

# **Urbane Klimaresilienz und Stadtgesundheit**

Bedeutung, Modelle und Simulationen für eine transformative  
Klimaanpassung

Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
*Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)*  
an der Fakultät Raumplanung  
der Technischen Universität Dortmund

Eingereicht von  
Mathias Schaefer  
aus Leverkusen

Tag der mündlichen Verteidigung: 09. August 2023



Thema

---

# Urbane Klimaresilienz und Stadtgesundheit

Bedeutung, Modelle und Simulationen für eine  
transformative Klimaanpassung

---

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr. habil. Nguyen Xuan Thinh  
Technische Universität Dortmund  
Fakultät Raumplanung  
Raumbezogene Informationsverarbeitung und Modellbildung (RIM)

Prof. Dr. habil. Heike Köckler  
Hochschule für Gesundheit  
Department of Community Health (DoCH)

Vorsitzender der Prüfungskommission:

apl. Prof. Dr. Stefan Greiving  
Technische Universität Dortmund  
Fakultät Raumplanung  
Institut für Raumplanung (IRPUD)

© 2023 Mathias Schaefer (ORCID iD: [0000-0002-5330-7714](https://orcid.org/0000-0002-5330-7714))

Die elektronische Version dieser Dissertation ist verfügbar auf:

<https://eldorado.tu-dortmund.de>



# Eidesstattliche Versicherung

Gemäß § 11 der Promotionsordnung der Fakultät Raumplanung der Technischen Universität Dortmund erkläre ich folgende Punkte:

1. Bei der eingereichten Dissertation zu dem Thema „*Urbane Klimaresilienz und Stadtgesundheit – Bedeutung, Modelle und Simulationen für eine transformative Klimaanpassung*“ handelt es sich um meine eigenständig erbrachte Leistung.
2. Ich habe nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und mich keiner unzulässigen Hilfe Dritter bedient. Insbesondere habe ich wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Inhalte als solche kenntlich gemacht.
3. Die Arbeit oder Teile davon habe ich bislang nicht an einer Hochschule des In- oder Auslands als Bestandteil einer Prüfungs- oder Qualifikationsleistung vorgelegt.

Ich versichere an Eides statt, dass ich nach bestem Wissen die reine Wahrheit erkläre und nichts verschwiegen habe.

---

Ort und Datum

---

Mathias Schaefer



# Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Raumbezogene Informationsverarbeitung und Modellbildung (RIM) verfasst. Auf diesem Weg haben mich viele unterschiedliche Menschen begleitet und in ihrer ganz eigenen Art und Weise einen positiven Einfluss auf meine Arbeit genommen.

Ganz besonders danke ich **Prof. Dr. Nguyen Xuan Thinh** für die kontinuierliche Unterstützung und Förderung dieser Arbeit. Seine Entschlossenheit und sein unermüdliches Engagement waren und sind für mich eine bedeutende Inspirationsquelle. Gemeinsam haben wir viele Abenteuer erlebt, an die ich mich gerne erinnere. Vielen herzlichen Dank, **Prof. Dr. Heike Köckler**, dass Sie mir stets zur Hilfe standen und mir so viele Möglichkeiten eröffneten, mich in den überfachlichen Austausch zu gesundheitsrelevanten Themen einzubringen. Ich bedanke mich ebenfalls bei **Prof. Dr. Stefan Greiving** für die fruchtbare Zusammenarbeit während des ZUKUR-Projekts. Sein Fachwissen in der Risikoforschung hat mir wertvolle Impulse für die eigene Arbeit gegeben.

Freilich danke ich dem gesamten **RIM-Team** für die familiäre Zusammenarbeit in der Forschung und Lehre. Zwei Personen möchte ich jedoch meinen besonderen Dank aussprechen, da sie für mich eine wichtige mentale Stütze waren. **Haniyeh**, ohne deinen selbstlosen Einsatz hätten die Feldmessungen in Dortmund-Martens nicht plangemäß stattfinden können. Für die unzähligen Gespräche und warmherzigen Aufmunterungen bin ich dir zutiefst dankbar. **Tobias**, ich konnte von dir noch viel über die Farbenlehre und Anwendungen im Grafikdesign lernen. Durch deine kreative Unterstützung wurde den Abbildungen wahrlich neues Leben eingehaucht.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeitern des Lehrstuhls **Raumbezogene Modellierung (RAM)** bedanken. Ihr habt mich gerade in der Endphase mit eurem Humor und Erfahrungsschatz maßgeblich unterstützt. Ein ausdrücklicher Dank gebührt an dieser Stelle **Jun.-Prof. Dr. René Westerholt**. Seine  $\text{\LaTeX}$ -Vorlage und vielen konstruktiven Hinweise erleichterten mir die Fertigstellung der Rahmenschrift erheblich.

Meinen **Freunden** aus Dortmund, Bonn, Köln und Langenfeld im Rheinland danke ich für ihre Geduld und Rücksicht während der gesamten Promotionszeit. Ihr habt dazu beigetragen, meine Motivation über die Jahre aufrecht zu erhalten. Zu guter Letzt danke ich meinen **Eltern** für die liebevolle Unterstützung in allen Etappen meines Lebens.





# Kurzfassung

Die Rhetorik um städtische Klimaanpassung hat sich geändert. Urbane Klimaresilienz tritt neben den etablierten Begriff der Nachhaltigkeit verstärkt in den raumplanerischen Diskurs. Städte sehen sich zunehmend in der Verantwortung, einen resilienten Umgang mit steigenden Temperaturen, Luftverschmutzungen und extremen Wetterereignissen zu finden, um die Gesundheit und Lebensqualität der ansässigen Bevölkerung zu verbessern. Der Weg dorthin soll über eine kooperative Zusammenarbeit zwischen evidenzbildender Wissenschaft, planender Praxis und impulsgebender Bevölkerung führen. Doch was bedeutet urbane Klimaresilienz und wie äußert sie sich im Stadtgefüge? Wo sind welche Maßnahmen zur Gesundheits- und Klimaresilienzförderung notwendig? Welche Rollen nehmen Wissenschaft und Planungspraxis in der gemeinsamen Ausgestaltung dieser Maßnahmen ein?

Die Dissertation nähert sich diesen Fragestellungen auf der Basis von drei referierten Veröffentlichungen. Konkret werden Theorien der Resilienz und Stadtgesundheit mit transdisziplinärer Forschung vereint und am Beispiel der Stadt Dortmund neue Erkenntnisse für die Klimaanpassung aufgezeigt. Räumliche Analysen und numerische Simulationen nehmen in der Erforschung dieser Themenfelder eine tragende Funktion ein. Freie Geobasisdaten des Bundeslandes Nordrhein-Westfalen (NRW) bilden in diesem Zusammenhang eine wesentliche Grundlage, sodass ein Transfer der methodischen Inhalte auf vergleichbare Untersuchungsräume vorstellbar ist.

Im ersten Beitrag wird ein Indikatorensystem unter Einbezug von Praxiswissen entwickelt, um urbane Klimaresilienz und sozial-ökologische Herausforderungen über die Integration einer multikriteriellen Fuzzy-Bewertung in Geo-Informationssystemen (GIS) zu kartieren. Auf gesamtstädtischer Ebene deuten die Ergebnisse darauf hin, dass gewisse Stadtteile und Flächennutzungen anfälliger für Klimaextremereignisse und Umweltbelastungen sind. Darüber hinaus kann beobachtet werden, dass mehrfach umweltbelastete Bereiche mit potenziell weniger vulnerablen Anwohnern existieren und umgekehrt.

Im Anschluss an die gesamtstädtische Analyse wird im zweiten Beitrag die Hitzebelastung und Feinstaubverteilung im Quartier Dortmund-Marten näher untersucht. Hierfür wird die subjektive Wahrnehmung von Passanten an zwei Straßenzügen während eines heißen Sommertags erfasst und sowohl mit Feldmessungen als auch mit mikroklimatischen Simulationen überprüft. Zur Modellgenerierung werden räumliche und materialspezifische Infor-

mationen hauptsächlich aus freien Luft- und Satellitenbildern abgeleitet. Anhand der Simulationen und gemessenen Werte lässt sich festhalten, dass Fußgänger an beiden Straßenzügen abwechselnd einem der beiden betrachteten Stressoren im Tagesverlauf gegenüberstehen. Mehr als die Hälfte der Passanten empfindet ein thermisches Unbehagen, wohingegen kein klarer Trend zu einer subjektiv wahrgenommenen Feinstaubbelastung festgestellt wird.

Kernthema der dritten Kontribution ist die Evaluation eines projektbasierten Workshops zwischen Wissenschaftlern und Stadtplanern zur Erarbeitung von Begrünungsmaßnahmen in Dortmund-Marten. In einer anschließenden Online-Befragung zum Workshop ist der selbst-eingeschätzte Wissenszuwachs der teilnehmenden Forscher höher als bei den Planungspraktikern, während sich die Vermittlung des individuellen Fachwissens für die Forschenden vergleichsweise schwieriger gestaltet. Die potenziellen Auswirkungen der erarbeiteten Maßnahmen auf den thermischen Komfort und die Feinstaubverteilung werden ebenfalls für einen heißen Sommertag simuliert. Im Ergebnis besteht im Untersuchungsraum ein ambivalentes Verhältnis zwischen einer großflächigeren Feinstauberrhöhung und kleinräumigeren positiven Effekten hinsichtlich des Thermalkomforts.

Die abschließende Zusammenführung der theoretischen und praktischen Erkenntnisse verdeutlicht die innewohnende Komplexität des Resilienzgedankens, welche sich nicht nur in der Umsetzung räumlicher Analysen, sondern auch in der kooperativen Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern und Stadtplanern zur Maßnahmensetzung niederschlägt. Die aufgeführten Ergebnisse sind daher nicht nur für die Wissenschaft, sondern auch für die Planungspraxis von Bedeutung. Sie geben Hinweise auf methodische Fallstricke und bieten eine nützliche Informationsgrundlage für den integrativen und transdisziplinären Austausch im Sinne einer klimaresilienten und gesundheitsfördernden Stadtentwicklung.

# Abstract

Urban climate resilience is entering the spatial planning discourse as a concept alongside the well-established vision of sustainability. There is considerable municipal interest in finding resilient ways to address rising temperatures, air pollution, and extreme weather events to improve public health and the quality of life in urbanized areas. This pathway requires collaborative efforts between science, planning practices, and citizens. But what does urban climate resilience mean with respect to the urban fabric? Where are suitable measures needed, and what is the role of science and planning practices in developing them collaboratively?

This cumulative dissertation addresses the outlined questions in three parts (each corresponding to one individual publication). In each of these parts, using the city of Dortmund as a case study, resilience and public health theories are combined with transdisciplinary research to find new solutions for future climate adaptation. Spatial analysis and numerical simulations form the methodological backbone. This work primarily builds on open geodata offered by the federal state of North Rhine-Westphalia (NRW), so the results provide a sound basis for transferring the findings and methodical contents to comparable study areas.

In the first contribution, a city-level indicator framework is developed using practical knowledge to map urban climate resilience and socioecological challenges. Multicriteria fuzzy logic is integrated into geographic information systems (GIS) to highlight neighborhoods and land uses that are more vulnerable to climate extremes and environmental stressors. It is observed that some multiply environmentally burdened areas exist comprising potentially less vulnerable residents – and vice versa.

Following the city-wide analysis, the second part examines heat stress and air pollution during a hot summer day in the Dortmund-Marten neighborhood. For this purpose, the perception of pedestrians at two street canyons is recorded and cross-checked with field measurements and microclimatic simulations. For the model generation, spatial and material-specific information is derived mainly from freely available remote sensing imagery. Based on the simulations and measurements, it can be concluded that pedestrians at both street canyons alternately face one of the two stressors during daytime. More than half of the pedestrians expressed thermal discomfort, whereas no clear trend toward the perceived air pollution could be identified.

The third contribution evaluates a project-based workshop involving both scientists and urban planners that aims to develop greening measures in Dortmund-Marten. In a subsequent online survey on the workshop, the participating researchers express higher knowledge gains through the workshop than the planning practitioners. At the same time, integrating individual expertise is comparatively more challenging for the researchers. Furthermore, the potential impacts of the proposed measures on thermal comfort and particulate matter dispersion are also simulated for a hot summer day. As a result of the simulations, there is an ambivalent relationship between a comparatively large-scale increase in particulate matter concentrations and small-scale positive effects on thermal comfort in the study area.

The combination of the theoretical and practical findings confirms the inherent complexity of the resilience concept, which is reflected not only in the implementation of spatial analyses but also in the cooperative collaboration between scientists and urban planners to implement appropriate measures. Therefore, the results are relevant to academia and planning practice, providing indications of methodological pitfalls while proposing a valuable information base for transdisciplinary exchange in the interest of a climate-resilient and health-promoting urban development.

# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Eidesstattliche Versicherung</b> . . . . .           | <b>i</b>    |
| <b>Danksagung</b> . . . . .                             | <b>iii</b>  |
| <b>Kurzfassung</b> . . . . .                            | <b>v</b>    |
| <b>Abstract</b> . . . . .                               | <b>vii</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b> . . . . .                  | <b>xiii</b> |
| <b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .                    | <b>xv</b>   |
| <b>Abkürzungsverzeichnis</b> . . . . .                  | <b>xvii</b> |
| <br>  |             |
| <b>I Nexus</b> . . . . .                                | <b>1</b>    |
| <b>1 Einleitung</b> . . . . .                           | <b>3</b>    |
| 1.1 Hintergrund . . . . .                               | 3           |
| 1.2 Kontext und räumliche Untersuchungsebenen . . . . . | 4           |
| 1.2.1 Dortmund . . . . .                                | 6           |
| 1.2.2 Dortmund-Marten . . . . .                         | 7           |
| 1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen . . . . .          | 8           |
| 1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .                         | 10          |
| <b>2 Konzeptionelles Grundverständnis</b> . . . . .     | <b>11</b>   |
| 2.1 Resilienz: die drei Urtypen . . . . .               | 11          |
| 2.1.1 Ingenieurtechnische Resilienz . . . . .           | 11          |
| 2.1.2 Ökologische Resilienz . . . . .                   | 12          |
| 2.1.3 Sozial-ökologische Resilienz . . . . .            | 14          |
| 2.2 Urbane Resilienz . . . . .                          | 17          |
| 2.2.1 Resilienz versus Vulnerabilität . . . . .         | 18          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.2    | Urbane Klimaresilienz und umweltbezogene Gerechtigkeit . . .                        | 19        |
| 2.3      | Transdisziplinäre Forschung . . . . .   | 20        |
| 2.4      | Konzeptsynthese . . . . .   | 23        |
| <b>3</b> | <b>Entwicklung und Kartierung eines urbanen Klimaresilienzindex . . . . .</b>       | <b>25</b> |
| 3.1      | Motivation . . . . .  | 26        |
| 3.1.1    | Inhärente und adaptive Resilienz . . . . .  | 26        |
| 3.1.2    | Urbane Klimaresilienz quantifizieren: Beispiele . . . . .                           | 26        |
| 3.2      | Methodische Vorgehensweise . . . . .  | 28        |
| 3.3      | Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion . . . . .                                     | 33        |
| 3.3.1    | Identifikation (nicht-)klimaresilienter Bereiche in Dortmund . . . . .              | 33        |
| 3.3.2    | Wechselwirkungen und Zielkonflikte zwischen Einzelindikatoren . . . . .             | 37        |
| 3.3.3    | Interaktive Webapplikation . . . . .  | 39        |
| 3.4      | Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .   | 40        |
| <b>4</b> | <b>Mikroskalige Simulation von Feinstaubausbreitungen und Hitzestress . . . . .</b> | <b>43</b> |
| 4.1      | Motivation . . . . .  | 44        |
| 4.2      | Methodische Vorgehensweise . . . . .  | 45        |
| 4.2.1    | Fernerkundungsbasierte Modellkonfiguration . . . . .                                | 46        |
| 4.2.2    | Feldmessungen und Befragung . . . . .   | 46        |
| 4.2.3    | Synthese und Simulation . . . . .   | 50        |
| 4.3      | Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion . . . . .                                     | 51        |
| 4.3.1    | Klassifikationsgüte . . . . .   | 51        |
| 4.3.2    | Simulationsperformanz und -ergebnisse . . . . .                                     | 52        |
| 4.3.3    | Subjektiv wahrgenommene Hitze- und Feinstaubbelastung . . . . .                     | 57        |
| 4.4      | Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .   | 58        |
| <b>5</b> | <b>Koproduktion und potenzielle Wirkung von Begrünungsmaßnahmen . . . . .</b>       | <b>61</b> |
| 5.1      | Motivation . . . . .  | 62        |
| 5.2      | Methodische Vorgehensweise . . . . .  | 62        |
| 5.2.1    | Zukunftswerkstatt »Grünes Marten« . . . . .   | 63        |
| 5.2.2    | Begrünungsszenarien . . . . .   | 65        |
| 5.2.3    | Online-Befragung . . . . .  | 66        |
| 5.3      | Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion . . . . .                                     | 66        |
| 5.3.1    | Auswirkungen auf das Mikroklima . . . . .   | 66        |
| 5.3.2    | Auswirkungen auf die Feinstaubverteilung . . . . .                                  | 68        |
| 5.3.3    | Lerneffekte und Erwartungen an die Planung von Begrünungsmaßnahmen . . . . .        | 70        |
| 5.4      | Beantwortung der Forschungsfragen . . . . .   | 72        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| <b>6</b>  | <b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>  | <b>75</b>  |
| 6.1       | Erkenntnisse und Forschungsbeiträge   | 75         |
| 6.2       | Kritische Reflexion   | 78         |
| 6.2.1     | Probleme durch die GIS-basierte Messung urbaner Klimaresilienz  | 78         |
| 6.2.2     | Quartiere und ihre Eigenarten   | 79         |
| 6.2.3     | Kritik am transdisziplinären Forschungsansatz   | 79         |
| 6.3       | Zukünftige Forschungsperspektiven   | 81         |
| 6.3.1     | Transfer und Skalierung   | 81         |
| 6.3.2     | Was bedeutet Transformation konkret?  | 81         |
| 6.3.3     | Smart Urban Areas (SUA)   | 82         |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>85</b>  |
| <br>      |   |            |
| <b>II</b> | <b>Publikationen</b>  | <b>99</b>  |
| <br>      |   |            |
| <b>1</b>  | <b>How Can Climate Resilience Be Measured and Visualized? Assessing a Vague Concept Using GIS-Based Fuzzy Logic</b>                           | <b>101</b> |
| <br>      |   |            |
| <b>2</b>  | <b>Assessing local heat stress and air quality with the use of remote sensing and pedestrian perception in urban microclimate simulations</b> | <b>133</b> |
| <br>      |   |            |
| <b>3</b>  | <b>Between vision and action: The predicted effects of co-designed green infrastructure solutions on environmental burdens</b>                | <b>149</b> |
| <br>      |   |            |
|           | <b>Weitere Publikationen</b>  | <b>171</b> |





# Abbildungsverzeichnis

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1.1 | Lokalisierung von 15 Verbundprojekten der <i>Leitinitiative Zukunftsstadt</i>   | 5  |
| 1.2 | Untersuchungsräume . . . . .  | 7  |
| 1.3 | Aufbau der Arbeit . . . . .   | 10 |
| 2.1 | Ingenieurtechnische und ökologische Resilienz am Beispiel eines Balles im Becken . . . . .  | 13 |
| 2.2 | Das Panarchiemodell adaptiver Zyklen . . . . .  | 16 |
| 2.3 | Schematische Einordnung vier verschiedener Forschungsformate . .  | 22 |
| 2.4 | Rahmenkonzept für die eigene Forschung . . . . .  | 23 |
| 3.1 | Schematische Darstellung einer Bewertung für urbane Klimaresilienz  | 28 |
| 3.2 | Methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung urbaner Klimaresilienz in Dortmund . . . . .   | 29 |
| 3.3 | Relative Worthäufigkeiten für alle 18 Indikatorenraster . . . . .   | 34 |
| 3.4 | Kartierung des <i>UCRI</i> innerhalb der Dortmunder Stadtgrenze . . . . .   | 35 |
| 3.5 | Violinendiagramm zur Rohwerteverteilung des <i>UCRI</i> innerhalb unterschiedlicher Flächennutzungsarten in Dortmund . . . . .  | 36 |
| 3.6 | Pearson-Korrelationsmatrix zwischen allen 18 Indikatorenrastern . .   | 38 |
| 3.7 | Ausschnitt aus der interaktiven Webapplikation für die Stadt Dortmund . . . . .   | 39 |
| 4.1 | Ablaufschema zur Generierung von Eingabeparametern und dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Felddaten und subjektiven Wahrnehmungen von Passanten . . . . . | 45 |
| 4.2 | Lokalisierung der Messstationen im Untersuchungsraum . . . . .  | 47 |
| 4.3 | Landbedeckung, Dachmaterialien und zugehörige Flächenanteile im Untersuchungsraum . . . . .   | 53 |
| 4.4 | Tagesverlauf der simulierten und gemessenen mikroklimatischen und lufthygienischen Parameter . . . . .  | 54 |
| 4.5 | Simulierte Feinstaubkonzentrationen und PET-Werte zu drei verschiedenen Tageszeitpunkten . . . . .  | 55 |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.6 | Windvektoren in Dortmund-Martén um 15:00 Uhr bei östlicher Windrichtung . . . . .   | 56 |
| 4.7 | Gemessene PM <sub>2,5-10</sub> -Konzentrationen im Vergleich zu individuellen Luftqualitätsbewertungen . . . . .  | 57 |
| 4.8 | Simulierter und subjektiv wahrgenommener Thermalkomfort . . . . .   | 58 |
| 5.1 | Schematischer Überblick über die transdisziplinäre Forschung in Dortmund-Martén . . . . .   | 63 |
| 5.2 | Einblicke in die Zukunftswerkstatt »Grünes Martén« . . . . .  | 64 |
| 5.3 | Potenzielle Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf meteorologische und thermische Behaglichkeitsparameter in der Martener Straße und am Schulmuseum . . . . . | 67 |
| 5.4 | Auswirkungen extensiver Dachbegrünung und Baumbepflanzungen auf die Dach- und Fassadentemperaturen um 15:00 Uhr . . . . .                                       | 68 |
| 5.5 | Potenzielle Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf die Windgeschwindigkeit und Feinstaubverteilung in der Martener Straße und am Schulmuseum . . . . .        | 69 |
| 5.6 | Auswertung zu den individuellen Lerneffekten und dem Wissensaustausch . . . . .   | 70 |
| 5.7 | Erwartungen an die Planung und notwendigen Eigenschaften von Begrünungsmaßnahmen . . . . .  | 71 |

# Tabellenverzeichnis

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Zentrale Charakteristika ingenieurtechnischer, ökologischer und sozial-ökologischer Resilienz im Vergleich . . . . .       | 17 |
| 3.1 | Indikatorenset zur Quantifizierung urbaner Klimaresilienz in Dortmund . . . . .  | 30 |
| 4.1 | PET-Schwellenwerte und korrespondierende Stresskategorien . . . . .  | 48 |
| 4.2 | Verwendete Eingangsparameter zur Szenariomodellierung in ENVI-met . . . . .  | 51 |
| 4.3 | Nutzergenauigkeit und Produzentengenauigkeit für die objektbasierte Bildklassifizierung im Untersuchungsraum . . . . .     | 52 |
| 4.4 | Vergleich der stündlichen Simulationsergebnisse mit gemessenen Werten anhand statistischer Genauigkeitsparameter . . . . . | 53 |



# Abkürzungsverzeichnis

|                |  |
|----------------|--|
| <b>AIF</b>     | Area Input File  |
| <b>ALKIS</b>   | Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem                                    |
| <b>ATKIS</b>   | Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem                          |
| <b>BBSR</b>    | Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung                                    |
| <b>BKG</b>     | Bundesamt für Kartografie und Geodäsie   |
| <b>BMBF</b>    | Bundesministerium für Bildung und Forschung  |
| <b>BMUB</b>    | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit                 |
| <b>BMUV</b>    | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz |
| <b>d</b>       | Index of agreement   |
| <b>DLM</b>     | Digitales Landschaftsmodell  |
| <b>DOP</b>     | Digitales Orthophoto   |
| <b>ESRI</b>    | Environmental Systems Research Institute   |
| <b>FF</b>      | Forschungsfrage  |
| <b>GIS</b>     | Geo-Informationssystem   |
| <b>HR</b>      | Hazard Rating  |
| <b>IPCC</b>    | Intergovernmental Panel on Climate Change  |
| <b>k</b>       | Cohen's Kappa  |
| <b>MAPE</b>    | Mean Absolute Percentage Error   |
| <b>MAUP</b>    | Modifiable Areal Unit Problem  |
| <b>MEMI</b>    | Münchner Energiebilanzmodell für Individuen  |
| <b>MiKaDo</b>  | Masterplan integrierte Klimaanpassung Dortmund                                       |
| <b>MONARES</b> | Monitoring von Anpassungsmaßnahmen und Klimaresilienz in Städten                     |

|                        |   |
|------------------------|---|
| <b>nDOM</b>            | normalisiertes digitales Oberflächenmodell  |
| <b>NRW</b>             | Nordrhein-Westfalen                         |
| <b>O<sub>A</sub></b>   | Overall Accuracy (Gesamtgenauigkeit)        |
| <b>OSM</b>             | OpenStreetMap                               |
| <b>P<sub>A</sub></b>   | Producer's Accuracy (Herstellergenauigkeit) |
| <b>PET</b>             | Physiologische äquivalente Temperatur       |
| <b>PM</b>              | Particulate Matter (Feinstaub)              |
| <b>R<sup>2</sup></b>   | Squared Correlation Coefficient             |
| <b>RH</b>              | Luftfeuchtigkeit                            |
| <b>RMSE</b>            | Root Mean Squared Error                     |
| <b>RVR</b>             | Regionalverband Ruhr                        |
| <b>SAMT2</b>           | Spatial Analysis and Modelling Tool 2       |
| <b>SF</b>              | Simulation File                             |
| <b>SGB</b>             | Sozialgesetzbuch                            |
| <b>SUA</b>             | Smart Urban Areas                           |
| <b>T<sub>a</sub></b>   | Lufttemperatur                              |
| <b>T<sub>mrt</sub></b> | Mittlere Strahlungstemperatur               |
| <b>U<sub>A</sub></b>   | User's Accuracy (Nutzergenauigkeit)         |
| <b>UCRI</b>            | Urban Climate Resilience Index              |
| <b>v</b>               | Windgeschwindigkeit                         |
| <b>ZUKUR</b>           | Zukunft-Stadt-Region-Ruhr                   |

**Teil I**

**Nexus**





# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Hintergrund

Städte und ihre Quartiere sehen sich zunehmend mit klimatischen, sozialen und umweltbezogenen Veränderungen konfrontiert (Bai et al., 2018). Gerade in Ballungsräumen akkumulieren sich gesundheitlich relevante Belastungen wie Feinstaub und Lärm sowie innerstädtische Wärmeinseln durch dichte Bebauungsstrukturen (Köckler und Sieber, 2020, S. 928). Dabei spielen die Städte selbst eine entscheidende Rolle als Treiber, Betroffene und Überwinder dieser Herausforderungen.

Klimatische und umweltbezogene Stressoren betreffen nahezu alle Bereiche des städtischen Lebens und erfordern daher fachübergreifende Anstrengungen für eine zukunftsfähige Stadtentwicklung. Als Antwort auf diese Rahmenbedingungen hat der Begriff der Resilienz Eingang in das deutsche Planungslexikon gefunden. Kurz formuliert sind Städte dann resilient, wenn sie sich gegenüber internen und externen Krisen robust zeigen, Schwachstellen anpassen und eine Fähigkeit entwickeln, nachhaltige Lern- und Transformationsprozesse anstoßen zu können (Kegler, 2016, S. 22). Die Fachöffentlichkeit ist sich weitgehend einig, dass das proaktive Bestreben nach Resilienz auch im Zuge einer nachhaltigen Entwicklung förderlich ist (Leichenko, 2011, S. 166). Diese Meinung wird insbesondere dadurch attestiert, dass das elfte Ziel für eine nachhaltige Entwicklung bis 2030 anstrebt, Städte und Siedlungen „inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig“ zu gestalten (UN, 2022). Die langfristig gedachte Linie der Nachhaltigkeit wird demnach über resilientes Verhalten unterstützt, jedoch keinesfalls ersetzt (Acuti et al., 2020; Walker und Salt, 2006).

Ein wesentliches Verkaufsargument von Resilienz ist dessen integrative Wirkung, welche Debatten zwischen verschiedensten Disziplinen und gesellschaftlichen Akteuren anregt, um Planungsprozesse neu zu denken und gemeinsam auszuhandeln (Davoudi et al., 2012, S. 307). So fordern die Verfasser des 2021 verabschiedeten *Memorandums zu urbaner Resilienz* die Konzeptintegration in bestehende raumplanerische Leitbilder, um Städte und Gemeinden hinsichtlich künftiger Krisen „robuster, flexibler und anpassungsfähiger zu gestalten“.

## Kapitel 1. Einleitung

ten“ (BMI, 2020, S. 3). Dabei sollen neben der reinen Widerstandsfähigkeit auch besagte transformative Veränderungsprozesse ins Bewusstsein treten, während die problemlösungsorientierte Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Praxis nahegelegt wird. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Reduktion von sozialer Benachteiligung, Gesundheitsgefahren und Umweltrisiken in Quartieren. Dies ist besonders relevant für Quartiere mit einem hohem Nutzungsdruck auf Grün- und Freiflächen einerseits sowie hohen Hitze-, Feinstaub- und Lärmbelastungen andererseits.

All diese Ambitionen beginnen mit der Analyse des Ist-Zustands. Geo-Informationssysteme (GIS) sind in diesem Zusammenhang ein unverzichtbares Werkzeug auf allen Ebenen der Raumplanung (Wegener, 1998). Hierzu werden in erster Linie raumbezogene Daten und Informationen benötigt. Im Bundesland Nordrhein-Westfalen (NRW) stehen seit dem 01.01.2017 eine Vielzahl an offenen<sup>1</sup> Geobasisdaten zur Verfügung (Caffier et al., 2017). Hierzu zählen mitunter hoch aufgelöste digitale Höhenmodelle, digitale Landschaftsmodelle (DLM) des amtlichen topographisch-kartographischen Informationssystems (ATKIS), das amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem (ALKIS) und digitale Orthophotos (DOP). Die Entwicklung und Erprobung neuer Verfahren zur Informationsverarbeitung und Modellbildung wird durch dieses Angebot bereichert. Unter diesen Voraussetzungen profitiert auch die Resilienz- und Gesundheitsforschung von der Ableitung raumbezogener Informationen und der Identifikation möglicher Verteilungsunterschiede von Umweltbelastungen und -ressourcen im Stadtgefüge. Durch die Einbeziehung von Szenarien können Strategien entwickelt werden, die auf die lokalen Bedingungen und die Bedürfnisse der Anwohner zugeschnitten sind.

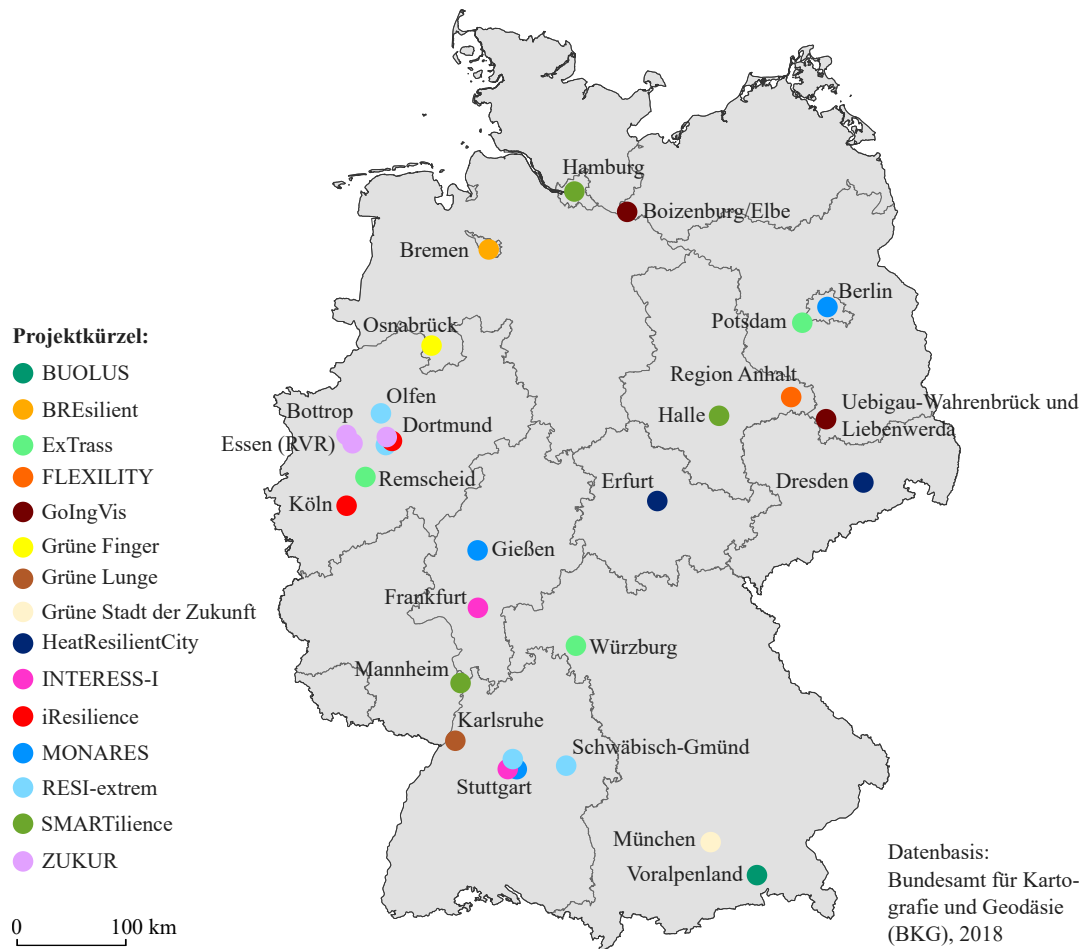
## 1.2 Kontext und räumliche Untersuchungsebenen

Die vorgestellten Erkenntnisse sind zum Teil im Zusammenhang des Forschungsprojekts Zukunft-Stadt-Region-Ruhr (ZUKUR) entstanden, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde. Als eines von 23 Projekten der bundesweiten Fördermaßnahme *Umsetzung der Leitinitiative Zukunftsstadt* (s. Abbildung 1.1) setzte ZUKUR von 2017 bis 2020 auf einen aktors- und fachgebietsübergreifenden Ansatz für eine nachhaltige, sozial-ökologisch gerechte und klimaresiliente Entwicklung der Stadtregion Ruhr. Ein Alleinstellungsmerkmal stellte die experimentelle Forschungsarbeit auf regionaler (Regionalverband Ruhr (RVR)), städtischer (Bottrop) und quartiersbezogener Ebene (Dortmund-Marten) dar. Das Konsortium umfasste zehn Fachgebiete der Fakultät Raumplanung der TU Dortmund sowie die Städte Bottrop, Dortmund und den RVR als Verbundpartner.

---

<sup>1</sup>Als »offen« oder »frei« können Daten bezeichnet werden, welche „von Menschen frei genutzt, wiederverwendet und weiterverbreitet werden können - ohne rechtliche, technische oder soziale Einschränkungen.“ (OKF, 2022, eigene Übersetzung)

## 1.2. Kontext und räumliche Untersuchungsebenen



**Abbildung 1.1:** Lokalisierung von 15 Verbundprojekten der *Leitinitiative Zukunftsstadt* mit dem Fokusthema *Klimaresilienz durch Handeln in Stadt und Region*. Verändert nach SynVer\*Z (2022).

Konkret bildeten auf allen drei Untersuchungsebenen eingerichtete Reallabore die Experimentierkullisse für einen lernenden Prozess zwischen Wissenschaft und Planungspraxis hinsichtlich des Abbaus umweltbezogener Ungleichheiten und dem resilienten Umgang mit Klimarisiken. Durch die regelmäßige Einbindung von Beteiligungsformaten wie Zukunftswerkstätten, World-Cafés und themenspezifischen Konferenzen sollte gemeinsam neues und anwendbares Wissen für die Praxisakteure im Sinne einer nachhaltigen Stadtentwicklung generiert werden. Umgekehrt lag der Anspruch begleitender räumlicher Analysen in der Lieferung neuer Erkenntnisgewinne für die Forschung. Aus der räumlichen Perspektive wird die Aufmerksamkeit dieser Forschungsarbeit auf die Stadt- und Quartiersebene gelenkt, deren Charakteristika in den nächsten beiden Kapiteln näher beschrieben werden.

### 1.2.1 Dortmund

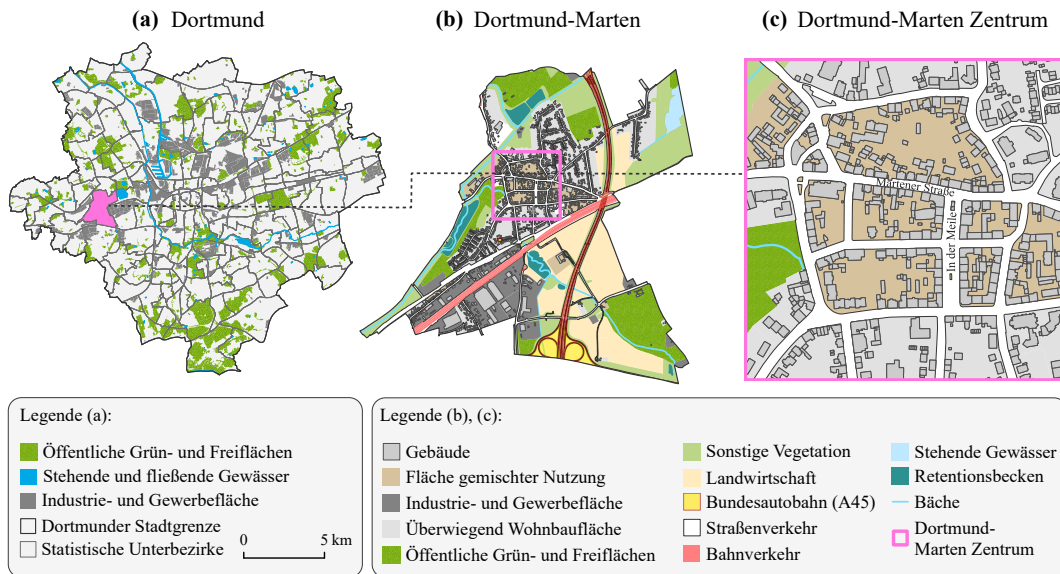
Mit rund 600.000 Einwohnern auf einer Fläche von 280 km<sup>2</sup> ist Dortmund nach Köln und Düsseldorf die drittgrößte Stadt NRWs (Stadt Dortmund, 2019). Im 19. Jahrhundert entwickelte sich die Stadt schnell zu einem Zentrum der Kohle- und Stahlindustrie, was später zu einer verstärkten Zuwanderung von Arbeitskräften aus Osteuropa und zur Errichtung neuer Arbeitersiedlungen führte. Im späten 20. Jahrhundert führten Deindustrialisierungsprozesse zur Stilllegung großer Industrieareale und einem grundlegenden Übergang von der Montanindustrie zu einem auf dem Dienstleistungssektor basierenden Modell im gesamten Ruhrgebiet. Dieser Strukturwandel ging allein in Dortmund mit einem Verlust von ca. 90.000 Arbeitsplätzen zwischen 1960 und 1994 einher (Stadt Dortmund, 2022). In den letzten Jahrzehnten konnte sich Dortmund zu einem wichtigen Standort für Dienstleistungen sowie Forschung und Entwicklung emanzipieren.

Heute bieten insbesondere die südlichen Stadtteile attraktive Wohn- und Arbeitsstandorte. Dagegen sind die nördlichen Stadtteile von einer dichten Bebauungsstruktur, einer hohen Arbeitslosigkeit und jüngerer Bevölkerung mit Migrationshintergrund geprägt. Diese Nord-Süd-Polarisierung in Nationalität, Alter und Einkommen setzt sich in weiten Teilen des Ruhrgebiets entlang des Emscherflusses fort (Lengyel et al., 2022).

Zum Jahr 2018 machten Industrie- und Gewerbeflächen mit 24,4 km<sup>2</sup> noch immer einen Anteil von 8,7 % der Gesamtstadt aus (eigene Berechnung), welche ebenfalls vermehrt in der Nordhälfte lokalisiert sind (s. Abbildung 1.2 a)). Durch den hohen Versiegelungsgrad und wärmespeichernde Baumaterialien neigen Industrie- und Gewerbeflächen verstärkt zu erhöhten Oberflächentemperaturen und der negativen Beeinflussung ihres Umlands. Als eine der 80 deutschen Großstädte mit mehr als 100.000 Einwohnern rangiert Dortmund hinsichtlich des Anteils an öffentlichen und privaten Grünflächen auf Platz 59 (Taubenböck et al., 2021, S. 8). Obwohl öffentliche Grün- und Freiflächen über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind, gelten besonders die großen Waldareale im erhöhten Süden als wichtige Kalt- und Frischluftproduzenten.

Wie viele andere Städte erlebte auch Dortmund mehrere aufeinanderfolgende Hitzewellen und Dürren in den Jahren 2018 bis 2020. Im Juli 2008 fielen innerhalb von zweieinhalb Stunden über 200 mm Niederschlag über den westlichen Teil Dortmunds (Greiving und Lindner, 2011). Das Starkregenereignis führte zu schwerwiegenden Schäden an Gebäuden und technischen Infrastrukturen in Dorstfeld und Dortmund-Marten. Dortmund beschäftigt sich eingehend mit Lösungen im Bereich der Klimaanpassung und bezieht dabei u.a. Starkregengefahrenkarten und regionale Klimaanalysen des RVR mit ein. Um stadtweite Maßnahmen gegenüber klimabedingten Extremereignissen wie Hitzewellen und Starkregen zu formulieren, veröffentlichte das Dortmunder Umweltamt nach einem mehrstufigen verwaltungsinternen Beteiligungsprozess im Jahr 2021 den *Masterplan integrierte Klimaanpassung Dortmund* (MiKaDo). Der Masterplan konzentriert sich vornehmlich auf die veraltungsspezifischen Handlungsfelder *Planen und Bauen, Gesundheit und Soziales, Wirtschaft*

## 1.2. Kontext und räumliche Untersuchungsebenen



**Abbildung 1.2: Untersuchungsräume.** In dieser Arbeit stehen die Stadt Dortmund a) und das Zentrum c) des statistischen Unterbezirks Dortmund-Marten b) im Fokus. Verändert nach Schaefer et al. (2021, S. 4).

sowie *Umwelt und Natur*. Mit den aufgeführten Maßnahmen soll eine umweltgerechte und resiliente Stadtentwicklung vorangetrieben und der Klimawandel in der Planung aktiv mitgedacht werden (Stadt Dortmund Umweltamt, 2021).

### 1.2.2 Dortmund-Marten

ZUKUR knüpft an bestehende Stadtentwicklungsprojekte in Dortmund an. Hierzu zählt auch das Projekt *Nordwärts*<sup>2</sup>, welches sich zum Ziel setzt, die nördlichen Stadtteile durch Beteiligungs- und Dialogverfahren langfristig an den Rest der Stadt anzugleichen. Der westliche Unterbezirk Dortmund-Marten bildet die Quartiersebene des ZUKUR-Projekts ab und liegt in der *Nordwärts*-Gebietskulisse. Im Vergleich zur Gesamtstadt leben in Dortmund-Marten mehr Arbeitslose (11,8 %, Dortmund: 9,8 %) und Personen, die staatliche Transferleistungen<sup>3</sup> (20,4 %, Dortmund: 16,6 %) beziehen (Stadt Dortmund, 2019). Im Zentrum wird die dichte Blockrandbebauung von Einbahnstraßen wie der *Martener Straße* und *In der Meile* umringt (s. Abbildung 1.2 c)). Da Dortmund-Marten als Verkehrsknotenpunkt mit Anschluss an übergeordnete Bundesstraßen (*Mallinckrodtstraße*) und Autobahnen (A40 und

<sup>2</sup>Mehr Informationen zu *Nordwärts*: <https://dortmund-nordwaerts.de/>

<sup>3</sup>Zu den staatlichen Transferleistungen zählen u.a. die Grundsicherung für Arbeitsuchende nach Sozialgesetzbuch (SGB) II, die Grundsicherung im Alter und bei Erwerbsminderung nach SGB XII sowie Regelleistungen nach dem Asylbewerberleistungsgesetz (Stadt Dortmund, 2019, S. 118).

A45) dient, werden zusätzlich hohe Emissionen durch den Pendlerverkehr verursacht. Dieser Effekt verstärkt sich durch die Kessellage des Zentrumsbereichs. Aufgrund des geringen Anteils an öffentlichen Grün- und Freiflächen ist zudem der Zugang zu geeigneten klimatischen Ausgleichsflächen nicht ausreichend gegeben. In Kombination mit der sozioökonomischen Situation zeichnen sich aus den oben beschriebenen Gegebenheiten deutliche Handlungsbedarfe im Bereich der Klimaanpassung und der gesundheitsfördernden Quartiersentwicklung ab.

### **1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen**

Diese Arbeit verfolgt als übergeordnetes Ziel, eine systemorientierte Integration von urbaner Klimaresilienz und Stadtgesundheit über räumliche Analysemethoden zu schaffen, um neue Erkenntnisse für eine transformative Klimaanpassung am Beispiel der Stadt Dortmund zu gewinnen. Folglich soll ein wissenschaftlicher Beitrag zu den folgenden Themenbereichen erarbeitet werden:

1. Operationalisierung und GIS-basierte Bewertung von urbaner Klimaresilienz.
2. Anwendung von Fernerkundungsmethoden in numerischen Simulationen zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit und Feinstaubverteilung.
3. Kooperation zwischen Wissenschaft und Planungspraxis zur Ausarbeitung von Begrünungsmaßnahmen auf Quartiersebene.

Diese drei Themenkomplexe wurden für ihre Bearbeitung in jeweils zwei Forschungsfragen (FF) unterteilt. Zur Beantwortung aller Forschungsfragen wurde ein Mixed-Methods-Ansatz unter Einbezug qualitativer und quantitativer Methoden verwendet. All diese Methoden können im Einzelnen immer nur einen sequentiellen Ausschnitt der übergeordneten Zielstellung aufzeigen, sich durch ihre Kombination jedoch sinnvoll ergänzen (Hense und Schork, 2017, S. 360). So wird garantiert, dass urbane Klimaresilienz und Stadtgesundheit aus verschiedenen Perspektiven und Datengrundlagen empirisch ausgearbeitet werden.

Da urbane Klimaresilienz noch immer ein vielschichtiger Begriff ist, gilt es zunächst, die zentralen Eigenschaften dieses Konzepts zu erörtern. Zwar häufen sich die Veröffentlichungen zur quantitativen Beschreibung von Resilienz, die GIS-basierte Anwendung von messbaren Resilienzindikatoren innerhalb des Stadtraums ist jedoch noch wenig erprobt (Rodríguez-Izquierdo et al., 2022). Die Identifizierung klimaresilienter und weniger klimaresilienter Bereiche kann jedoch wertvolle Hinweise für die städtische Klimaanpassung geben. Entsprechend soll urbane Klimaresilienz unter Berücksichtigung der Verteilung klimatischer und umweltbezogener Gesundheitsbelastungen über einen ganzheitlichen Index auf gesamtstädtischer Ebene abgebildet werden. Der Kartierung geht der Anspruch voraus, konkrete Handlungsschwerpunkte ableiten zu können. Aus der methodischen Perspektive werden folgende Fragen untersucht:

### 1.3. Zielsetzung und Forschungsfragen

1.1 *Welche Anforderungen ergeben sich an die Operationalisierung von urbaner Klimaresilienz?*

1.2 *Wie kann urbane Klimaresilienz gesamtstädtisch kartiert werden?*

Nach der GIS-basierten Identifizierung von Handlungsräumen rücken ausgewählte klimatische und umweltbezogene Gesundheitsbelastungen auf Quartiersebene näher in den Fokus, da diese über stadtweite Analysen nicht in Gänze darstellbar sind. Schließlich werden Hitze- und Feinstaubbelastungen über mikroklimatische Simulationen und Feldmessungen untersucht. Da sich die Simulation auf eine größere Fläche bezieht, werden zur effizienten Ableitung eines geometrischen Modells etablierte Fernerkundungsmethoden erprobt. Die Messungen und Simulationsergebnisse werden zusätzlich mit der subjektiven Einschätzung von Passanten verglichen, da die Wahrnehmung von lokalen Stressoren bedeutend für die Akzeptanz und Formulierung entsprechender Maßnahmen ist (Cohen et al., 2013). Hierbei stellen sich folgende Fragen:

2.1 *Welches Potenzial bietet die Implementierung von GIS- und Fernerkundungsdaten in mikroklimatischen Simulationen?*

2.2 *Wie beeinflussen bauliche und natürliche Elemente die thermische Behaglichkeit und die Feinstaubverteilung in Dortmund-Marten?*

Im Anschluss an die stadt- und quartiersbezogene Bestandsaufnahme werden in Kooperation mit Verwaltungsmitarbeitern der Stadt Dortmund lösungsorientierte Begrünungsmaßnahmen zur Reduktion von klimatischen und umweltbezogenen Gesundheitsbelastungen in Dortmund-Marten erarbeitet. Um die potenziellen Wirkungen dieser Handlungsmaßnahmen zu evaluieren, wird ein Begrünungsszenario über numerische Simulationen mit einem heißen Sommertag konfrontiert. Ebenso sollen die Erkenntnisse aus der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Planungspraxis festgehalten werden. So werden Antworten auf folgende Fragen gesucht:

3.1 *Wie können klimatische und gesundheitliche Belastungen auf der Quartiersebene effektiv adressiert werden?*

3.2 *Wie beeinflusst die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Planungspraxis die strategische Ausarbeitung von Begrünungsmaßnahmen?*

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Diese Rahmenschrift dient der zusammenfassenden Dokumentation der eigenen Forschungsarbeit zwischen den Jahren 2019 und 2022. Sie setzt sich aus den generierten Erkenntnissen dreier wissenschaftlicher Artikel zusammen und ist in zwei Hauptteile aufgebaut. Im ersten Teil (Nexus) werden die erzielten Forschungsergebnisse in einen übergreifenden Konnex überführt und sowohl methodisch als auch stadtplanerisch diskutiert. Zunächst wird in Kapitel 2 theoretisches Wissen um die berührten Themenbereiche aufgearbeitet. Die darauffolgenden Kapitel 3 bis 5 fassen die Inhalte der Artikel zusammen und schließen jeweils mit der Beantwortung der Forschungsfragen aus Kapitel 1.3 ab. In Kapitel 6 werden schlussfolgernd die wesentlichen Forschungserkenntnisse synthetisiert, kritisch reflektiert und zukünftige Forschungspfade skizziert. Abbildung 1.3 veranschaulicht den Aufbau der Dissertation, die verwendeten methodischen Ansätze und wie diese mit den Forschungsfragen in Verbindung stehen. Alle drei wissenschaftlichen Aufsätze sind im zweiten Hauptteil (Publikationen) chronologisch in Originalform angehängt.

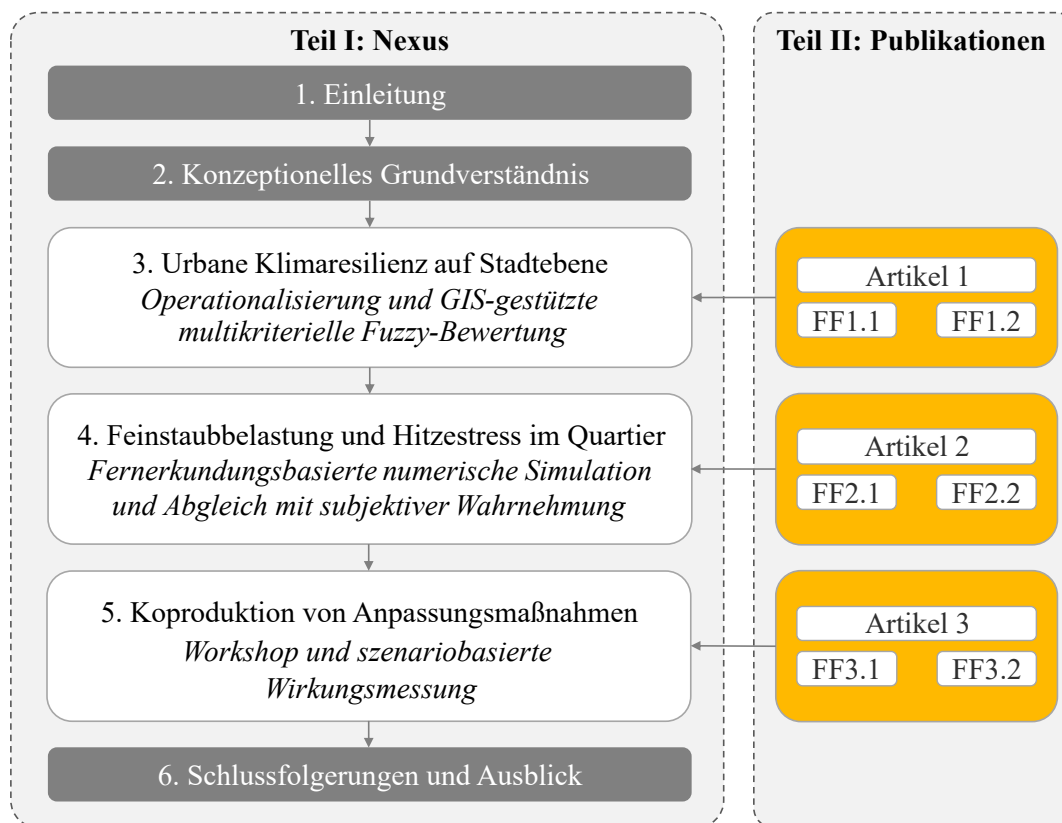


Abbildung 1.3: Aufbau der Arbeit.



## Kapitel 2

# Konzeptionelles Grundverständnis

Das folgende Kapitel dient der Herstellung der Zusammenhänge zwischen urbaner Klimaresilienz, Stadtgesundheit und transdisziplinärer Forschung. Es werden relevante Begrifflichkeiten aus einschlägigen Themenfeldern definiert und in den raumplanerischen Kontext eingeordnet. Zum Ende des Kapitels wird bezugnehmend auf die vorgestellten Inhalte ein Rahmenkonzept für die weitere Forschungsarbeit konkretisiert.

### 2.1 Resilienz: die drei Urtypen

#### 2.1.1 Ingenieurstechnische Resilienz

Vorab sei erwähnt, dass eine allgemeingültige Definition von Resilienz nicht existiert. Resilienz wird aus dem lateinischen *resilie* abgeleitet und bedeutet wörtlich »zurückfedern« (Alexander, 2013, S. 2708). Der Begriff findet in nahezu allen Disziplinen Anwendung. Besonders in der Entwicklungspsychologie deutet Resilienz auf angeborene oder erlernte Charaktereigenschaften von Menschen hin, die trotz traumatischer Ereignisse ein erfülltes Leben durchlaufen (Goldstein und Brooks, 2013; Werner et al., 1971).

Die historische Genese von Resilienz ist bis heute unklar. Über die Werkstoffkunde gewann der Begriff jedoch maßgeblich an Popularität. So wurde im Jahr 1858 die ingenieurstechnische Denkweise von Resilienz (engl.: *engineering resilience*) durch William John Macquorn Rankine nach außen getragen, um die Festigkeit von Stahlträgern zu beschreiben (Alexander, 2013, S. 2710). Neun Jahre später entwarf Rankine eine Formulierung für Resilienz als Antonym zur reinen Steifigkeit. Resilienz ist demnach die Fähigkeit eines Materials, nach einer äußeren Belastung in den Ausgangszustand zurückzukehren (engl.: *bounce back*). Das reaktive Zurückprallen nach einer Störung in den vorherigen Zustand verfolgt das Ziel einer dauerhaften Stabilität gegenüber äußeren Einflüssen (Pimm, 1984).

Je schneller ein System<sup>4</sup> in den einzigen alten Zustand zurückkehrt –oder ihn gar nicht erst verlässt–, umso resilienter ist es. Dies war zugleich die dominierende Resilienzvorstellung bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts.

Die ingenieurstechnische Resilienzmetaphorik lässt sich auch im städtischen Raum wiedererkennen. So werden Deiche und Wälle gegen Überschwemmungen errichtet, um Gefahren zu widerstehen und den status quo zu erhalten (Davoudi et al., 2012, S. 326). Auch für kritische Infrastrukturen wie etwa die Energieversorgung, dem Verkehrs- und Gesundheitswesen ist die ingenieurstechnische Resilienz relevant, um auf technische Störfälle zu reagieren und das System schnell wiederherzustellen. Allerdings setzt ingenieurstechnische Resilienz neben einem starken Kontrollbestreben voraus, dass sich die Umwelt linear entwickelt und Krisen temporär auftreten. Der reinen Gefahrenabwehr dienend versuchen ingenieurstechnische Resilienzbestrebungen die Robustheit gegenüber externen Schocks durch adäquate Stabilisierungsstrategien zu maximieren.

### 2.1.2 Ökologische Resilienz

Im Jahr 1973 sollte eine ökologisch orientierte Sichtweise das Narrativ für viele aktuelle Resilienzauffassungen legen. In seinem Beitrag *Resilience and stability of ecological systems* beschrieb der kanadische Ökosystemforscher Crawford Stanley Holling Resilienz als die Aufrechterhaltung existenzieller Funktionen eines Ökosystems (Holling, 1973, S. 17). Holling sah für ein Ökosystem nicht nur einen Gleichgewichtszustand, sondern mehrere mögliche Gleichgewichte, welche mit einem wandelbedingten Sprung in einen neuen Zustand (engl.: *bounce forth*) einhergehen können. Hier wird Resilienz danach definiert, wie viele Störungen ein System unter der Beibehaltung existenzieller Funktionen aushalten kann, bis es seine Strukturen an neue Rahmenbedingungen anpasst. Der ökologischen Resilienz ist demnach der Fortbestand durch Veränderung immanent.

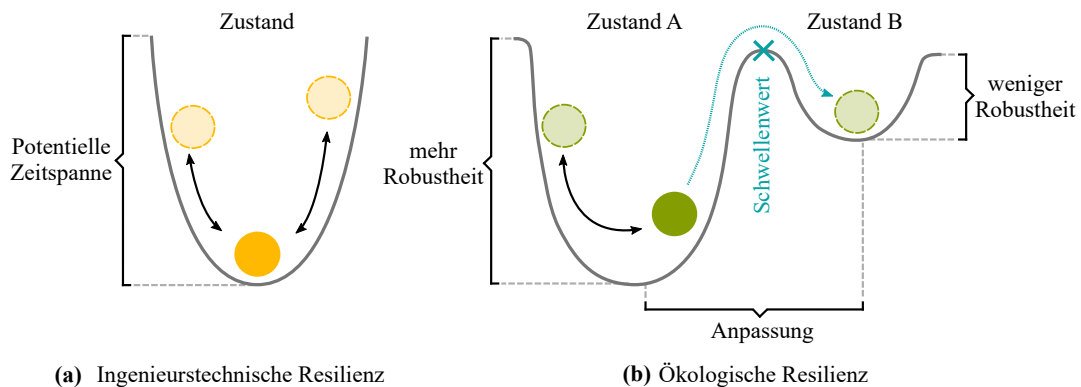
Auch die ökologische Resilienzdefinition findet oft unterbewusst Eingang in Klimaschutz und -anpassungsmaßnahmen. Sie beziehen sich z. B. auf den Biodiversitäts- und Landschaftsschutz, bevor bestimmte Spezies aussterben oder sich zum Nachteil anderer verändern. Auch Retentionsbecken zum Hochwasser- und Überflutungsschutz erlauben Schwankungen unterhalb eines kritischen Schwellenwerts, bevor das System kollabiert.

Sowohl der ingenieurstechnischen, als auch der ökologischen Argumentationsform ist zunächst gemein, dass ein System dann resilient ist, wenn es trotz bedeutsamen inneren und äußeren Schwankungen erhalten bleibt (Holling, 1996, S. 32 f.). Folglich bedingen beide Auffassungen ein Gleichgewicht, das über einen bestimmten Zeitraum stabil ist. Der Unterschied liegt in der Art und Weise, wie dieses Gleichgewicht erreicht wird: Soll in den immer

---

<sup>4</sup>Ein System (z. B. Stadt) setzt sich aus verschiedenen, miteinander in Bezug stehenden Einzelelementen zusammen und steht in enger Wechselwirkung zu seiner Umwelt. Veränderungen einzelner Elemente wirken sich auf andere Elemente aus und beeinflussen dadurch das Systemverhalten (Erk, 2016, S. 18).

## 2.1. Resilienz: die drei Urtypen



**Abbildung 2.1: Ingenieurstechnische und ökologische Resilienz am Beispiel eines Balles im Becken.** Pfeile symbolisieren Störeinflüsse, die das jeweilige System (Ball) temporär aus dem Gleichgewicht bringen. Der tiefste Punkt repräsentiert in beiden Fällen den idealen Gleichgewichtszustand. Ingenieurstechnische Resilienz a) zielt auf den Verbleib des Systems am Muldenboden, während sich ökologische Resilienz b) darauf bezieht, ob das System unter fortwährenden Schwankungen innerhalb des aktuellen Beckens verbleiben kann. Verändert nach Liao (2012).

gleichen Ausgangszustand zurückgekehrt werden, oder kann sich ein neuer Gleichgewichtszustand durch Anpassungen an sich ändernde Bedingungen aufspannen?

Zur metaphorischen Beschreibung beider Resilienzperspektiven wird in der Fachliteratur häufig das Beispiel eines Balles im Becken (engl.: *ball in a basin*) verwendet (Scheffer et al., 1993; Walker et al., 2004). Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 2.1 illustriert: Ein Ball (in dem Fall ein beliebiges System) befindet sich in einem Becken, welches zunächst das Reaktionsvermögen des Systems darstellen soll. Trifft ein disruptives Ereignis auf das System ein, kann der Ball an den Beckenrand gestoßen und damit aus dem Gleichgewicht gebracht werden. Bei der ingenieurstechnischen Resilienz muss der Ball nach dem Schock wieder unverändert in den Ursprungszustand am Beckengrund ankommen. Die benötigte Zeit, um den Ausgangszustand zu erreichen, determiniert die Resilienz des Systems. Ist der Störeinfluss jedoch zu stark, kann das System kollabieren und aus dem Beckenrand gestoßen werden. Daher gilt bei der ingenieurstechnischen Resilienz: Je steiler und höher das Becken gestaltet ist, umso unwahrscheinlicher ist der Ausfall und desto schneller kann in den Ausgangszustand zurückgekehrt werden.

Bei der ökologischen Resilienz ist ein vermeintlich ähnlicher Ablauf zu sehen, jedoch kann das System bei einem zu starken Schock über den Beckenrand in einen neuen Zustand –respektive ein neues Becken– mit besseren oder schlechteren Ausgangsbedingungen gelangen. Dieser dynamische Prozess wird auch als *regime shift* bezeichnet und erfordert eine strukturelle Anpassung des Systems. Gerade ökologische Resilienz ist in vielen Ökosystemprozessen wiedererkennbar, so z. B. bei der temporären oder langfristigen Artenanpassung an neue Umweltbedingungen (Zustand A hin zu Zustand B) oder der Regeneration

von Fischpopulationen nach starker Überfischung (Zustand B hin zu Zustand A) (Holling, 1973). Bezugnehmend auf die globalen klimatischen Veränderungen kann der Ball ebenso stellvertretend für die Erde sein, welche vor einem bestimmten kritischen Schwellenwert (1,5 °C Ziel) steht und andernfalls verheerende Folgen für Mensch und Umwelt entstehen können.

### 2.1.3 Sozial-ökologische Resilienz

Nach der Veröffentlichung des Brundtlandberichts zur nachhaltigen Entwicklung (WCED, 1987) breitete sich Hollings Haltung zu Resilienz in den 1990er Jahren von der reinen Ökosystemforschung zunehmend auf andere Wissenschaftszweige wie die Katastrophenforschung, Wirtschafts-, Sozial- und Planungswissenschaften aus (Schnur, 2013, S. 337). Die Rückkopplungseffekte der Umwelt auf menschliches Wirken rückten näher in den Fokus in der sich stärker ausweitenden sozial-ökologischen Forschung. Sozial-ökologische Systeme beschreiben dabei die Mensch-Umwelt-Beziehungen als sich gegenseitig über zeitliche und räumliche Skalen hinweg beeinflussende Faktoren (Biggs et al., 2022, S. 5).

In diesem Kontext entstand zu Beginn der 2000er Jahre ein evolutionäres Verständnis von Resilienz, da sich die natürliche und bauphysische Umwelt sowohl durch interne als auch externe Faktoren in einem dynamischen Wandel mit Rückkopplungseffekten befinden. Dieser Ansatz steht entgegen der Idee, Resilienz als Ergebnis zu sehen, sondern als multi-kontextuellen Transformationsprozess (engl.: *bounce forward*). Hier wird dem bestehenden Resilienzgerüst eine antizipatorische Komponente hinzugefügt, welche das permanente und flexible Anpassen in den Vordergrund rückt und sich damit von starrer Resistenz distanziert.

Das so genannte *Panarchiemodell adaptiver Zyklen* wurde von Gunderson und Holling (2002) vorgestellt und ist für die oben beschriebenen Entwicklungen stellvertretend. Durch die vier zyklischen Phasen in Form einer Endlosschleife wird ausgedrückt, dass Resilienz einen lernenden Prozess zwischen Anpassung und Stabilität auf unterschiedlichen räumlichen Maßstabebenen (z. B. Bezirk und Gesamtstadt) darstellt (Folke et al., 2010). Resilienz ergibt sich hierbei in Abhängigkeit von (sozialer) Konnektivität und (strukturellem) Potential, welche je nach Phase unterschiedliche Ausprägungen annehmen können (s. Abbildung 2.2):

1. Wachstum (r-Phase<sup>5</sup>):

Zu Beginn der r-Phase herrscht ein schnelles Wachstum mit der Akkumulation von Ressourcen, Fähigkeiten, Beziehungen und einem entsprechend hohem Grad an Resilienz. Im Fall einer Zerstörung ist das Schadensausmaß in der Anfangsphase verhältnismäßig gering. Im späteren Verlauf der r-Phase verlangsamt sich die Wandel-

---

<sup>5</sup>In der Biologie steht r für die (exponentiell ansteigende) Wachstumsrate einer Population (Meyer et al., 1986, S. 1156).

geschwindigkeit. Strukturelles Potential und Konnektivität steigen in dieser Phase schnell an.

### 2. Erhaltung (K-Phase <sup>6</sup>):

Soziales, kulturelles und physisches Kapital wird angesammelt und Routinen verfestigen sich. Durch den hohen Selbsterhaltungsaufwand wird die Flexibilität zur Reaktion auf Veränderungen reduziert. Folglich steigt die Vulnerabilität gegenüber Krisen mit der gleichzeitigen Reduktion von Resilienz.

### 3. Freisetzung ( $\Omega$ -Phase <sup>7</sup>):

Die  $\Omega$ -Phase ist aufgrund dysfunktionaler Beziehungen und Strukturen der tiefste Resilienzpunkt im Panarchiemodell. Sie markiert die Rückwärtsschleife und bildet die Grundlage zur Ausbildung neuer Resilienzpoteziale.

### 4. Reorganisation ( $\alpha$ -Phase <sup>8</sup>):

In der  $\alpha$ -Phase dominiert der Anspruch an Innovationen, Experimenten, Improvisation und Lernmöglichkeiten. Ab diesem Punkt beginnt die Resilienz durch strukturelle Anpassungen an neue Rahmenbedingungen wieder zu steigen.

In einer Schleife laufen somit zwei Prozesse mit unterschiedlichen Zielen ab: Zum einen die langsam laufende Vorwärtsschleife (engl.: *forward loop*) von r zu K zur Maximierung von Wachstum und Stabilität. Zum anderen die schnell laufende Rückwärtsschleife (engl.: *backward loop*) von  $\Omega$  zu  $\alpha$  unter großer Unsicherheit mit Innovationspotentialen und Reorganisationsabläufen. Beide Kernprozesse können innerhalb eines Systems nicht parallel ablaufen, sondern bedingen sich gegenseitig. Dabei läuft der adaptive Zyklus auf jeder Maßstabsebene auf unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Während der gröbere Maßstab (z. B. Stadtverwaltung) großflächige und verhältnismäßig langsame Transformationsmechanismen aufweist, setzt dieser die nötigen Rahmenbedingungen für schnellere und experimentell laufende Transformationsschritte auf Nachbarschaftsebene. Resilienz auf gröberen Maßstabsebenen ermöglicht demnach Resilienz auf feineren Ebenen und umgekehrt (Folke et al., 2010; Walker et al., 2004).

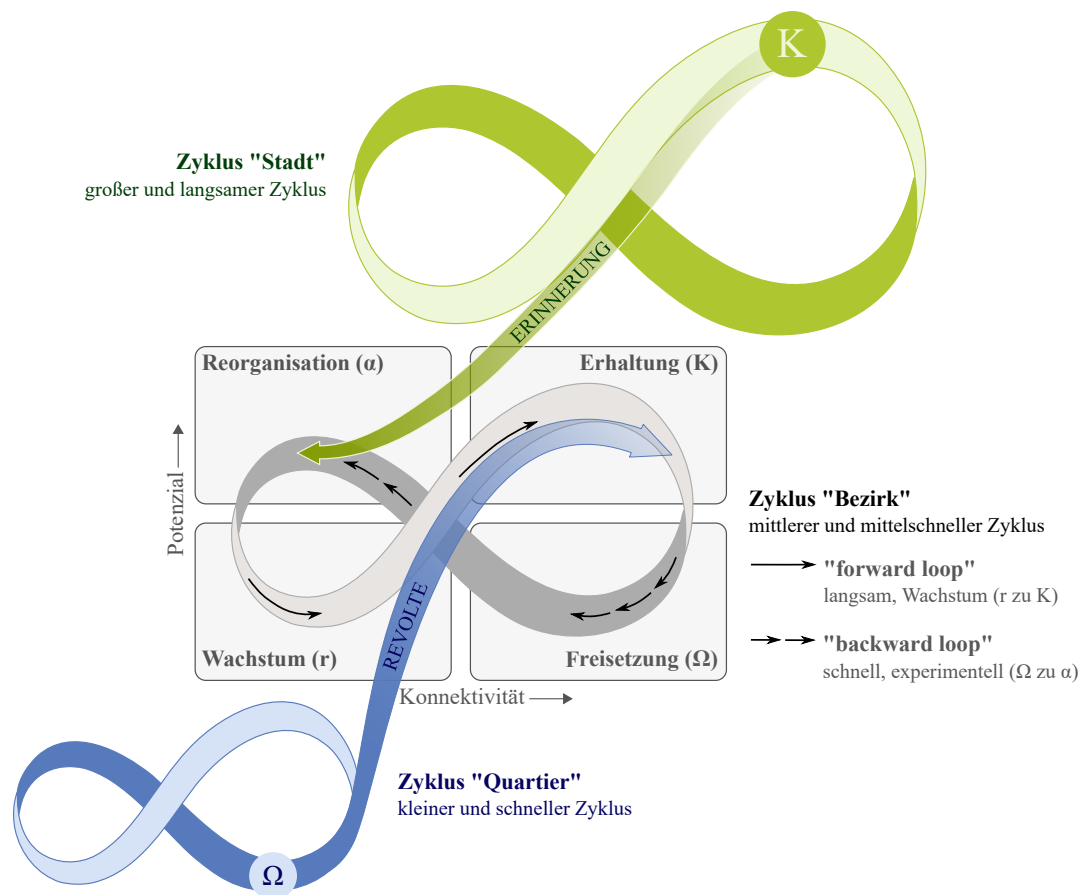
Auch wenn es in diesem Beispiel höher und niedriger gestellte Ebenen gibt, so handelt es sich nicht um eine von oben nach unten gerichtete Hierarchie, sondern um eigene, verschachtelte Kreisläufe, die sowohl räumlich als auch zeitlich miteinander verwoben sind

---

<sup>6</sup>K steht in der Biologie für ein dauerhaftes Plateau oder die maximale Population, die von einem System erreicht werden kann (Pearl, 1927, S. 539).

<sup>7</sup> $\Omega$  ist der letzte Buchstabe im griechischen Alphabet und steht im Beispiel des Panarchiemodells für das »Ende«.

<sup>8</sup> $\alpha$  ist der erste Buchstabe im griechischen Alphabet und bildet den (Neu-)»Anfang« im Panarchiemodell.



**Abbildung 2.2: Das Panarchiemodell adaptiver Zyklen.** Die Grafik zeigt drei miteinander verwobene Zyklen am Beispiel der Maßstabebenen Region, Stadt und Quartier. Verändert in Anlehnung an Gunderson und Holling (2002, S. 75) sowie Schnur (2013, S. 340).

(Panarchie). Durch das enge Wechselspiel der Systeme können sich höhere oder niedrigere Ebenen beeinflussen. Dies geschieht entweder durch Erinnerungsmechanismen in der K-Phase, um einen Niedergang zu vermeiden, oder durch Revolte in der  $\Omega$ -Phase, die z. B. durch Proteste den Umsturz eines politischen Systems erzwingen.

Die Architektur des Panarchiemodells wurde von Holling und Gunderson bewusst so schlicht wie möglich gehalten, um es auch auf andere Fachbereiche zu transferieren. Auch im Kontext der Stadtentwicklung ist das Panarchiemodell unter bestimmten Rahmenbedingungen auf Systemnischen anwendbar, insbesondere in Bezug auf städtebauliche Auf- und Abwertungsprozesse in Quartieren (Schnur, 2013). Allerdings sind der ökologisch-evolutionären Handschrift auch Grenzen gesetzt, gerade bei Systemen, in denen menschliche Entscheidungen eine zentrale Rolle spielen. So können bestimmte Phasen im Modell durch vorausschauende Planung beschleunigt, verlangsamt, oder gar übersprungen werden.

Tabelle 2.1: Zentrale Charakteristika ingenieurtechnischer, ökologischer und sozial-ökologischer Resilienz im Vergleich.

| Eigenschaft       | Resilienzform  |   |                                      |
|-------------------|--|---|--------------------------------------|
|                   | ingenieurtechnisch                                       | ökologisch  | sozial-ökologisch                    |
| Gleichgewicht     | ein Gleichgewicht  | multiple Gleichgewichte   | Evolution ohne Gleichgewicht         |
| Rolle von Schocks | Gefahr   | Grund zur Anpassung   | Lern- und Transformationsmöglichkeit |
| Systemverständnis | linear   | nicht-linear  | komplex                              |
| Reaktion          | statisch   | dynamisch   | kontinuierlich                       |
| Zielrichtung      | Ausgangszustand  | innerhalb eines Zustands unterhalb kritischer Schwellenwerte                    | Transformation                       |
| Zeitraumen        | kurzfristig  | mittelfristig   | langfristig                          |
| Erfassung         | benötigte Zeit, um in den Ausgangszustand zurückzukehren | Menge der Störung, die vor einer strukturellen Anpassung absorbiert werden kann | Anpassungsfähigkeit                  |

Für einen abschließenden Überblick sind die wesentlichen Charakteristika aller drei Urtypen in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Wie bereits angedeutet, unterscheiden sich Maßnahmen in ihrer raumwirksamen Ausgestaltung bereits durch den thematischen Hintergrund aller drei Resilienzanschauungen.

## 2.2 Urbane Resilienz

Die Resilienzdebatte wird seit einem Jahrzehnt auch im Kontext der Raumplanung attraktiver (Wilkinson, 2012), wobei sich der Begriff der urbanen Resilienz im semantischen Wettbewerb durchgesetzt hat. Seit 2010 kann ein rapider Anstieg wissenschaftlicher Veröffentlichungen zu urbaner Resilienz dokumentiert werden (Bautista-Puig et al., 2022). Besonders zwischen wissenschaftlicher Theorie und planender Politik ergeben sich jedoch erhebliche Differenzen in der Resilienzinterpretation (Moser et al., 2019; Walker, 2020).

In dem viel beachteten Aufsatz *Defining Urban Resilience: A Review* in der Zeitschrift *Landscape and urban planning* wurde im Zuge der Koexistenz zahlreicher, teils widersprüchlicher Auffassungen ein erster Versuch unternommen, eine integrative Definition für urbane Resilienz vorzustellen. Unter der Berücksichtigung vorangegangener Definitionen basiert sie auf allen drei Urtypen und soll sowohl für die Wissenschaft, als auch für die Planungspraxis greifbar sein. Urbane Resilienz beschreibt hiernach

## Kapitel 2. Konzeptionelles Grundverständnis

„die Fähigkeit eines städtischen Systems und seiner Subsysteme (1) über zeitliche und räumliche Skalen hinweg (sozial-ökologisch) (2) grundlegende Funktionen angesichts einer Störung aufrechtzuerhalten oder schnell wiederherzustellen (ingenieurstechnisch), (3) sich an Veränderungen anzupassen (ökologisch) und (4) Systeme, die die derzeitige oder künftige Anpassungsfähigkeit einschränken, zeitnah zu transformieren (sozial-ökologisch).“

(Meerow et al., 2016, S. 39, eigene Übersetzung und Hervorhebung)

Nach dieser Definition befinden sich Städte nicht in einem dauerhaften Gleichgewichtszustand, sondern antizipieren notwendige Veränderungsprozesse (Transformation) und passen sich kurz- und langfristig an neue Rahmenbedingungen an, um die Robustheit gegenüber (externen) Schocks zu stärken. Städte werden dabei als ein Konglomerat vernetzter Teilsysteme<sup>9</sup> verstanden. Häufig wird zwischen den Subsystemen *Umwelt*, *Soziales*, *Infrastruktur*, *Wirtschaft* und *Governance* differenziert (Jakubowski, 2013, S. 375). Das Zusammenspiel der einzelnen Mikrosysteme macht eine Stadt als Makrosystem letztlich funktionsfähig. Die Teilsysteme sind in ihrem Wesen eng mit den zu erhaltenden Grunddaseinsfunktionen einer Stadt verbunden (Laschinger und Lötscher, 1975, S. 122 f.). So muss sichergestellt sein, dass Wohnen, Arbeiten, Bildung, Erholung, die Teilnahme am Verkehr sowie die Ver- und Entsorgung für jeden Menschen erfüllt sind.

### 2.2.1 Resilienz versus Vulnerabilität

Zur Beschreibung der Verwundbarkeit gegenüber Krisen wird in der Risikoforschung der Begriff der Vulnerabilität herangezogen (Cutter, 2022, S. 214). Laut dem zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen<sup>10</sup> beschreibt Vulnerabilität die „Tendenz oder Prädisposition, negativ betroffen zu sein“ (IPCC, 2012, S. 5, eigene Übersetzung). So wird Vulnerabilität durch das Fehlen interner Anpassungskapazitäten gegenüber einer externen Gefahr erhöht.

Im Gegensatz zu Resilienz besitzt Vulnerabilität in der Öffentlichkeit eine tendenziell negative Konnotation (Cutter et al., 2008; McEvoy et al., 2013). Daher werden Resilienz und Vulnerabilität oft als gegensätzliche, aber durch das Bindeglied von Anpassungskapazitäten zugleich als verwandte Ansätze aufgefasst (Reghezza-Zitt et al., 2012). Für die eigene Arbeit ist es daher von großer Bedeutung, beide Begriffe formal voneinander abzugrenzen und ihren individuellen Eigenwert hervorzuheben.

---

<sup>9</sup>In dieser Dissertation werden die Begriffe Teilsystem, Subsystem und Mikrosystem synonym verwendet.

<sup>10</sup>Engl.: *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*



Bezogen auf klimatische Extremereignisse wird Vulnerabilität verstärkt –aber nicht ausschließlich (O’Brien et al., 2004)– sektoral kommuniziert, so z. B. für Hitzewellen (Depietri et al., 2013) oder Sturzfluten (Karagiorgos et al., 2016). Derartige Analysen beziehen sich in der Regel auf einen bestimmten Zeitpunkt und sind damit statischer Natur. Vulnerabilität kommt daher der traditionellen, ingenieurtechnischen Resilienzauffassung am nächsten. Krisenbedingte Lerneffekte und vorausschauende Planung bleiben in Vulnerabilitätsanalysen meist unberücksichtigt. Urbane Resilienz wird indessen als integratives, prozessbezogenes Konzept für Systeme und ihre Wechselwirkungen gedacht und setzt zudem Transformations- und Anpassungsfähigkeit gegenüber unvorhergesehene Schocks voraus (Adger et al., 2005). Vulnerabilitätsanalysen alleine können daher keine hinreichenden Aussagen zur Resilienz treffen, sind jedoch eine wichtige Voraussetzung, um resilienzfördernde Maßnahmen zielgerichtet einzuleiten (Brunetta und Salata, 2019).

### 2.2.2 Urbane Klimaresilienz und umweltbezogene Gerechtigkeit

Auch wenn urbane Resilienz auf viele städtische Herausforderungen wie den demographischen Wandel, Pandemien, Terror- und Cyberangriffe anwendbar ist, so wird der Begriff am häufigsten mit klimawandelbedingten Anpassungsstrategien in Städten und Regionen in Verbindung gebracht (Solecki et al., 2011). Als spezifische Resilienzform beschäftigt sich urbane Klimaresilienz mit der kurz- und langfristigen Bewältigung von Extremereignissen wie z. B. Hitzewellen, Dürren, Starkregen- und Hochwasserereignissen im städtischen Raum. Dabei wird Stadtgesundheit (engl.: *Public Health*) als eine Kernkomponente resilienter Städte angesehen (Cutter, 2016, S. 753). Aus der Resilienzperspektive lässt sich z. B. das Ziel ableiten, das gesundheitliche Wohlbefinden der Zivilbevölkerung aufrecht zu erhalten und einen Zugang zu klimatischen Ausgleichsflächen sowie gesundheitlicher Versorgung zu ermöglichen. Menschen stellen nach diesem Beispiel einen Teil des Mikrosystems *Soziales* dar und interagieren mit den Mikrosystemen *Umwelt* und *(Gesundheits-)Infrastruktur*. Dabei verteilen sich Menschen (freiwillig oder unfreiwillig) durch vielfältige Gründe wie z. B. eigene Wohnstandortpräferenzen oder durch residentielle Segregationsprozesse innerhalb einer Stadt ungleich (Dangschat, 2014). Gleichzeitig wurde bereits mehrfach empirisch aufgezeigt, dass gesundheitlich relevante Stressoren wie Lärm, Luftverschmutzung und Wärmeinseln in bestimmten städtischen Teilgebieten stärker konzentriert sind (Flacke et al., 2016; Shrestha et al., 2016; Köckler et al., 2020). Zusammen mit fehlenden natürlichen Ausgleichsflächen zur Regenwasserversickerung oder der nächtlichen Abkühlung können die negativen Auswirkungen von plötzlichen (Starkregen) und schleichenden (Hitze) Extremereignissen intensiviert werden. Dies betrifft insbesondere Bevölkerungsgruppen wie z. B. Senioren und Kleinkinder, welche durch fehlende Anpassungskapazitäten als vulnerabler gegenüber Klimaextremereignissen und Umweltbelastungen gelten (Bach et al., 2014). Treten Umweltbelastungen und vulnerable Bevölkerungsgruppen in einer unverhältnismäßigen

## Kapitel 2. Konzeptionelles Grundverständnis

räumlichen Gleichzeitigkeit auf, so kann dies ein Indiz für eine Ungerechtigkeit darstellen (Köckler, 2017, S. 26).

Umweltbezogene Gerechtigkeit (engl.: *Environmental Justice*) ist ein gesellschaftliches Leitbild, das einen angemessenen Zugang zu Umweltressourcen vorsieht und gleichzeitig den gesundheitlichen Schutz des Menschen vor umweltbedingten Belastungen in den Vordergrund stellt (Agyeman und Evans, 2004, S. 156). Innerhalb der Debatte um umweltbezogene Gerechtigkeit wird zwischen den vier Teilkonzepten der Chancen-, Verteilungs-, Verfahrens- und Ergebnisgerechtigkeit unterschieden (Köckler, 2017, S. 34 ff.). Grundlage für umweltbezogene Gerechtigkeit ist zunächst die Chancengerechtigkeit. Sie stellt im Sinne des Fähigkeitsansatzes die Voraussetzung, dass „Personen selbstbestimmt leben können“ (Köckler, 2020, S. 24). Verteilungsgerechtigkeit meint eine angemessene Verteilung von (nicht vermeidbaren) Umweltbelastungen und -ressourcen ohne Rücksicht auf ethnische Zugehörigkeit oder sozialen Status. Die Verfahrensgerechtigkeit zielt auf den wirksamen Einbezug betroffener Gruppen an umweltpolitisch relevanten Planungs- und Entscheidungsprozessen ab (Schlosberg, 2007, S. 27). Werden Menschen, die in ökologisch benachteiligten Gebieten leben entgeltlich oder über die Planung neuer Umweltressourcen kompensiert, so spricht man von einer Ergebnisgerechtigkeit (Kloepfer, 2006, S. 48). Damit hat Ergebnisgerechtigkeit einen indirekten Einfluss auf die Verteilungsgerechtigkeit und umgekehrt. So ist es die Aufgabe der Stadtplanung und des Umweltschutzes, Parks, Friedhöfe und urbane Wälder als räumliche Gemeinschaftsgüter ausgewogen zu verteilen und die Lebensqualität der Anwohner zu verbessern. Unter diesen Gesichtspunkten können Maßnahmen zu einem Mehr an Resilienz nach Sandoval et al. (2014, S. 421 f.) jedoch auch umweltbezogene Ungleichheiten verschärfen, indem bestimmte Bevölkerungsgruppen von den positiven Effekten ausgeschlossen werden. Im sozial-ökologischen Kontext kann urbane Klimaresilienz daher nicht ohne Rücksichtnahme auf Stadtgesundheit und umweltbezogene Gerechtigkeit thematisiert werden (Shi et al., 2016).

### 2.3 Transdisziplinäre Forschung

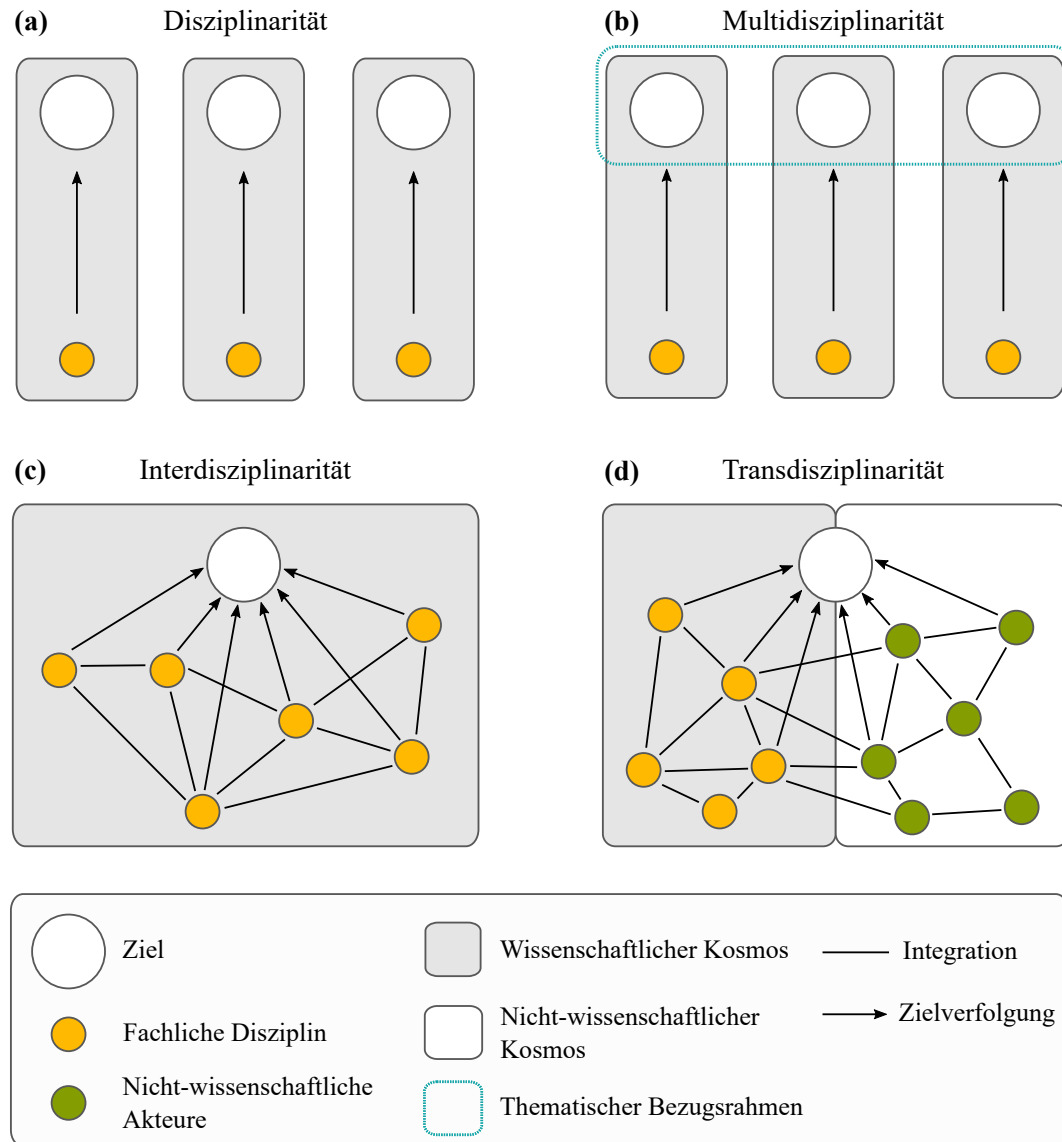
Wie in den vorherigen Sektionen geschildert zeichnet sich urbane Resilienz mitunter über das stetige Lernen und Transformationen in mehreren städtischen Teilsystemen aus. Bezogen auf die räumliche Planung liefert dabei die Grundlagenforschung nötige Beiträge zum theoretischen Verständnis einzelner Prozesse im Stadtgefüge. Planungsverwaltungen befinden sich dabei an der Schnittstelle zwischen Forschung und Gesellschaft und berücksichtigen bestenfalls wissenschaftliche Evidenz in der politischen Entscheidungsfindung (Home und Bauer, 2021). Darüber hinaus kann nach Wright Morton et al. (2015) ohne die Rückkopplung mit der Planungspraxis kein praktisch umsetzbares Wissen durch die Forschung generiert werden. Aus diesem Grund kann die spezifische Nischenforschung der komplexen Fragestellung nach urbaner Klimaresilienz nicht gerecht werden. Mit dieser Erkenntnis

wächst besonders im Bereich der Resilienz- und Nachhaltigkeitsforschung das Bedürfnis nach experimentellen Forschungsansätzen, die über einzelne Fachdisziplinen hinausgehen.

Die Bemühung nach einer problemlösungsorientierten Zusammenführung gesellschaftlicher Akteure und Einzeldisziplinen forschender Wissenschaft ist kein Novum (Jantsch, 1970). So wurden schon im Jahr 1970 auf der ersten internationalen Transdisziplinaritätskonferenz neue Forschungsformate gefordert, um das distanzierte Verhältnis zwischen Wissenschaft und Gesellschaft neu zu justieren (Klein, 2001, S. 35). Im Nachgang entstand in der Wissenschaftstheorie ein erweitertes Vokabular zur Erschließung neuer Forschungsformate: Multidisziplinarität, Interdisziplinarität und Transdisziplinarität. Diese sind inklusive der traditionellen Disziplinarität in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt und sollen nachfolgend kurz umrissen werden.

Im Rahmen disziplinärer Forschung finden Projekte isoliert innerhalb einer einzigen fachlichen Disziplin statt. Das jeweilige Projektziel gilt ausschließlich der Erweiterung von Wissen und Theorien im eigenen Forschungsbereich. Multidisziplinäre Projekte schließen dagegen mehrere fachliche Disziplinen parallel in den Forschungsprozess ein, allerdings bleiben die individuellen Ziele stets disziplinärer Natur. Wissen wird zwar punktuell ausgetauscht, durch fehlende Integration werden jedoch fachliche Grenzen nicht überschritten. Multidisziplinarität ist insbesondere dann sinnvoll, wenn die involvierten Teildisziplinen klar voneinander abgegrenzt agieren und die Synthetisierung von vereinzelt Expertwissen am Ende einen Mehrwert bietet. Interdisziplinäre Forschungsprojekte kennzeichnen sich durch eine integrative Zusammenarbeit zwischen mehreren, nicht verwandten fachlichen Disziplinen. Dabei werden zur gemeinsam definierten Zielerreichung fachliche Grenzen aufgebrochen und neues Wissen für die Forschung generiert.

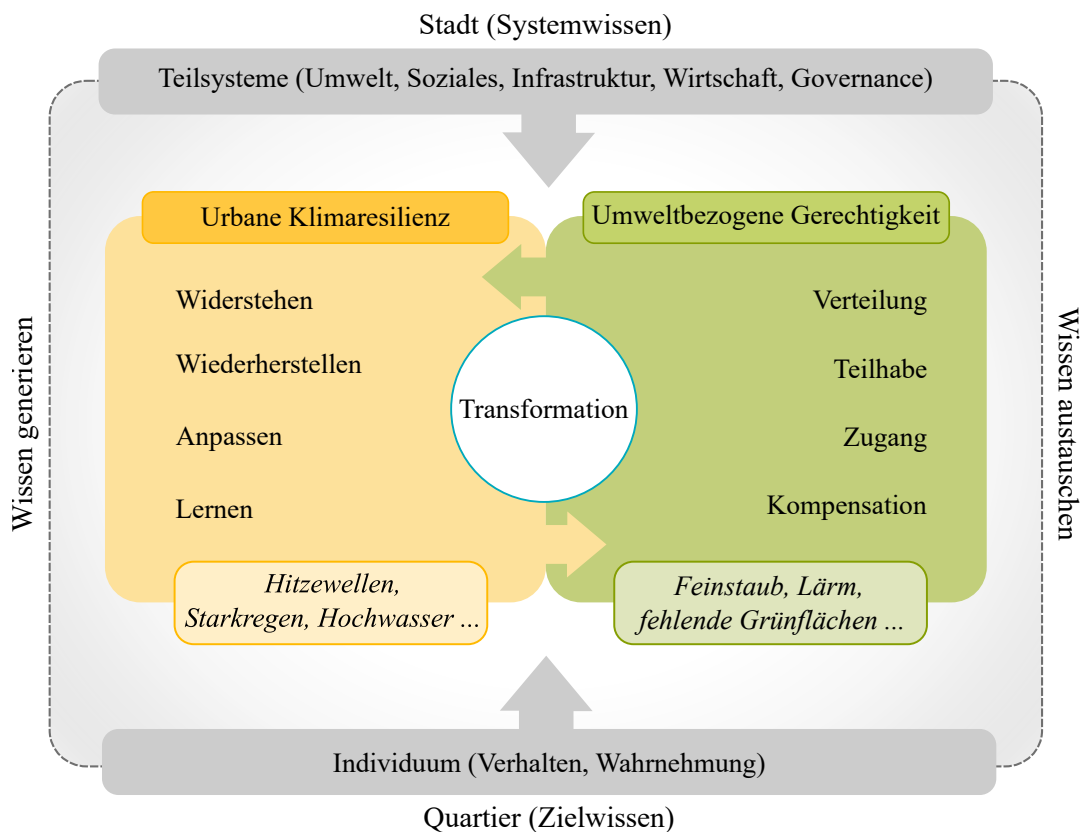
Projekte, die nicht nur interdisziplinär ausgerichtet sind, sondern darüber hinaus auch nicht-wissenschaftliches Wissen zur gemeinsamen Zielerreichung miteinbeziehen, sind transdisziplinär. Am Beginn transdisziplinärer Projekte steht immer eine konkrete gesellschaftlich-politische wie wissenschaftlich-analytische Problemdefinition (Scholz, 2020, S. 1039). Durch einen kurz-, mittel- und langfristigen Wissensaustausch soll dieses Problem nicht alleine durch voneinander getrennte Disziplinen, sondern im Schulterschluss mit der Gesellschaft gelöst werden. Damit ist gemeint, auch Akteure aus der Wirtschaft, Interessensvertreter, Verwaltungen sowie die allgemeine Öffentlichkeit aktiv in den Forschungsprozess einzubinden (Tress et al., 2005, S. 487). Punktuell eingesetzte partizipative Formate können darüber hinaus lokales Alltagswissen mit wissenschaftlichen Methoden vereinen (Stelzer et al., 2018, S. 405). Auf diese Weise schafft transdisziplinäre Forschung im Idealfall durch einen wechselseitigen Lernprozess nicht nur nützliche Erkenntnisse für die Wissenschaft, sondern gleichermaßen auch für die Gesellschaft (Byrne, 2022). Die Integration von gesellschaftlichem und wissenschaftlichem Wissen soll in der Konsequenz die Ergebnisverwertung in beiden Sphären ermöglichen und langfristige Veränderungsprozesse (Transformation) anstoßen (Scholz und Steiner, 2015, S. 664).



**Abbildung 2.3: Schematische Einordnung vier verschiedener Forschungsformate.** Disziplinarität und Multidisziplinarität a) bis b) zählen zu den nicht-integrativen Forschungsansätzen, wohingegen Inter- und Transdisziplinarität c) bis d) den integrativen Forschungsansätzen zuzuordnen sind. Verändert nach Tress et al. (2005, S. 484).

## 2.4 Konzeptsynthese

Für die weitere Forschungsarbeit wurde aus den vorangegangenen Kapiteln ein zusammenführendes Rahmenkonzept erstellt, in welchem die aufgeführten Charakteristika urbaner Resilienz aus Kapitel 2.2 zentral sind (s. Abbildung 2.4). Entsprechend wird auch in dieser Arbeit eine Stadt als ein aus Teilsystemen zusammengesetztes Gesamtsystem gesehen. Die Konzeptionen zu urbaner Klimaresilienz und umweltbezogener Gerechtigkeit sind zwar aus unterschiedlichen Strömungen entstanden, besitzen aber durch ihren Bezug zur Vulnerabilität und Stadtgesundheit mehrere Schnittstellen. Grundsätzlich setzt urbane Resilienz sowohl auf den Systemerhalt, als auch auf notwendige Transformationen auf unterschiedlichen Maßstabsebenen (z. B. Stadt, Quartier, Individuum). Auch in der umweltbezogenen Gerechtigkeit werden langfristige Veränderungen in den jeweiligen Teilkonzepten gefordert (s. Kapitel 2.2.2).



**Abbildung 2.4: Rahmenkonzept für die eigene Forschung.** Urbane Klimaresilienz und umweltbezogene Gerechtigkeit stehen in einem engen Wechselspiel. Gleichzeitig beeinflussen Prozesse auf Stadtebene das alltägliche Quartiersleben und umgekehrt. Der integrative Wissensaustausch und die Wissensgenerierung zu Stressoren und Anpassungsmöglichkeiten finden ebenenübergreifend statt.

## *Kapitel 2. Konzeptionelles Grundverständnis*

Sozial-ökologische Ungleichheiten können die Fähigkeit eines Gesamtsystems beeinträchtigen, auf klimabedingte Extremereignisse angemessen zu reagieren. Umgekehrt kann eine geringe Klimaresilienz auch zu sozial-ökologischen Ungleichheiten führen, da bestimmte Quartiere und Bevölkerungsgruppen auf unterschiedliche Arten und Weisen stärker von Stressoren betroffen sein können, als andere. So können durch die Identifizierung vulnerabler Bevölkerungsgruppen und der räumlichen Verteilung gesundheitlich relevanter Faktoren Aussagen zu beiden Themenbereichen gezogen werden. In diesem Fall kann die systemwissenschaftliche Prägung von Resilienz eine neue Perspektive auf den gesamtstädtischen Raum setzen (Systemwissen). Auf der Quartiersebene steht dagegen der Mensch mit seiner Wahrnehmung in Bezug zu seinem direkten Umfeld im Zentrum der Betrachtung. Planerische Entscheidungen auf Stadtebene wirken dabei auf das Quartiersleben ein, welches wiederum das Stadtsystem als Ganzes zu beeinflussen vermag. Aus Kapitel 2.3 geht hervor, dass nicht nur Evidenzwissen der Forschung, sondern auch handfestes Wissen relevanter Praxisakteure und der Zivilbevölkerung (Zielwissen) für eine gelungene Transformation bedeutsam sind. Dabei stellen kleinräumige Gegebenheiten die Bühne für resilienzfördernde Maßnahmen. Angesichts des übergeordneten Forschungsziels ergibt sich hierdurch die Notwendigkeit, Städte und ihre Quartiere sowie urbane Klimaresilienz und Stadtgesundheit gemeinsam zu denken. Die folgenden drei Kapitel sollen diese Denkweise durch empirische und experimentelle Forschungsansätze näherbringen.

## Kapitel 3

# Entwicklung und Kartierung eines urbanen Klimaresilienzindex<sup>\*</sup>

Im vorangegangenen Kapitel wurden wichtige theoretische Anforderungen zur Resilienz von Städten gegenüber klima- und umweltbedingten Faktoren thematisiert. Der Nährboden für eine Transformation des Stadtsystems ist die Kenntnis über alle dafür relevanten Teilsysteme, ihre Grenzen und ihre Interaktionen untereinander. Hierbei ist zu klären, wie urbane Klimaresilienz zu bewerten ist, wie sie sich im Raum verteilt und welche Ausprägungen die Teilsysteme einer Stadt annehmen. Bislang waren die meisten indikatorbasierten Messmethoden auf die Regions- und Stadtebene begrenzt, wobei lediglich ein Indikatorwert für die gesamte Raumeinheit gebildet wurde. Bezugnehmend auf die kommunale Planung maskiert ein aggregierter Resilienzwert je Stadt Verteilungseffekte innerhalb der Verwaltungsgrenzen, was nicht nur die Identifizierung konkreter Handlungsräume, sondern auch die Erfolgskontrolle resilienzfördernder Maßnahmen erschwert. Entsprechend ist es sinnvoll, urbane Klimaresilienz systematisch innerhalb der Stadtgrenze bis hin zu innerquartierlichen Bereichen zu erfassen. Für diese Prozedur bildete die Stadt Dortmund den Untersuchungsraum. Zunächst wurde ein Indikatorensystem unter Einbindung von Akteurswissen entwickelt und anschließend anhand einer GIS-basierten Fuzzylogik ein ganzheitlicher Index gebildet. Eine wesentliche Schlussfolgerung ist, dass die einzelnen Teilsysteme in einem Spannungsfeld stehen und klimaresiliente Orte im Raum ungleich verteilt sind, wobei der Stadtkern tendenziell weniger resiliente Eigenschaften vorweist, als ländliche Bereiche.

---

\*Die Inhalte dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:

Schaefer, M., Thinh, N. X., und Greiving, S. (2020). How Can Climate Resilience Be Measured and Visualized? Assessing a Vague Concept Using GIS-Based Fuzzy Logic. *Sustainability*, 12(2):635

## 3.1 Motivation

Um fundierte und planungsrelevante Entscheidungen für eine klimaresiliente Stadtentwicklung treffen zu können, ist die indikatorengestützte Erfassung und Darstellung der einzelnen Teilsysteme vorteilhaft (Friend und Moench, 2013). Für die Vorbereitung der eigenen Methodik sollen zunächst wesentliche Schwerpunktthemen und Limitierungen vergangener Resilienzmessungen aufgeführt werden.

### 3.1.1 Inhärente und adaptive Resilienz

Hinsichtlich der Kartierung von Resilienz unterscheiden Cutter et al. (2008) sowie Tierney und Bruneau (2007) zwischen adaptiver und inhärenter Resilienz. Adaptive Resilienz adressiert ausschließlich den Wiederherstellungsprozess infolge einer Katastrophe. Entsprechend ist adaptive Resilienz in der Gegenwart kaum demonstrierbar, sondern in ihrer Darstellung retrospektiv. Eine von wenigen entscheidenden Determinanten bei adaptiver Resilienz ist der benötigte Zeitraum, um z. B. wirtschaftliche und bauphysische Schäden zu beheben und den alten oder einen neuen Zustand eines bestimmten Sektors herzustellen.

Inhärente Resilienz widmet sich dagegen den bereits vorhandenen Attributen einer Stadt, um künftig angemessen auf disruptive Schocks zu reagieren und sich davon zu erholen. Dieses Verständnis von Resilienz lässt quantitative Beurteilungen zu, wenngleich diese durch den ingenieurstechnischen Resilienzbezug auch schwer trennbar von Vulnerabilitätsanalysen scheinen. Zudem setzt die Quantifizierung keine Grenzen in der Wahl möglicher Indikatoren und kann daher schnell die Interpretation erschweren.

### 3.1.2 Urbane Klimaresilienz quantifizieren: Beispiele

Die räumliche Bestimmung resilienter Eigenschaften für Städte und Regionen ist vor allem im U.S. amerikanischen Raum weit verbreitet (Cutter et al., 2010, 2014). In Deutschland haben Resilienzindikatoren erst in der letzten Dekade verstärkt an Aufmerksamkeit dazugewonnen. Nachfolgend werden unter Berücksichtigung des eigenen Forschungsziels erprobte Herangehensweisen zur Resilienzmessung vorgestellt.

#### 100 Resilient Cities

Die Rockefeller Foundation lancierte im Dezember 2013 das Programm der *100 resilient cities*. Insgesamt wurden 52 Indikatoren unter den vier Dimensionen *Gesundheit und Wohlbefinden*, *Wirtschaft und Gesellschaft*, *Infrastruktur und Umwelt* sowie *Führung und Strategie* subsumiert. Diese Indikatoren wurden wiederum 12 Zielen zugeordnet und zu einem *City Resilience Index (CRI)* zusammengefasst, um die Resilienz von Städten ganzheitlich zu beschreiben (ARUP, 2014). Die Förderung der Rockefeller Foundation wurde im Sommer



2019 beendet. Seit 2020 wird die Initiative hauptsächlich vom *global resilient cities network (R-cities)* und *resilient cities catalysts (RCC)* weitergetragen. Unter den weltweit 100 teilnehmenden Städten befindet sich bis dato keine deutsche Kommune, was offenes Potenzial für eine exemplarische Aufarbeitung des Konzepts für deutsche Städte und Gemeinden darbietet.

#### **Pestel Institut: Regionale Krisenfestigkeit**

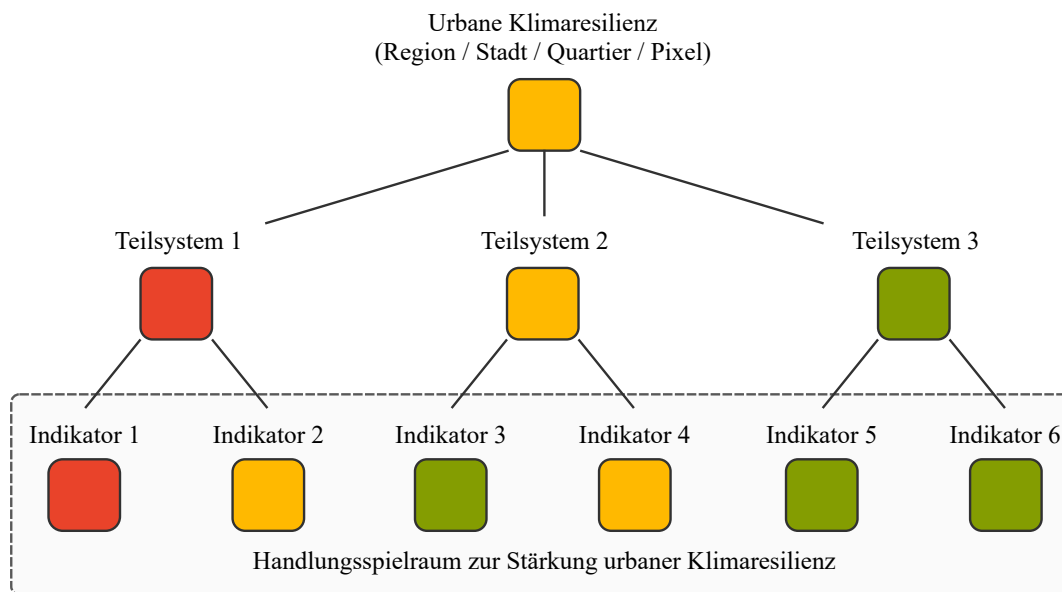
Für Deutschland wurde im Jahr 2010 eine Kartierung des Pestel Instituts zur Beschreibung der Krisenfestigkeit von Regionen vorgelegt. Mittels 18 Indikatoren zu den Bereichen *Soziales, Wohnen, Verkehr, Flächennutzung, Energie* und *Wirtschaft* sollte die Handlungsfähigkeit und Flexibilität von Kreisen und kreisfreien Städten im Krisenfall kartographisch dargestellt werden (Pestel Institut, 2010). Die Autoren unterstreichen die Diskussionswürdigkeit der verwendeten Indikatoren und befürworten eine Debatte zur Anpassung des Bewertungssystems, was dem heutigen sozial-ökologischen Resilienzgedanken nahe kommt.

#### **Stresstest Stadt**

Die Studie *Stresstest Stadt – wie resilient sind unsere Städte?* des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und dem damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) wurde als erste Handreichung für deutsche Kommunen zur eigenen Resilienzquantifizierung konzipiert (Kötter und Weiß, 2018). In der Studie bildet urbane Resilienz die Klammer um Robustheit (inhärent, statisch) und Anpassungsfähigkeit (antizipatorisch, dynamisch). Robustheit beschreibt die Fähigkeit einer Stadt (und ihrer Teilsysteme), externen Schocks zu widerstehen, oder deren negative Auswirkungen zu minimieren und damit nicht aus dem Gleichgewicht zu geraten. Sie ist im weitesten Sinne als Gegenpol zu Vulnerabilität zu verstehen und daher auch über harte Indikatoren quantifizierbar. Anpassungsfähigkeit setzt auf die Bewältigung nachteiliger Auswirkungen und die langfristige Reaktion auf veränderte klimatische Bedingungen, was vor allem finanzielle Mittel und strategische Planung voraussetzt. Sie setzt sich zum Großteil aus weichen Kenngrößen zusammen und ist z. B. über standardisierte Fragebögen zu aktuellen Planwerken und dem integrierten Resilienzverständnis im Verwaltungshandeln greifbar. Die Zusammenführung der Kenngrößen zu Robustheit und Anpassungsfähigkeit über eine Matrix soll letztlich Aussagen zur Resilienz einer Stadt ermöglichen.

#### **MONARES**

Im Rahmen des Querschnittsprojekts *Monitoring von Anpassungsmaßnahmen und Klimaresilienz in Städten* (MONARES) wurden im engen Austausch mit den weiteren 14 Forschungsprojekten der *Leitinitiative Zukunftsstadt* (s. Kapitel 1.2) Handlungsfelder und ein Indikatorenset für die fünf Teilsysteme *Umwelt, Gesellschaft, Infrastruktur, Wirtschaft* und



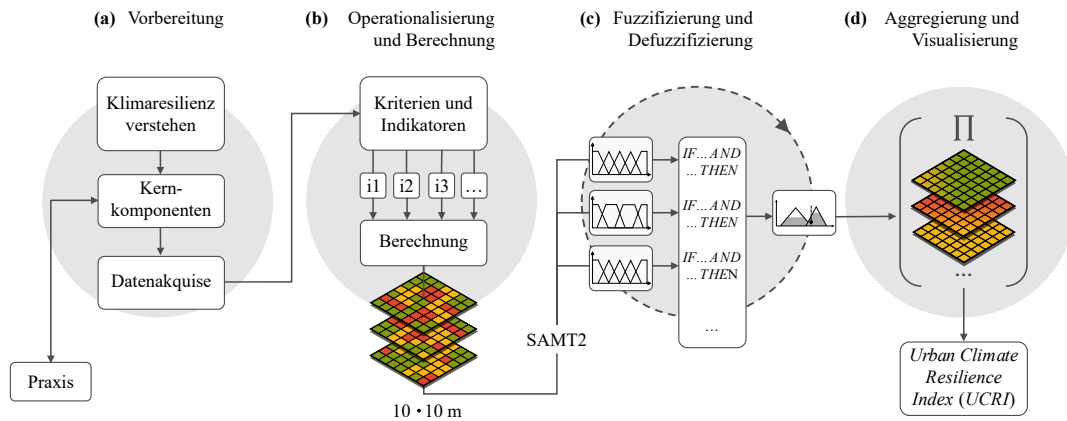
**Abbildung 3.1: Schematische Darstellung einer Bewertung für urbane Klimaresilienz.** Der übergeordnete Resilienzwert kann resilienzfördernde (grün), moderate (orange) und resilienzhemmende (rot) Ausprägungen annehmen, welche auf der Ebene der Indikatoren beeinflusst werden. Um die Resilienz des Untersuchungsraums zu verbessern, müssten im oberen Beispiel die Indikatorwerte 1 und 2 aus dem Teilsystem 1 über adaptive Planungskonzepte verbessert werden. Verändert nach Cariolet et al. (2019, S. 10) mit Genehmigung von Elsevier.

*Governance* zur Messung urbaner Klimaresilienz in deutschen Städten erarbeitet (Feldmeyer et al., 2019). Der Autor hat als Repräsentant des ZUKUR-Projekts aktiv bei der kooperativen Indikatorenentwicklung mitgewirkt. Bei der Indikatorenkonzeption sollte unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit eine deutschlandweite Anwendbarkeit verfolgt werden, was unweigerlich mit einem Verlust an Detailschärfe einhergeht und sich somit auch hier keine Aussagen zur Resilienz innerhalb der Stadtgrenze räumlich verorten lassen.

### 3.2 Methodische Vorgehensweise

Aus den vorangegangenen Beispielen lässt sich ein klarer Handlungsauftrag ableiten, urbane Klimaresilienz auf feineren Maßstabsebenen abzubilden. Folgend soll die methodische Vorgehensweise zur Erarbeitung und Kartierung eines ganzheitlichen Index zur Bewertung der urbanen Klimaresilienz in Dortmund vorgestellt werden. Bislang existieren wenige Versuche, Stadtgesundheit in die Resilienzdebatte zu integrieren, obwohl beide Konzepte aus ihren Zielvorstellungen heraus untrennbar miteinander verbunden sind (s. Kapitel 2.4). Aus methodischer Sicht sind multikriterielle Bewertungsmethoden zur Erfassung inhärenter Resilienzmerkmale prädestiniert: Hierbei wird urbane Klimaresilienz systematisch in seine ein-

### 3.2. Methodische Vorgehensweise



**Abbildung 3.2: Methodische Vorgehensweise zur Quantifizierung urbaner Klimaresilienz in Dortmund.** Verändert nach Schaefer et al. (2020, S. 6).

zelen Teilsysteme zerlegt, über Kriterien beschrieben und anschließend mit einem messbaren Indikatorenset zu einem Gesamtindex (engl.: *resilience score*) aggregiert (s. Abbildung 3.1). Dieses Vorgehen ist mithilfe raumbezogener Daten in einem GIS umsetzbar (Moghadass et al., 2019). Die hier angewandte Methodik knüpft an dieses Vorbild an und kann in vier übergeordnete Arbeitsschritte unterteilt werden. Abbildung 3.2 stellt den Ablauf schematisch dar.

**a) Vorbereitung** In der Vorbereitungsphase wurde über eine umfassende Literaturrecherche ein Überblick über messbare inhärente Resilienzeigenschaften herausgearbeitet. So lag die Konzentration vorerst auf den beiden Kernkomponenten *Robustheit* und *Anpassungsfähigkeit* (Kötter und Weiß, 2018, S. 29 ff.). Ausgehend von diesen beiden Oberkriterien steht jeder Bezugsraum vor individuellen Herausforderungen und weist unterschiedliche Potenziale zu deren Bewältigung auf. Zur Eingrenzung des Indikatorensets wurden zusätzlich zwei Experten des Umweltamts sowie des Stadtplanungs- und Bauordnungsamts zu bedeutsamen Stressoren, Flächennutzungen und Bevölkerungsgruppen befragt, welche bei der Indexbildung berücksichtigt werden sollten. Nach Einschätzung der Praxisakteure sollten gesundheitsbelastende Faktoren wie die Luftqualität und innerstädtische Hitze sowie gesundheitsfördernde Ressourcen wie öffentliche Grün- und Freiflächen in die Indexbildung eingebunden werden. Ebenso würden potenzielle Gefahren durch Starkregenereignisse eine wesentliche Rolle spielen (Schaefer et al., 2020, S. 9).

**b) Operationalisierung und Berechnung** Basierend auf den Praxismeinungen und den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche wurde im zweiten Schritt ein Kriterien- und Indikatorenset entwickelt, welches in Anlehnung an Feldmeyer et al. (2019) und Jakubowski (2013) die fünf Teilsysteme *Umwelt*, *Gesellschaft*, *Infrastruktur*, *Wirtschaft* und *Institution* mit Bezug zu urbaner Klimaresilienz in Dortmund abbildet (s. Tabelle 3.1). Alle Teilsysteme

**Tabelle 3.1: Indikatorenset zur Quantifizierung urbaner Klimaresilienz in Dortmund.** Das Indikatorenset beschreibt stadt-eigene Parameter, um Störungen zu bewältigen, Transformationen einzuleiten und dabei wesentliche Funktionen beizubehalten. Je stärker oder schwächer die Indikatorenwerte in jedem Teilsystem ausgeprägt sind, desto resilienter ist die Gesamtstadt gegenüber klima- und umweltbedingten Stressoren. Pfeile symbolisieren, ob der Indikatorwert zu minimieren (↘), oder zu maximieren (↗) ist. Übersetzt und verändert nach Schaefer et al. (2020, S. 10).

| Teilsystem                 | Kriterium                          | Indikator [GIS-Akronym]  |   |
|----------------------------|------------------------------------|--|---|
| <b>Robustheit</b>          |                                    |  |   |
| Umwelt                     | Retentionsflächen                  | Anteil unversiegelter Fläche [DUG]   | ↗ |
|                            |                                    | Hangneigung [SL]   | ↘ |
|                            | Ressourcen                         | Gehzeit zu öffentlichen Grün- und Freiflächen [AccG]   | ↘ |
|                            |                                    | Kaltluftvolumenströme [VS]   | ↗ |
|                            | Belastungen                        | Hitzestress [PET]  | ↘ |
|                            |                                    | Lärmbelastung [NP]   | ↘ |
| Gesellschaft               | Gebäudeschäden                     | Potentiell überflutete Wohngebäude [HFld]  | ↘ |
|                            | Vergangene Extremereignisse        | Anzahl Feuerwehreinsätze aufgrund von Extremereignissen (2008-2018) [NFO]                    | ↘ |
|                            | Demographie                        | Anzahl Bevölkerung 0-11 Jahre [INF]  | ↘ |
|                            |                                    | Anzahl Bevölkerung +65 Jahre [ELD]   | ↘ |
|                            |                                    | Anzahl Singlehaushalte [SHH]   | ↘ |
| Infrastruktur              | Kritische Infrastrukturen          | Potentiell überflutete technische und soziale Infrastruktur [TSFld]                          | ↘ |
|                            |                                    | Potentiell überflutete Verkehrsflächen [TTFld]   | ↘ |
|                            | Zivile Sicherheit                  | Fahrzeit der Feuerwehr [AccF]  | ↘ |
|                            | Gesundheitliche Versorgung         | Fahrzeit zu Krankenhäusern [AccH]  | ↘ |
| <b>Anpassungsfähigkeit</b> |                                    |  |   |
| Wirtschaft                 | Diversität an Arbeitsmöglichkeiten | Shannon Diversity Index [SHDI]   | ↗ |
|                            | Finanzielle Ressourcen             | Anzahl SGB II und SGB XII Empfänger [SGB]  | ↘ |
| Institution                | Maßnahmen und Pläne                | Umsetzungsstand von Maßnahmen und Plänen mit Bezug zu Klimaresilienz und Klimaanpassung [IN] | ↗ |

me wurden den beiden Kernkomponenten *Robustheit* und *Anpassungsfähigkeit* zugewiesen. Für die anschließende GIS-basierte Indikatorenberechnung wurde ein breiter Geodatenatz verwendet, welcher in NRW zu einem Großteil über entsprechende Geodatenportale<sup>11</sup> frei zur Verfügung steht (s. Kapitel 1.1). Der Untersuchungsraum wurde für die Bewertung in 10 · 10 m große Rasterzellen eingeteilt. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten GIS-Software, (Geo-)Datensätze sowie der Berechnung aller Indikatorenraaster findet sich in Schaefer et al. (2020, S. 7 ff.).

**c) Fuzzifizierung und Defuzzifizierung** Zur Identifizierung von Möglichkeitsräumen einer klimaresilienten Entwicklung wird die kumulierte Wirkung aller hergeleiteten Indikatoren vorausgesetzt. Da nicht klar abgegrenzt werden kann, ab wann etwas klimaresilient ist, muss eine geeignete Methode gewählt werden, welche diese Unsicherheit berücksichtigt. Im Hinblick auf multikriterielle Bewertungsmethoden reicht die traditionelle binäre Logik (wahr oder falsch bzw. 1 oder 0) nicht für die Beschreibung eines derart unklaren Konzepts aus. So müssen verbal argumentative Unschärfen wie »eher resilient« oder »weniger resilient« in den Klassifizierungsprozess implementiert werden. Die Idee der Erweiterung der klassischen Logik in unscharfe Mengen (auch: Fuzzy-Mengen, engl.: *fuzzy sets*) wurde vom Mathematiker Lotfi Askar Zadeh inventiert und wird in der Entscheidungstheorie als „Fuzzylogik“ bezeichnet (Zadeh, 1965). Sie kommt durch die Modellierung unscharfer Beschreibungen dem menschlichen Denken näher und soll daher für die eigene Bewertungskonzeption zum Einsatz kommen.

Für die Fuzzy-Analyse wurden zunächst alle 18 Indikatorenraaster mit diskreten Ausgangswerten in das frei verfügbare *Spatial Analysis and Modelling Tool 2 (SAMT2)*<sup>12</sup> (Wieland et al., 2006) importiert. Wie auch in SAMT2 besteht in der Fuzzy-Theorie der Anspruch die oben beschriebene binäre Logik aufzugeben und stattdessen die Elemente<sup>13</sup> einer Grundmenge<sup>14</sup> über kontinuierliche Zugehörigkeitsgrade (engl.: *membership function*) zu charakterisieren. So besitzt jedes Element  $x$  innerhalb der Grundmenge  $G$  einen eigenen Zugehörigkeitsgrad  $\mu_M(x)$  zu einer unscharfen Menge  $M$ . Diese Kopplung wird in der Algebra als „geordnetes Paar“ formuliert, wobei  $x \in G$  gilt (Böhme, 1993, S. 4):

$$(x, \mu_M(x)) \quad (3.1)$$

Der Zugehörigkeitsgrad liegt im Wertebereich [0;1], so dass sich die Mitgliedschaft eines

<sup>11</sup>Gängige Anbieter sind z.B. <https://www.opengeodata.nrw.de/produkte/>, <https://www.tim-online.nrw.de/tim-online2/> und <https://www.geoportal.nrw/>.

<sup>12</sup>SAMT2 ist eine GIS-basierte Analysesoftware und beinhaltet Module für einfache Fuzzy-Bewertungen. Die Software basiert auf der Python-Programmiersprache und ist frei verfügbar auf <https://www.zalf.de/de/forschunglehre/softwaredownloads/Seiten/default.aspx>

<sup>13</sup>In dieser Dissertation ist mit einem Element ein diskreter Indikatorwert gemeint.

<sup>14</sup>Die Gesamtheit aller Werte in einem Indikatorenraaster bildet die Grundmenge.

### Kapitel 3. Entwicklung und Kartierung eines urbanen Klimaresilienzindex

Elements auf alle reellen Zahlen zwischen 0 und 1 erstrecken kann. Je größer der Wert  $\mu_M(x)$ , desto deutlicher ist die Mitgliedschaft zu einer Fuzzy-Menge. Wenn folglich die Elemente einer Grundmenge  $G$  über die Funktion  $\mu_A$  dem Intervall  $[0;1]$  zugeordnet werden können:

$$\mu_A : G \rightarrow [0;1] \quad (3.2)$$

dann ist die Menge  $A$  aller Paare  $(x, \mu_A(x))$  eine unscharfe Menge über  $G$ :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in G\} \quad (3.3)$$

Die Zugehörigkeitsfunktion jedes Indikatorwerts zu einer Fuzzy-Menge wird über linguistische Terme ausgedrückt. Typische linguistische Terme sind verbale Ausdrücke wie z. B. »leichte Hitzebelastung«, »mittlere Hitzebelastung« und »starke Hitzebelastung«. Trapezförmige und dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen sind die am häufigsten aufgegriffenen linearen Typen in der Fuzzylogik. Maxima von Dreiecks- oder Trapezfunktionen stehen für eine definitive Zugehörigkeit und werden entsprechend mit dem Wert 1 definiert. Ist das Wissen um die Schwellenwerte zwischen den Fuzzy-Mengen begrenzt, sollte diese Unsicherheit über eine trianguläre Zugehörigkeitsfunktion abgebildet werden, da diese für jeden linguistischen Term nur einen bestimmten Indikatorwert einer klar abgrenzbaren Zugehörigkeit zuweist (Piegat, 2001). Überschneidungen zwischen den einzelnen Zugehörigkeitsfunktionen garantieren fließende Übergänge zwischen den Klassenzuordnungen. Alle verwendeten Zugehörigkeitsfunktionen sind in Schaefer et al. (2020, S. 24) abgebildet.

Nach der Festlegung linguistischer Terme und der Art der Zugehörigkeitsfunktion wird jeder diskrete Wert eines Indikators in einem WENN-DANN-Inferenzregelwerk (engl.: *IF-THEN*) der betrachteten Fuzzy-Menge zugewiesen. Bei drei Indikatorenrastern und fünf linguistischen Termen sind 125 ( $5^3$ ) Inferenzregeln aufzustellen, weshalb nicht mehr als drei Indikatoren pro Kriterium einbezogen werden sollten (Thin und Hedel, 2005, S. 5). Um die linguistischen Terme zu einer Aussage zu verknüpfen, wurde der UND-Operator verwendet. Dies bedeutet, dass zwischen den *fuzzy sets* eine gemeinsame Schnittmenge gebildet wurde. Beispielhaft kann folgende Formulierung gewählt werden:

WENN (die Zelle des Indikators *AccG* ist {sehr nah  $\vee$  nah  $\vee$  moderat  $\vee$  weit  $\vee$  sehr weit} bewertet) UND

WENN (die Zelle des Indikators *VS* ist {mittel  $\vee$  hoch  $\vee$  sehr hoch} bewertet)

DANN (die Zelle des Kriteriums *Ressourcen* ist {sehr schlecht  $\vee$  schlecht  $\vee$  mittel  $\vee$  gut  $\vee$  sehr gut} bewertet).

Mit  $\vee$  wird das ausschließende *oder* repräsentiert, so dass genau einer der obigen linguistischen Terme zutrifft (Thin und Hedel, 2005, S. 4 f.). Alle Fuzzy-Mengen wurden mit der MAX-PROD-Inferenzmethode transformiert. Der ausgegebene Maximalwert entspricht hier dem Mitgliedsgrad. Der letzte Schritt der Fuzzylogik besteht darin, die resultierenden

### 3.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

*fuzzy sets* mit unscharfen Grenzwerten wieder in ein Raster mit trennscharfen Grenzwerten zu überführen (Defuzzifizierung). Hierzu muss ein Ergebniswert je Pixel als Repräsentant innerhalb der aggregierten Fuzzy-Mengen berechnet werden. In SAMT2 wird hierfür ein Flächenschwerpunkt (engl.: *Center of Gravity (CoG)*) ermittelt:

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i) \cdot x_i}{\sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)} \quad (3.4)$$

In Gleichung 3.4 steht  $x^*$  für einen trennscharfen Zentroid-Wert zwischen 0 und 1, während  $\mu_A$  die Zugehörigkeitsfunktion des Ausgangsindikatorwerts  $x_i$  repräsentiert (Lee, 1990, S. 430). Der gesamte Vorgang der (De-)Fuzzifizierung wurde für jede Hierarchie-Ebene (Indikatoren, Kriterien, Teilsysteme, Robustheit und Anpassungsfähigkeit) wiederholt (s. Abbildung 3.2 c)).

**d) Aggregation zu einem Gesamtindex** Abschließend wurden die Raster für die Robustheit und Anpassungsfähigkeit in SAMT2 zu einem urbanen Klimaresilienzindex (engl.: *Urban Climate Resilience Index (UCRI)*) aggregiert und ebenso als defuzzifiziertes Raster exportiert. Die resultierenden Werte des *UCRI* rangieren gemäß Gleichung 3.4 im Wertebereich [0,1]. Über die rasterbasierte Berechnung der relativen Abweichung vom Mittelwert wurde das Wertespektrum für Dortmund in fünf gleich große Klassen mit eher resilienten und weniger resilienten Bereichen unterteilt (z-Werte):

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma} \quad (3.5)$$

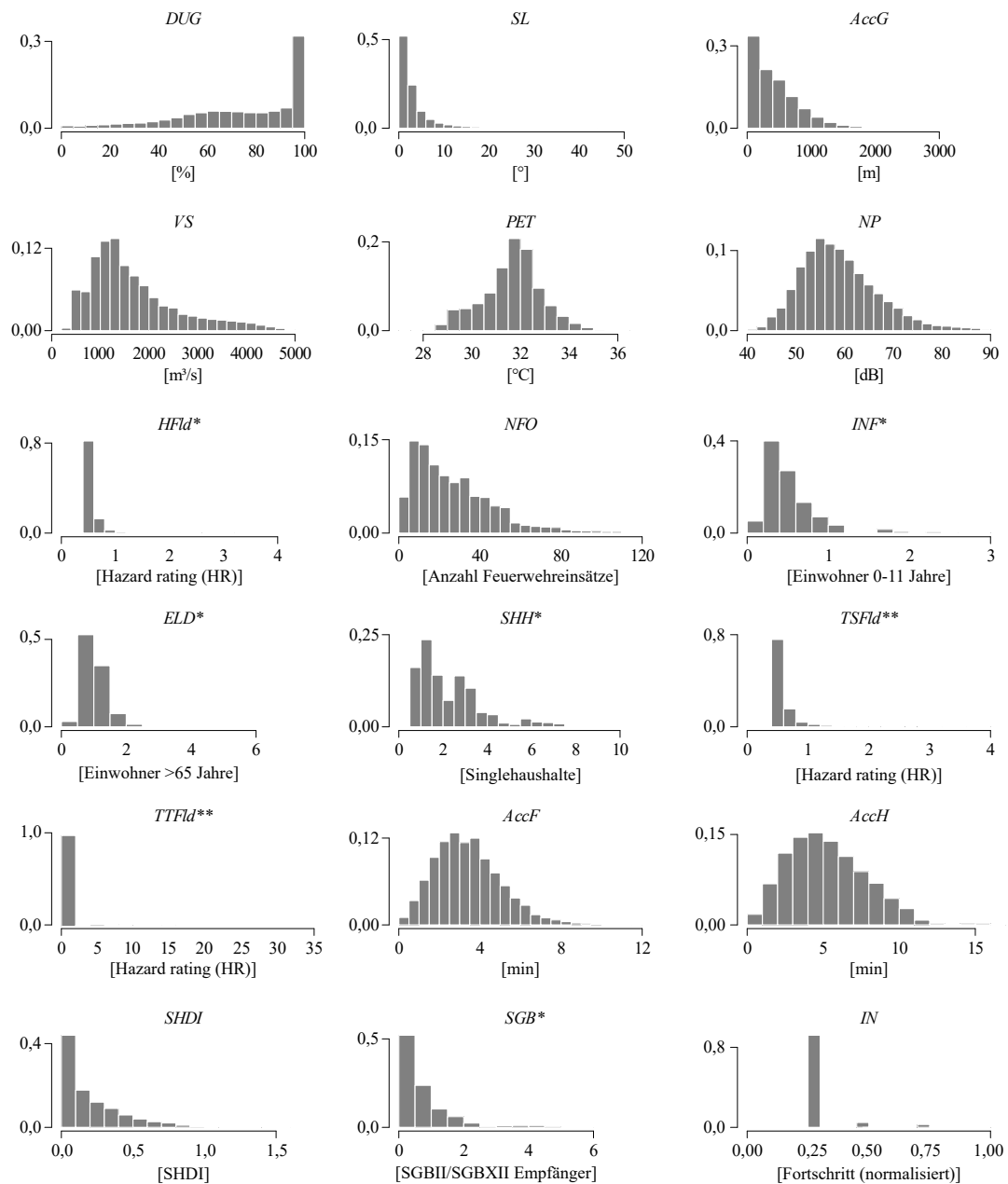
Der Ausgangswert des *UCRI* wird in Gleichung 3.5 mit  $x$  beschrieben,  $\mu$  steht für den Mittelwert und  $\sigma$  für die Standardabweichung. Ein Wert von +1 bedeutet demnach, dass eine Pixelfläche eine Standardabweichung vom Mittelwert null (0) entfernt ist.

## 3.3 Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

### 3.3.1 Identifikation (nicht-)klimaresilienter Bereiche in Dortmund

Abbildung 3.3 gibt Aufschluss über das Wertespektrum und die relativen Worthäufigkeiten aller 18 Indikatoren raster im Untersuchungsraum. Die Histogramme deuten auf eine stadtweit ungleiche Verteilung robuster und anpassungsfähiger Merkmalsausprägungen. Abbildung 3.4 zeigt den *UCRI* im Untersuchungsgebiet nach Anwendung der Fuzzylogik unter Berücksichtigung der Mittelwertabweichung. Die Mehrzahl der berechneten Pixelwerte weist ein moderates (-0,5 bis 0,5) oder leicht erhöhtes Resilienzniveau (0,5 bis 1,5) auf, was den Ausgleich und die konkurrierenden Effekte zwischen den thematisch divergierenden Indikatoren und Teilsystemen erklärt. Darüber hinaus befinden sich resiliente Bereiche vermehrt im Süden und Südosten außerhalb des Stadtkerns, während weniger resiliente Land-

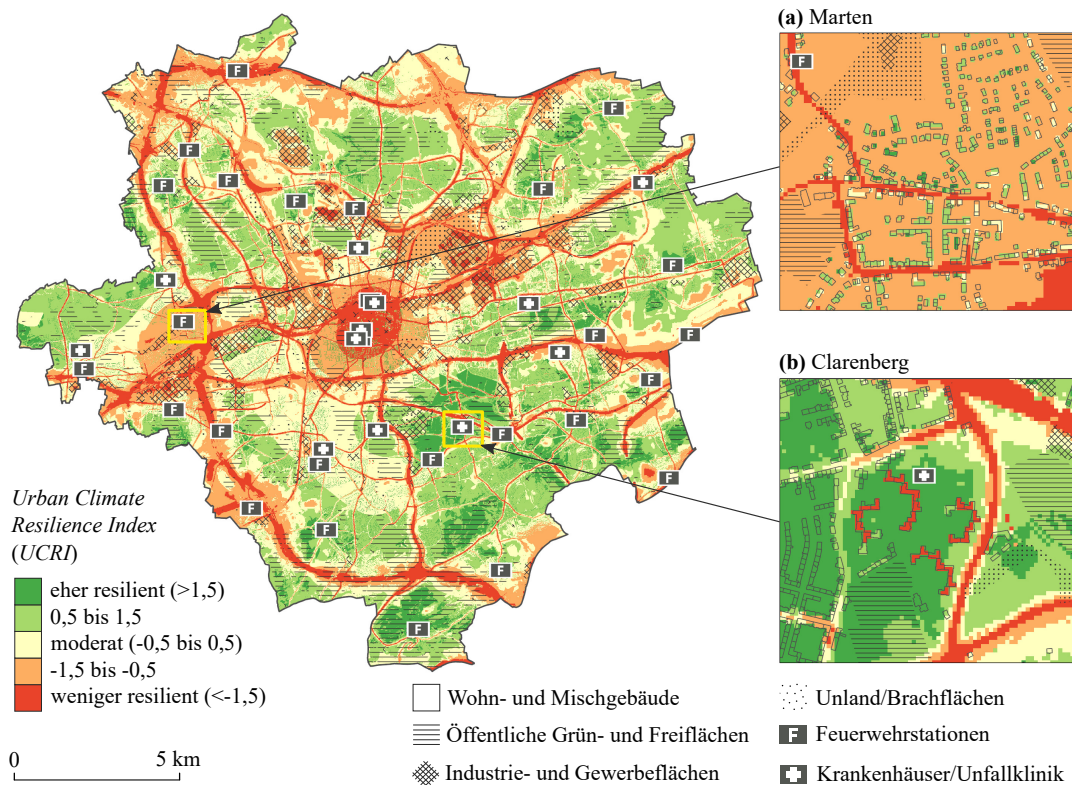
### Kapitel 3. Entwicklung und Kartierung eines urbanen Klimaresilienzindex



**Abbildung 3.3: Relative Werte Häufigkeiten für alle 18 Indikatorenraaster.** Histogramme, die mit einem Asterisk (\*) gekennzeichnet sind beziehen sich ausschließlich auf das Wertespektrum innerhalb von Wohn- und Mischgebäuden und damit nicht auf die Gesamtstadt. Histogramme mit zwei Asterissen (\*\*) zeigen Werte innerhalb technischer, sozialer und verkehrsbezogener Infrastrukturen (Schaefer et al., 2020, S. 23).

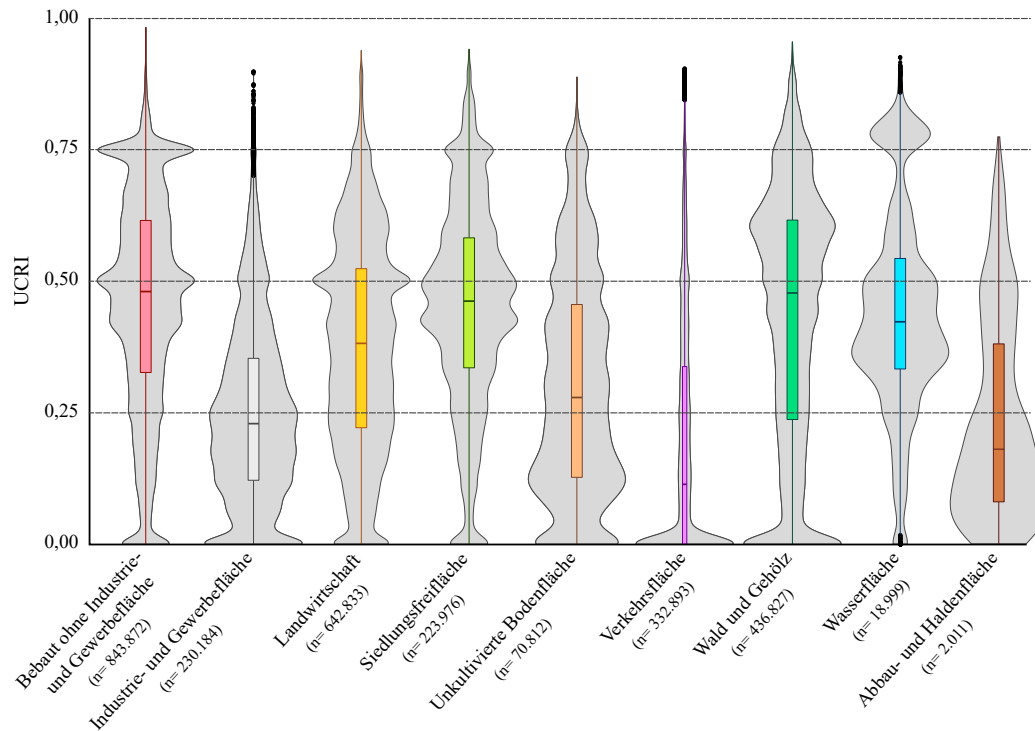


### 3.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 3.4: Kartierung des UCRI innerhalb der Dortmunder Stadtgrenze.** Der Kontrast zwischen öffentlichem und privatem Raum wird besonders in den Unterbezirken a) Marten und b) Clarenberg deutlich. Die Datengrundlagen sind aus Schaefer et al. (2020, S. 8) zu entnehmen. Verändert nach Schaefer et al. (2020, S. 19 f.)

nutzungen wie Hauptverkehrsstraßen, Schienennetze und überhitzte Industriestandorte über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt sind. Im (nördlichen) Stadtkern führen eine mäßige Zugänglichkeit zu öffentlichen Grün- und Freiflächen (*AccG*), hohe Hitzestresswerte (*PET*), wenige unversiegelte Flächen (*DUG*), ein niedriger Kaltluftvolumenstrom (*VS*), ein hoher Anteil an Single-Haushalten (*SHH*) und hohe Sozialhilfeempfänger (*SGB*) zu eher geringen Klimaresilienzwerten (-0,5 bis unter -1,5). Der negative Einfluss von Feuerwehreinsätzen zwischen 2008 und 2018 (*NFO*) bleibt auch in der Aggregation aller Indikatoren bestehen und macht sich besonders im Westen (Dortmund-Marten) und im Zentrum bemerkbar. Weil Lärmbelastungen oder Hitzestress durch eine solide Erreichbarkeit von öffentlichen Grün- und Freiflächen nicht als weniger störend empfunden werden, sind die Indikatoren aus dem Kriterium der Umweltbelastungen persistente negative Faktoren in der Ergebniskartierung. Generell gilt, dass unversiegelte Flächen wie Wälder und Seen in den ländlichen Stadtteilen hinsichtlich des Teilsystems *Umwelt* robuster sind, während verstärkte Cluster und Industriestandorte als weniger robust bewertet werden.



**Abbildung 3.5: Violinendiagramm zur Rohwertverteilung des UCRI innerhalb unterschiedlicher Flächennutzungsarten in Dortmund.** Jeder Punkt (n) steht für eine Pixelfläche von  $10 \cdot 10$  m. Die Flächennutzungsarten wurden aus dem ATKIS Basis-DLM abgeleitet (IÖR, 2018).

Der UCRI liefert zudem Einblicke innerhalb städtischer Quartiere. Während das bebaute Umfeld in Dortmund-Martens angesichts der hohen Lärmbelastung, vielen Feuerwehreinheiten und einer hohen Flächenversiegelung als weniger resilient eingestuft wird, ist ein Großteil des Unterbezirks Clarenberg aufgrund einer guten Krankenhaus- und Grünflächen-erreichbarkeit resilienter bewertet (s. Abbildung 3.4 a) und b)). Der auf einem ehemaligen Hochofen- und Stahlwerksgelände angelegte Phoenixsee stellt eine öffentliche Grün- und Freifläche sowie eine Klimaanpassungsmaßnahme dar, da er als potenzielles Rückhaltebecken der angrenzenden Emscher dient (Frank et al., 2022, S. 370 f.). Darüber hinaus ist ein Großteil des Stadtteils Hörde Gegenstand von Klimaanpassungsmaßnahmen, was sich in einer hohen Anpassungsfähigkeitsbewertung des IN Indikators niederschlägt. Dennoch wird die Bevölkerung beider Unterbezirke hinsichtlich ihrer Resilienz unterschiedlich eingestuft. So scheint es trotz hinreichender Anbindung zu Grün- und Freiflächen denkbar, dass die Clarenberger Anwohner Schwierigkeiten haben, klimatische Extremereignisse zu bewältigen. Hierdurch wird ein konkreter Ballungspunkt vulnerabler Bevölkerungsgruppen offenbart, welcher auf der Ebene statistischer Unterbezirke unerkannt geblieben wäre.

### 3.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

Ein Blick auf die Verteilung des *UCRI* innerhalb der Flächennutzungen verdeutlicht weitere Disparitäten im Untersuchungsraum (s. Abbildung 3.5). Je breiter ein Diagramm in der oberen Hälfte der Abbildung ist (0,5 bis 1,0), umso häufiger können der Flächennutzung resilientere Eigenschaften zugewiesen werden. Durch die Kompromissbildung aus allen Teilsystemen erreicht keine Flächennutzungsart den Höchstwert von 1,0, wobei alle Flächennutzungsarten punktuell Werte über 0,75 aufweisen. Verkehrsflächen nehmen durch ihren hohen Versiegelungsgrad, Wärmespeicherungsprozesse und Lärmemissionen vornehmlich Werte unter 0,25 an. Auffallend ist zudem die ähnliche Werteverteilung von bebauten, nicht-industriellen Flächen und Siedlungsfreiflächen.

#### 3.3.2 Wechselwirkungen und Zielkonflikte zwischen Einzelindikatoren

Um räumliche und werteszufisiche Wechselwirkungen zwischen den Indikatoren und damit auch der betrachteten Teilsysteme aufzudecken, zeigt Abbildung 3.6 die Korrelationskoeffizienten nach Pearson für die Rohwerte der Indikatorenrafter. Die innere Logik des *UCRI* wird somit sichtbar. Folgende Schlüsse können gezogen werden:

- Fortgeschrittene Klimaanpassungsmaßnahmen (*IN*) scheinen sich stärker auf versiegelte Bereiche (*DUG*) zu konzentrieren.
- Orte mit größeren Distanzen zu Grün- und Freiflächen (*AccG*) sind auch stärker von Hitzestress (*PET*) betroffen.
- Dort, wo eine hohe Vielfalt an Arbeitsmöglichkeiten vorliegt (*SHDI*), ist durch das Fehlen unversiegelter Flächen (*DUG*) auch ein höheres Maß an Hitzestress (*PET*) zu erwarten.
- Die Mehrzahl an vergangenen Feuerwehreinsätzen zwischen den Jahren 2008 und 2018 (*NFO*) schien vornehmlich im urbanen Raum (*DUG*, *SHDI*) lokalisiert gewesen zu sein.
- Bereiche, die schwer für die Feuerwehr zugänglich sind (*AccF*), sind ebenso weit von Krankenhäusern entfernt (*AccH*).

Da *INF*, *ELD*, *SHH* und *SGB* disaggregierte Bevölkerungszahlen auf der identischen Gebäudeinformation darstellen, sind diese mit einer gegenseitig stark positiven Korrelation verbunden, stehen jedoch durch die ungleiche Verteilung der Bevölkerungsgruppen in keinem vollständig linearen Zusammenhang. Bis auf die demographiebezogenen Indikatoren weisen keine Vergleiche Korrelationen höher als  $\pm 0,7$  auf, was die angestrebte Einzigartigkeit jedes Indikators untermauert (Cutter et al., 2010, S. 6). Allerdings werden durch die gesamtstädtische Betrachtung punktuell auftretende Gefahren durch Starkregen überdeckt (*TSFld*, *TTFld* und *HFld*). Diese verlieren unter dem Einfluss der Pixelgesamtheit, welche

### Kapitel 3. Entwicklung und Kartierung eines urbanen Klimaresilienzindex

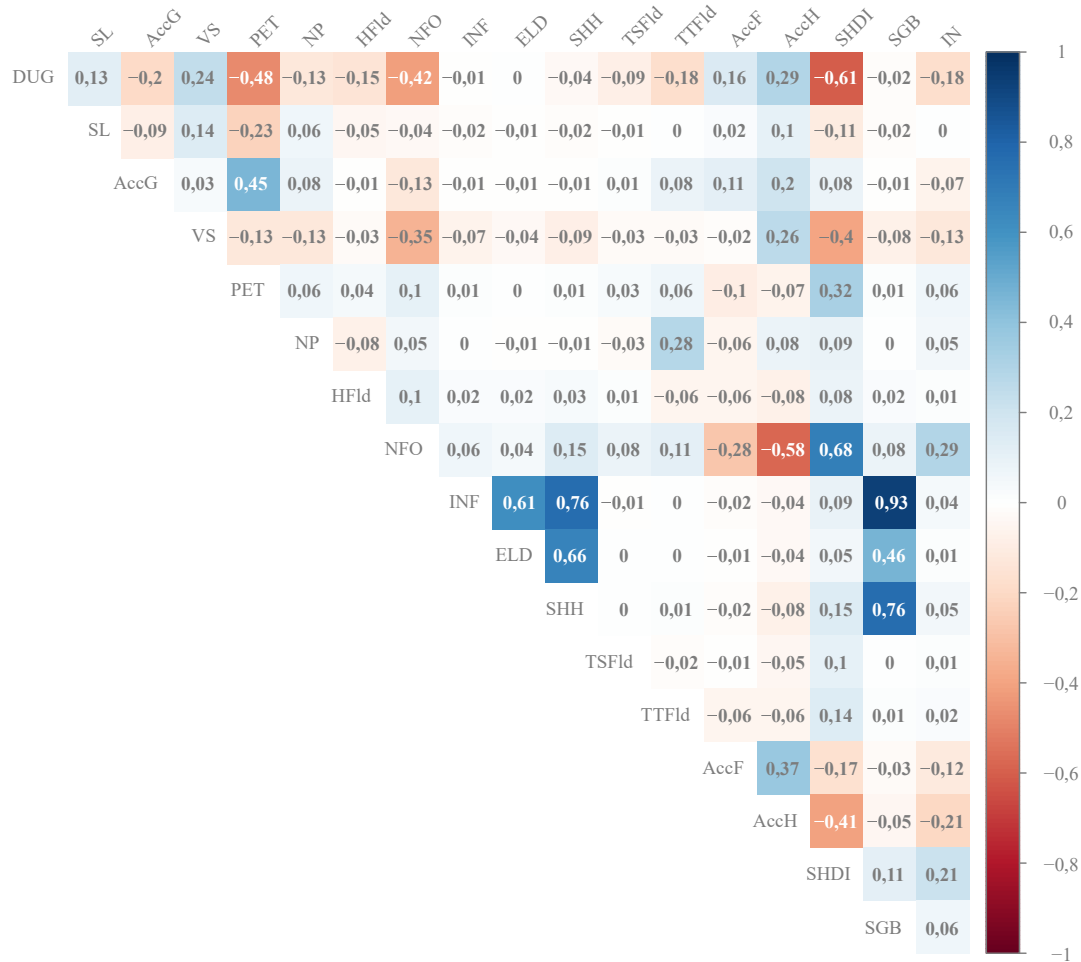
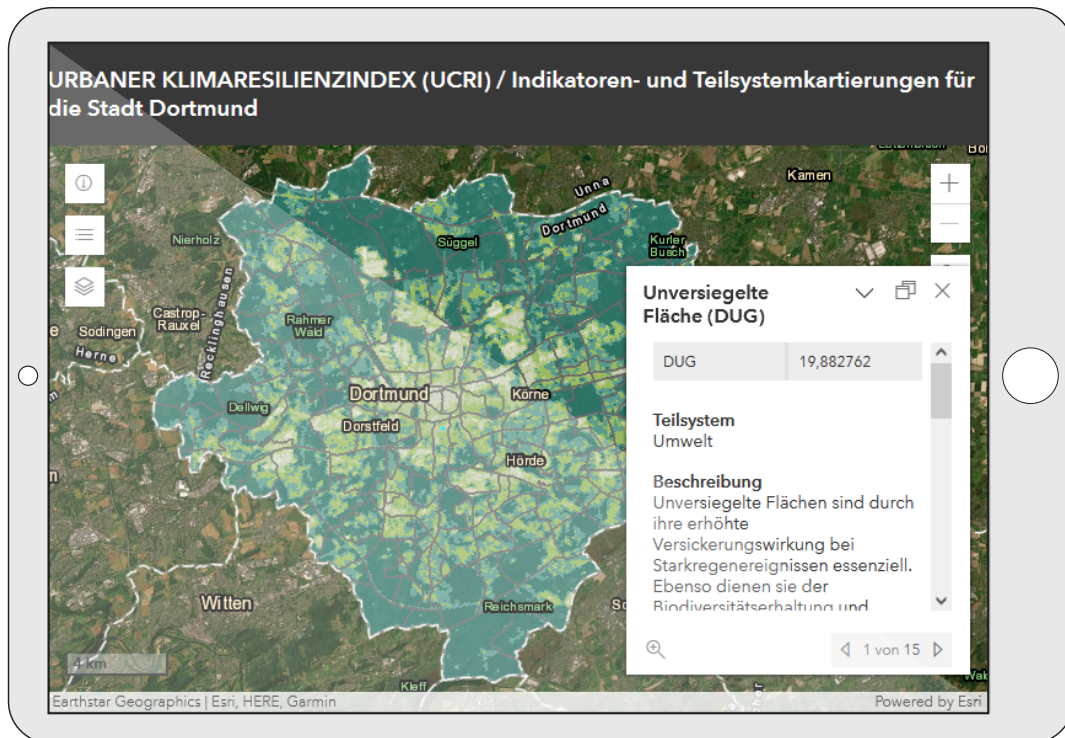


Abbildung 3.6: Pearson-Korrelationsmatrix zwischen allen 18 Indikatorenrastern.

hauptsächlich keine Gefahren widerspiegelt, an Einfluss und zeigen daher auch keine hinreichenden Korrelationen zu anderen Indikatoren auf. Entsprechend muss die gesamtstädtische Kartierung ergänzend für dessen Lokalisierung herangezogen werden. Schlussfolgernd wird deutlich, dass sich bestimmte Indikatoren wechselseitig beeinflussen und damit die Ziele einzelner Teilsysteme im Spannungsfeld stehen, was ebenso von Feldmeyer et al. (2020) auf regionaler Ebene beobachtet werden konnte. Werden unversiegelte Flächen (*DUG*) für die nächtliche Kaltluftproduktion (*VS*) freigehalten, so wirkt sich dies in Form von fehlenden Gewerbeflächen (*SHDI*) negativ auf das wirtschaftliche Teilsystem aus. Diese Interessenskonflikte lassen sich nicht vollständig vermeiden und mögen vorerst als Nachteil interpretiert werden. Nichtsdestoweniger offenbart es die Notwendigkeit, urbane Klimaresilienz teilsystemübergreifend zu denken und spricht für ein Erfordernis neuer Diskurse zur Vereinbarung von Freiraumschutz und Flächenentwicklungen.



**Abbildung 3.7:** Ausschnitt aus der interaktiven Webapplikation für die Stadt Dortmund. Über die Layer-Liste können die Indikatorenkarten und Teilsysteme verglichen werden ([Link zur Webapplikation](#) (nur in der elektronischen Version abrufbar)).

#### 3.3.3 Interaktive Webapplikation

Die Ergebniskartierungen sollen letztlich auch für die Stadtplanung und interessierte Bürger einsehbar sein. Aufgrund der hohen geometrischen Auflösung und Komplexität wurde sich zur verständlichen Vermittlung für eine webbasierte Darstellung auf mehreren Maßstabsebenen entschieden (s. Abbildung 3.7). Die Webapplikation wurde über ArcGIS Online (*Environmental Systems Research Institute (ESRI)*) erstellt und visualisiert alle 18 Indikatorenraster, die fünf Teilsysteme sowie den *UCRI* im Hexagonformat mit einer Kantenlänge von 100 m. Jeder Datensatz ist mit einer Attributtabelle versehen, so dass für jedes Hexagon ein spezifischer Wert je Indikator, Teilsystem und des *UCRI* selbst hinterlegt ist. Jeder Ort ist über die Suchfunktion auf der Karte auffindbar. Mithilfe der an- und ausschaltbaren Layer-Liste können durch den interaktiven Vergleich Synergien und Zielkonflikte zwischen den einzelnen Indikatoren festgestellt werden. Zu jedem Indikator wird in einem Pop-up Menü eine zusammenfassende Beschreibung, der Berechnungsvorgang und die verwendete Datengrundlage aufgezeigt. Die webbasierte Darstellung kann somit ein kommunales Informationssystem zur Auslotung von Handlungsmaßnahmen auf feineren Maßstabsebenen darstellen.

### 3.4 Beantwortung der Forschungsfragen

*FF1.1: Welche Anforderungen ergeben sich an die Operationalisierung von urbaner Klimaresilienz?*

Auf Basis der Literaturzusammenführung bietet die Zuweisung der fünf Teilsysteme *Umwelt, Gesellschaft, Infrastruktur, Wirtschaft, und Institution* zu den beiden Oberkategorien *Robustheit* und *Anpassungsfähigkeit* eine erste Operationalisierungsgrundlage. Beschreibende Kriterien und Indikatoren müssen jedoch für jeden Bezugsraum in Abstimmung mit lokalen Planungsbehörden präzisiert werden. Es gibt demzufolge nicht *die* urbane Klimaresilienz, welche mit einem einzigen Indikatorenset erklärt werden kann. Daran anknüpfend sollten in Anlehnung an Meerow et al. (2016, S. 46) im Vorfeld drei grundlegende Leitfragen beantwortet werden:

- Wessen Resilienz soll gestärkt werden?
- Welche Flächen sind für die Stärkung urbaner Klimaresilienz von besonderem Interesse?
- Welche umwelt- und klimabedingten Stressoren sind relevant?

Dieses anfangs erfragte Meinungsbild der Planungspraxis führte das theoretische Konstrukt von Resilienz in einen passgenauen Zuschnitt für die eigenen Systemcharakteristika Dortmunds. Dieser Vorgang setzt unweigerlich thematische Schwerpunkte und umgeht bewusst die Entwicklung einer allgemeingültigen Resilienzschablone. Das entwickelte Indikatorensystem aus Tabelle 3.1 enthält dabei Merkmale der ingenieurstechnischen, ökologischen und sozial-ökologischen Resilienz (s. Kapitel 2.1). Der *UCRI* ist bislang als Prototyp zu verstehen und kann in Zukunft um weitere Indikatoren ergänzt oder reduziert werden. Beim Einbezug zu vieler Indikatoren entsteht jedoch nicht nur ein erheblicher Mehraufwand in der Regelwerkauflistung, sondern auch ein Verlust an inhaltlicher Nachvollziehbarkeit. Zu wenige Indikatoren würden wiederum die Teilsysteme nicht ausreichend beschreiben. Letzteres betrifft vor allem die unterrepräsentierten Subsysteme *Wirtschaft* und *Institution*, welche sich auf die Anpassungsfähigkeit beziehen und damit niemals vollständig zu quantifizieren sind.

*FF1.2: Wie kann urbane Klimaresilienz gesamtstädtisch kartiert werden?*

In diesem Kapitel wurde anhand einer GIS-basierten Fuzzy-Bewertung ein erstes Resilienzprofil für die Stadt Dortmund vorgestellt. Eine wesentliche Herausforderung bestand darin, dass urbane Klimaresilienz in der heutigen Auffassung einen dynamischen Prozess darstellt, das Konzept für die Kartierung zwecks Zeitstempel der Datengrundlage jedoch in einen statischen Zustand versetzt werden muss. Über die rasterbasierte multikriterielle Bewertung wird die Untersuchung einer zeitlichen Entwicklung der Resilienzindikatoren für

### 3.4. Beantwortung der Forschungsfragen

ein bestimmtes Teilgebiet ermöglicht, um so die Auswirkungen resilienzfördernder Maßnahmen auf alle Teilsysteme langfristig zu beobachten. Die Bewertung sollte entsprechend relational zu den eigenen Gegebenheiten umgesetzt werden und weniger einem normativen Kennwert folgen. Durch die hohe geometrische Auflösung von  $10 \cdot 10$  m ist eine Differenzierung zwischen privatem und öffentlichem Raum geboten und setzt damit neue Perspektiven für die Maßnahmenformulierung. Gleichwohl lassen sich hierdurch Verteilungsunterschiede von klimatischen und umweltbezogenen Stressoren innerhalb der Stadtgrenze räumlich verorten. Gemäß des Fuzzy-Konzepts besteht jedoch kein Anspruch auf eine klar abgrenzbare Bestimmung (nicht-)resilienter Zonen. Aus planerischer Sicht bleibt somit die Frage, inwieweit unscharfe Aussagen der Fuzzy-Bewertung in eindeutig abgrenzbare Planwerke überführt werden können. Es sollten daher auch Indikatorkartierungen mit diskreten Werten herangezogen werden. Für die zu verwendenden Datensätze ergeben sich aus dem zugrundeliegenden Beitrag folgende Prämissen, die bei zukünftigen Resilienzkartierungen berücksichtigt werden sollten:

- Institutionelle Sekundärdaten, welche in einem regelmäßigen Rhythmus aktualisiert werden, sind essenziell, um Resilienzentwicklungen über einen längeren Zeitraum konsistent festzuhalten. Die Bündelung mit nutzergenerierten Geodatensätzen zur Lückenschließung ist von Vorteil.
- Daten müssen von Beginn an in einer ähnlich hohen geometrischen Auflösung für die Gesamtstadt vorliegen.
- Die verwendeten Daten sollten nach Möglichkeit frei verfügbar sein (OKF, 2022) und flächendeckend vorliegen, um einen Transfer einzelner Indikatoren auf vergleichbare Städte und Regionen zu ermöglichen.
- Um Ungleichheiten nachweisen zu können, müssen die Daten im gleichen Zeitraum erhoben sein.

Hierbei sei angemerkt, dass sich die Aussagen ausschließlich auf GIS-basierte und stadtweite Kartierungen beziehen. Weitere Primärdatenerhebungen bleiben in diesem Zusammenhang unerlässlich.





## Kapitel 4

# Mikroskalige Simulation von Feinstaubausbreitungen und Hitzestress<sup>\*</sup>

Ob umwelt- und klimabezogene Gesundheitsbelastungen vorliegen, bemisst sich nicht allein nach objektiven Indikatoren auf städtischer Ebene, sondern auch nach der subjektiven Wahrnehmung und individuellen Anpassungsstrategien auf Quartiersebene (s. Kapitel 2.4). In diesem Kapitel wird daher die thermische Behaglichkeit und die Luftqualität über die erfragte Wahrnehmung von Passanten und der Simulation des Mikroklimas an einem heißen Sommertag in zwei Straßenzügen des Quartiers Dortmund-Marten untersucht. Dabei lieferten ausgewertete Luft- und Satellitenbilder die nötigen räumlichen und materialspezifischen Informationen für eine realistische Modellgenerierung. Anschließend wurden die Simulationsergebnisse mit den Feldmessungen und den Befragungsergebnissen überprüft. Es werden folgende Schlussfolgerungen gezogen: Die mikroklimatische Simulation lieferte zuverlässige Ergebnisse über die Feinstaubverteilung, Lufttemperaturen und -feuchtigkeiten. Je nach Straßenausrichtung, Begrünung und angrenzenden Gebäudehöhen unterscheidet sich die simulierte Luftqualität und Hitzebelastung. Ein thermisches Unbehagen konnte seitens der befragten Passanten bestätigt werden, wobei niemand die Luftqualität als sehr sauber bewertete.

---

<sup>\*</sup>Die Inhalte dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:

Schaefer, M., Ebrahimi Salari, H., Köckler, H., und Thinh, N. X.(2021). Assessing local heat stress and air quality with the use of remote sensing and pedestrian perception in urban microclimate simulations. *Science of The Total Environment*, 794(3):148709

und teilweise auf der Veröffentlichung:

Schaefer, M. (2022). Between vision and action: the predicted effects of co-designed green infrastructure solutions on environmental burdens. *Urban Ecosystems*, 25(6):1805–1824

## 4.1 Motivation

Im letzten Kapitel wurde aufgezeigt, welchen klimatischen und umweltbedingten Problemen die Stadt Dortmund ausgesetzt ist. Dabei steht Dortmund-Marten als Quartier mit dichter Bebauungsstruktur sowie der Nähe zu Verkehrs- und Industrieflächen mehreren gesundheitlichen Belastungen gegenüber (s. Kapitel 3.3.1). Feinstaub (engl.: *Particulate Matter (PM)*) ist ein Schadstoff, der besonders im urbanen Raum erhöht ist und nachweislich die Gesundheit des Menschen beeinträchtigt (Breuste et al., 2016, S. 151). Je feiner der aerodynamische Partikeldurchmesser (z. B.  $2,5 \mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{2,5}$ )), desto einfacher kann er in die Lunge eintreten und zu Atemwegserkrankungen führen. Die Koexposition gegenüber extremer Hitze und Feinstaub kann das Risiko für eine kardiovaskuläre und respiratorische Sterblichkeit zusätzlich verstärken (Eis et al., 2011; Chen et al., 2018). Die synergetische Betrachtung dieser gesundheitsbezogenen Stressoren soll daher in diesem Kapitel auf der Quartiersebene weitergeführt werden. Zu dessen Auswertung reichen Thermal-Satellitendaten zu Wärmeinseln und mesoskalige Ausbreitungsschätzungen zur Feinstaubtransmission jedoch nicht aus. So muss hinsichtlich einer möglichen Mehrfachbelastung überprüft werden, wie sich diese Parameter im Quartierskontext verhalten und subjektiv wahrgenommen werden.

Mikroskalige Simulationen werden zur modellhaften Untersuchung von Kühlungseffekten durch Begrünungsmaßnahmen (Bartesaghi Koc et al., 2018), der Ausbreitung von Luftschadstoffen (Abhijith et al., 2017; Sharmin et al., 2017; Tsoka, 2017), oder zur Abschätzung potenzieller Auswirkungen städtebaulicher Entwicklungsmaßnahmen auf die Umgebung (Koch et al., 2018) eingesetzt. Trotz der voranschreitenden Entwicklungen im Bereich der Modellaufbereitung kann die manuelle Erstellung großer und heterogen gestalteter Untersuchungsräume viel Zeit in Anspruch nehmen. Tatsächlich können spezifische Eingangsparameter für das geometrische Modell (z. B. Dachmaterialien und Vegetationsflächen) mit Fernerkundungstechniken erfasst werden, jedoch ist diese Prozedur bislang auf kommerzielle Hyperspektraldaten beschränkt (Heldens et al., 2017; Masson et al., 2020). Anhand der frei verfügbaren Geodaten in NRW soll hier beispielhaft dessen Nutzen für die Aufbereitung eines geometrischen Modells gezeigt werden. Die Ziele in diesem Kapitel sind folglich:

1. ein Verständnis über die wahrgenommene thermische Behaglichkeit und Luftqualität während eines extremen Hitzeereignisses zu generieren,
2. die kombinatorische Verteilung von urbanen Wärmeinseln und Feinstaub zu verstehen und
3. die Aussagekraft fernerkundungsbasierter Simulationen zum Mikroklima abzuschätzen.

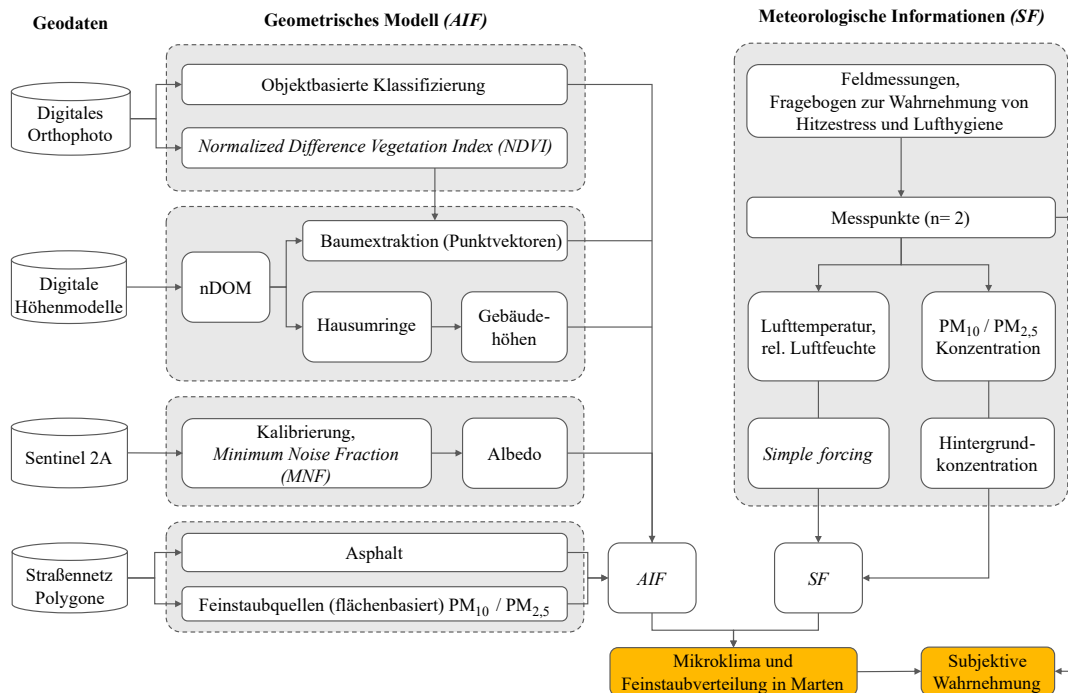


Abbildung 4.1: Ablaufschema zur Generierung von Eingabeparametern und dem Vergleich der Simulationsergebnisse mit gemessenen Felddaten und subjektiven Wahrnehmungen von Passanten. Verändert nach Schaefer et al. (2021, S. 3).

## 4.2 Methodische Vorgehensweise

Für die Fragestellungen in diesem Kapitel wurde die Software ENVI-met<sup>15</sup> verwendet. ENVI-met ist ein mikroskaliges Modell für meteorologische Simulationsanwendungen im dreidimensionalen Raum. Die Software wurde von Prof. Dr. Michael Bruse entwickelt und folgt den Regeln der numerischen Strömungsmechanik (Bruse und Fleer, 1998). Zur Simulationsdurchführung werden zwei Initialisierungsdateien benötigt: Zum einen das geometrische Modell (engl.: *Area Input File (AIF)*), das die Modellierungsumgebung wie z. B. Dachmaterialien, Vegetationstypen oder Bodenbeläge räumlich darstellt. Jedem Objekt werden auf Basis der ENVI-met Datenbank standardmäßige physikalische Parameter zugewiesen. Zum anderen dient die Simulationsdatei (engl.: *Simulation File (SF)*) der Implementierung von Wetterbedingungen zu einem bestimmten Zeitraum (z. B. Windrichtung und -geschwindigkeit, stündliche Lufttemperatur und Luftfeuchte sowie die Oberflächenrauigkeit).

<sup>15</sup>In dieser Dissertation wurden die Versionen 4.4.5 und 5.0.2 eingesetzt. Mehr Informationen zu ENVI-met: <https://envi-met.info/doku.php?id=start>

Die anvisierte Herleitung des dreidimensionalen geometrischen Modells und der ein-dimensionalen Simulationsdatei ist in Abbildung 4.1 schematisch dargestellt. Zur Ergebnisinterpretation werden nachfolgend die wesentlichen Prozesse beschrieben. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Geodaten und der Bearbeitungsschritte findet sich in Schaefer et al. (2021, S. 11).

### 4.2.1 Fernerkundungsbasierte Modellkonfiguration

Die vier Hauptarbeitsschritte zur Ableitung eines geometrischen Modells waren wie folgt:

1. Objektbasierte Klassifizierung eines DOP (generalisiert auf 1 m) und Ableitung von Höheninformationen aus einem normalisierten digitalen Oberflächenmodell (nDOM).
2. Albedo-Informationen wurden zur Identifizierung von Dachmaterialien anhand purer Pixel aus einem kalibrierten Sentinel 2C-Satellitenbild extrahiert (Li et al., 2018; Heiden et al., 2001; Kotthaus et al., 2014).
3. Materialspezifische Parameter wie die spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)], die Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)], der Emissionsgrad  $\epsilon$  [%] und die Dichte [kg/m<sup>2</sup>] wurden auf der Grundlage der berechneten Albedowerte und Literaturdaten in die ENVI-met Datenbank eingepflegt (Clarke, 2001).
4. Die klassifizierten Vektordaten zu Gebäuden, Dachmaterialien, Bäumen, Hecken, Rasen- und Sandflächen sowie Asphalt und Pflasterstein wurden in eine eigene ENVI-met-Datenbank importiert. Über die Datenbankinformationen konnte das geometrische Modell in der ENVI-met MONDE Erweiterung automatisiert erstellt werden.

Im Anschluss an die objektbasierte Bildklassifizierung wurde die Korrektheit der Klassifizierungsergebnisse beurteilt. Für jede der insgesamt elf identifizierten Landbedeckungsklassen wurden 50 Stichprobenpunkte zugewiesen (Congalton, 1991, S. 43). Das hochaufgelöste DOP (10 cm) diente als geeignete Referenzdatenbasis. Über eine Fehlermatrix (engl.: *error matrix*) wurden gängige statistische Parameter wie die Gesamtgenauigkeit ( $O_A$ ), Cohen's Kappa ( $k$ ) sowie die Nutzer- und Herstellergenauigkeit ( $U_A$ ,  $P_A$ ) berechnet.

### 4.2.2 Feldmessungen und Befragung

#### Simulationsdaten

Die Ergebnisse mikroklimatischer Simulationen müssen mit ortsbezogenen Messungen validiert werden, um nicht nur die Zuverlässigkeit der Simulationsergebnisse, sondern auch die Wirkungen abgeleiteter Klimaanpassungsstrategien sachgemäß einschätzen zu können (Crank et al., 2020; Tsoka et al., 2018). Um realitätsnahe Simulationsparameter und eine



Datenbasis: Geobasis NRW, 2020; OpenStreetMap (OSM), 2020

**Abbildung 4.2: Lokalisierung der Messstationen im Untersuchungsraum.**

belastbare Referenzquelle für die Simulationsergebnisse zu garantieren, wurden Probenahmestellen zum Mikroklima und der Luftqualität im Untersuchungsraum installiert. Die Messungen fanden an einem heißen Sommertag<sup>16</sup> am 11. August 2020 zwischen 05:00 und 23:00 Uhr statt. Dabei wurde berücksichtigt, dass die Messpunkte im Kern des geometrischen Modells liegen, um Unregelmäßigkeiten in der Kalkulation im Randbereich des Modells zu vermeiden (s. Abbildung 4.2). Weiterhin sollte aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 3 ein besonderer Fokus auf zwei unterschiedlich orientierte und stark befahrene Straßen gesetzt werden. So wurde an den beiden Straßenzügen *Martener Straße* (West-Ost-Ausrichtung, kaum Straßenbegleitgrün) und *In der Meile* (Süd-Nord-Ausrichtung, viel Straßenbegleitgrün) jeweils ein mobiler Partikelzähler (PCE-PCO2) eingerichtet, welche gemäß den Anforderungen der EU-Luftreinhalt Richtlinie einen Abstand von 25 m zu Ampeln und Verkehrsknotenpunkten einhielten (Luftqualitätsrichtlinie, 2008, S. 19). Die Messinstrumente zeichneten  $PM_{2,5-10}$ -Konzentrationen in  $\mu g/m^3$  mit 17 Einstundenmittelwerten aus 60 Sekunden-Intervallen in einer konstanten Höhe von 1,5 m über dem Boden (Atemzone) auf. Lufttemperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit wurden parallel mit denselben Geräten und Intervallen gemessen.

<sup>16</sup>Heiße Tage kennzeichnen sich durch maximale Lufttemperaturen von über 30 °C zwischen 06:00 und 18:00 Uhr (DWD, 2023).

**Tabelle 4.1: PET-Schwellenwerte und korrespondierende Stresskategorien.** PET-Werte von 29 bis 35 °C bedeuten z. B., dass eine Person im Freien den gleichen thermischen Zustand erreicht, wie in einem Raum mit einer Lufttemperatur von 29 bis 35 °C. Verändert nach Matzarakis und Amelung (2008, S. 166).

| PET [°C]  | Thermische Wahrnehmung | Stresskategorie       |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| unter 4   | Sehr kalt              | Extremer Kältestress  |
| 4 bis 8   | Kalt                   | Starker Kältestress   |
| 8 bis 13  | Kühl                   | Moderater Kältestress |
| 13 bis 18 | Leicht kühl            | Schwacher Kältestress |
| 18 bis 23 | Neutral                | Kein Wärmestress      |
| 23 bis 29 | Leicht warm            | Schwacher Wärmestress |
| 29 bis 35 | Warm                   | Moderater Wärmestress |
| 35 bis 41 | Heiß                   | Starker Wärmestress   |
| über 41   | Sehr heiß              | Extremer Wärmestress  |

### Befragung und thermische Behaglichkeit

Parallel zur Feldmessung wurden teilstandardisierte Befragungen mit Fußgängern geführt. Der erste Teil des Fragebogens erfasste persönliche Merkmale wie das Geschlecht (weiblich/männlich/divers), das Alter (<18, 18-30, 31-50, 51-70, 71-80, >80 Jahre), die körperliche Aktivität vor dem Interview (Schlafen, Sitzen, Stehen, Gehen, Sport), dem Wohnort und wie häufig die befragte Person an diesem Ort vorbeigeht (täglich, mehrmals pro Woche, einige Male pro Woche, einige Male pro Monat, gelegentlich, zum ersten Mal).

Der zweite Teil bestand aus Fragen zur empfundenen thermischen Behaglichkeit, zur Luftqualität, dem Gesamtwohlbefinden sowie zu den eigenen Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen bei Hitzestress. Die Luftqualitätsbewertungen wurden über eine 5-Punkte-Likert-Skala (5= sehr sauber, 4= eher sauber, 3= neutral, 2= eher schlecht, 1= sehr schlecht) ausgedrückt. Durch eine 7-Punkte-Likert-Skala konnten die Aussagen der Passanten eindeutigen Behaglichkeitsintervallen zugeordnet und somit eine Schnittstelle zwischen simuliertem und wahrgenommenem thermischen Komfort hergestellt werden (s. Tabelle 4.1).

Als vergleichendes Maß wurde die physiologische äquivalente Temperatur (PET) herangezogen, welche in ENVI-met nach Abschluss der Hauptsimulation anhand der berechneten mikroklimatischen Parameter abgeleitet werden kann. Die PET ist eine etablierte biometeorologische Kenngröße zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit des Menschen. Definitionsgemäß repräsentiert sie jene Lufttemperatur im Innenraum, bei der unter ausgeglichener Wärmebilanz die gleichen Hautoberflächen- und Körperkerntemperaturen ( $T_{sk}$ ,  $T_c$ ) vorherrschen, wie im Freien (Höppe, 1984). Sie basiert auf dem Münchner Energiebilanzmodell für Individuen (MEMI) und schließt sowohl meteorologische als auch biophysische Parameter mit ein. Grundlage für das MEMI ist die Wärmehaushaltsgleichung des Menschen (Höppe, 1999, S.71 f.):

$$M + W + R + C + E_D + E_{Re} + E_{Sw} + S = 0 \quad (4.1)$$

Dabei ist  $M$  der Gesamtenergieumsatz (metabolische Rate),  $W$  die physische Leistung,  $R$  die Nettostrahlung des Körpers,  $C$  der konvektive Wärmestrom,  $E_D$  der latente Wärmestrom zur Verdunstung von Wasser (nicht wahrnehmbare Transpiration über die Haut),  $E_{Re}$  die Summe der Wärmeströme zur Erwärmung und Befeuchtung der Atemluft,  $E_{Sw}$  der latente Wärmestrom durch Schweißverdunstung und  $S$  der Wärmespeicherstrom zur Erwärmung oder Kühlung der Körpermasse.  $M$  ist als Repräsentant des Energiegewinns für den Körper immer im positiven Wertebereich angesiedelt.  $W$ ,  $E_D$  und  $E_{Sw}$  stehen für einen Energieverlust und sind daher immer mit einem negativen Vorzeichen verbunden. Alle Wärmeströme werden in Watt [W] angegeben. Sind die zu- und abfließenden Wärmeströme im Gleichgewicht, so wird die Umgebung als behaglich empfunden. Bei einem thermischen Ungleichgewicht muss Wärme zu- oder abgeführt werden, bis sich eine Behaglichkeit einstellt. Die einzelnen Wärmeströme werden direkt von den folgenden meteorologischen Umgebungsparametern beeinflusst:

- Lufttemperatur ( $T_a$ ):  $C$ ,  $E_{Re}$
- Luftfeuchtigkeit (RH):  $E_D$ ,  $E_{Re}$ ,  $E_{Sw}$
- Windgeschwindigkeit ( $v$ ):  $C$ ,  $E_{Sw}$
- Mittlere Strahlungstemperatur ( $T_{mrt}$ ):  $R$

Darüber hinaus sind bestimmte Parameter wie z. B.  $E_{Sw}$  aus Gleichung 4.1 von der Schweißrate ( $S_W$ ) abhängig, welche sich wiederum aus der Bekleidungsoberflächentemperatur ( $T_{cl}$ ), der  $T_{sk}$  sowie der  $T_c$  ableiten lässt. Zur Bestimmung dieser drei Unbekannten müssen zusätzlich die Wärmeflüsse vom Körperkern zur Hautoberfläche ( $F_{csk}$ ) (s. Gleichung 4.2) sowie von der Hautoberfläche zur Bekleidungsoberfläche ( $F_{skcl}$ ) (s. Gleichung 4.3) berechnet werden (Mehra, 2021, S. 61):

$$F_{csk} = V_b \cdot \rho_b \cdot c_b \cdot (T_c - T_{sk}) \quad (4.2)$$

$$F_{skcl} = I_{cl}^{-1} \cdot (T_{sk} - T_{cl}) \quad (4.3)$$

Mit  $V_b$  als Blutfluss vom Körperinneren zur Haut,  $\rho_b$  als Dichte des Bluts [kg/l] und  $c_b$  als spezifische Wärme des Bluts. Der Wärmedurchlasswiderstand der Kleidung [clo] wird mit  $I_{cl}^{-1}$  beschrieben.

Schließlich wird  $S_W$  über die in Gleichung 4.2 und 4.3 ermittelten  $T_c$  und  $T_{sk}$  berechnet und anschließend in die Gleichung 4.1 eingesetzt, um somit die korrespondierende Lufttemperatur zu bestimmen. Die final berechnete PET gleicht der Lufttemperatur und wird ebenso in [°C] angegeben. Wie bereits angedeutet, gilt bei der Bestimmung der PET der Innenraum als Referenzumgebung. Für ein typisches Innenraumklima werden folgende Parameter angenommen (Höppe, 1999, S. 71):  $v = 0,1$  m/s, Wasserdampfdruck = 12 hPa (entspricht 50 % Luftfeuchte bei  $T_a = 20$  °C) und  $T_{mrt} = T_a$ . Für den Vergleich biophysischer Parameter wird

häufig der so genannte „Klima-Michel“ als Norm-Mensch herangezogen (Jendritzky, 1990, S. 32): Dieser ist 35 Jahre alt, hat eine Körpergröße von 1,75 m und wiegt 75 kg. Sein Kleidungswärmedurchlasswiderstand rangiert zwischen 0,5 clo (leichte Sommerkleidung) und 1,75 clo (Winterkleidung). Bei leichter körperlicher Aktivität setzt er 80 W um. Die Besonderheit der PET liegt darin, dass alle Eigenschaften des Klima-Michels individuell angepasst werden können und damit auch auf spezifische Szenarien unter Berücksichtigung (vulnerabler) Bevölkerungsgruppen anwendbar ist. Im Vergleich zu meteorologischen Parametern bietet die PET eine umfassendere Überprüfung des thermischen Komforts und ist deshalb auch ein geeigneter Indikator für die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen (Knaus und Haase, 2020, S. 7).

### 4.2.3 Synthese und Simulation

Nach der fernerkundungsbasierten Ableitung des geometrischen Modells wurden auf Basis des Straßennetzes und dem Luftreinhalteplan für das östliche Ruhrgebiet Feinstaubquellen für den motorisierten Verkehr festgelegt (Bezirksregierung Arnsberg, 2011). Da es in der ENVI-met-Umgebung nicht möglich ist, das stündliche Verkehrsaufkommen (absolute Anzahl der Fahrzeuge pro Simulationsstunde) anzupassen, variierte die vorhergesagte Feinstaubkonzentration in einer vorangegangenen Simulation über den Tagesverlauf nur geringfügig (Schaefer et al., 2021). Um dieses Problem zu beheben, wurden die Emissionsraten für jede Stunde in Microsoft Excel unter Berücksichtigung der Emissionsraten für die gesamte Simulationsdauer neu berechnet. Somit blieb die Summe aller Emissionsraten unverändert, während Schwankungen im Verkehrsaufkommen simuliert werden konnten. Anstelle der standardmäßigen Darstellung von linienbasierten Emissionsquellen [ $\mu\text{g}/\text{m} \cdot \text{s}$ ] simuliert eine flächenbasierte Emissionsquelle [ $\mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ] den *Stop-and-Go-Effekt* im städtischen Straßenverkehr realistischer (Paas und Schneider, 2016; Schaefer, 2022).

Die eigens gemessenen Werte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wurden zu je einem stündlichen Mittelwert zusammengefasst und in die ENVI-met-Simulationsdatei eingepflegt. Die niedrigsten gemessenen Mittelwerte der Feinstaubkonzentrationen dienten als Hintergrundkonzentrationen im Untersuchungsgebiet. Als Kompromiss zwischen Genauigkeit und Berechnungszeit erstreckt sich der Simulationsbereich auf den Kernbereich in Dortmund-Marten, mit einer horizontalen Ausdehnung von  $500 \cdot 500$  m und einer Höhe von 60 m. Alle Modellparameter zur Simulationsdurchführung können aus Tabelle 4.2 abgelesen werden. Zur Bewertung der Vorhersageleistung des Modells wurde der *Squared Correlation Coefficient* ( $R^2$ ), der *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), der *Root Mean Squared Error* (RMSE) sowie der *Index of agreement* ( $d$ ) nach Willmott (1981) zwischen den simulierten und gemessenen Parametern berechnet.



### 4.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

**Tabelle 4.2: Verwendete Eingangsparameter zur Szenariomodellierung in ENVI-met.** Die Berechnungszeit beläuft sich mit den untenstehenden Parametern und unter Verwendung eines AMD Ryzen Threadripper 3970X 32-Kern Prozessors (3.69 GHz) auf ca. 80 Stunden.

| Parameter                                 | Beschreibung                                     | Wert                 |
|---|--|----------------------|
| Modelldimensionierung                     | Anzahl Zellen (x, y, z)                          | 250, 250, 20         |
|   | Zellengröße (x, y, z)                            | 2, 2, 3              |
|   | Anzahl Randzellen (engl.: <i>nesting grids</i> ) | 7                    |
| Simulationseinstellungen                  | Simulierter Tag                                  | 11.08.2020           |
|   | Simulationsstart                                 | 05:00 Uhr            |
|   | Simulationsende                                  | 23:00 Uhr            |
|   | Ausgabeintervall                                 | 60 min.              |
|   | Windgeschwindigkeit bei 10 m über Grund          | 2,2 m/s              |
|   | Dominierende Windrichtung                        | Osten (90°)          |
|   | Oberflächenrauigkeit [m]                         | 0,677                |
|   | Minimum Lufttemperatur (05:00 Uhr)               | 21,1 °C              |
|   | Maximum Lufttemperatur (15:00 Uhr)               | 32,4 °C              |
|   | Minimum rel. Luftfeuchtigkeit (15:00 Uhr)        | 40,80 %              |
| Maximum rel. Luftfeuchtigkeit (07:00 Uhr) | 71,70 %  |                      |
| Feinstaubmodellierung                     | Hintergrundkonzentration PM <sub>10</sub>        | 17 µg/m <sup>3</sup> |
|   | Hintergrundkonzentration PM <sub>2,5</sub>       | 7 µg/m <sup>3</sup>  |
| PET Einstellungen (biomet)                | Alter  | 35 Jahre             |
|   | Größe  | 1,75 m               |
|   | Gewicht  | 75 kg                |
|   | Metabolismus                                     | 80 W                 |
|   | Sommerbekleidung                                 | 0,57 clo             |

## 4.3 Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

### 4.3.1 Klassifikationsgüte

Die niedrigsten Genauigkeitswerte liegen bei den Landbedeckungsklassen Pflasterstein ( $U_A = 67,2\%$ ) und dunklen Dachziegeln ( $U_A = 79,0\%$ ) vor, da beide Klassen ähnliche radiometrische Werte im sichtbaren Wellenlängenbereich aufweisen (s. Tabelle 4.3). Nichtsdestotrotz wurde in dieser Arbeit Pflasterstein als Standard-Bodenmaterial in ENVI-met genutzt, weshalb die geringere Genauigkeit für diese Klasse keinen Einfluss auf die Genauigkeit des geometrischen Modells hatte. Im Gegensatz dazu erzielten Bäume, Hecken und Rasen eine durchgehend hohe Klassifizierungsgenauigkeit von über 90 %. Mit einer Gesamtgenauigkeit von 89,09 % und einem Kappa-Koeffizienten von 0,88 ist das hochaufgelöste DOP eine geeignete Datengrundlage für die objektbasierte Klassifizierung städtischer Gebiete. Die Ergebnisse der objektbasierten Bildklassifizierung und der resultierenden Flächenanteile der Bodenbedeckungsklassen sind in Abbildung 4.3 aufgeführt.

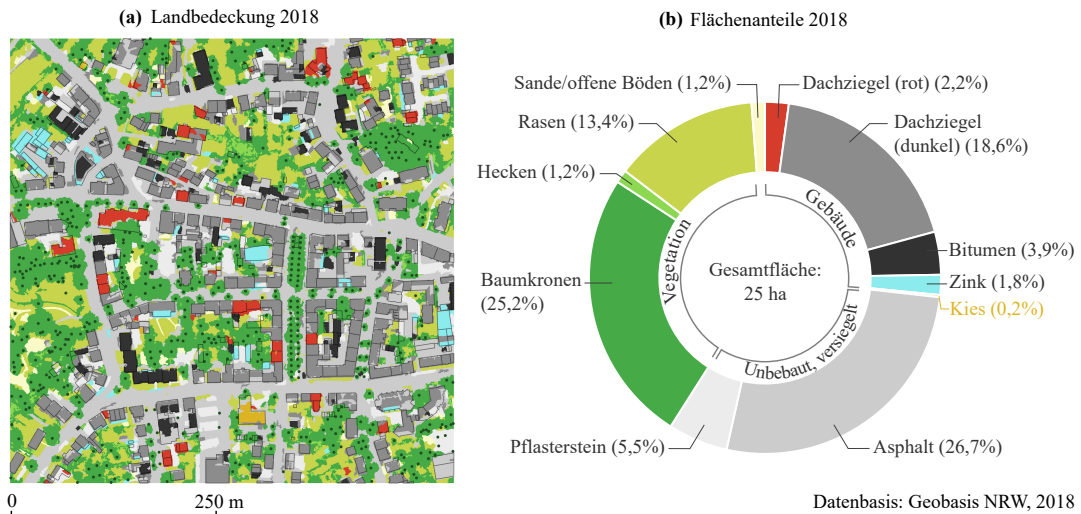
**Tabelle 4.3: Nutzergenauigkeit ( $U_A$ ) und Produzentengenauigkeit ( $P_A$ ) für die objektbasierte Bildklassifizierung im Untersuchungsraum.** Farben repräsentieren den Grad der Genauigkeit (● >80 %, ● ≤ 80 %) bei 50 gesetzten Referenzpunkten je Landbedeckungsklasse. Verändert nach Schaefer et al. (2021, S. 7).

| Landbedeckungsklasse                    | $U_A$    | $P_A$    |
|---|----------|----------|
| <b>Dachmaterialien</b>                  |          |          |
| Dachziegel (rot)                        | 100 % ●  | 94,0 % ● |
| Dachziegel (dunkel)                     | 79,0 % ● | 90,0 % ● |
| Zinkdach                                | 90,7 % ● | 78,0 % ● |
| Bitumen                                 | 85,1 % ● | 80,0 % ● |
| Kiesdach                                | 96,0 % ● | 96,0 % ● |
| <b>Nicht bebaute versiegelte Fläche</b> |          |          |
| Asphalt                                 | 100 % ●  | 80,0 % ● |
| Pflasterstein                           | 67,2 % ● | 90,0 % ● |
| <b>Vegetation</b>                       |          |          |
| Baumkronen                              | 90,2 % ● | 92,0 % ● |
| Hecken                                  | 90,2 % ● | 92,0 % ● |
| Rasen                                   | 100 % ●  | 96,0 % ● |
| <b>Sande/offene Böden</b>               |          |          |
|   | 93,9 % ● | 92,0 % ● |
| Gesamtgenauigkeit ( $O_A$ ): 89,09 %    |          |          |
| Cohen's Kappa: 0,88                     |          |          |

### 4.3.2 Simulationsperformanz und -ergebnisse

Die Validierungsmetriken zeigen unterschiedliche Übereinstimmungen mit den Simulationsergebnissen (s. Tabelle 4.4). Mit einem *MAPE* von 0,14 für  $PM_{10}$  und 0,23 für  $PM_{2,5}$  in der *Martener Straße* sowie 0,15 für  $PM_{10}$  und 0,18 für  $PM_{2,5}$  in der Straße *In der Meile* erfüllte das Simulationsergebnis die Anforderungen an ein „gutes“ Schadstoffausbreitungsmodell (Chang und Hanna, 2004, S. 186). Durch die Anpassungen der Feinstaubquellen (s. Kapitel 4.2.3) konnten die  $PM_{2,5-10}$ -Konzentrationen deutlich realistischer dargestellt werden. Im Vergleich zur *Martener Straße* zeigen die Luftschadstoffvorhersagen in der Straße *In der Meile* jedoch immer noch geringere Übereinstimmungswerte mit den Feldmessungen. Derartige Fehleinschätzungen sind möglicherweise auf die unterschiedlichen Hauptverkehrszeiten und Straßenkonstruktionen zurückzuführen. So erreicht die Luftschadstoffkonzentration an der *Martener Straße* ihre gemessenen Spitzenwerte um 09:00 Uhr und um 18:00 Uhr, während die  $PM_{10}$  Konzentration an der Straße *In der Meile* über einen längeren Zeitraum über  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  liegt (s. Abbildung 4.4). Ebenso sind die gemessenen  $PM_{2,5}$ -Konzentrationen in der *Martener Straße* deutlich höher als in der Straße *In der Meile*, was durch eine andere Verkehrszusammensetzung mit einem höheren Anteil an Schwerlastfahrzeugen und entsprechenden Emissionsfaktoren erklärt werden könnte. Da die *Martener Straße* als Einbahnstraße konzipiert ist, wiederholt sich der markante  $PM_{2,5}$ -Anstieg um 09:00 Uhr ( $45,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) in den Nachmittagsstunden nicht wie in der Straße *In der Meile*, wo zwei Einbahnstraßen durch eine Baumallee getrennt sind. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die vorgestellte Simulation nur den Abgasausstoß von Kraftfahrzeugen berücksichtigt. Somit werden ande-

### 4.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion



**Abbildung 4.3: Landbedeckung, Dachmaterialien und zugehörige Flächenanteile im Untersuchungsraum.** Schattenflächen wurden über die darunter liegende Bodenbedeckung reklassifiziert. Punkte geben den genauen Baumstandort an.

re potenzielle Emittenten wie angrenzende Industrieanlagen, aufgewirbelter Staub, oder der Verkehr auf der außerhalb des Untersuchungsgebiets liegenden Autobahn A45 vom Modell vernachlässigt.

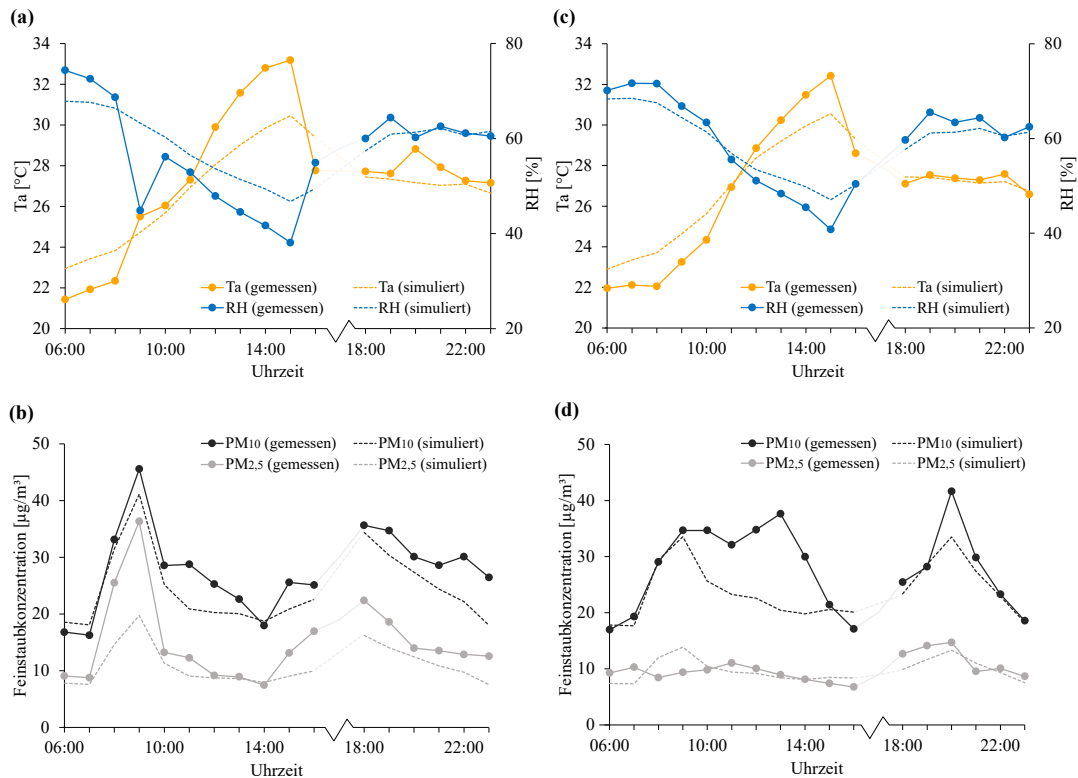
In Verbindung mit den hohen Übereinstimmungen zur Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit (s. Tabelle 4.4 und Abbildung 4.4) können aus den Simulationsergebnissen aussagekräftige Rückschlüsse auf das lokale Mikroklima in Dortmund-Martener gezogen werden. Dennoch sei angemerkt, dass ENVI-met über die geographische Lage des Untersuchungsraums die direkte Sonneneinstrahlung abschätzt, weshalb extreme Temperaturen für das Modell schwer zu simulieren sind. Aus diesem Grund liegen die simulierten Spitzentemperaturen zwischen 13:00 und 15:00 Uhr um bis zu 3 °C unter den Messwerten.

**Tabelle 4.4: Vergleich der stündlichen Simulationsergebnisse mit gemessenen Werten (n= 17) anhand statistischer Genauigkeitsparameter.**

| Parameter         | Martener Straße |      |      |      | In der Meile   |      |      |      |
|-------------------|-----------------|------|------|------|----------------|------|------|------|
|                   | R <sup>2</sup>  | RMSE | MAPE | d    | R <sup>2</sup> | RMSE | MAPE | d    |
| T <sub>a</sub>    | 0,90            | 1,54 | 0,05 | 0,92 | 0,97           | 0,99 | 0,03 | 0,97 |
| RH                | 0,69            | 6,44 | 0,10 | 0,84 | 0,97           | 2,96 | 0,05 | 0,96 |
| PM <sub>10</sub>  | 0,82            | 4,49 | 0,14 | 0,89 | 0,44           | 6,86 | 0,15 | 0,67 |
| PM <sub>2,5</sub> | 0,87            | 5,85 | 0,23 | 0,72 | 0,24           | 2,07 | 0,18 | 0,65 |

Legende: T<sub>a</sub>—Lufttemperatur, RH—Relative Luftfeuchte, PM<sub>2,5-10</sub>—Feinstaubpartikel, R<sup>2</sup>—Squared correlation coefficient, RMSE—Root Mean Squared Error, MAPE—Mean Absolute Percentage Error, d—Index of agreement.

## Kapitel 4. Mikroskalige Simulation von Feinstaubausbreitungen und Hitzestress



**Abbildung 4.4: Tagesverlauf der simulierten und gemessenen mikroklimatischen und lufthygienischen Parameter.** Die Werte beziehen sich auf die Messstationen *Martener Straße* a) bis b) und *In der Meile* c) bis d) am 11. August 2020 auf 1,5 m Höhe über Grund. Für 17:00 Uhr liegen keine Messwerte vor.

Wie in Abbildung 4.5 dargestellt, sind unbeschattete Bereiche mit fehlender Vegetation gegenüber der Sonneneinstrahlung stark exponiert. Insbesondere scheint das Zusammenspiel der Straßenausrichtung und der angrenzenden Gebäudehöhen den thermischen Komfort zusätzlich zu beeinflussen: So weisen Straßenzüge mit Nord-Süd- und Ost-West-Ausrichtungen und höheren Gebäuden niedrigere PET-Werte auf, als jene mit einer Ost-West-Ausrichtung und niedrigeren Gebäuden (s. Abbildung 4.5). Dieser Effekt konnte auch in Ali-Toudert und Mayer (2006) beobachtet werden.

Obwohl der westliche Parkbereich fast vollständig mit Vegetation bedeckt ist, liegen die PET-Werte um 15:00 Uhr bei unbeschatteten Grasflächen über 41 °C (extremer Wärmestress). So sind die simulierten Lufttemperaturunterschiede im Untersuchungsraum um 15:00 Uhr mit ca. 2 °C verhältnismäßig klein, die Unterschiede in der thermischen Belastung jedoch weitaus größer (Schaefer et al., 2021, S. 9). Anhand dieses Beispiels wird ersichtlich, dass öffentliche Parks mit wenig beschatteten Flächen zwar niedrigere Lufttemperaturen aufweisen als unbeschattete versiegelte Flächen, jedoch mit Blick auf potenziellen Wärmestress hinsichtlich ihrer Qualität kritisch zu hinterfragen sind.

### 4.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

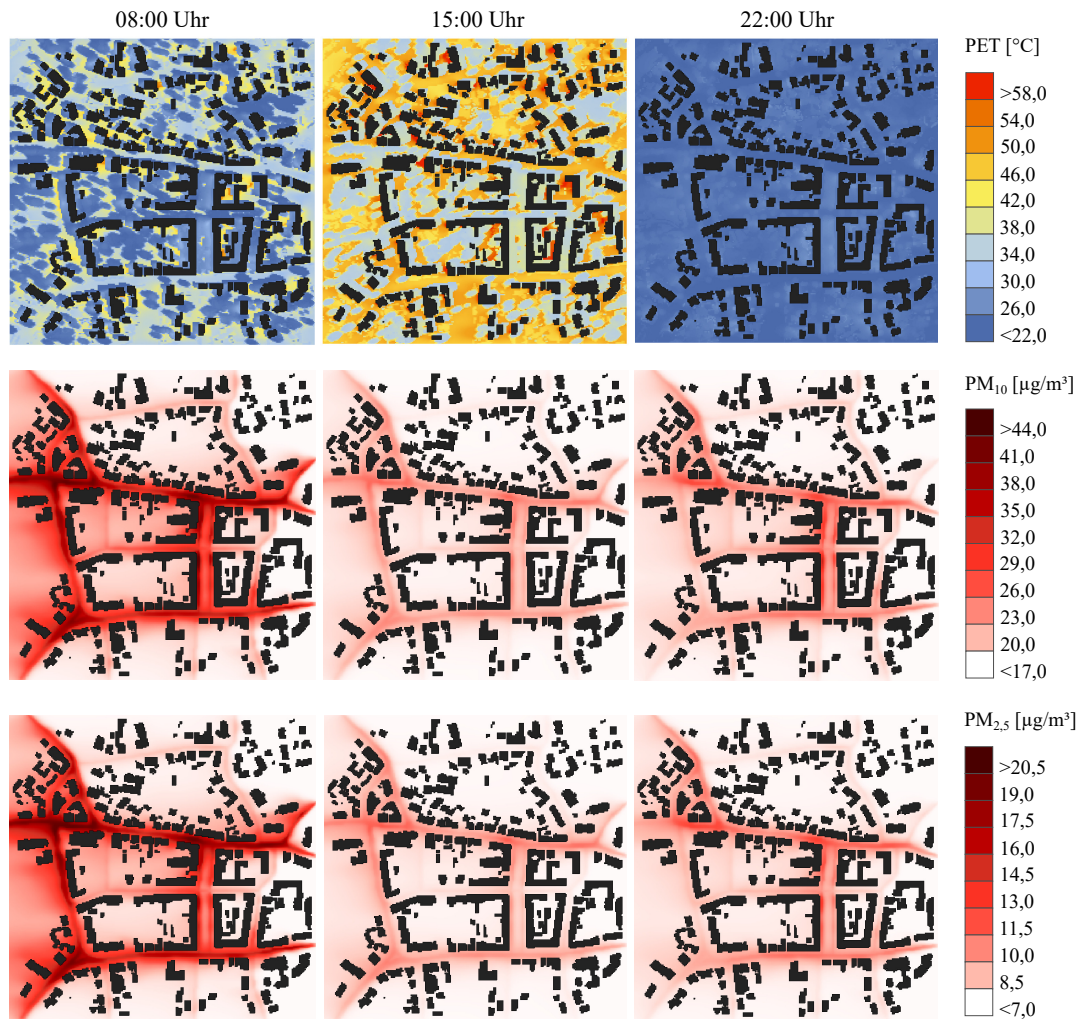
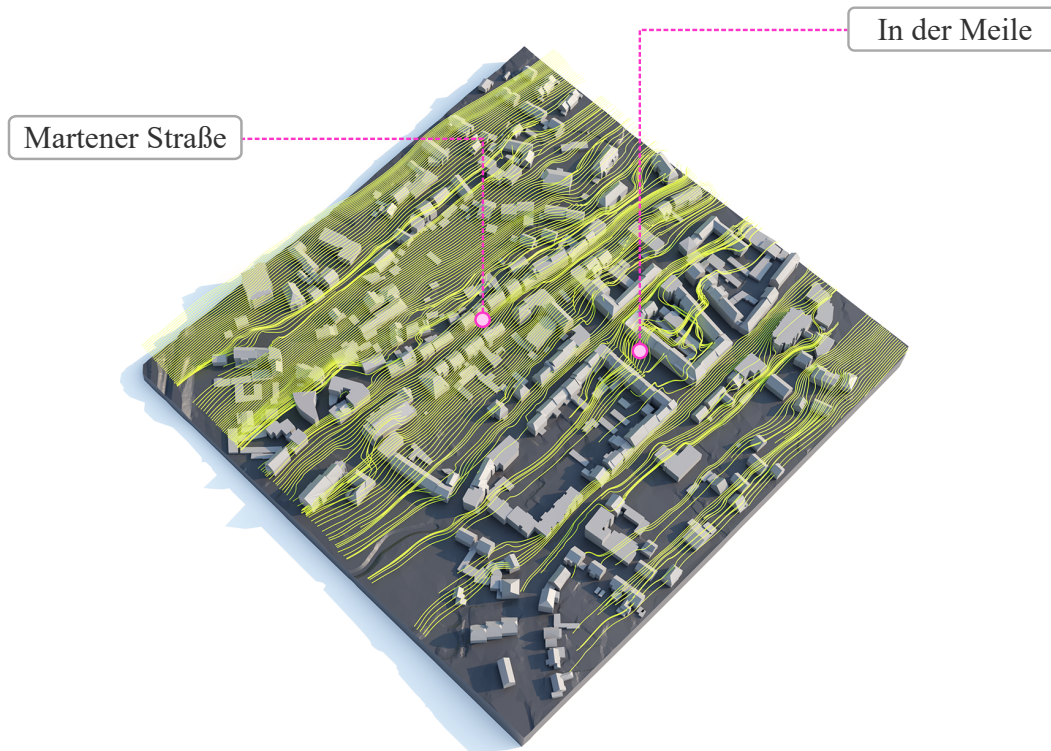


Abbildung 4.5: Simulierte Feinstaubkonzentrationen und PET-Werte zu drei verschiedenen Tageszeitpunkten am 11. August 2020 auf 1,5 m Höhe.

Es wird deutlich, dass die dichte Bebauung von Dortmund-Marten die Diffusion von Luftschadstoffen einschränkt, was besonders im Straßenzug *In der Meile* auffällt. Aufgrund der östlichen Windrichtung und der Nord-Süd-Ausrichtung der Straße reduzieren die Gebäude die Windgeschwindigkeit (s. Abbildung 4.6). Darüber hinaus wirken die mittig angeordneten Straßenbäume als ein natürlicher Tunnel für die Feinstaubansammlung. Dieser abschirmende Effekt konnte auch in anderen Simulationen mit vergleichbaren Untersuchungsräumen nachgewiesen werden (Abhijith et al., 2017; Tsoka, 2017). Das westliche Parkgebiet ist überwiegend durch Rasenflächen und einzelne Bäume gekennzeichnet, die keine undurchlässigen Hindernisse für die Partikelanreicherung darstellen. Tatsächlich ist dieser Bereich zum Teil den Emissionen der angrenzenden Verkehrsstraße ausgesetzt, was ein häufig beobachtetes Phänomen in städtischen Parkflächen darstellt (Paas et al., 2016). Andererseits ist zu erwarten, dass die Feinstaubexposition analog zur Windrichtung zu- oder abnehmen wird.

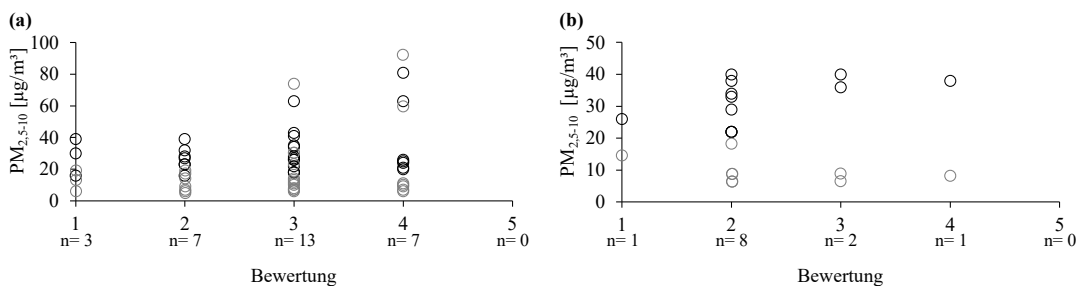


**Abbildung 4.6: Windvektoren in Dortmund-Marten um 15:00 Uhr bei östlicher Windrichtung.** Das Windfeld innerhalb des Straßenzugs *In der Meile* wird durch die Blockrandbebauung gestört. Datenbasis: Geobasis NRW, 2020.

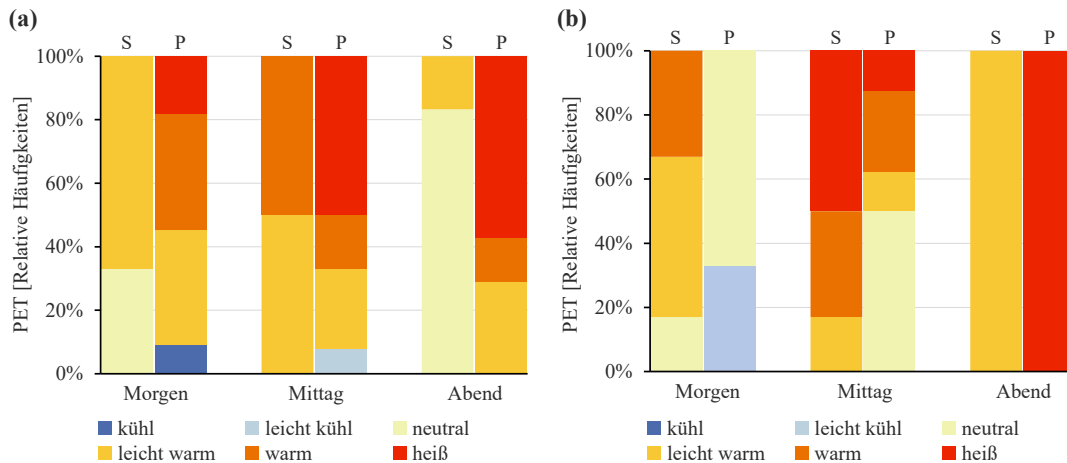
### 4.3.3 Subjektiv wahrgenommene Hitze- und Feinstaubbelastung

Insgesamt haben 42 Passanten an der Umfrage teilgenommen. Deskriptive Statistiken zu den Antworten finden sich in Schaefer et al. (2021, S. 11 f.). Zunächst konnte festgestellt werden, dass sich keine älteren Menschen (über 80 Jahre) während des heißen Sommertags im Freien aufgehalten haben, was eine Verzerrung in Richtung hitzeresistenter Fußgänger mit sich bringen könnte. Sportliche Aktivitäten wurden über den gesamten Befragungszeitraum nicht beobachtet. Zwei Drittel der Befragten (66,2 %) leben in Dortmund-Martener; 71,4 % frequentieren die *Martener Straße* und *In der Meile* täglich, was eine gewisse Vertrautheit mit den klimatischen Bedingungen beider Standorte vermuten lässt. Die Befragungsdaten zeigen, dass thermische und lufthygienische Gegebenheiten in Zeit und Raum unterschiedlich wahrgenommen werden. Interessanterweise war die Bewertung zur Luftqualität und dem Thermalkomfort unabhängig des Alters, Geschlechts und Wohnorts ähnlich verteilt.

Eine deutliche Exposition gegenüber hohen Feinstaubkonzentrationen konnte nicht nur modelliert, sondern auch objektiv gemessen werden. Nach der EU-Richtlinie 2008/50/EG dürfen  $PM_{10}$ -Konzentrationen von  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  im 24-Stunden-Mittel nicht öfter als 35mal im Kalenderjahr überschritten werden (Luftqualitätsrichtlinie, 2008, S. 31). Für  $PM_{2,5}$  existiert noch kein einzuhaltender 24-Stunden-Mittelwert; im Jahresmittel gilt es die  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  Grenze nicht zu überschreiten. Obwohl die faktischen Messungen an der *Martener Straße* diese Grenzwerte stellenweise überschritten, nahmen zwei Personen eine eher saubere Luftqualität wahr (s. Abbildung 4.7 a)). Im Gegensatz dazu stimmte keiner der Befragten für eine sehr saubere Luftqualität. Aufgrund der geringen und unausgewogenen Teilnehmeranzahl ist kein klarer Trend in Richtung einer sauberen oder schlechten Luftqualitätsbewertung erkennbar. Eine durchgehend negative Einstellung zur Luftqualität konnte jedoch nicht festgestellt werden. Unter der Berücksichtigung, dass 35,7 % der Luftqualität gegenüber neutral gestimmt waren, können diese Bewertungen vermutlich auf eine erschwerte sensorische Wahrnehmung, oder auf intuitive Erinnerungen an (gute oder schlechte) Luftbedingungen aus der Vergangenheit zurückzuführen sein. Im Vergleich zu den Simulationsergebnissen wird deut-



**Abbildung 4.7: Gemessene  $PM_{2,5-10}$ -Konzentrationen im Vergleich zu individuellen Luftqualitätsbewertungen.** Die Bewertung der Passanten wurde für die Stationen a) *Martener Straße* und b) *In der Meile* über eine 5-Punkte-Likert-Skala ausgedrückt (5= sehr sauber, 4= eher sauber, 3= neutral, 2= eher schlecht, 1= sehr schlecht).



**Abbildung 4.8: Simulierter und subjektiv wahrgenommener Thermalkomfort.** Zeitlicher Verlauf der simulierten thermischen Behaglichkeit in 1,5 m Höhe (S) und der subjektiven Wahrnehmung der Passanten (P) an den Messstationen a) *Martener Straße* und b) *In der Meile*. Die Werte sind auf den Morgen (06:00 bis 11:00 Uhr), Mittag (12:00 bis 17:00 Uhr) und Abend (18:00 bis 23:00 Uhr) aufgeteilt. Verändert nach Schaefer et al. (2021, S. 13).

lich, dass die Teilnehmer an der *Martener Straße* über den Tag verteilt mehr thermisches Unbehagen empfanden (s. Abbildung 4.8). Umgekehrt empfanden die Befragten am Standort *In der Meile* in den Morgen- und Mittagsstunden weniger thermisches Unbehagen als vom Modell angenommen. Dementsprechend könnte die Allee in *In der Meile* einen bedeutenden Beitrag zur Kühlung leisten als prognostiziert wurde, während die Windgeschwindigkeit nicht der treibende Faktor für die thermische Behaglichkeit der Befragten zu sein scheint (s. Kapitel 4.2.2): Aufgrund der Gebäudeausrichtung und der östlichen Windrichtung sind die Windgeschwindigkeiten in *In der Meile* deutlich geringer als bei der *Martener Straße*. Obwohl 15 Befragte (36 %) angaben, dass sie keine Anpassungsstrategien gegen extreme Hitze anwenden, empfanden neun dieser Personen einen moderaten bis starken Wärmestress (Schaefer et al., 2021, S. 11).

## 4.4 Beantwortung der Forschungsfragen

### FF2.1: Welches Potenzial bietet die Implementierung von GIS- und Fernerkundungsdaten in mikroklimatischen Simulationen?

Der vorgestellte fernerkundungsbasierte Ansatz zeigte das Potenzial auf, aus einigen wenigen offenen Geodatenätzen realitätsnahe und aktuelle Eingabeparameter für mikroklimatische Simulationen abzuleiten. Ein Vorteil, der auf der Hand liegt, ist die Zeitersparnis und Kosteneffizienz der computergestützten Merkmalsextraktion im Gegensatz zur manuellen Bearbeitung großer Untersuchungsgebiete. Die Informationsableitung aus dem zeitlich



#### 4.4. Beantwortung der Forschungsfragen

hoch aufgelösten Sentinel 2 Satellitenbild (fünf bis zehn Tage Revisite) in Kombination mit einem Luftbild hoher räumlicher Auflösung (10 cm) brachte zufriedenstellende Simulationsergebnisse. Weiterhin wird durch die Verwendung aktueller Fernerkundungsdaten die witterungsbedingte Materialabnutzung mit einem veränderten Reflexionsgrad berücksichtigt. Die Detektion und Implementierung von Dachmaterialien ermöglicht zudem eine vergleichende Simulation zur Abschätzung der Kühlwirkung von Dachbegrünungen. Die elf identifizierten Bodenbedeckungsklassen lieferten darüber hinaus einen nützlichen Datensatz zur individuellen Bestimmung der Oberflächenrauigkeit, was eine dem Quartier entsprechende Modellierung des Windfeldes begünstigt. Durch die Verwendung des landesweit frei verfügbaren institutionellen Geodatensatzes ist das methodische Vorgehen auch auf die Gesamtstadt und andere Städte in NRW übertragbar.

*FF2.2: Wie beeinflussen bauliche und natürliche Elemente die thermische Behaglichkeit und die Feinstaubverteilung in Dortmund-Martener?*

Die mikroklimatischen Simulationen und Feldmessungen konnten demonstrieren, dass städtische Quartiere –insbesondere Teile dessen– von mehreren Umweltbelastungen gleichzeitig betroffen sein können. Es zeigte sich ein deutlicher Einfluss der Baustruktur, der Vegetation und der Straßenausrichtung auf die simulierte thermische Behaglichkeit und die Feinstaubakkumulation. Urbane Wärmeinseln sind im Untersuchungsraum lokal vorzufinden, logischerweise dort, wo keine kühlende Vegetation und vorwiegend künstliche Oberflächenmaterialien wie Asphalt und Pflasterstein mit einer hohen Wärmespeicherkapazität vorliegen. Süd-Nord-orientierte Straßenzüge können über den Tag mehr Schatten spenden, als niedrig bebaute Ost-West-orientierte Straßenzüge, deren Nordseite der Sonneneinstrahlung permanent ausgesetzt ist. Die subjektive Wahrnehmung der Passanten wich zwar stellenweise von den Simulationsergebnissen ab, insgesamt konnte seitens der Befragten jedoch ebenso ein klarer Trend zu einem thermischen Unbehagen in der *Martener Straße* bestätigt werden. Bei einer östlichen Windrichtung erlauben Ost-West-orientierte Straßenzüge dagegen den Abtrag von Feinstaubemissionen, während Süd-Nord-orientierte Straßenzüge mit geschlossener Bebauungsumgebung das Windfeld abschirmen und sich so vermehrt Feinstaub ansammelt. Zusätzliches, dichtes Straßenbegleitgrün verstärkt und verlängert diesen Effekt bei einem entsprechend schmalen Straßenquerschnitt. Anders als bei der Einschätzung zum Thermalkomfort konnte über die Befragung keine klare Aussage zu einer kollektiv wahrgenommenen Feinstaubbelastung gezogen werden.



## Kapitel 5

# Koproduktion und potenzielle Wirkung von Begrünungsmaßnahmen<sup>\*</sup>

Städtische Grünflächen sind sowohl aus gesundheitlicher wie klimatischer Perspektive förderlich und können bei entsprechend sorgfältiger Planung beiden Anforderungen gerecht werden (Meerow et al., 2021). Das theoretische und praktische Wissen um die Auswirkungen spezifischer Anpassungsmaßnahmen ist dahingehend entscheidend für eine tragfähige Umsetzung. In diesem Kapitel steht daher die transdisziplinäre Erarbeitung und potenzielle Wirkung von Begrünungsmaßnahmen auf der Quartiersebene im Mittelpunkt. Im Rahmen eines kooperativen Workshops zwischen Wissenschaftlern und Stadtplanern wurden ausgewählte Begrünungsmaßnahmen in Dortmund-Marten verortet. Die Ideen des Workshops wurden in ein Szenario für einen heißen Sommertag integriert, um die Auswirkungen der abgeleiteten Maßnahmen auf den thermischen Komfort und die Luftqualität zu quantifizieren. Um die Erfahrungen aus der kooperativen Zusammenarbeit festzuhalten, wurden die Standpunkte der Wissenschaftler und Verwaltungsmitarbeiter zu Lerneffekten, der Wissensintegration und Anforderungen an Begrünungsmaßnahmen in einer Online-Umfrage zusammengefasst. Während die vorgeschlagenen Begrünungsmaßnahmen den Thermalkomfort positiv beeinflussen könnten, würden zusätzliche Baumreihenbepflanzungen bei leichtem Ostwind eine lokale Erhöhung der PM<sub>2,5-10</sub>-Konzentrationen mit sich bringen. Die Reflexionen über den Workshop zeigen, dass die Lerneffekte bei den teilnehmenden Forschern höher waren als bei den Planungspraktikern, wohingegen sich die Integration des individuellen Fachwissens während des Workshops für die Forschenden schwieriger gestaltete.

---

<sup>\*</sup>Die Inhalte dieses Kapitels basieren auf der Veröffentlichung:

Schaefer, M. (2022). Between vision and action: the predicted effects of co-designed green infrastructure solutions on environmental burdens. *Urban Ecosystems*, 25(6):1805–1824

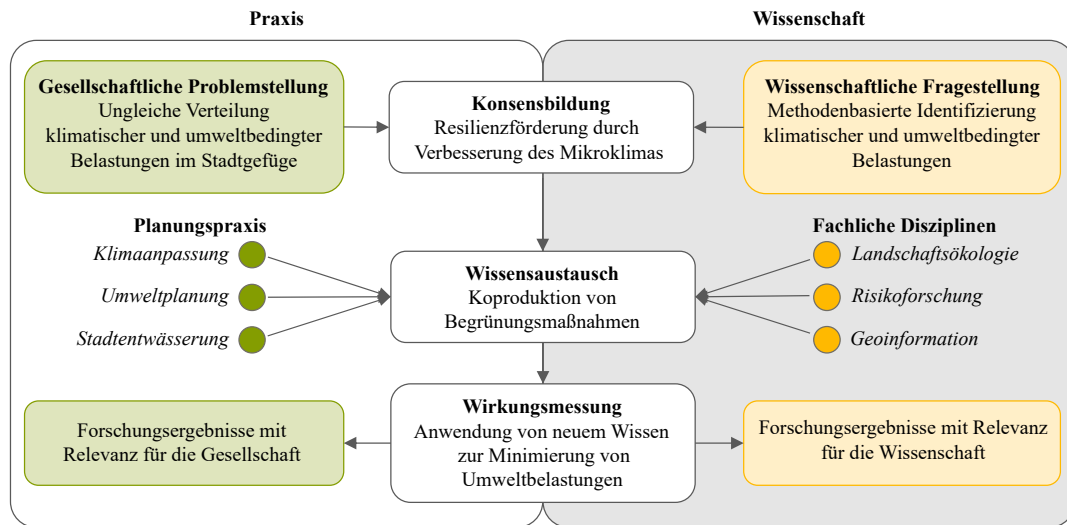
## **5.1 Motivation**

Die Motivation für das vorgestellte Vorhaben begründet sich aus zwei Kerngedanken:

1. Die Ergebnisse aus Kapitel 4 deuten darauf hin, dass Begrünungsmaßnahmen dazu beitragen könnten, tagsüber Hitzestress im Freien zu reduzieren. Potenzielle Umweltbelastungen und -ressourcen, welche durch planerische Interventionen entstehen, sollten dahingehend im Vorfeld evaluiert werden. Die Konfrontation mit Szenarien vor der eigentlichen Planung ist zur Abschätzung möglicher mikroklimatischer und umweltbezogener Folgewirkungen ein geeignetes Mittel. Um Wechselwirkungen aufzudecken, soll sich daher nicht nur auf einen Stressor beschränkt, sondern sowohl die Wärme- als auch die Feinstaubbelastung betrachtet werden.
2. Für eine effektive Umsetzung sind umweltplanerische Interventionen auf den Kontext des Quartiers abzustimmen. Im Zeichen einer transdisziplinären Arbeitsweise kann die Kooperation zwischen Wissenschaftlern und der Planungspraxis sinnvoll sein, um evidenzbasierte Lösungen für die ansässige Bevölkerung auszuloten. Um zu bestimmen, ob die Zusammenarbeit effektiv war, sollten neben der wissenschaftlichen Ergebnisprüfung ebenfalls Stärken und Schwächen des kooperativen Prozesses zur Ideenfindung festgehalten werden. Auf diese Weise kann differenziert werden, welche Faktoren zu einem erfolgreichen Prozess beitragen und wo weiterer Kommunikationsbedarf besteht.

## **5.2 Methodische Vorgehensweise**

Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, orientiert sich die methodische Vorgehensweise an den charakteristischen Merkmalen der transdisziplinären Forschungsweise (s. Kapitel 2.3). Die Konsensbildung fußt mitunter auf vorangegangenen Partizipationsformaten im Quartier Dortmund-Marten, der stadtweiten Analyse zu urbaner Klimaresilienz (s. Kapitel 3) und einem abschließenden Workshop mit Planungspraktikern, Bürgern und Wissenschaftlern zur gemeinsamen Vereinbarung über zentrale sozial-ökologische Herausforderungen. Die gemeinsame Konsenserklärung wurde im Rahmen von ZUKUR für die Regions-, Stadt- und Quartiersebene erklärt (s. Kapitel 1.2). Auf der Quartiersebene gab sie damit den Anstoß zu einem kooperativen Workshop zwischen Wissenschaftlern und Planungspraktikern des ZUKUR-Projekts. Hierdurch sollte ein Wissenszuwachs in beide Richtungen generiert und mögliche Maßnahmen zur Reduktion klimatischer und umweltbedingter Gesundheitsbelastungen in Dortmund-Marten ausgehandelt werden. Dieses Kapitel richtet den Fokus auf den Wissensaustausch und die Wirkungsmessung, deren Inhalte in den nächsten Unterkapiteln erläutert werden.



**Abbildung 5.1: Schematischer Überblick über die transdisziplinäre Forschung in Dortmund-Marten.** Der Prozess wurde von unterschiedlichen Praxisakteuren und wissenschaftlichen Mitarbeitern der TU Dortmund getragen. Im Rahmen der Konsensbildung wurde ebenso spezifisches Wissen der Martener Zivilbevölkerung herangezogen.

### 5.2.1 Zukunftswerkstatt »Grünes Marten«

Im Rahmen des ZUKUR-Projekts fand am 2. März 2020 ein moderierter Workshop zur Identifizierung und Lokalisierung konkreter Handlungsmaßnahmen in der Martener Nachbarschaftswerkstatt »Meilenstein« statt. Die Teilnehmer wiesen unterschiedliche Expertisen auf und setzten sich aus sechs Wissenschaftlern (einschließlich des Autors) der TU Dortmund sowie fünf kommunalen Vertretern der Stadt Dortmund zusammen.

Zu Beginn des Workshops wurden aktuelle sozial-ökologische Herausforderungen in Dortmund-Marten von den anwesenden Planungspraktikern und dem ZUKUR-Forschungsteam vorgestellt. Nach den Präsentationen und der Erläuterung der Ziele der Sitzung wurden alle Teilnehmer in zwei gemischte Arbeitsgruppen aufgeteilt, um Strategien und geeignete Maßnahmen unter Berücksichtigung der Klimaanpassung und der öffentlichen Gesundheit zu entwickeln. Mithilfe ausgedruckter Indikatorenkarten aus Schaefer et al. (2020) wurden von beiden Arbeitsgruppen erste Maßnahmen skizziert (s. Abbildung 5.2). Während der Gruppenarbeit wurde deutlich, dass der Raum für Begrünungsmaßnahmen in Dortmund-Marten begrenzt ist, wodurch sich der Schwerpunkt auf die Verbindung und Qualifizierung bestehender Grünelemente mit dem Ziel eines vielfältigen Nutzens für die Bewohner verlagerte. Eine weitere Voraussetzung war, dass die Interventionen für alle Bürger in Dortmund-Marten fußläufig erreichbar und öffentlich zugänglich sein müssen. Nach der Gruppenarbeitsphase wurden die erarbeiteten Argumente zusammengeführt. Beide Arbeitsgruppen betonten einen deutlichen Handlungsbedarf für die *Martener Straße*, was vor allem mit dem Fehlen von Schattenflächen und einem hohen Verkehrsaufkommen zusammen-

## Kapitel 5. Koproduktion und potenzielle Wirkung von Begrünungsmaßnahmen



**Abbildung 5.2: Einblicke in die Zukunftswerkstatt »Grünes Marten«.** Für das Martener Zentrum wurden zusätzliche Bäume entlang der Martener Straße, Entsiegelungsmaßnahmen am Schulmuseum und extensive Dachbegrünungen vorgeschlagen. Verändert nach Schaefer (2022, S. 1810).

hängt. Ein weiterer Schwerpunkt war die ungenutzte versiegelte Fläche am Schulmuseum nördlich der *Martener Straße*. Durch Entsiegelungsmaßnahmen sollten neue Begegnungsmöglichkeiten geschaffen und sinnvoll mit dem Bildungsangebot des Museums verknüpft werden. Als Endergebnis der Zukunftswerkstatt wurden Entsiegelungsmaßnahmen, Dachbegrünungen und Baumreihenbepflanzungen im Untersuchungsgebiet als Entwurf herausgestellt (s. Abbildung 5.2).

### 5.2.2 Begrünungsszenarien

Die Ideen aus der Zukunftswerkstatt bildeten den Ausgangspunkt zur Untersuchung auf ihre mikroklimatischen Auswirkungen auf die Umgebung. In diesem Zusammenhang galt es herauszufinden, ob die herausgearbeiteten Maßnahmen auch zum Ziel der Reduktion umwelt- und klimabedingter Stressoren beitragen.

Zunächst wurden die aufgezeigten Maßnahmenskizzen aus Abbildung 5.2 im geometrischen ENVI-met Modell digitalisiert. Alle extensiven Dachbegrünungen wurden auf geeigneten Dächern mit einer Mindestfläche von 20 m<sup>2</sup> nach dem Gründachkataster des RVR eingearbeitet (RVR, 2020). Die Gesamtfläche aller begrünten Dächer entspricht 10.669 m<sup>2</sup>. Die Begrünungsart war Gras mit einer Höhe von 30 cm und einer Substratschicht von 20 cm.

Um eine Verbindung mit den Alleebäumen entlang der Straße *In der Meile* zu schaffen, wurden auf den unbeschatteten Gehwegen entlang der *Martener Straße* 28 Laubbäume im Abstand von 8 m eingearbeitet, welche die gleiche Höhe (15 m) und Kronenbreite (9 m) besitzen wie die bestehenden Bäume. Der Abstand von 8 m (bei einer geometrischen Auflösung von 2 m sind 9 m nicht möglich) wurde gewählt, weil eine optimale Kühlung auf Fußgängerniveau erreicht wird, wenn der Abstand zwischen den Bäumen der Kronenbreite entspricht (Zheng et al., 2018, S. 16). Durch diese Anordnung wurden unnötige Schattenüberschneidungen vermieden.

Zusätzlich wurde in der Modellumgebung eine Rasenfläche von 1.600 m<sup>2</sup> unterhalb der dichten Baumgruppe des Martener Schulmuseums angelegt, um eine Erholungsnutzung zu ermöglichen.

Das Begrünungsszenario<sup>17</sup> wurde mit den gleichen meteorologischen und zeitlichen Parametern wie das Basisszenario simuliert, um die direkten Auswirkungen während eines extremen Hitzeereignisses zu quantifizieren (s. Tabelle 4.2). Zusätzlich wurde ein weiteres Szenario mit südlicher Windrichtung bei gleicher Windgeschwindigkeit simuliert, um Unterschiede in der Feinstaubverteilung aufzudecken.

---

<sup>17</sup>Die Simulationsergebnisse sind unter <https://zenodo.org/record/6367504> abrufbar.

### 5.2.3 Online-Befragung

Ziel der Umfrage war es, sowohl die Wissensgenerierung, als auch den Wissensaustausch durch die Zukunftswerkstatt bei der Planungspraxis und Wissenschaft zu ermitteln. Zunächst wurden Fragen zu Lerneffekten sowie dem Wissensaustausch gestellt, welche über eine zusätzliche Kommentierfunktion begründet werden durften. Basierend auf den Überlegungen von Matthews et al. (2015, S. 161 f.) wurden in einem zweiten Block die beidseitigen Erwartungen an die Planung und Eigenschaften von Begrünungsmaßnahmen abgefragt, um mögliche Unterschiede im Verständnis zu den erarbeiteten Maßnahmen zu entschlüsseln. Für jede Frage wurde eine 5-Punkte-Likert-Skala verwendet (5= stimme völlig zu, 1= stimme überhaupt nicht zu). Als Online-Befragungssystem wurde LimeSurvey ausgewählt. Der Online-Fragebogen wurde per E-Mail an die fünf Praxisteilnehmer, weitere Mitarbeiter der Stadtverwaltung und die teilnehmenden wissenschaftlichen Mitarbeiter der TU Dortmund versandt.

## 5.3 Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

### 5.3.1 Auswirkungen auf das Mikroklima

Abbildung 5.3 zeigt die möglichen mikroklimatischen Auswirkungen der straßenbegleitenden Baumpflanzungen und der Grünfläche in der Nähe des Schulmuseums. Aufgrund der Ost-West-Ausrichtung des Straßenzugs können zusätzliche Bäume entlang der Martener Straße eine schattenspendende Wirkung auf den nördlichen Gehweg ausüben. Die positiven Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit (PET) nehmen mit zunehmendem Abstand zu den Baumkronen rapide ab (s. Abbildung 5.3 c)). Im Gegensatz dazu sinkt die Lufttemperatur um 0,4 bis 0,1 °C und die relative Luftfeuchtigkeit steigt um 0,2 bis 1,8%, was auf einen verstärkten Evapotranspirationsprozess in Windrichtung zurückzuführen ist (s. Abbildung 5.3 b), e)). Den größten Einfluss auf die PET-Reduktion hat die mittlere Strahlungstemperatur, welche sich analog zur Oberflächentemperatur verringert (s. Abbildung 5.3 d)). Wie in Abbildung 5.3 b) bis c) zu sehen ist, hat die vorgeschlagene Entsiegelungsprozedur in der Nähe des Schulmuseums den thermischen Komfort nur geringfügig beeinflusst (PET = -4 °C). Insgesamt könnten zusätzliche Baumpflanzungen am Straßenrand nicht nur die PET um 13 bis 25 °C in 1,5 m Höhe senken, sondern auch die Oberflächentemperatur der nahe gelegenen Gebäudefassaden um 6 bis 21 °C reduzieren (s. Abbildung 5.4). Dieser Effekt ist besonders relevant für das Wärmeempfinden in den angrenzenden Einzelhandelsgeschäften oder Büros im Erdgeschoss.

Alle betrachteten Dachmaterialien erreichten ihre Höchsttemperatur zwischen 12:00 und 14:00 Uhr. Zum Nachtanbruch zwischen 21:00 und 23:00 Uhr wird die gespeicherte Wärme wieder an die Umgebung abgegeben, so dass alle Dachmaterialien eine ähnliche Oberflächentemperatur von etwa 25 °C aufwiesen (Schaefer, 2022, S. 1816). Im Vergleich zu wär-



### 5.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

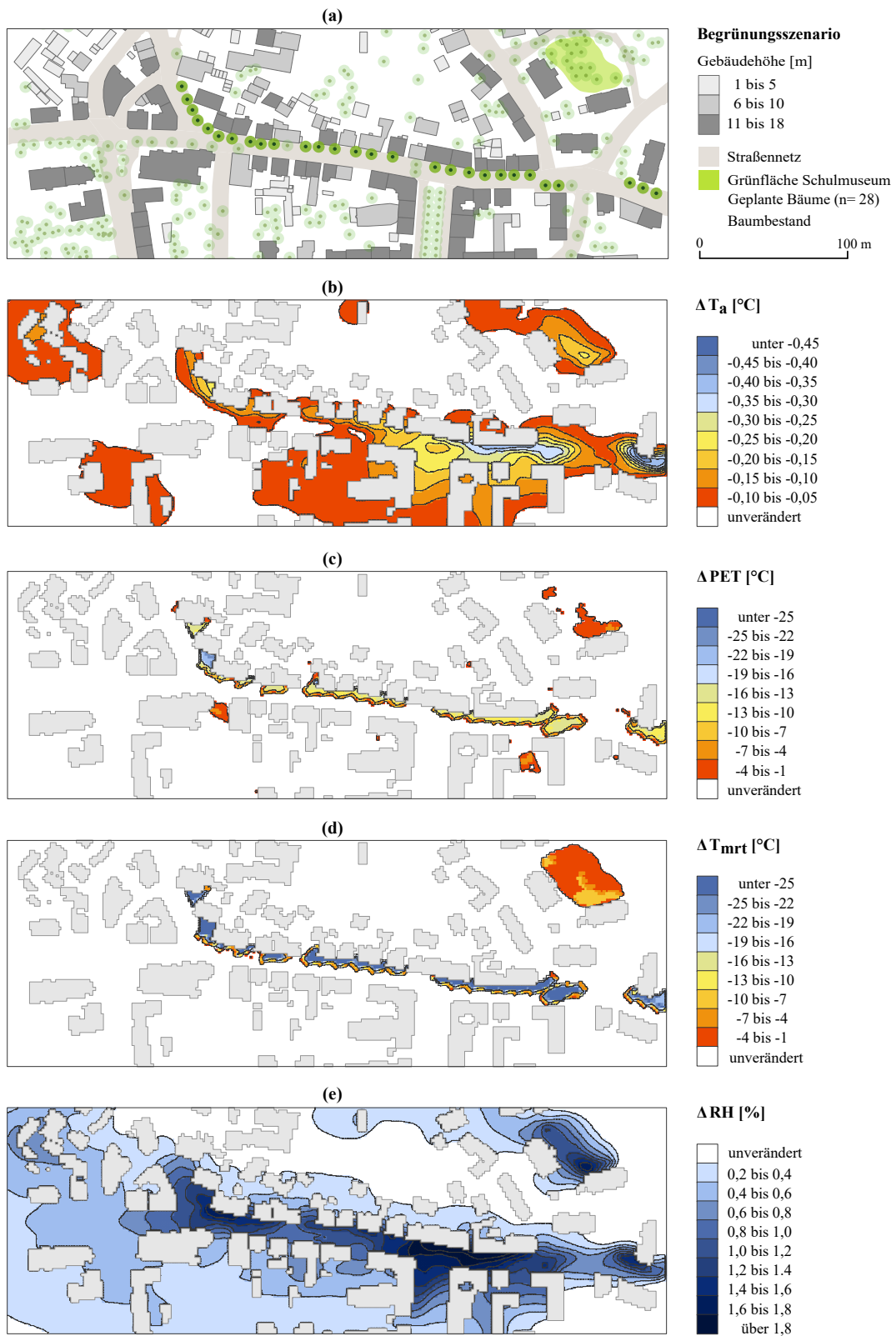


Abbildung 5.3: Potenzielle Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf meteorologische und thermische Behaglichkeitsparameter in der Martener Straße und am Schulmuseum (1,5 m Höhe, 15:00 Uhr). Verändert nach Schaefer (2022, S. 1814).

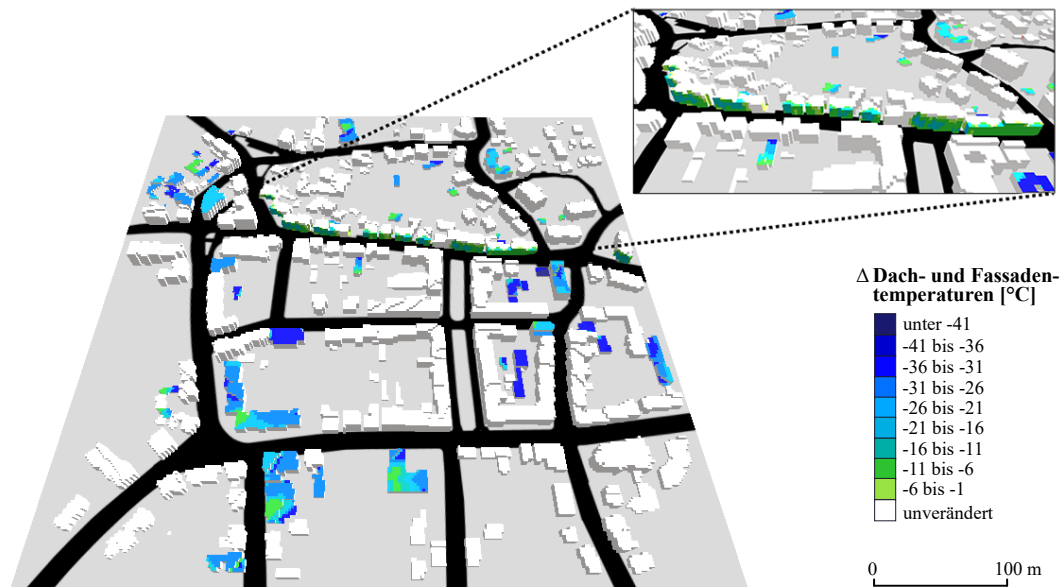


Abbildung 5.4: Auswirkungen extensiver Dachbegrünung und Baumbepflanzungen auf die Dach- und Fassadentemperaturen um 15:00 Uhr. Verändert nach Schaefer (2022, S. 1816).

mespeichernden Zink- und Bitumendächern konnte durch begrünte Dächer eine maximale Oberflächentemperaturabsenkung von ca. 42 °C erzielt werden. Sofern bereits überhängende Baumkronen die Dächer beschatteten, war der durchschnittliche Kühleffekt mit -10 °C deutlich geringer (s. Abbildung 5.4).

Begrünte Dächer auf der windzugewandten Seite hatten ebenfalls einen leicht positiven Effekt auf die leeseitige Lufttemperatur (-0,1 °C) (s. Abbildung 5.3 b)). Den größten Einfluss auf die Wärmebildung hatte jedoch die Gebäudestruktur und -höhe im Untersuchungsgebiet, wie auch von He et al. (2019) beobachtet wurde. Da extensive Gründächer keinen zusätzlichen Schattenwurf bieten, nahm mit zunehmender Gebäudehöhe die Kühlung durch Gründächer auf 1,5 m Höhe ab, was mit den Ergebnissen von Zhang et al. (2019) übereinstimmt. Gleichzeitig gilt: Je größer der Abstand zwischen den Gebäuden, desto größer ist das Ventilationspotenzial. Allerdings ist hier die Exposition gegenüber der Sonneneinstrahlung erhöht (Ali-Toudert und Mayer, 2006), was durch die vorgeschlagene extensive Dachbegrünung nicht kompensiert werden kann.

### 5.3.2 Auswirkungen auf die Feinstaubverteilung

Im Vergleich zum Referenzszenario reduziert die Baumreihenbepflanzungen bei Ostwind (90°) durch zusätzliche Reibungseffekte die Windgeschwindigkeiten um bis zu 1 m/s, was die Feinstaubdiffusion entlang der stark befahrenen *Martener Straße* merkbar erhöht (s. Ab-

### 5.3. Ausgewählte Ergebnisse und Diskussion

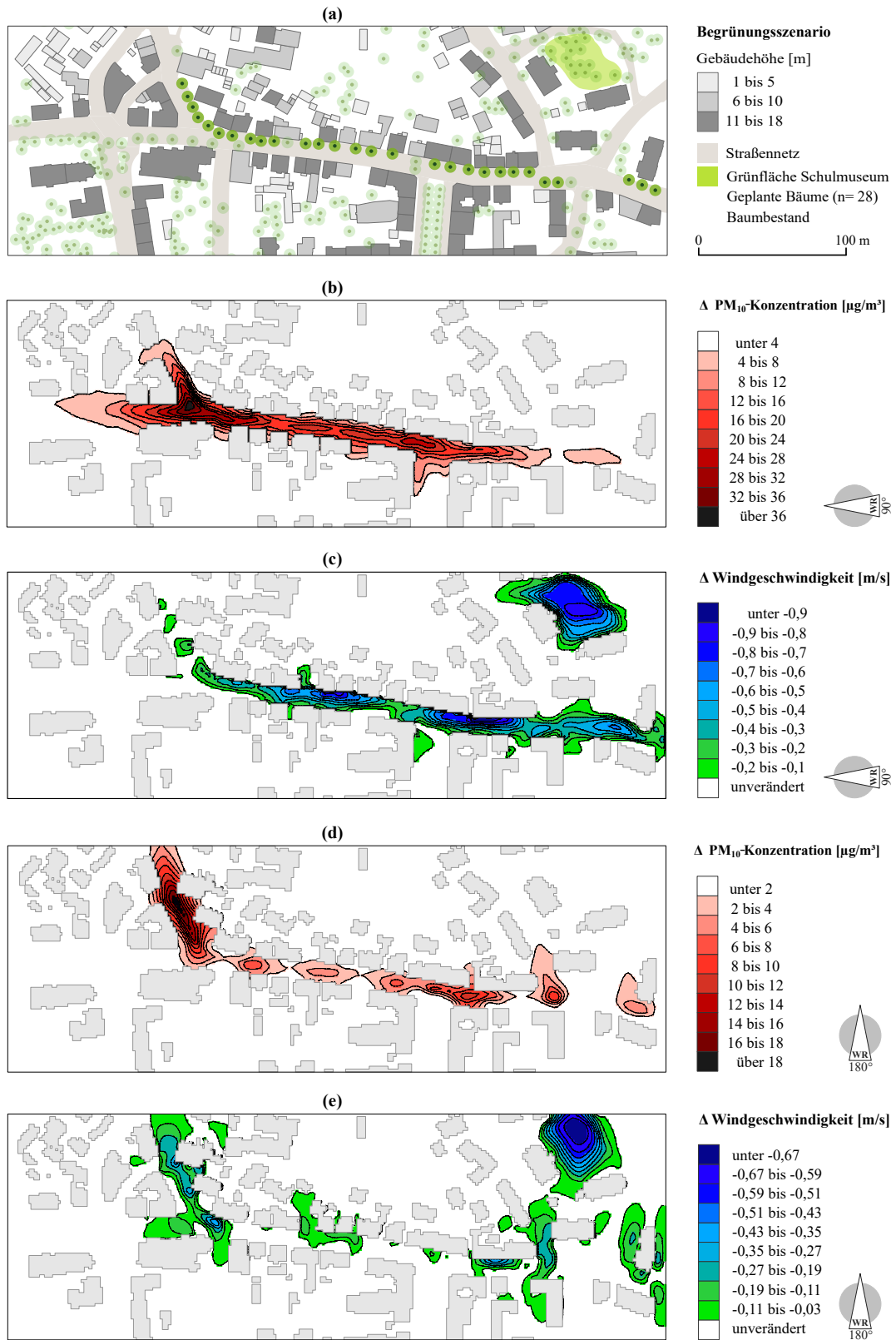
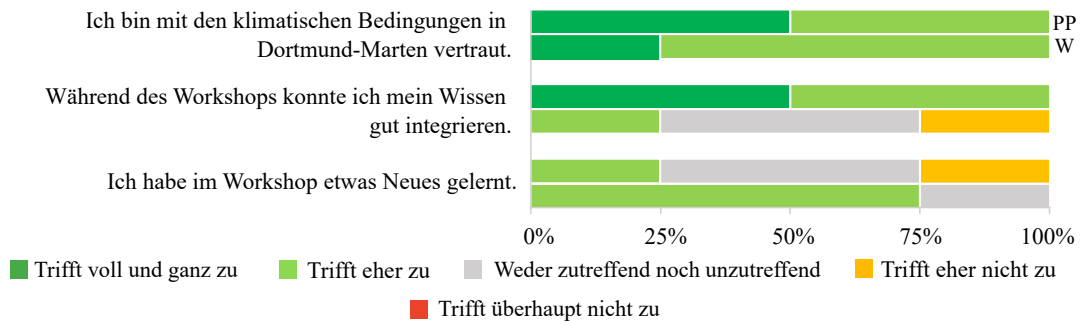


Abbildung 5.5: Potenzielle Auswirkungen der Begrünungsmaßnahmen auf die Windgeschwindigkeit und Feinstaubverteilung in der Martener Straße und am Schulmuseum (1,5 m Höhe, 09:00 Uhr). Verändert nach Schaefer (2022, S. 1817).

## Kapitel 5. Koproduktion und potenzielle Wirkung von Begrünungsmaßnahmen



**Abbildung 5.6: Auswertung zu den individuellen Lerneffekten und dem Wissensaustausch zwischen der Planungspraxis (PP) und der Wissenschaft (W).** Verändert nach Schaefer (2022, S. 1818).

bildung 5.5 b) bis c)). Die Beeinträchtigung des Belüftungskorridors wird zusätzlich durch die beschränkte Breite des Straßenzugs verstärkt. Besonders deutlich wird dieser Effekt im östlichen Teil der Martener Straße, wo zwar die Feinstaubbelastung nur um  $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für  $\text{PM}_{10}$  ansteigt, die Windgeschwindigkeit aber dennoch um  $0,6 \text{ m/s}$  reduziert wurde. Ähnliche Beobachtungen wurden in einer anderen Studie mit vergleichbaren Windkonditionen gemacht (Gromke und Ruck, 2012).

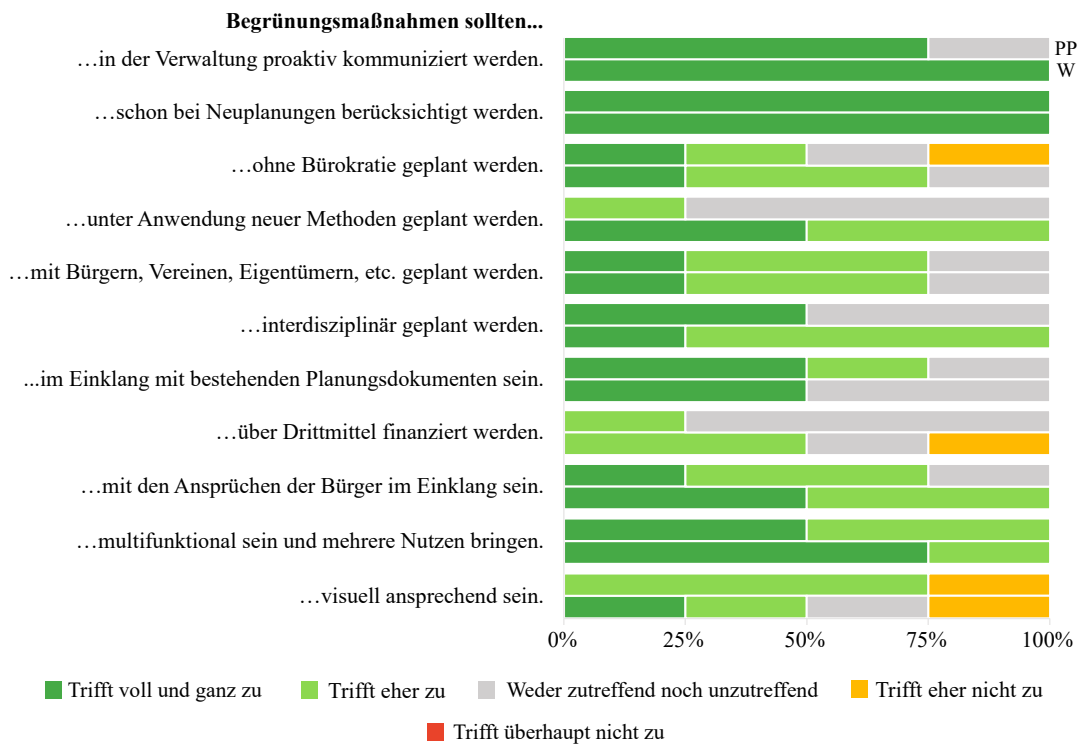
Bei Südwind ( $180^\circ$ ) sind ebenfalls Beeinträchtigungen des Windfeldes durch die Baumreihenbepflanzungen zu erkennen, jedoch in einem weitaus geringerem Ausmaß (s. Abbildung 5.5 d) bis e)). So ist die angesammelte Feinstaubkonzentration nur halb so hoch wie im Ostwindszenario (ca.  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Interessanterweise bleibt die westliche Straßenkreuzung in beiden Fällen der primäre Bereich für die Feinstaubakkumulation. Die vorgeschlagene Rasenfläche in der Nähe des Schulmuseums hatte unabhängig der Windrichtung zwar einen bremsenden Einfluss auf die Windgeschwindigkeit, jedoch keine nennenswerten Effekte auf die Feinstaubverteilung. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die potenziellen Auswirkungen auf die thermische Behaglichkeit zwar positiv, aber stark konzentriert sind, wohingegen die Auswirkungen auf die Feinstaubakkumulation negativ und weiträumiger sind.

### 5.3.3 Lerneffekte und Erwartungen an die Planung von Begrünungsmaßnahmen

Abbildung 5.6 stellt die Reflexionen über den Wissensaustausch in der Zukunftswerkstatt »Grünes Marten« zwischen der Planungspraxis ( $n=4$ ) und Wissenschaft ( $n=4$ ) dar. Ein Planungspraktiker, der nicht am Workshop teilnahm, füllte die Online-Umfrage zu den Erwartungen an die Planung von Begrünungsmaßnahmen aus. Ein anderer Planungspraktiker, der am Workshop teilnahm, hatte die Umfrage begonnen, aber die Fragen zu den Erwartungen an die Planung von Begrünungsmaßnahmen nicht ausgefüllt.

Sowohl die Stadtplaner als auch die Forscher waren mit den klimatischen und umweltbezogenen Bedingungen in Dortmund-Martener weitgehend vertraut, nicht zuletzt aufgrund

## 5.4. Beantwortung der Forschungsfragen



**Abbildung 5.7: Erwartungen an die Planung und notwendigen Eigenschaften von Begrünungsmaßnahmen seitens der Planungspraxis (PP) und der Wissenschaft (W).** Verändert nach Schaefer (2022, S. 1818).

ihres Fachbereichs und dem vorangestellten Prozess zur Konsensbildung (s. Kapitel 5.2). Entgegen der Wissenschaftler sahen die Experten keine Barrieren in ihrer Wissensvermittlung. Im Kontrast dazu konnte ein neutrales Lernergebnis der Planungspraktiker verzeichnet werden. Für die teilnehmenden wissenschaftlichen Mitarbeiter war der Wissenszuwachs durch den Workshop vergleichsweise höher, da die Praxisteilnehmer mitunter unbeachtete Barrieren in der Umsetzung von Begrünungsmaßnahmen (z. B. Pflegeaufwand oder der Verlust öffentlicher Parkplätze) kommunizierten. Abbildung 5.7 deutet auf eine weitgehend kollektive Erwartungshaltung an die Planung und notwendigen Eigenschaften von Begrünungsmaßnahmen. Die Meinungen divergieren, wenn es um den Einsatz neuer Instrumente und Methoden im Planungsprozess geht. Neben einem deutlichen Konsens bei der institutionellen Kommunikation, der frühzeitigen Integration bei Neuplanungen und der Multifunktionalität gab es nicht nur zwischen Wissenschaft und Praxis, sondern auch innerhalb beider Gruppen unterschiedliche Erwartungen an die visuellen Anforderungen von Begrünungsmaßnahmen. Auch bezüglich der unbürokratischen Planung gingen die Meinungen bei den Planungspraktikern auseinander.

## 5.4 Beantwortung der Forschungsfragen

*FF3.1: Wie können klimatische und gesundheitliche Belastungen auf der Quartiersebene effektiv adressiert werden?*

Die abschirmende Wirkung der Baumreihenbepflanzung und die lokal begrenzten Kühlungseffekte stellen geläufige positive Zuschreibungen von Begrünungsmaßnahmen zunächst in Frage. Dies bedeutet allerdings nicht, dass Baumpflanzungen generell die Feinstaubakkumulation erhöhen, sondern dass die Straßenausrichtung und -breite sowie die dominierende Windrichtung innerhalb des Straßenzugs stets zu berücksichtigende Einflussfaktoren sind. Aus den Simulationsergebnissen kann geschlossen werden, dass breitere Bereiche entlang der Martener Straße für eine zukünftige Baumreiheninstallation interessant bleiben. Je nach Straßentyp (offen, hohe oder niedrige Bebauung) sind folglich unterschiedliche Vegetationsformen (dicht, niedrig, hoch) zu wählen. Inwieweit die langfristige Feinstaubfilterung der Straßenbäume im Verhältnis zu einer Konzentrationserhöhung steht, sollte über weitere Simulationen in einem längeren Zeitraum untersucht werden.

Die Erkenntnisse unterstreichen die Wichtigkeit, multiple Umweltparameter in die Maßnahmenprüfung einzubeziehen und die individuellen Gegebenheiten bei der Maßnahmensetzung zu berücksichtigen. Hierzu ist es hilfreich, den Untersuchungsraum und damit den betrachteten Themenkomplex möglichst übersichtlich zu halten, um schlüssige Maßnahmen zu formulieren, welche spürbare Impulse für die Anwohner auslösen können. Die Einbindung von unterschiedlichen Disziplinen, Experten und Anwohnern kann bei einer transparenten und dauerhaften Kommunikation vorteilhaft sein. Wie die Online-Umfrage zeigt, ist die Einbeziehung der Öffentlichkeit auch ein Anliegen für die Dortmunder Planungspraktiker. Die Martener Bevölkerung wurde in diesen expliziten Workshop jedoch nicht eingebunden. Nichtsdestoweniger bestehen durch die Präsenz des »Meilensteins« weiterhin mannigfaltige Möglichkeiten für einen regelmäßigen Bürgerdialog, nicht zuletzt, um Misstrauen unter den Anwohnern abzubauen und die Legitimität der Maßnahmen zu rechtfertigen.

*FF3.2: Wie beeinflusst die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Planungspraxis die strategische Ausarbeitung von Begrünungsmaßnahmen?*

Durch den kooperativen Austausch zwischen der Planungspraxis und der Wissenschaft konnte ein erstes Zukunftsbild für eine Begrünung in Dortmund-Martens gezeichnet werden. Es wurden wissenschaftliche Erkenntnisse mit praktischen Erfahrungen abgeglichen und praktische Maßnahmen auf belastbaren Ergebnissen formuliert. Die hoch aufgelösten thematischen Indikatorenkarten des *UCRI* eigneten sich besonders zur gemeinsamen Identifizierung punktueller Handlungsschwerpunkte. Ohne die szenariobasierte Rückkopplung der skizzierten Maßnahmen wären sensorisch schwer wahrnehmbare Umweltbelastungen wie die erhöhte Feinstaubkonzentration (s. Kapitel 4.3.3) unerkannt geblieben. Unter diesen

#### 5.4. Beantwortung der Forschungsfragen

Gesichtspunkten wird die bedeutende Rolle der Wissenschaft als Evidenz- und Informationsvermittler für die Gesellschaft und die Stadtplanung greifbar.

Es ist erwähnenswert, dass die ausgearbeiteten Begrünungsmaßnahmen kein verbindliches Planungsdokument, sondern ein Teilergebnis eines kooperativen Forschungsprojekts darstellen. Die teilnehmenden Planungspraktiker hatten daher keine realen Konflikte zu erwarten, weshalb die Herangehensweise nicht mit traditionellen Planungsverfahren vergleichbar ist. Zudem können die kommunalen Workshop-Teilnehmer die Stadtverwaltung keinesfalls in Gänze repräsentieren. Vielmehr fungieren sie als punktuelle Kontaktpersonen, als dass sie die politische Durchsetzungskraft zur Ideenumsetzung hätten. Entsprechend bleiben die Maßnahmen zunächst nicht mehr als eine Ideensammlung. Dies kann zugleich eine Frustrationsquelle für Forschende darstellen, ist es doch das Ziel der transdisziplinären Arbeit, die Ergebnisverwertung in der realen Welt voranzutreiben. Weiterhin standen wissenschaftliche Innovationsbemühungen im Konflikt mit verankerten Praxisroutinen, was sich auch in der tendenziell neutralen Haltung gegenüber dem Einsatz neuer Methoden in der Planung von Begrünungsmaßnahmen niederschlägt. Dieses potenzielle Spannungsfeld manifestierte sich auch in der Schwierigkeit der Forscher, ihre Expertise und aktuelle Forschungsergebnisse während des Workshops zu integrieren.





## Kapitel 6

# Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Dissertation begann mit der konzeptionellen Zusammenführung von Stadtgesundheit und urbaner Klimaresilienz und führte sowohl über stadtweite als auch quartiersbezogene Analysen zur mikroklimatischen Auswertung kooperativ erarbeiteter Begrünungsmaßnahmen. In diesem Kapitel werden die zentralen wissenschaftlichen Erkenntnisse und Grenzen der Forschungsarbeit zusammengefasst. Abschließend werden Anknüpfungspunkte für zukünftige Forschungsfelder aufgeführt.

### 6.1 Erkenntnisse und Forschungsbeiträge

Resümierend bieten sowohl die Analyseergebnisse, als auch die erhobenen empirischen Daten der Planung neue Lern- und Handlungsspielräume für eine klimaresiliente und gesundheitsfördernde Stadtentwicklung. Die leitende Rolle des Quartierskontexts wurde dabei hervorgehoben, um sozial-ökologische Herausforderungen aus wissenschaftlicher Perspektive aufzuarbeiten und experimentelle Lösungswege kritisch zu hinterfragen.

Die quantitative Beurteilung urbaner Klimaresilienz wurde bislang durch dessen allgemeine Deutungsoffenheit und die damit verbundenen Unsicherheiten selten praktiziert. Auch zum Abschluss dieser Arbeit steht außer Frage, dass urbane Klimaresilienz ein vielschichtiges Konzept konkurrierender Zielvorstellungen bleibt. Doch wie bereits in Kapitel 3 angedeutet, galt es nicht ein vollständiges Abbild der Realität zu generieren, sondern möglicherweise unerkannte Prozesse zu einem komplexen Thema aufzudecken. Der Einbezug einer Fuzzylogik half dabei, einen methodischen Zugang herzustellen und diese Komplexität über die integrierte Betrachtung der Teilsystemzusammenhänge zu reduzieren. Zweifellos sind Indices wie der *UCRI* nicht als Endprodukt zu verstehen, aber gerade dessen räumlich hoch aufgelöstes Indikatorenset stellt einen bedeutenden Informationswert für den kooperativen Austausch mit der Planungsverwaltung dar (s. Kapitel 5.2.1). Die Koexposition gegenüber multiplen klimatischen und umweltbedingten Gesundheitsbelastungen wurde auf eine integrierte und maßstabsübergreifende Weise nachgewiesen. Die Verflechtung zwischen Klima-

## Kapitel 6. Schlussfolgerungen und Ausblick

resilienz und Stadtgesundheit wurde dabei deutlich gemacht und das Wissen um treibende Determinanten weiter vertieft. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass der *UCRI* keinesfalls gängige Vulnerabilitätsanalysen ersetzen, sondern den Diskurs um urbane Klimaresilienz erweitern und das prozessuale Denken in Systemen auf städtischer Ebene fördern soll. Die Ergebnisse sind als Hilfestellung in der Flächennutzungs- oder der verbindlichen Bauleitplanung im Rahmen der Umweltprüfung als Abwägungsmaterial zur Ausweisung resilienzfördernder Areale nutzbar. Ferner kann durch das Indikatorenset aus Kapitel 3.2 ein zielgerichtetes Monitoring in Gang gesetzt werden, um regelmäßig Auf- und Absteiger in puncto urbaner Klimaresilienz zu bilanzieren. Unter Berücksichtigung der sozial-ökologischen Resilienzkomponente ist jedoch hervorzuheben, dass jedes System seinem eigenen Zyklus folgt und sich daher zeitlich abweichend entwickeln kann. Die webbasierte Indikatorenvisualisierung (s. Kapitel 3.3.3) kann als Austauschplattform die Integration urbaner Klimaresilienz in die Planungspraxis zusätzlich erleichtern.

Der vorgestellte Ansatz in Schaefer et al. (2020) wird seit seiner Veröffentlichung regelmäßig in resilienzbezogenen Fuzzy-Analysen rezipiert (Gerundo et al., 2020; Amer et al., 2022; Buzási et al., 2022; Cardone und Di Martino, 2022), was einen erkennbaren Wert für die Forschungslandschaft um Resilienzmessungen darstellt. Eine räumlich-analytische Auseinandersetzung mit dem Konzept zu urbaner Klimaresilienz ist daher trotz aller Kritik lohnenswert, insbesondere, wenn die Detektion möglicher sozialer und umweltbezogener Ungleichheiten im Stadtgefüge von Interesse ist. Teilergebnisse des *UCRI* wurden zudem bei der Auftaktveranstaltung des MiKaDo am 05. Dezember 2019 vorgestellt und anhand einzelner Indikatoren mit Akteuren aus der Stadtverwaltung, Wirtschaft und Vereinen diskutiert (Lokalkompass Dortmund-Ost, 2019).

Urbane Hitze und Feinstaub sind Belastungen, die großen raum-zeitlichen Schwankungen unterlegen sind. Der Fall Dortmund-Marten hat demonstriert, dass beide Phänomene gemeinsam im bauphysischen und sozial-ökologischen Kontext der Stadt zu denken sind. In Kapitel 4 wurde die Wichtigkeit der Überprüfung mikroklimatischer Simulationen mittels Feldmessungen und der subjektiv wahrgenommenen Belastungssituation aufgezeigt. So konnten validierte Szenarien zum Quartiersklima in Dortmund-Marten dargeboten werden. Zudem zeigte die Passantenbefragung, dass sich einige nicht über die objektiv gemessene Feinstaubbelastung bewusst waren, sehr wohl aber (starkes) thermisches Unbehagen äußerten, welches stellenweise durch das Modell unter- oder überschätzt wurde. Dies unterstreicht die Bedeutung einer ortsbezogenen Forschung als Ergänzung zur stadtweiten Kartierung urbaner Klimaresilienz.

Das zeit- und kosteneinsparende Potenzial der Anwendung freier Geodaten in GIS, Fernerkundung sowie der dreidimensionalen Simulation wurde in allen drei Aufsätzen verdeutlicht. Die vorgestellte Methodik zur mikroklimatischen Modellgenerierung wird zunehmend in studentischen Projekten an der Fakultät Raumplanung (TU Dortmund) zu Klimaresilienz und -anpassungsmaßnahmen gelehrt und praktisch angewendet. Das fernerkundungsbasierte

Verfahren zur Ableitung von Dachmaterialien könnte zukünftig auch bei der Umsetzung der Landbedeckungskartierung in NRW nützlich sein, nicht zuletzt da hier dieselben Satellitendaten und Orthophotos die Datengrundlage bilden (Sandmann et al., 2022). Hierdurch ergibt sich auch eine Schnittstelle zum landesweit frei verfügbaren Geobasisdatensatz, welcher semantisch angereichert werden und so eine Datenquelle für mikroklimatische Simulationen darstellen kann. Um das Informations- und Analysepotential gänzlich auszuschöpfen, ist es allerdings nicht nur wichtig, *mehr* Daten bereitzustellen, sondern diese auch einheitlich, vollständig, aktuell und flächendeckend anzubieten (Biljecki et al., 2021).

Für die Analyse klimatischer und gesundheitlich relevanter Phänomene liegen heutzutage eine Vielzahl an Geodaten und Satellitenbildern vor. Auch in den Stadtverwaltungen wächst das Interesse an der öffentlichen Bereitstellung raum- und demographiebezogener Daten. Dieser Datenfundus ermöglichte auch in dieser Arbeit eine effiziente Analyse von Ungleichheiten im städtischen Gefüge. Qualitative Merkmale wie z. B. individuelle Anpassungskapazitäten werden jedoch nicht von Kommunen erhoben. Sie verlangen zeitaufwändige Erhebungsmethoden, haben aber einen gleichbedeutenden Wert für eine klima- und umweltgerechte Entscheidungsfindung in der Planung. Hieraus kann abgeleitet werden, dass erst der Verbund aus qualitativen und quantitativen Methoden ein erstes Resilienzportrait einer Stadt zeichnet. Je stärker das Brennglas auf feinere Maßstabsebenen gerichtet wird, umso mehr werden Extremereignisse zu einem sozialen Ereignis: Harte Sekundärdaten (*top down*) zu Flächennutzungen werden allmählich von weichen Primärdaten (*bottom up*) zu Individuen abgelöst. Individuen sind hier nicht nur auf den Bürger beschränkt, sondern schließen gleichermaßen handelnde Akteure der Gesellschaft mit ein.

Wenn sich Städte dazu entscheiden klimaresilient zu planen, so sind damit auch neue Methoden und Instrumente erforderlich. Die Ergebnisse aus Kapitel 5 verweisen auf den zusätzlichen Stellenwert einer kontinuierlichen Reflexion des individuellen Verständnisses in transdisziplinären Projektgruppen. Auf diese Weise sollten auch bestehende Instrumente der kommunalen Planung im Kontext urbaner Klimaresilienz und Stadtgesundheit weiter reflektiert werden. Ein greifbares Beispiel zur frühzeitigen Berücksichtigung klima- und sozial-ökologischer Belange in der Planung bietet der »Nachhaltigkeitscheck« in Bottrop, an dessen Entwicklung der Autor im Rahmen des ZUKUR-Projekts beteiligt war (Ohlmeyer et al., 2022). Im Hinblick auf das evolutionäre Panarchiemodell (s. Kapitel 2.1.3) und die teilweise notwendigen Brüche mit Pfadabhängigkeiten müssen auch methodische Ansätze neu gedacht werden. Es wird nicht ausreichen, Szenarien linear aus der Vergangenheit zu extrapolieren, sondern es bedarf neuer Konzepte zur Konfrontation mit klimatischen Stressoren. Unter diesen Bedingungen impliziert urbane Klimaresilienz auch die Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungsdynamiken kritischer Infrastrukturen und vulnerabler Bevölkerungsgruppen in der Szenarienbildung. Eine derartige Klimawirkungsanalyse hat der Autor bereits gemeinsam mit wissenschaftlichen Mitarbeitern des ZUKUR-Teams in Kirstein et al. (2022) für das Ruhrgebiet vorgestellt.

## 6.2 Kritische Reflexion

Am Beispiel der Stadt Dortmund wurden erprobte Methoden aus der Fernerkundung, multi-kriteriellen Bewertung und mikroklimatischen Simulationen angewandt und stellenweise erweitert. Dennoch konnten im Forschungsverlauf einige methodische wie inhaltliche Schwächen festgestellt werden, welche für die Ergebnisinterpretation von Relevanz sind.

### 6.2.1 Probleme durch die GIS-basierte Messung urbaner Klimaresilienz

Mit der Messung anhand von Indices wird urbaner Klimaresilienz automatisch eine Gesetzmäßigkeit unterstellt, welche de facto nicht existiert. In einem höchst komplexen und dynamischen Stadtsystem gibt es keinen Zustand, ab dem wieder Normalität herrscht, welcher ebenfalls a priori definiert werden müsste. Erst der relationale Vergleich über einen längeren Zeitraum lässt aussagekräftige Urteile über ein resilientes Stadtsystem zu. Für die Anwendung des *UCRI* ist wiederum tiefgreifendes methodisches Fachwissen erforderlich, was den potenziellen Nutzerkreis deutlich eingrenzt. Der *UCRI* lokalisiert zwar markante Handlungsschwerpunkte, die zugrundeliegenden Ursachen für stadtweite Differenzen –und damit auch mögliche Ungerechtigkeiten– können über die gewählten Deskriptoren jedoch nicht erklärt werden.

Die Unbestimmtheit von Lage, Form und Maßstab der verwendeten Datenformate (z. B. Polygone) kann bei räumlichen Analysen zum so genannten *Modifiable Areal Unit Problem (MAUP)* führen (Openshaw, 1983). Hiervon sind vor allem demographische Daten betroffen, welche für einen bestimmten Bezugsraum wie z. B. einen Stadtbezirk aggregiert und von Statistikämtern veröffentlicht werden. Die Bildung solcher Grenzen kann letztlich zu ungewünschten räumlichen Gewichten führen (Westerholt, 2022, S. 43). Zur Minimierung des *MAUP* sind die soziodemographischen und -ökonomischen Indikatoren (*ELD*, *SHH*, *INF* und *SGB*) im *UCRI* parzellenbezogene Zuweisungen auf der räumlichen Grundlage statistischer Unterbezirke (Schaefer et al., 2020, S. 12). Derartige Bevölkerungsdisaggregationen bergen potenzielle Irrtümer, denn sie berücksichtigen keine Leerstände oder Ferienwohnungen in Wohn- und Mischgebieten (Biljecki, 2017, S. 196). Zudem sind die prognostizierten Bevölkerungsverteilungen primär auf mehrstöckige Gebäude fokussiert. Eingeschossige Gebäude sind dadurch automatisch resilienter, da die zugewiesene Bevölkerungsanzahl stets gering bleibt. Diese Nachteile könnten über institutionelle Bevölkerungsdaten auf Baublockebene umgangen werden, sind jedoch aufgrund datenschutzrechtlicher Bestimmungen selten öffentlich zugänglich. Dem gegenüber steht der Fakt, dass sich die Bevölkerung nicht ausschließlich am eigenen Wohnort aufhält. Insofern stehen sowohl die mikroskalige Detektion vulnerabler Ballungspunkte, als auch die mesoskalige Aggregation auf Unterbezirksebene im Spannungsfeld einer realitätsnahen Abbildung und der geographischen Genauigkeit.

### 6.2.2 Quartiere und ihre Eigenarten

Ein offensichtlicher Nachteil ergibt sich aus dem geringen Rücklauf (n= 42) zur Befragung nach dem thermischen Komfort und der Luftqualität in Dortmund-Martens. Die Ergebnisse sind als Momentaufnahme statistisch nicht aussagekräftig und daher auch nicht übertragbar. Durch die extreme Hitze und den landesweiten Vorsichtsmaßnahmen zur COVID-19 Pandemie hielten sich nur wenige Menschen am 11. August 2020 im Freien auf. Gewiss wäre eine Befragung zu kälteren Jahreszeiten möglich gewesen; das Ziel der Umfrage war es jedoch, die subjektive Einschätzung während einer extremen Hitzewelle festzuhalten. Außerdem bleibt die Frage, ob eine verallgemeinernde Ausdehnung gewünscht ist oder nicht doch die individuellen Eigenarten im Quartier die Schlüsselrolle zur flexiblen Resilienzförderung spielen. Diese Problematik betrifft auch die Ergebnisse aus der Zukunftswerkstatt, welche in ihrer Ausprägung kontextspezifisch und abhängig vom Hintergrundwissen der teilnehmenden Forschenden und der Planungspraktiker waren.

Da gemittelte physiologische Variablen unter sommerlichen Bedingungen für die Modellierung des PET verwendet wurden, ist es unausweichlich, dass die Vorhersagen nicht mit jedem beobachteten Merkmal der Befragten (Alter, Größe, Kleidung) übereinstimmen. Darüber hinaus wurden alle Dächer im Untersuchungsraum als Flachdächer in die Modellregion integriert, was die simulierte Solareinstrahlung für z. B. Satteldächer beeinflusst. Da der Fokus auf der Ebene der Fußgänger (1,5 m Höhe) und begrünten Flachdächern lag, ist diese Einschränkung hinnehmbar. Die Einbindung von 3D-Daten mit einem höheren Genauigkeitsgrad (engl.: *Level of Detail (LoD)*) zur Modellierung der Dachform in ENVI-met MONDE ist dahingehend ein vielversprechender Ansatz. Fassadenmaterialien blieben ebenfalls unberücksichtigt, könnten jedoch bei entsprechender Verfügbarkeit über Schrägluftbilder modelliert werden. Ebenfalls ist ein Vergleich mit weiteren Behaglichkeitsmodellen für den Aufenthalt im Freien wie dem universellen thermischen Klimaindex (engl.: *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*) anzuraten.

### 6.2.3 Kritik am transdisziplinären Forschungsansatz

Disziplinäre Forschung verfolgt das Stigma, den aktuellen globalen Herausforderungen nicht gerecht zu werden, während von integrativen oder gar transdisziplinären Projekten mannigfaltige praktische Lösungen erwartet werden. Internationale wie nationale Fördermittelgeber sind dabei ein Haupttreiber für transdisziplinäre Forschungsprojekte. Gleichzeitig zeichnet sich ein Trend zur integrativen Forschung ab, ohne dessen Implementierung eine Förderung unwahrscheinlicher wird (Fry et al., 2007, S. 251). Dies hat zugleich einen wesentlichen Einfluss auf die wissenschaftliche Agenda.

Wie in der gesamten Dissertation aufgezeigt, birgt das Konzept der Resilienz auch heutzutage wissenschaftliche Lücken. Auch in einem transdisziplinären Forschungsprojekt gilt es, diese Lücken durch wissenschaftliche Arbeit zu schließen, selbst wenn darunter die expe-

## *Kapitel 6. Schlussfolgerungen und Ausblick*

rimentelle Arbeit leiden kann (Jahn et al., 2019). Das bedeutet, dass eine generelle Umstellung wissenschaftlicher Praxis hin zu Transdisziplinarität notwendige Evidenzbildung abschwächen oder gar (bewusst oder unbewusst) verhindern kann. Dies schlägt sich besonders in der Erkenntnis- und Methodenkommunikation mit der Praxis und der Gesellschaft nieder: Um einen beidseitigen Lernprozess zu ermöglichen, muss eine sorgfältige und verständliche Methodenwahl erfolgen, was positiv oder negativ in die wissenschaftliche Fragenformulierung eingreift.

Aus ZUKUR ergaben sich rückblickend typische Herausforderungen für ein transdisziplinäres Forschungsprojekt, wie z. B. wechselndes Personal, divergierende Erwartungshaltungen sowie ein dysbalancierter Arbeitsaufwand, welche von Sieber et al. (2022) bereits ausführlich dokumentiert wurden. Hierdurch können sich einstige Leitmotive schlagartig ändern, bereits gesetzte Konsenserklärungen verworfen und neue Weichen in der Methodenwahl gestellt werden. Diese Irrwege müssen nicht zwingend eine negative Wirkung entfalten, stehen sie doch im Zeichen einer flexiblen und lernenden Herangehensweise. Im Hinblick auf den festgelegten Zeitrahmen sind derartige Umstellungen jedoch nur schwierig zu bewältigen. Eine Förderungszeit von drei Jahren scheint bei komplex angelegten Projekten oftmals nicht ausreichend und muss daher von Anfang an länger gedacht werden. Hierzu ist eine klare Kommunikation mit dem Projektträger notwendig, um optimale Rahmenbedingungen für die langfristige Projektdurchführung zu schaffen.

Wissenschaftler wie auch planende Akteure stehen am Ende transdisziplinärer Projekte häufig vor Barrieren, die eine Umsetzung der Ergebnisse in die reale Welt erschweren. Hinsichtlich einer nachträglichen Dachbegrünung existieren im Bauplanungs- und ordnungsrecht mehrere formale Hürden wie z. B. denkmalschutzrechtliche Belange, oder die nachträgliche Implementierung gestalterischer Festsetzungen, welche im Zeichen des Bestandsschutzes nur über unberührte Grundzüge des Bebauungsplans im vereinfachten Verfahren umgesetzt werden könnte. Zusätzliche Straßenbegleitbegrünung reduziert den bestehenden Parkraum, bedarf einer regelmäßigen Pflege und kann mit der unterirdischen Infrastruktur kollidieren. Diese Reihe an Flaschenhälsen lässt Vorbehalte gegenüber Veränderungen aufkeimen, so dass zum Ende des Projekts eine praktische Umsetzung der vorgeschlagenen Begrünungsmaßnahmen ausblieb. Es benötigt daher nicht nur Problemidentifizierungsinstrumente in Form von räumlichen Analysen, sondern gleichwohl auch flexible Rechtsinstrumente für nachträgliche Anpassungen im Bestand. Der temporäre Aufenthalt in experimentellen Forschungsvorhaben kann eine katalysatorische Wirkung entfalten, jedoch sollte auch nach der Projektförderung an den Ideen und dem politischen Willen zur Umsetzung festgehalten werden. Es bleibt nach wie vor eine Herausforderung, die dynamische und flexible Welt urbaner Klimaresilienz in konsolidierte Routinen der Stadtplanung und dem Krisenmanagement zu integrieren. Die intrinsische und dauerhafte Motivation aller Projektmitglieder ist in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung für den Projekterfolg und einen langfristig gedachten Transformationsprozess.

## 6.3 Zukünftige Forschungsperspektiven

Die gelieferten Ergebnisse öffnen neue Türen für eine Reihe künftiger Forschungspfade. Nachfolgend sollen drei potenzielle Themenfelder dargelegt werden, deren weitere Erforschung das Verständnis um eine resiliente und gesunde Stadtentwicklung erweitern können.

### 6.3.1 Transfer und Skalierung

Diese Dissertation widmete sich der Großstadt Dortmund, dessen Planungsverwaltung und Raumplanungsfakultät durch die eigene Historie mit Extremwetterereignissen, die Einbindung in unterschiedliche Projekte zur Klimaanpassung sowie der Ausarbeitung des MiKa-Do nachweisbare Erfahrungen im Umgang mit Klimaextremereignissen besitzen (s. Kapitel 1.2.2). Kleinstädte sind aufgrund fehlender Ressourcen und personeller Kapazitäten im Vergleich zu Großstädten weniger in Bezug auf Klimaschutz und -anpassung vorbereitet (Otto et al., 2021). Zukünftige Forschungsprojekte zu Klimaresilienz sollten daher auch den Fokus auf Klein- und Mittelstädte legen, oder Groß- und Kleinstädte kooperativ zusammenführen, um nachhaltige Lerneffekte städteübergreifend anzustoßen.

Zwar muss Resilienz für jede Stadt individuell gedacht werden, jedoch soll dies nicht bedeuten, dass Städte hinsichtlich ihrer Robustheit und Anpassungsfähigkeit rein selbstbezogen handeln. Gefahren breiten sich ungeachtet von Verwaltungsgrenzen aus, was für einen regionalen Verflechtungsraum wie dem Ruhrgebiet von besonderem Interesse ist. So sollten auch grenzüberschreitende Analysen und Szenarien zu einem kooperativen Austausch führen, Versorgungsdefizite aufgedeckt werden und somit ein sich stetig anpassendes und lernendes System entstehen. Eine effiziente Beschränkung auf einige wenige Kernindikatoren des *UCRI* kann hierfür einen ersten Ansatzpunkt bieten. Klimabedingte Extremereignisse sind für deutsche Städte nur eine Schockrubrik unter vielen –sich teilweise anbahnenden– Herausforderungen, wie z. B. Cyberangriffe, die zunehmende Urbanisierung, und der demographische Wandel. Eine Skalierung des Resilienzkonzepts ist daher nicht nur auf die räumliche Ebene beschränkt, sondern sollte sich gleichermaßen der inhaltlichen Themensetzung von Resilienz zuwenden. Damit gehen ebenfalls zukünftige Anpassungen und neue Fragestellungen in der Resilienztheorie einher.

### 6.3.2 Was bedeutet Transformation konkret?

Forschungsbasierte Empfehlungen für die Stadtplanung werden im Hinblick auf eine echte Transformation und damit einem tatsächlichen Mehrwert für die Gesellschaft nicht ausreichen. Während wissenschaftliche Wirkungen über referierte Veröffentlichungen, Zitationen, neue Lehrmodule, oder studentische Arbeiten darstellbar sind, ist die gesellschaftliche Wirkung transdisziplinärer Forschung weitaus komplexer. In Verbindung mit den Resultaten aus der eigenen Arbeit stellen sich tiefere Fragen bezüglich der Transformation im Pro-

gramm künftiger transdisziplinärer Forschungsprojekte: Anhand welcher Gütekriterien lässt sich Transformation als wirkender Outcome für die Gesellschaft messen? Ist sie inkrementalistisch oder direkt? Wird Transformation gefördert oder politisch blockiert? Wer profitiert von einer Transformation und wer nicht?

Diese Fragestellungen sind nicht nur relevant für die eigene Qualitätssicherung oder den Vergleich unterschiedlicher Projektvorhaben, sondern üblicherweise auch, um die Investitionen seitens der Fördermittelgeber transparent zu rechtfertigen. Die Handlungen der Praxisakteure rücken bei den obigen Fragen vermehrt in den Fokus. Gerade weil die planerische Umsetzung im *UCRI* nur rudimentär abgebildet werden konnte (s. Kapitel 3.2), sollten für die kontinuierliche Auswertung ergänzend standardisierte Fragebögen erstellt werden. Eine erste Annäherung dafür haben Wilden und Feldmeyer (2021) exemplarisch vorgestellt. Auf diese Weise können Veränderungen in verwaltungsinternen Vorstellungen zu Resilienz und Transformation langfristig beobachtet und die in Kapitel 6.2.3 beschriebenen Kontroversen effektiv gesteuert werden.

### 6.3.3 Smart Urban Areas (SUA)

Wie in Kapitel 4 und 5 erläutert, werden bioklimatische Kenngrößen wie der Thermalkomfort mitunter durch die strukturellen und materialspezifischen Eigenschaften der umliegenden Bebauung beeinflusst. Entsprechend wird die sensorische Überprüfung und bauliche Implementierung natürlicher und klimarobuster Materialien bei einem global zunehmenden Flächennutzungsdruck an Bedeutung gewinnen. Für ein effizientes Monitoring der beeinflussenden mikroklimatischen Parameter auf den Thermalkomfort ist ein gediegenes Netzwerk aus Sensoren, die mit dem Internet der Dinge (engl.: *Internet of Things (IoT)*) kommunizieren, unerlässlich. In diesem Zusammenhang bieten Smart Cities die geeignete technische und digitale Infrastruktur zur Datengenerierung (Sharifi und Yamagata, 2022). Für die Datenspeicherung können Digitale Gebäudezwillinge (engl.: *digital twin*) als mehrdimensionales Abbild der physischen Welt zum Einsatz kommen (Glaessgen und Stargel, 2012). Weiter unterstützen sie ein energiesparendes und klimaangepasstes Wohnen durch Simulationen, informierende Visualisierungen sowie der Echtzeitüberwachung und -steuerung (Alva et al., 2022, S. 2).

Der Autor arbeitet bereits zu jener Thematik im Rahmen des Forschungsprojekts Smart Urban Areas (SUA)<sup>18</sup>, welches zwischen 2022 und 2025 vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) gefördert wird: In der rasant wachsenden vietnamesischen Hauptstadt Hanoi werden Klimaanpassungs- und Energieeinsparungsmaßnahmen für ein 39-geschossiges Wohngebäude innerhalb einer entstehenden Smart City erprobt. Mithilfe intelligenter Hocheffizienzpumpen, Dach- und Fassadenbepflanzungen sowie der effizienten Regen- und Grauwassernutzung soll sich ein nach-

---

<sup>18</sup>Mehr Informationen über SUA: <https://www.exportinitiative-umweltschutz.de/projekte/sua/>



### *6.3. Zukünftige Forschungsperspektiven*

weisbarer Beitrag im nachhaltigen Gebäudemanagement einstellen. Über dauerhafte sensorische Messungen zu meteorologischen Parametern, unterstützenden mikroklimatischen Simulationen und der Informationsbündelung in einem Digitalen Gebäudezwilling sind die Maßnahmenauswirkungen wissenschaftlich zu beobachten. Die Implementierung und Überwachung derartiger Technologien und Bauwerksbegrünungen erfordert ebenfalls eine transdisziplinäre Umsetzung zwischen Wissenschaft, Industrie sowie Planungs- und Bauunternehmen. Somit bietet SUA im Hinblick auf die oben beschriebenen Trends eine sinnvolle Vertiefung in der Transformations- und Resilienzforschung auf der Gebäudeebene.



# Literaturverzeichnis

- Abhijith, K. V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., Broderick, B., Di Sabatino, S., und Pulvirenti, B. (2017). Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – A review. *Atmospheric Environment*, 162:71–86.
- Acuti, D., Bellucci, M., und Manetti, G. (2020). Company disclosures concerning the resilience of cities from the Sustainable Development Goals (SDGs) perspective. *Cities*, 99:102608.
- Adger, W. N., Arnell, N. W., und Tompkins, E. L. (2005). Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change*, 15(2):77–86.
- Agyeman, J. und Evans, B. (2004). 'Just sustainability': the emerging discourse of environmental justice in Britain? *The Geographical Journal*, 170(2):155–164.
- Alexander, D. E. (2013). Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11):2707–2716.
- Ali-Toudert, F. und Mayer, H. (2006). Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41(2):94–108.
- Alva, P., Biljecki, F., und Stouffs, R. (2022). USE CASES FOR DISTRICT-SCALE URBAN DIGITAL TWINS. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W4-2022:5–12.
- Amer, L., Erkoc, M., Andiroglu, E., und Celik, N. (2022). A Novel Composite Resilience Indicator for Decentralized Infrastructure Systems (CRI-DS).
- ARUP (2014). City resilience index: Understanding and measuring city resilience. <https://www.arup.com/perspectives/publications/research/section/city-resilience-index>.
- Bach, C., Birkmann, J., Kropp, J., Olonscheck, M., Setiadi, N., Vollmer, M., und Walther, C. (2014). Assessing Vulnerability to Heat Waves and Heavy Rainfall at a Community Level.

## Literaturverzeichnis

- Bai, X., Dawson, R. J., Ürge-Vorsatz, D., Delgado, G. C., Salisu Barau, A., Dhakal, S., Dodman, D., Leonardsen, L., Masson-Delmotte, V., Roberts, D. C., und Schultz, S. (2018). Six research priorities for cities and climate change. *Nature*, 555(7694):23–25.
- Bartesaghi Koc, C., Osmond, P., und Peters, A. (2018). Evaluating the cooling effects of green infrastructure: A systematic review of methods, indicators and data sources. *Solar Energy*, 166:486–508.
- Bautista-Puig, N., Benayas, J., Mañana-Rodríguez, J., Suárez, M., und Sanz-Casado, E. (2022). The role of urban resilience in research and its contribution to sustainability. *Cities*, 126:103715.
- Bezirksregierung Arnsberg (2011). Luftreinhalteplan Ruhrgebiet 2011, Teilplan Ost. [https://www.bra.nrw.de/system/files/media/document/file/lrp\\_ruhr\\_ost.pdf](https://www.bra.nrw.de/system/files/media/document/file/lrp_ruhr_ost.pdf).
- Biggs, R., Clements, H., de Vos, A., Folke, C., Manyani, A., Maciejewski, K., Martín-López, Preiser, R., Selomane, O., und Schlüter, M. (2022). What are social-ecological systems and social-ecological systems research? In Biggs, R., de Vos, A., Preiser, R., Clements, H., Maciejewski, K., und Schlüter, M., Herausgeber, *The Routledge handbook of research methods for social-ecological systems*, Routledge international handbooks, Seiten 3–26. Routledge, London and New York.
- Biljecki, F. (2017). *Level of detail in 3D city models*. Dissertation, Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
- Biljecki, F., Chew, L. Z. X., Milojevic-Dupont, N., und Creutzig, F. (2021). Open government geospatial data on buildings for planning sustainable and resilient cities.
- BMI – Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat, Herausgeber (2020). Memorandum urbane Resilienz: Wege zur robusten, adaptiven und zukunftsfähigen Stadt. Berlin.
- Böhme, G. (1993). *Fuzzy-Logik: Einführung in die algebraischen und logischen Grundlagen*. Springer eBook Collection. Springer, Berlin and Heidelberg.
- Breuste, J., Pauleit, S., Haase, D., und Sauerwein, M. (2016). *Stadtökosysteme*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Brunetta, G. und Salata, S. (2019). Mapping Urban Resilience for Spatial Planning—A First Attempt to Measure the Vulnerability of the System. *Sustainability*, 11(8):2331.
- Bruse, M. und Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, 13(3-4):373–384.

- Buzási, A., Jäger, B. S., und Hortay, O. (2022). Mixed approach to assess urban sustainability and resilience – A spatio-temporal perspective. *City and Environment Interactions*, 16:100088.
- Byrne, L. B. (2022). Ecology with Cities. *Urban Ecosystems*.
- Caffier, A., Elsner, C., Rath, C., Robens, F., Seidel, J., und Will, K. (2017). Offene Geobasisdaten für NRW. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, 142(3):133–145.
- Cardone, B. und Di Martino, F. (2022). A GIS-based framework using fuzzy relation equation system solutions in urban planning. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*.
- Cariolet, J.-M., Vuillet, M., und Diab, Y. (2019). Mapping urban resilience to disasters – A review. *Sustainable Cities and Society*, 51:101746.
- Chang, J. C. und Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87(1-3):167—196.
- Chen, K., Wolf, K., Breitner, S., Gasparri, A., Stafoggia, M., Samoli, E., Andersen, Z. J., Bero-Bedada, G., Bellander, T., Hennig, F., Jacquemin, B., Pekkanen, J., Hampel, R., Cyrys, J., Peters, A., und Schneider, A. (2018). Two-way effect modifications of air pollution and air temperature on total natural and cardiovascular mortality in eight European urban areas. *Environment International*, 116:186–196.
- Clarke, J. (2001). *Energy simulation in building design*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2. Auflage.
- Cohen, P., Potchter, O., und Matzarakis, A. (2013). Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Applied Geography*, 37:1–10.
- Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1):35–46.
- Crank, P. J., Middel, A., Wagner, M., Hoots, D., Smith, M., und Brazel, A. (2020). Validation of seasonal mean radiant temperature simulations in hot arid urban climates. *The Science of the total environment*, 749:141392.
- Cutter, S. L. (2016). The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Natural Hazards*, 80(2):741–758.
- Cutter, S. L. (2022). Vulnerability and Resilience Science: Concepts, Tools, and Practice. In James, H., Shaw, R., Sharma, V., und Lukasiewicz, A., Herausgeber, *Disaster Risk*

## Literaturverzeichnis

- Reduction in Asia Pacific*, Disaster Risk, Resilience, Reconstruction and Recovery, Seiten 213–231. Springer Nature Singapore, Singapore.
- Cutter, S. L., Ash, K. D., und Emrich, C. T. (2014). The geographies of community disaster resilience. *Global Environmental Change*, 29:65–77.
- Cutter, S. L., Barnes, L., Berry, M., Burton, C., Evans, E., Tate, E., und Webb, J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change*, 18(4):598–606.
- Cutter, S. L., Burton, C. G., und Emrich, C. T. (2010). Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, 7(1).
- Dangschat, J. S. (2014). Residentielle Segregation. In Gans, P., Herausgeber, *Räumliche Auswirkungen der internationalen Migration*, Nummer 3 in Forschungsberichte der ARL, Seiten 63–77. Verlag der ARL - Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover; Hannover.
- Davoudi, S., Shaw, K., Haider, L. J., Quinlan, A. E., Peterson, G., Wilkinson, C., Fünfgeld, H., McEvoy, D., und Porter, L. (2012). Resilience: A Bridging Concept or a Dead End? *Planning Theory & Practice*, 13(2):299–333.
- Depietri, Y., Welle, T., und Renaud, F. G. (2013). Social vulnerability assessment of the Cologne urban area (Germany) to heat waves: links to ecosystem services. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 6:98–117.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2023). Wetter- und Klimalexikon. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101452>.
- Eis, D., Helm, D., Laußmann, D., und Stark, K. (2011). Klimawandel und Gesundheit - ein Sachstandsbericht.
- Erk, C. (2016). *Was ist ein System? Eine Einführung in den klassischen Systembegriff*. Red guide. LIT, Wien, Zürich und Münster.
- Feldmeyer, D., Wilden, D., Jamshed, A., und Birkmann, J. (2020). Regional climate resilience index: A novel multimethod comparative approach for indicator development, empirical validation and implementation. *Ecological Indicators*, 119:106861.
- Feldmeyer, D., Wilden, D., Kind, C., Kaiser, T., Goldschmidt, R., Diller, C., und Birkmann, J. (2019). Indicators for Monitoring Urban Climate Change Resilience and Adaptation. *Sustainability*, 11(10):2931.

- Flacke, J., Schüle, S. A., Köckler, H., und Bolte, G. (2016). Mapping Environmental Inequalities Relevant for Health for Informing Urban Planning Interventions-A Case Study in the City of Dortmund, Germany. *International journal of environmental research and public health*, 13(7).
- Folke, C., Carpenter, S. R., Walker, B., Scheffer, M., Chapin, T., und Rockström, J. (2010). Resilience thinking: integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecology and Society*, 15(4).
- Frank, S., Gerwinat, V., Greiwe, U., und Schmitt, J. P. (2022). Mixed-Methods Monitoring of Large-Scale Urban Development Projects: The Case of Lake Phoenix in Dortmund-Hörde. In Gurr, J. M., Parr, R., und Hardt, D., Herausgeber, *Metropolitan Research*, Seiten 367–382. transcript Verlag.
- Friend, R. und Moench, M. (2013). What is the purpose of urban climate resilience? Implications for addressing poverty and vulnerability. *Urban Climate*, 6:98–113.
- Fry, G., Tress, B., und Tress, G. (2007). Integrative landscape research: facts and challenges. In Wu, J. und Hobbs, R. J., Herausgeber, *Key Topics in Landscape Ecology*, Cambridge Studies in Landscape Ecology, Seite 246–268. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gerundo, R., Marra, A., und de Salvatore, V. (2020). Construction of a Composite Vulnerability Index to Map Peripheralization Risk in Urban and Metropolitan Areas. *Sustainability*, 12(11):4641.
- Glaessgen, E. und Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA*, Reston, Virginia. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Goldstein, S. und Brooks, R. B. (2013). *Handbook of Resilience in Children*. Springer US, Boston, MA.
- Greiving, S. und Lindner, C. (2011). Assessment of Flash Flood Risk in a Continuous Urban Fabric by the Example of the City of Dortmund. In Zenz, G., Hornich, R., Herausgeber, *Urban Flood Risk Management – Approaches to enhance resilience of communities*, Seiten 257–262. Verlag der Technischen Universität Graz.
- Gromke, C. und Ruck, B. (2012). Pollutant Concentrations in Street Canyons of Different Aspect Ratio with Avenues of Trees for Various Wind Directions. *Boundary-Layer Meteorology*, 144(1):41–64.

## Literaturverzeichnis

- Gunderson, L. H. und Holling, C. S., Herausgeber (2002). *Panarchy: Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington, D.C.
- He, B.-J., Ding, L., und Prasad, D. (2019). Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: A case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustainable Cities and Society*, 47:101472.
- Heiden, U., Roessner, S., Segl, K., und Kaufmann, H. (2001). Analysis of spectral signatures of urban surfaces for their identification using hyperspectral HyMap data. In *IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (Cat. No.01EX482)*, Seiten 173–177. IEEE.
- Heldens, W., Heiden, U., Esch, T., Mueller, A., und Dech, S. (2017). Integration of remote sensing based surface information into a three-dimensional microclimate model. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125:106–124.
- Hense, A. und Schork, F. (2017). Doing Mixed Methods: Methodenintegrative Ansätze in der Organisationsforschung. In Liebig, S., Matiaske, W., und Rosenbohm, S., Herausgeber, *Handbuch Empirische Organisationsforschung*, Seiten 359–388. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1):1–23.
- Holling, C. S. (1996). Engineering resilience versus ecological resilience. In Schulze, P., Herausgeber, *Engineering within ecological constraints*, Seiten 31–44. National Academy Press, Washington, D.C., USA.
- Home, R. und Bauer, N. (2021). Researchers working with city administrations: Reflecting on transdisciplinary collaboration under conditions of shared goals but different constraints. *Urban Ecosystems*.
- Höppe, P. (1984). *Die Energiebilanz des Menschen*. Nummer 49 in Wissenschaftliche Mitteilungen / Meteorologisches Institut. Universität München, München.
- Höppe, P. (1999). The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2):71–75.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2012). Summary for Policymakers. In Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, und P.M. Midgley, Herausgeber, *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation:*



- A Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IÖR – Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (2018). Monitor der Siedlungs- und Freiraumentwicklung (IÖR-Monitor): Flächenschema. <https://www.ioer-monitor.de/methodik/>.
- Jahn, T., Keil, F., und Marg, O. (2019). Transdisziplinarität: zwischen Praxis und Theorie. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 28(1):16–20.
- Jakubowski, P. (2013). Resilienz – eine zusätzliche Denkfigur für gute Stadtentwicklung. *Informationen zur Raumentwicklung*, (4):371–378.
- Jantsch, E. (1970). Inter- and Transdisciplinary University: A systems approach to education and innovation. *Policy Sciences*, 1(1):403–428.
- Jendritzky, G. (1990). *Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen: Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell*, Band 114 in *Veröffentlichungen der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Hannover Beiträge*. Akad. für Raumforschung und Landesplanung, Hannover.
- Karagiorgos, K., Thaler, T., Heiser, M., Hübl, J., und Fuchs, S. (2016). Integrated flash flood vulnerability assessment: Insights from East Attica, Greece. *Journal of Hydrology*, 541:553–562.
- Kegler, H. (2016). Eine Schwelle im Anthropozän: Vom Wachstum zur Resilienz: Anregungen für ein räumliches Lernprogramm zur resilienten Stadtgesellschaft aus historisch-strategischer Perspektive. In Hahne, U. und Kegler, H., Herausgeber, *Resilienz: Stadt und Region – Reallabore der resilienzorientierten Transformation*, Stadtentwicklung, Seiten 19–60. PL Academic Research, Frankfurt am Main and Bern and Bruxelles and New York and Oxford and Warszawa and Wien.
- Kirstein, M., Schaefer, M., Schnittfinke, T., Greiving, S., und Küsters, R. (2022). Impacts of river flooding on urban agglomerations: a climate-impact analysis and the role of strategic planning for the Ruhr, Germany. *Town Planning Review*, 93(2):165–185.
- Klein, J. T. (2001). The Discourse of Transdisciplinarity: An Expanding Global Field. In Klein, J. T., Häberli, R., Scholz, R. W., Grossenbacher-Mansuy, W., Bill, A., und Welti, M., Herausgeber, *Transdisciplinarity: Joint Problem Solving among Science, Technology, and Society*, Seiten 35–44. Birkhäuser Basel, Basel.
- Kloepfer, M. (2006). *Umweltgerechtigkeit: Environmental Justice in der deutschen Rechtsordnung*, Band 150 in *Schriften zum Umweltrecht*. Duncker & Humblot, Berlin.

## Literaturverzeichnis

- Knaus, M. und Haase, D. (2020). Green roof effects on daytime heat in a prefabricated residential neighbourhood in Berlin, Germany. *Urban Forestry & Urban Greening*, 53:126738.
- Koch, F., Bilke, L., Helbig, C., und Schlink, U. (2018). Compact or cool? The impact of brownfield redevelopment on inner-city micro climate. *Sustainable Cities and Society*, 38:31–41.
- Köckler, H. (2017). *Umweltbezogene Gerechtigkeit: Anforderungen an eine zukunftsweisende Stadtplanung*, Band 2 in *Stadtentwicklung*. PL Academic Research, Frankfurt am Main, Bern, Brüssel, New York, Oxford, Warschau und Wien.
- Köckler, H. (2020). Umweltbezogene Gerechtigkeit. *Nachrichten der ARL*, 50(1-2):24–26.
- Köckler, H. und Sieber, R. (2020). Die Stadt als gesunder Lebensort?! : Stadtentwicklung als ein Politikfeld für Gesundheit. *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz*, 63(8):928–935.
- Köckler, H., Simon, D., Agatz, K., und Flacke, J. (2020). Gesundheitsfördernde Stadtentwicklung. *Informationen zur Raumentwicklung*, 47(1):96–109.
- Kötter, T. und Weiß, D. (2018). *Stresstest Stadt - wie resilient sind unsere Städte? Unsicherheiten der Stadtentwicklung identifizieren, analysieren und bewerten*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn, Stand: Februar 2018, 1. Auflage.
- Kotthaus, S., Smith, T. E., Wooster, M. J., und Grimmond, C. (2014). Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 94:194–212.
- Laschinger, W. und Lötscher, L. (1975). Urbaner Lebensraum : ein systemtheoretischer Ansatz zu aktualgeographischer Forschung. *Geographica Helvetica : Schweizerische Zeitschrift für Geographie*, 30(3):119–132.
- Lee, C. C. (1990). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part II. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 20(2):419–435.
- Leichenko, R. (2011). Climate change and urban resilience. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3):164–168.
- Lengyel, J., Roux, S., und Alvanides, S. (2022). Multivariate analysis of socioeconomic profiles in the Ruhr area, Germany. *Journal of Maps*, 0(0):1–9.

- Li, Z., Erb, A., Sun, Q., Liu, Y., Shuai, Y., Wang, Z., Boucher, P., und Schaaf, C. (2018). Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from sentinel-2A surface reflectance and MODIS/VIIRS surface anisotropy measures. *Remote Sensing of Environment*, 217:352–365.
- Liao, K.-H. (2012). A Theory on Urban Resilience to Floods—A Basis for Alternative Planning Practices. *Ecology and Society*, 17(4):48.
- Lokalkompass Dortmund-Ost (2019). Projektaufakt: Masterplan integrierte Klimaanpassung Dortmund (MiKaDo). [https://www.lokalkompass.de/dortmund/c-politik/projektaufakt-masterplan-integrierte-klimaanpassung-dortmund-mikado\\_a1260159](https://www.lokalkompass.de/dortmund/c-politik/projektaufakt-masterplan-integrierte-klimaanpassung-dortmund-mikado_a1260159).
- Luftqualitätsrichtlinie (2008). Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:02008L0050-20150918>.
- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., de Munck, C., Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., Votsis, A., und Zeidler, J. (2020). City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31:100536.
- Matthews, T., Lo, A. Y., und Byrne, J. A. (2015). Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landscape and Urban Planning*, 138:155–163.
- Matzarakis, A. und Amelung, B. (2008). Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. In Thomson, M. C., Garcia-Herrera, R., und Beniston, M., Herausgeber, *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*, Band 92, Seiten 161–172. Springer Netherlands, Dordrecht.
- McEvoy, D., Fünfgeld, H., und Bosomworth, K. (2013). Resilience and Climate Change Adaptation: The Importance of Framing. *Planning Practice and Research*, 28(3):280–293.
- Meerow, S., Helmrich, A. M., Andrade, R., und Larson, K. L. (2021). How do heat and flood risk drive residential green infrastructure implementation in Phoenix, Arizona? *Urban Ecosystems*.
- Meerow, S., Newell, J. P., und Stults, M. (2016). Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147:38–49.
- Mehra, S.-R. (2021). *Stadtbauphysik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

## Literaturverzeichnis

- Meyer, J. S., Ingersoll, C. G., McDonald, L. L., und Boyce, M. S. (1986). Estimating Uncertainty in Population Growth Rates: Jackknife vs. Bootstrap Techniques. *Ecology*, 67(5):1156–1166.
- Moghadas, M., Asadzadeh, A., Vafeidis, A., Fekete, A., und Kötter, T. (2019). A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35:101069.
- Moser, S., Meerow, S., Arnott, J., und Jack-Scott, E. (2019). The turbulent world of resilience: interpretations and themes for transdisciplinary dialogue. *Climatic Change*, 153(1-2):21–40.
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L., und West, J. (2004). Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change*, 14(4):303–313.
- Ohlmeyer, K., Schaefer, M., Kirstein, M., Gruehn, D., und Greiving, S. (2022). Introducing environmental-justice analysis into urban planning practices in the city of Bottrop, Germany. *Town Planning Review*, 93(2):187–210.
- OKF – Open Knowledge Foundation (2022). Open Definition: Defining Open in Open Data, Open Content and Open Knowledge: Version: 2.1. <https://opendefinition.org/od/2.1/de/>.
- Openshaw, S. (irca 1983). *The modifiable areal unit problem*, Band 38 in *Concepts and techniques in modern geography*. Geo Books, Norwich.
- Otto, A., Kern, K., Haupt, W., Eckersley, P., und Thieken, A. H. (2021). Ranking local climate policy: assessing the mitigation and adaptation activities of 104 German cities. *Climatic Change*, 167(1-2).
- Paas, B., Schmidt, T., Markova, S., Maras, I., Ziefle, M., und Schneider, C. (2016). Small-scale variability of particulate matter and perception of air quality in an inner-city recreational area in Aachen, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(3):305–317.
- Paas, B. und Schneider, C. (2016). A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter. *Atmospheric Environment*, 145:392–404.
- Pearl, R. (1927). The Growth of Populations. *The Quarterly Review of Biology*, 2(4):532–548.
- Pestel Institut (2010). Regionale Krisenfestigkeit: Eine indikatorengestützte Bestandsaufnahme auf der Ebene der Kreise und kreisfreien Städte. [https://www.braunschweig.de/politik\\_verwaltung/fb\\_institutionen/staedtische\\_gesellschaften/bsmportal/spitzenposition/Regionale-Krisenfestigkeit-Pestel-Institut\\_011211.pdf](https://www.braunschweig.de/politik_verwaltung/fb_institutionen/staedtische_gesellschaften/bsmportal/spitzenposition/Regionale-Krisenfestigkeit-Pestel-Institut_011211.pdf).

- Piegat, A. (2001). *Fuzzy Modeling and Control*, Band 69 in *Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Physica-Verlag HD, Heidelberg.
- Pimm, S. L. (1984). The complexity and stability of ecosystems. *Nature*, 307(5949):321–326.
- Reghezza-Zitt, M., Rufat, S., Djament-Tran, G., Le Blanc, A., und Lhomme, S. (2012). What Resilience Is Not: Uses and Abuses. *Cybergeo: European Journal of Geography*, (621):1–27.
- Rodríguez-Izquierdo, E., Cid, A., García-Meneses, P. M., Peña-Sanabria, K. A., Lerner, A. M., Matus-Kramer, A., und Escalante, A. E. (2022). From resilience attributes to city resilience. *Landscape and Urban Planning*, 226(4):104485.
- RVR – Regionalverband Ruhr (2020). Gründachkataster. <https://www.rvr.ruhr/themen/oekologie-umwelt/startseite-klima/gruendachkataster/>.
- Sandmann, S., Hochgürtel, G., Piroska, R., und Steffens, C. (2022). Cop4ALL NRW – Ableitung der Landbedeckung in Nordrhein-Westfalen mit Fernerkundung und künstlicher Intelligenz. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, 147(5):299–310.
- Sandoval, V., Gonzalez-Muzzio, C., und Albornoz, C. (2014). Resilience and Environmental Justice: Potential Linkages. *Procedia Economics and Finance*, 18:416–424.
- Schaefer, M. (2022). Between vision and action: the predicted effects of co-designed green infrastructure solutions on environmental burdens. *Urban Ecosystems*, 25(6):1805–1824.
- Schaefer, M., Ebrahimi Salari, H., Köckler, H., und Thinh, N. X. (2021). Assessing local heat stress and air quality with the use of remote sensing and pedestrian perception in urban microclimate simulations. *Science of The Total Environment*, 794(3):148709.
- Schaefer, M., Thinh, N. X., und Greiving, S. (2020). How Can Climate Resilience Be Measured and Visualized? Assessing a Vague Concept Using GIS-Based Fuzzy Logic. *Sustainability*, 12(2):635.
- Scheffer, M., Hosper, S. H., Meijer, M.-L., Moss, B., und Jeppesen, E. (1993). Alternative equilibria in shallow lakes. *Trends in ecology & evolution*, 8(8):275–279.
- Schlosberg, D. (2007). *Defining Environmental Justice*. Oxford University Press.
- Schnur, O. (2013). Resiliente Quartiersentwicklung? Eine Annäherung über das Panarchie-Modell adaptiver Zyklen. *Informationen zur Raumentwicklung*, (4):337–350.

## Literaturverzeichnis

- Scholz, R. W. (2020). Transdisciplinarity: science for and with society in light of the university's roles and functions. *Sustainability Science*, 15(4):1033–1049.
- Scholz, R. W. und Steiner, G. (2015). The real type and ideal type of transdisciplinary processes: part II—what constraints and obstacles do we meet in practice? *Sustainability Science*, 10(4):653–671.
- Sharifi, A. und Yamagata, Y. (2022). Smart cities and climate-resilient urban planning. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 49(5):1347–1353.
- Sharmin, T., Steemers, K., und Matzarakis, A. (2017). Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 34:293–308.
- Shi, L., Chu, E., Anguelovski, I., Aylett, A., Debats, J., Goh, K., Schenk, T., Seto, K. C., Dodman, D., Roberts, D., Roberts, J. T., und VanDeveer, S. D. (2016). Roadmap towards justice in urban climate adaptation research. *Nature Climate Change*, 6(2):131–137.
- Shrestha, R., Flacke, J., Martinez, J., und van Maarseveen, M. (2016). Environmental Health Related Socio-Spatial Inequalities: Identifying "Hotspots" of Environmental Burdens and Social Vulnerability. *International journal of environmental research and public health*, 13(7).
- Sieber, R., Faulenbach, L., Fuchs, M., und Gülleken, L. (2022). The challenges of co-research in labs in real-world contexts: empirical findings from four labs in the context of urban climate-change research. *Town Planning Review*, 93(2):139–163.
- Solecki, W., Leichenko, R., und O'Brien, K. (2011). Climate change adaptation strategies and disaster risk reduction in cities: connections, contentions, and synergies. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 3(3):135–141.
- Stadt Dortmund (2019). Statistikatlas: Dotmunder Statistik 2019. [https://www.dortmund.de/media/p/statistik/pdf\\_statistik/veroeffentlichungen/statistikatlas/215\\_-\\_Statistikatlas\\_-\\_2019.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/statistik/pdf_statistik/veroeffentlichungen/statistikatlas/215_-_Statistikatlas_-_2019.pdf).
- Stadt Dortmund (2022). 20. Jahrhundert - "heute": Strukturkrise und Strukturwandel. [https://www.dortmund.de/de/leben\\_in\\_dortmund/ausunsererstadt/stadtportraet/stadtgeschichte/20jahrhundert/strukturkrise\\_und\\_wandel/index.html](https://www.dortmund.de/de/leben_in_dortmund/ausunsererstadt/stadtportraet/stadtgeschichte/20jahrhundert/strukturkrise_und_wandel/index.html).
- Stadt Dortmund Umweltamt (2021). Masterplan integrierte Klimaanpassung Dortmund: MiKaDo: Endversion des Gesamtberichtes. [https://www.dortmund.de/de/leben\\_in\\_dortmund/umwelt/umweltamt/klimaschutz\\_energie/startseite\\_klimaschutz/klimafolgenanpassung/masterplan\\_integrierte\\_klimaanpassung\\_dortmund/index.html](https://www.dortmund.de/de/leben_in_dortmund/umwelt/umweltamt/klimaschutz_energie/startseite_klimaschutz/klimafolgenanpassung/masterplan_integrierte_klimaanpassung_dortmund/index.html).

- Stelzer, F., Becker, S., Timm, J., Adomßent, M., Simon, K.-H., Schneidewind, U., Renn, O., Lang, D., und Ernst, A. (2018). Ziele, Strukturen, Wirkungen transformativer Forschung. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 27(4):405–408.
- SynVer\*Z – Synthese und Vernetzung \* Zukunftsstadt (2022). Landkarte der Projekte. <https://www.nachhaltige-zukunftsstadt.de/projekte/landkarte-der-projekte/>.
- Taubenböck, H., Reiter, M., Dosch, F., Leichtle, T., Weigand, M., und Wurm, M. (2021). Which city is the greenest? A multi-dimensional deconstruction of city rankings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 89:101687.
- Thinh, N. X. und Hedel, R. (2005). Vergleich zwei räumlicher Bewertungsmethoden- Compromise Programming und regelbasierte hierarchische Fuzzy-Bewertung. In Wittmann, J. und Thinh, N. X., Herausgeber, *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften*, Seiten 57–66. Umweltinformatik, Shaker Verlag Aachen.
- Tierney, K. und Bruneau, M. (2007). Conceptualizing and measuring resilience: A key to disaster loss reduction. *TR News*, 250.
- Tress, G., Tress, B., und Fry, G. (2005). Clarifying Integrative Research Concepts in Landscape Ecology. *Landscape Ecology*, 20(4):479–493.
- Tsoka, S. (2017). Investigating the Relationship Between Urban Spaces Morphology and Local Microclimate: A Study for Thessaloniki. *Procedia Environmental Sciences*, 38:674–681.
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., und Theodosiou, T. (2018). Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. *Sustainable Cities and Society*, 43:55–76.
- UN – United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Herausgeber (2022). Goal 11: Make cities and human settlements inclusive, safe, resilient and sustainable. <https://sdgs.un.org/goals/goal11>.
- Walker, B., Holling, C., Carpenter, S., und Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Conservation Ecology*, 9(2).
- Walker, B. H. (2020). Resilience: what it is and is not. *Ecology and Society*, 25(2).
- Walker, B. H. und Salt, D. A. (2006). *Resilience thinking: Sustaining ecosystems and people in a changing world*. Island Press, Washington, DC.
- WCED – World Commission on Environment and Development (1987). Our common future: Towards sustainable development.

## Literaturverzeichnis

- Wegener, M. (1998). GIS and Spatial Planning. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(7):48–52.
- Werner, E. E., Bierman, J. M., und French, F. E. (1971). *The children of Kauai: A longitudinal study from the prenatal period to age ten*. University of Hawaii Press, Honolulu.
- Westerholt, R. (2022). Exploratory Statistical Analysis of Spatial Structures in Urban Datasets. In Gurr, J. M., Parr, R., und Hardt, D., Herausgeber, *Metropolitan Research*, Urban Studies, Seiten 37–62. transcript Verlag, Bielefeld, Germany.
- Wieland, R., Voss, M., Holtmann, X., Mirschel, W., und Ajibefun, I. (2006). Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT): 1. Structure and possibilities. *Ecological Informatics*, 1(1):67–76.
- Wilden, D. und Feldmeyer, D. (2021). Measuring knowledge and action changes in the light of urban climate resilience. *City and Environment Interactions*, 10:100060.
- Wilkinson, C. (2012). Social-ecological resilience: Insights and issues for planning theory. *Planning Theory*, 11(2):148–169.
- Willmott, C. J. (1981). On the validation of models. *Physical Geography*, 2(2):184–194.
- Wright Morton, L., Eigenbrode, S. D., und Martin, T. A. (2015). Architectures of adaptive integration in large collaborative projects. *Ecology and Society*, 20(4).
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353.
- Zhang, G., He, B.-J., Zhu, Z., und Dewancker, B. J. (2019). Impact of Morphological Characteristics of Green Roofs on Pedestrian Cooling in Subtropical Climates. *International journal of environmental research and public health*, 16(2).
- Zheng, B., Bernard BEDRA, K., Zheng, J., und Wang, G. (2018). Combination of Tree Configuration with Street Configuration for Thermal Comfort Optimization under Extreme Summer Conditions in the Urban Center of Shantou City, China. *Sustainability*, 10(11):4192.



**Teil II**

**Publikationen**




## Artikel 1: Eckdaten und Autorenbeiträge

|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>Referenz</b> | Schaefer, M., Thinh, N. X., und Greiving, S. (2020). How Can Climate Resilience Be Measured and Visualized? Assessing a Vague Concept Using GIS-Based Fuzzy Logic. <i>Sustainability</i> , 12(2):635   |
| <b>Beiträge</b> | <b>M.S.:</b> Literaturlauswertung, methodisches Design, Beschaffung und Aufbereitung notwendiger (Geo-)Daten, Kartierung und Analyse, Visualisierung der Ergebnisse, vollständige Erarbeitung des Manuskripts; <b>N.X.T.:</b> Substanzielle Hinweise zum Manuskript, Konzeptualisierung; <b>S.G.:</b> Substanzielle Hinweise zum Manuskript, Projektkoordinator des betreffenden BMBF-Forschungsprojekts Zukunft-Stadt-Region-Ruhr (ZUKUR) |
| <b>Historie</b> | Eingereicht: 09. Dezember 2019<br>Akzeptiert: 11. Januar 2020<br>Veröffentlicht: 15. Januar 2020   |

Als *Open Access* unter der [Creative Commons \(CC-BY\) 4.0 Lizenz](#) veröffentlicht.

Article

# How Can Climate Resilience Be Measured and Visualized? Assessing a Vague Concept Using GIS-Based Fuzzy Logic

Mathias Schaefer <sup>1,\*</sup> , Nguyen Xuan Thinh <sup>1</sup> and Stefan Greiving <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Spatial Information Management and Modelling (RIM), TU Dortmund University, 44227 Dortmund, Germany; nguyenthinh@tu-dortmund.de

<sup>2</sup> Institute of Spatial Planning (IRPUD), TU Dortmund University, 44227 Dortmund, Germany; stefan.greiving@tu-dortmund.de

\* Correspondence: mathias.schaefer@tu-dortmund.de

Received: 9 December 2019; Accepted: 11 January 2020; Published: 15 January 2020



**Abstract:** As negative impacts of climate change tend to increase in the future, densely-populated cities especially need to take action on being robust against natural hazards. Consequently, there is a growing interest from scientists in measuring the climate resilience of cities and regions. However, current measurements are usually assessed on administrative levels, not covering potential hotspots of hazardous or sensitive areas. The main aim of this paper focusses on the measurement of climate resilience in the City of Dortmund, Germany, using Geographic Information Systems (GIS). Based on a literature review, we identified five essential components of climate resilience and initially designed a theoretical framework of 18 indicators. Since climate resilience is still a vague concept in scientific discourses, we implemented local expert knowledge and fuzzy logic modelling into our analysis. The benefit of this study not only lies in the fine-scale application, but also in the relevance for multiple disciplines by integrating social and ecological factors. We conclude that climate resilience varies within the city pattern, with the urban core tending to be less resilient than its surrounding districts. As almost the entire geodata set used is freely available, the presented indicators and methods are to a certain degree applicable to comparable cities.

**Keywords:** climate resilience; sustainable development; urban planning; remote sensing; fuzzy logic; compromise programming

## 1. Introduction

The worldwide issue of climate change, population growth and environmental pollution is becoming increasingly apparent to the general public—including the youth—and is discussed controversial via social media [1,2]. However, it is empirically documented that urban agglomerations with high population densities are particularly confronted with air and noise pollution, urban heat islands' effects due to a lack of green spaces, or flash floods enforced by ongoing surface sealing processes. Despite these circumstances, it is also expected that 68% of the world's population by the year 2050 will live in cities, which probably reinforces the above issues [3]. It is plausible that in the case of an extreme event many people and infrastructures in large cities are affected at once, as they are cumulated in a relatively small space, which also triggers cascading effects such as disruptions of supply chains which leads to negative economic impacts. With economic losses of over 96 billion euros due to climate-related extremes between 1980–2017, Germany is ranked on the first place in the Europe Economic Area (EEA) [4]. In addition, in 2003 and 2018, Germany had its two hottest and driest meteorological summers since the beginning of systematic weather records in 1881 [5,6].

Whenever current debates on climate change and extreme weather events are discussed in the context of urban planning, the concept of climate resilience is often echoed by politicians and scientists. In brief, a climate resilient city has the ability to adapt proactively to changing environmental conditions and recover quickly from the negative consequences of external shocks triggered by extreme weather events. This indicates that climate resilient thinking goes beyond but not exclude climate protection or reactive climate adaptation, as described through Walker and Salt's metaphor of a ball in a basin: The ball (i.e., urban system) maintains its general features and functions in a basin (the ability to change or respond to a shock), but after external extreme events, the ball can be pushed into a new basin with different structures and conditions, by maintaining its self-organizing capacity [7]. Responding to an external shock enables a city to recover after extreme events and to keep its basic essential functions, which is also highly depending on the public wellbeing, the build environment and natural capital [8]. As the vulnerability of the exposed people plays a major role in such events, social inequity in health and environmental infrastructure access can even reinforce potential harms through extreme events [9,10]. Environmental justice or social-ecological equity is a social aim to provide adequate access to spatial and environmental goods (including human protection against environmental burdens or security of climate extreme events), which is also affecting the quality of life at a place of residence. Especially subgroups like the elderly, infants, homeless, poor, or disabled tempt to be more vulnerable to environmental burdens, often driven by residential segregation processes over time [11]. To establish a connection, a current issue of social-ecological inequalities and extreme weather events is that "there have been relatively few attempts to integrate environmental justice into resilience thinking", although both domains are inextricably intertwined [12,13]. For urban planners, this demands designing settlements and infrastructures to meet the challenges of today's and tomorrow's climate, while also capturing connections between vulnerabilities and social-environmental challenges [14]. In a sense of a "just climate resilience", risks to the urban system and its subsystems must be examined in a holistic way [8,15]. This requires also a parallel modelling approach which means that demographic and socioeconomic changes are projected in parallel to the changes of the climatic system consideration of socio-economic changes [16]. Over the last 10 years, the number of international publications on resilience in general has increased exponentially, underlining the attraction of the topic [17,18]. This enormous popularity leads to the stimulation of many interdisciplinary dialogues in academic and policy circles [18]. On the contrary, due to the wide-ranging forms of interpretation, this "fuzziness" often causes ambiguities in the scientific operationalization process and therefore impedes convergent decision making for new strategies and policies [19–21]. Fuzzy logic provides a suitable tool for modelling vague, imprecise, incomplete and subjective data, combining linguistic variables with IF-THEN rules in order to emulate human reasoning. Therefore, fuzzy logic is an effective candidate for measuring and assessing resilience, e.g., in Multi Criteria Decision Analyses (MCDA) [22].

Since 2015, there is also a considerable interest of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) in funding research projects that are dealing with adaptation to climate change and elaborating solutions for cities and regions to strengthen their resilience [23]. The work is part of the BMBF project "Zukunft-Stadt-Region-Ruhr" (ZUKUR), which focuses on a cross-disciplinary approach to contribute to the reduction of social-ecological inequalities and the increase of climate resilience at the scale of regions, cities and neighborhoods. One key research aim of ZUKUR is to find out, whether environmental disadvantaged and sensitive societal groups are extra affected by multiple environmental threads in the Ruhr-Area, Germany. This article demonstrates an interdisciplinary GIS-based fuzzy logic approach on the City of Dortmund to examine spatial distribution patterns in the light of climate resilience and social-ecological disparities. On the basis of a comprehensible framework and via cartographical visualizations, potential (non-)climate resilient locations can be identified. Following this line of thought, the debate on climate resilience indicators and open geodata—especially in Germany—should be enriched. The results should provide a point of departure to launch an evaluation process in order to inform urban planning and decision makers early about climate impacts

and spatial disparities. Doing so, also allows monitoring the progress and effectiveness of devised climate resilience strategies over time.

## 2. A Brief Review of Understanding and Measuring Climate Resilience

The resilience term initially got popular by the psychologist E. Werner after documenting the individual development of 698 Hawaiian children over 40 years. The major finding was that some children recovered more from similar perinatal traumata and adverse conditions (e.g., poverty) than others. Those children were “resilient” [24]. In 1973, C. S. Holling introduced the resilience concept to the social-ecological sector, describing it as the capacity of an ecosystem to retain its basic organization while undergoing necessary change in the face of ecological disturbances (e.g., by human) [25]. Here, the bounce forward behavior of an ecosystem after a disturbance joined the scientific discourse and replaced previous perspectives on a bounce back effect into equilibrium, [26]. While the global debate around climate change got more serious at the late 1990s, resilience also gained prominence in the field of climate adaptation in cities and regions [27]. Today, the opportunity to innovation and reorganization after disturbances for a city as a normative agenda is raising a multitude of urban planning topics, often following the dynamic credo that “we hardly ever return to where we were” [21]. First influences on European spatial planning can be identified by the fact that climate and disaster risks should be important elements in the decision making process of the environmental impact assessment (EIA) [28]. Climate resilience is also widely understood as a complement to a sustainable development, because the transition towards a state that meets the needs of the present without compromising the ability to meet the future generations is prevented, if climate threats interrupt planning processes [29–31]. As a consequence, policies that promote climate resilience can also contribute to more sustainable structures, not least because resilience is addressed by Sustainable Development Goal 11 (SDG) of the United Nations (UN) 2030 Agenda [32–34].

It is not intended to further expand the theoretical debate of the resilience concept, as this has been conducted thoroughly in previous studies [17,35,36]. Nevertheless, for a comprehensible operationalization and measuring procedure in GIS, a pragmatic definition has to be chosen which shows the key aspects of climate resilience of a city with respect to its social-ecological systems [37]. Drawing on the great amount of existing research articles and reviews, the essential components of climate resilience respected in this study are summarized in Table 1. In theory, the more pronounced these components are, the more resilient a city is to weather related stresses and shocks.

**Table 1.** Persistent key components of climate resilience definitions respecting different researches.

|   | Explanation  | Source        |
|---|--|---------------|
| R | Robustness and adaptiveness to climate related stresses and shocks     | [35,38]       |
| E | Evaluation and Monitoring: resilience as a process                     | [39,40]       |
| S | Scale (Countries, Regions, Cities, Neighborhoods, Individual)          | [39–42]       |
| I | Interdisciplinarity: resilience as umbrella for different sectors      | [18,40]       |
| L | Learning and innovation  | [37,43,44]    |
| I | Information and transparency: resilience as participation tool         | [40,45]       |
| E | Environment (natural and built up)                                     | [17,35]       |
| N | Networked systems and actors (multilevel governance)                   | [35]          |
| C | Capacity to transform after disturbance but maintain self-organization | [7,21,46]     |
| E | Equity and Justice: resilience measurements must not exclude others    | [42,44,47,48] |

When it comes to the measurement of climate resilience, robustness (Robustness describes the ability of a city (and its subsystems) to withstand external shocks, to absorb them or to limit the adverse effects and consequences) as well as adaptiveness (Adaptiveness enables a city to cope with adverse effects and to respond to changed climatic conditions in the long term, which requires in particular financial resources as well as planning and design decisions [49]) are regarded as the two prerequisites that can be further operationalized, embracing the other aspects mentioned in Table 1 [50,51]. While

robustness can be covered quite well with secondary (geo-)data, the adaptiveness concept is mostly seen through a more qualitative lens and therefore challenging to manage in GIS-based analysis. Currently, this primary data can be assessed by volunteered geographic information (VGI), household surveys or interviews on topics like active climate adaptation strategies and masterplans [45,52]. On the other hand, if not integrated into existing surveys, such primary data collection may be very time and cost consuming. In addition, it is difficult to guarantee a full coverage of an entire city while only catching a brief impression of the interviewees.

From a global point of view, the GIS-based measurement of resilience with indices or scorecards is nothing new [53–57]. Unfortunately, a concrete application in Germany, especially *within* the community scale, is still missing. For example, a first interdisciplinary proposal could be perceived in 2010 by comparing the vulnerability of German autonomous cities and regions using 18 indicators [58]. As a first step onto resilience measurement, Brunetta and Salata conceived a GIS-approach to map the impact of shocks and linear pressures on sensitivities in the city of Moncalieri, Italy [59]. Moghadas et al. introduced a multi criteria approach using weighting factors for assessing urban flood resilience in the 22 urban districts of Tehran, Iran [60]. Based on several workshops and literature review, in 2019 Feldmeyer et al. provided a theoretical framework of 24 indicators to assess urban climate resilience at city scale in Germany [40]. To our knowledge, these indicators have not been applied or tested on a practical example.

To summarize, predefined metrics on climate resilience in Germany are too abstract for urban planning decisions, as the results would not show distributional effects, but one resilience score for the whole urban fabric or its districts, corresponding to the Modifiable Areal Unit Problem (MAUP) [61]. Often, these limitations are influenced by data restrictions. Furthermore, because of the different situations cities are facing, it is difficult to identify if one city is more resilient than the other using the same indicator set. Every municipality is shaped by its own demographic and institutional structures. External shocks may occur in different places, which accordingly implies that “a single prescriptive scorecard does not suit cities of different sizes and contexts” [39].

### 3. Study Area

The City of Dortmund, which belongs to the federal state of North Rhine-Westphalia (NRW), is located in the Ruhr-Area, the largest urbanized agglomeration in Germany, where the three administrative districts Münster, Düsseldorf, and Arnsberg come together (Figure 1). With about 600,000 inhabitants (2018) and a size of 280 km<sup>2</sup>, Dortmund is the largest city in the Ruhr-Area and one of the main economic hubs in NRW [62]. During the phase of industrialization in the 19th century, Dortmund quickly developed into a center of coal and steel industry, which led to an increased immigration of workers from Eastern Europe and the establishment of new workers’ housing estates. In the late 20th century, deindustrialization processes resulted in enormous brown fields and a fundamental transition from a heavy-industry based economy to a service sector based model in the whole Ruhr-Area, which was accompanied by high unemployment rates caused by a loss of 90,000 jobs between 1960 and 1994 just in the City of Dortmund [63]. While retaining the image of an industrial city, new jobs were created, mainly in the tertiary and finally quaternary sector. Especially the southern districts of Dortmund now offer attractive housing and employment locations, whereas the northern districts are marked by dense building structures with a high degree of unemployment and migration background, finally resulting in a socioeconomic north-south polarization [64].

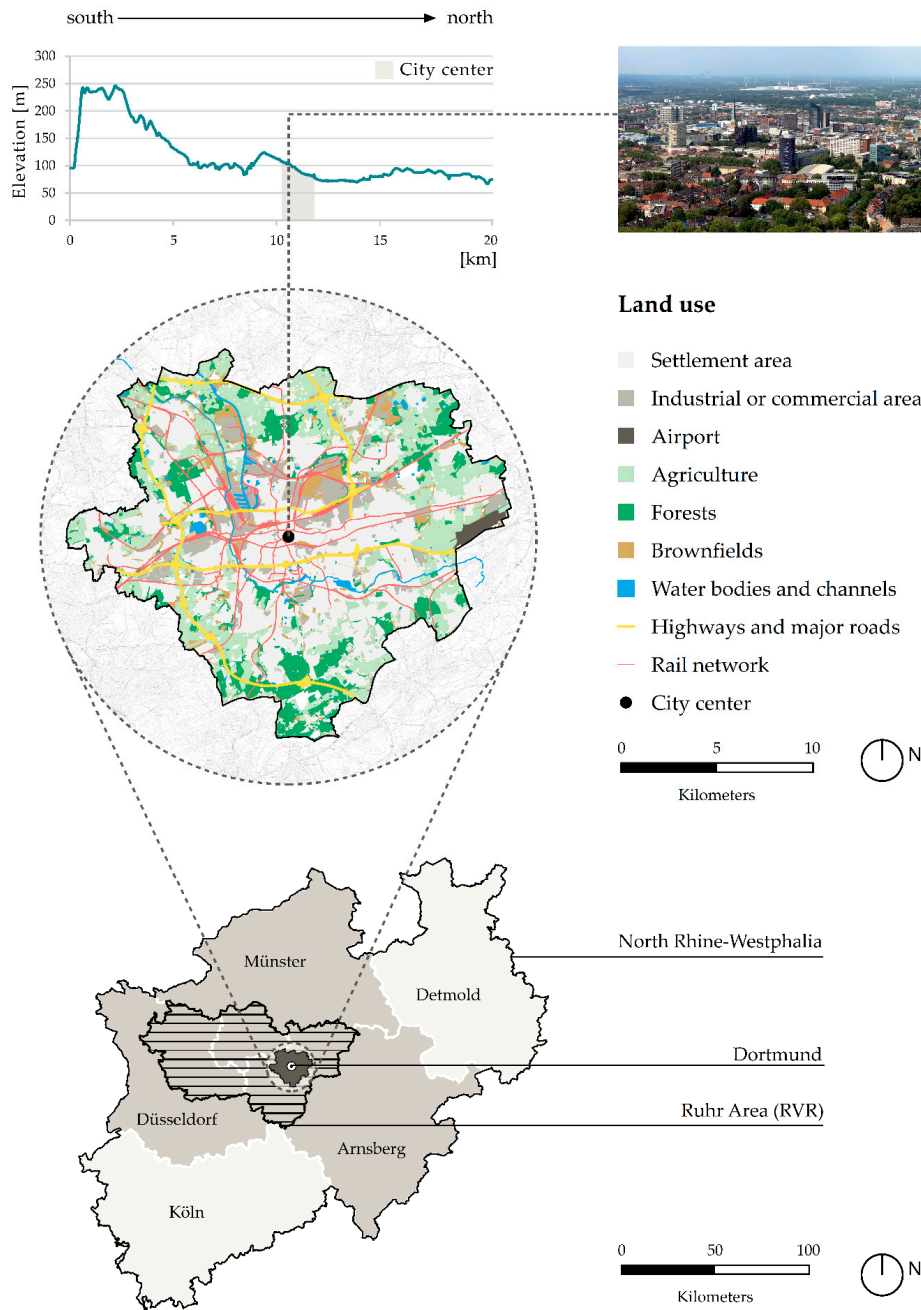


Figure 1. Study area.

Today, as another result of former coal mining activities, large parts of the city’s territory are subsided up to 20 m, which are mostly equipped with artificial drainage facilities [65]. The land use of the central city is characterized by a high degree of settlement. Approximately one third of the settlement areas are sealed to more than 60% and often characterized by urban heat islands. On the



contrary, radial surroundings of open and green spaces as well as agricultural uses are providing nightly fresh and cold air.

The two main reasons for choosing the City of Dortmund as study area are as follows:

1. During the last decade, the effects of climate change like urban flooding, storms, heat waves and droughts have been particularly noticeable for local residents. Significantly urban flooding due to a heavy rainfall event in July 2008 caused damage to infrastructures and residential properties: Within two and a half hours, 203 mm of precipitation fell over the western part of Dortmund, especially the sub-districts Marten and Dorstfeld [66].

The drought and hot summer of 2018 enforced many urban heat islands and crop losses, while storms in 2014, 2018 and 2019 caused damage and harm to people and the built environment. As a reaction to the increasing number of extreme weather events, on 15 November 2018 the council decided to develop an integrated climate adaptation masterplan to strengthen resilience for the entire city. The analysis results could support the conceptualization procedure. Previous GIS-based studies have also shown that—to a certain degree—Dortmund is confronted with social-ecological inequalities [67,68].

2. Since January 2017, the availability of open geodata of the surveying and cadastral administration in NRW has been considerably improved [69]. As a consequence, digital elevation models (DEM), digital landscape models (DLM), noise pollution mappings, climate analyses and high-resolution Digital Orthophotos (DOP) are freely available under the German data license »dl-de/by-2-0«. In this sense, there are fewer formal and financial barriers to the outlined research purpose and more precise analyses up to parcel level are feasible. The City of Dortmund should serve as an illustrative example to present the potential application of this free geodata and to connect those individual data sets thematically.

#### 4. Materials and Methods

In general, the workflow of our methodology can be divided into four analytical steps (Figure 2). The initial preparation phase was important to create an overview of current resilience measurements and the landscape of possible indicators. Based on these findings, dimensions, criteria and indicators representing climate resilience of a city were carried out as a hierarchical framework, integrating practical knowledge for adequate indicator selection and data acquisition that fit the priorities of Dortmund. The preparation and indicator grid calculation was based on ArcGIS for Desktop Advanced 10.4.1 (Environmental Systems Research Institute, ESRI) as well as its Spatial Analyst and Network Analyst extensions. In addition, the freely available landscape analysis program FRAGSTATS 4.27 [70,71] and remote sensing software ENVI 5.4 (Exelis Visual Information Solutions) were applied.

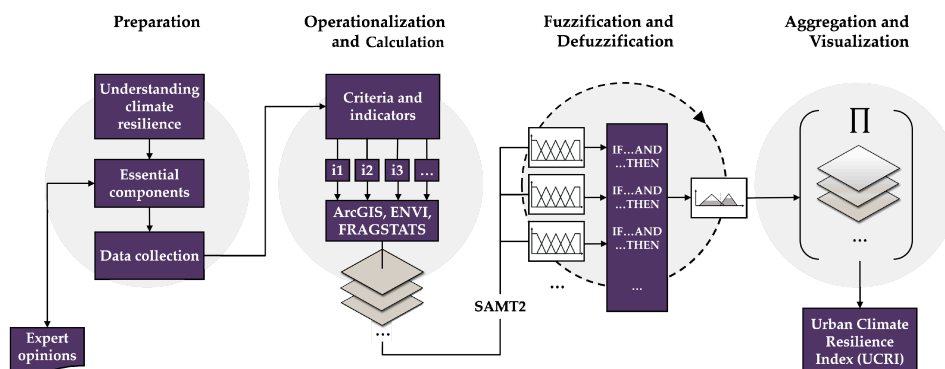


Figure 2. Schematic workflow of the study.

After operationalization and calculation, all raster grids with crisp values were imported into the freely available Spatial Analysis and Modelling Tool SAMT2 [72,73], followed by fuzzification with corresponding linguistic variables, rule-based inference process and defuzzification to standardized crisp variables. This step was iterated on every hierarchical level (indicators, criteria and dimensions) of the framework. The final procedure was the aggregation of the defuzzified raster grids to a general Urban Climate Resilience Index (UCRI), visualizing more and less climate resilient locations within the community scale.

#### 4.1. Data Collection and Preparation

To properly address the situated problem statement, the use of consistent data is essential. As described earlier, secondary open data that is routinely refreshed and published by statistical agencies is important for a city to compare its own state over time. For this study, a broad dataset was collected, mainly composed of raster, vector and socio-economic data (Table 2). With the use of the freely available road vectors as linear features from OpenStreetMap (OSM), two network datasets both for car driving as well as walking routes were created using Network Analyst. This procedure allowed us to quantify the access of different locations within a certain catchment area (i.e., the access of open and green spaces) in a more realistic way than other tools like simple buffering or Euclidean distance, because it orientates on the real road network like a navigation system [74]. For car driving, missing information on maxspeed limitations (km/h) were subsequently added, using standard values for each road type (Table A1) [75]. Fire brigade operations due to extreme weather events (storms, heavy rainfalls and heat stress) between 2008 and 2018 were provided as table-based long–lat-coordinates, which initially were converted to multipoint data in GIS. Raster data on noise pollution was previously modelled by the Environmental Office Dortmund. Other noise pollutants like construction noise or sports and recreational noise are not included.

Yet important questions about social-ecological phenomena and data on air pollution were not included in this work, as the finest available spatial resolution here is  $1 \times 1$  km of different pollutant emissions in NRW for 2013 and thus too coarse and outdated for the research purpose. However, because noise pollution is likely to spatially correlate on air pollution (especially next to streets and industrial sites), the noise pollution mapping appears to give an insight, where potential air pollution could occur within the city [76]. The provided heavy rain hazard mapping was previously modelled by the engineering office Beck GmbH & Co. KG (City of Wuppertal) using a DSM of 2012 for a return period of 100 years on a spatial resolution of  $1 \times 1$  m. The mapping consists of three raster images, including flow directions, water depths in m and flow velocity in m/s. Unfortunately, a modelling of a return period of more than 200 years, which happened in Dortmund Marten in 2008, was not available. Cold air volume flows in  $\text{m}^3/\text{s}$  have been calculated in 2012 by GEO-NET Umweltconsulting GmbH in cooperation with Prof. Dr. G. Groß (University Hannover) for entire NRW with the application of the mesoscale FITNAH climate simulation model, respecting the development of various climatic parameters such as wind and temperature over a daily cycle on a grid of  $100 \times 100$  m. For spatial modelling, an air temperature of  $20^\circ\text{C}$  at 21 o'clock, a cloudless sky and no supra-regional wind currents for modelling was assumed. In order to generate a digital surface and digital terrain model, Airborne Laserscanning 3D- point data with a 0.5 m interval was interpolated to a  $1 \times 1$  m raster using natural neighbor algorithm in GIS. By subtracting the DTM of the DSM, a normalized Digital Surface Model (nDSM) could be calculated, highlighting off-terrain objects (e.g., buildings, trees etc.). Building parcels of the city with actual land use could be examined and extracted out of the Authoritative real estate cadastre information system (ALKIS). The Land Use classification of the ATKIS Basic DLM meets the requirements for high thematic and spatial resolution ( $\pm 3$  m), while being available for complete NRW with a nationwide thematically consistency and a cyclically update every 3–5 years.

Table 2. Data used.

| Format                                | Description   | Resolution/Scale                    | Source  | Year             |
|---------------------------------------|---|-------------------------------------|---|------------------|
| Raster                                | Landsat 8 Satellite Image (path 197/row 24)   | 30 × 30 m<br>(Cloud Cover: 5.22%)   | United States Geological Survey (USGS)  | 2018             |
|                                       | Digital Orthophotos (n = 332)   | 0.01 × 0.01 m                       | Geobasis NRW (dl-de/by-2-0)   | 2018             |
|                                       | Heavy rain hazard mapping (return period 1%/year)   | 1 × 1 m                             | Municipal Drainage Office Dortmund  | 2019             |
|                                       | Noise mapping from different sources (trains, trams, roads, industry)                                     | 10 × 10 m                           | Environmental Office Dortmund; Federal Office for Railways Bonn   | 2018             |
|                                       | Digital terrain model (DTM) and digital surface model (DSM)   | Point data with 0.5 m spacing       | Geobasis NRW (dl-de/by-2-0)   | 2018             |
| Vector                                | Land Use, Digital Landscape Model of the Federal topographic information system (ATKIS Basis-DLM)         | 1:10.000                            | Geobasis NRW (dl-de/by-2-0)   | 2019             |
|                                       | Building parcels with land use information, Authoritative real estate cadastre information system (ALKIS) | Parcel Level                        | GeobasisNRW (dl-de/by-2-0)  | 2019             |
|                                       | Points of Interest (POI)  | Parcel Level                        | City of Dortmund Website  | 2019             |
|                                       | Road Network  | Parcel Level                        | OpenStreetMap (Geofabrik GmbH, <a href="http://www.download.geofabrik.de">www.download.geofabrik.de</a> ) | 2019             |
|                                       | Fire brigade operations due to extreme weather events   | Long/Lat Coordinates                | Institute of Fire Service and Rescue Technology (IFR) Dortmund  | 2008–2018        |
|                                       | Volume of cold-air flow in m <sup>3</sup> /s  | 100 × 100 m                         | NRW Office for the Protection of Nature, the Environment and Consumers (LANUV)                            | 2019             |
| Socio-demo-graphic and -Economic data | Proportion of infants (0–11 years)  | Statistical sub-districts (n = 170) | Statistics Office Dortmund  | 2017             |
|                                       | Proportion of elderly +65 years   |                                     |   |                  |
|                                       | Proportion of SGBII and SGB XII recipients  |                                     |   |                  |
|                                       | Proportion of single households   |                                     |   |                  |
| Digital Land Use Plans                | Official preparatory Land Use Plan  | 1:20.000                            |   | 2004             |
|                                       | Land Use plans Ev148, InN222, Hu144   | Parcel Level                        | City of Dortmund Website  | 2014, 2012, 1985 |
|                                       | Climate mitigation measures   | 1:500                               |   | Unk.             |
|                                       |   |                                     | Freely available  | On demand        |

Descriptive statistics on unemployment benefit recipients according to the second and twelfth book of the Code of Social Law (SGBII and SGBXII) as well as demographic structure were also involved to this study. They represent potential vulnerable groups which are likely to be particularly exposed to extreme weather events and its consequences, including injuries, heat stress or premature death. Additional information of land use plans and measurements have been manually digitalized in order to capture areas where climate resilience related projects are located in Dortmund.

During the pre-processing of the single Landsat satellite image, Dark Object Subtraction (DOS) algorithm was used to remove atmospheric scattering effects like dust and haze [77]. The transformation to reflectance values is an automated process in ENVI 5.4 by using the sourced Landsat metadata. Cloudless and georectified DOPs, recorded on 29 June 2018, are distributed in a 1 × 1 km square-grid, which had to be mosaicked for the entire study area in order to enable further remote sensing analysis.

Finally, all geodata was projected into the Universal Transverse Mercator coordinate system (UTM) zone 32 north and clipped to the study area, except the two network datasets, which additionally extended 5 km around the city border in order to integrate connections from adjacent municipalities. We chose a consistent 10 × 10 m raster analysis unit, as it provides a high level of detail and compromises between computing time and feasibility. Each cell is finally representing an area which will be tested amongst criteria and indicators for a climate resilient city.

#### 4.2. Indicator Selection and Calculation

In order to coordinate and specify which external stressors and social sensitivities are prioritized for Dortmund, preliminary expert interviews with two staff members of Dortmund's urban planning and environmental office were assessed. Based on the findings of Meerow et al., the following three questions have been asked [12,35]:

1. Whose resilience is prioritized?
2. What climate related extreme events should Dortmund be resilient to?
3. Is the resilience of some areas prioritized over others?

To summarize the experts' answers, major sensitive groups are inhabitants with lower income, as they are living in more densely populated neighborhoods and self-protection as well as personal provision are limited in monetary terms. Heavy rainfall events, air pollution of industrial sites and urban heat island effects are important stressors for Dortmund, while green and open spaces are important as resilience strengthening areas. These findings were taken into account for further indicator selection.

The indicator selection depended on the possibility to be calculated in GIS with the gathered data and therefore matching the fine scale up to neighborhood level. Furthermore, a clear relevance to climate resilience based on the essentials presented in Section 2 had to be ensured. For a better understanding about the framework, criteria and indicators can be structured to an overarching objective in a hierarchical fashion, also referred to as "granulation" in fuzzy logic analyses [78]. In our case, climate resilience of a certain areal (here:  $10 \times 10$  m pixel) within the city corresponds to a normatively overall objective. The maximum number of three raster-grids is allowed as input in SAMT2, so that not more than three factors can be considered on each hierarchical step. Due to the chosen analysis scale and corresponding data restrictions, many indicators which previously were set up for cities do not fit to our purpose, e.g., percent population with a vehicle or percent population with health insurance coverage [20]. On the other hand, the creation and calculation of new indicators on a much finer scale may allow to unmask interdependencies between empirical data that is recorded on broader scales.

As climate resilience is widely seen as a holistic approach, the urban system as a whole firstly had to be operationalized into its major subsystems. Following the general classification of Feldmeyer et al. [40] and Cutter et al. [37], initially five dimensions of an urban system (Environment, Society, Infrastructure, Economy, and Institution) were set up as starting point for operationalization (Table 3). An important precondition was to include social-ecological factors into the indicator set, as the public wellbeing and health of the society plays a major role in terms of the robustness of the system. As a consequence, these factors are particularly present in the Environment (resources and burdens) and Society dimensions. As pointed out in Section 2, the dimensions Environment, Society, and Infrastructure refer to the robustness of the system, while Economy and Institution correspond to its adaptiveness. Of course, this assignment is arguable, but if a city has no prospering economy and political willingness for adaptation measurements—including the repairs of local damages by weather extremes—the adaptiveness may be less pronounced. To describe climate resilience phenomena for all five dimensions, 18 indicators belonging to 12 criteria were determined which will be explained in the following sections.

**Table 3.** Final indicator set for measuring climate resilience in Dortmund.

| Dimension                         | Criterion                          | Indicator (GIS-Acronym)   | Source       |
|-----------------------------------|------------------------------------|---|--------------|
| <b>Robustness</b>                 |                                    |   |              |
| <b>Environment</b>                | Retention sites                    | Degree of unsealed ground (DUG)<br>Slope (SL)   | [40]<br>[79] |
|                                   | Resources                          | Accessibility of public open and green spaces (AccG)  | [42,67,80]   |
|                                   |                                    | Ventilation status (VS)   | [40,81]      |
|                                   | Burdens                            | Heat stress (PET)   | [82]         |
| Noise pollution (NP)              |                                    | [67]  |              |
| <b>Society</b>                    | Hazard to housing                  | Potentially flooded housing parcels (HFld)  | [59]         |
|                                   | History of extreme events          | Number of fire brigade operations due to extreme weather events (2008–2018) (NFO)                           | [40]         |
|                                   | Demographic structure              | Number of 0–11 years olds (INF)   | [68,83]      |
|                                   |                                    | Number of +65 years olds (ELD)  | [67,83]      |
| Number of single-households (SHH) |                                    | [83,84]   |              |
| <b>Infrastructure</b>             | Hazard to Critical Infrastructures | Potentially flooded technical and social infrastructures (TSFld)  | [59,83]      |
|                                   |                                    | Potentially flooded transport and traffic infrastructures (TTFld)   | [59,83]      |
|                                   | Civil Protection                   | Accessibility by fire brigade (AccF)  | [85]         |
|                                   | Health access                      | Drive time to hospitals (AccH)  | [86]         |
| <b>Adaptiveness</b>               |                                    |   |              |
| <b>Economy</b>                    | Diversity of business              | Shannon Diversity Index (SHDI)  | [40]         |
|                                   | Unemployment                       | Number of SGBII and SGBXII recipients (SGB)   | [20]         |
| <b>Institution</b>                | Strategies and plans               | Implementation status of climate resilience related measurements, research projects and land use plans (IN) | [37,40,87]   |

#### 4.2.1. Environment

Unsealed surfaces play a major role as natural infiltration site in case of heavy rainfalls. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) is a multidisciplinary remote sensing index for i.e., determining and analyzing healthy green vegetation, vegetation recovery after a fire occurrence, or urban flooding [88]. As one of the most popular indices in remote sensing, it is simply and quickly to assess with almost every multispectral imagery in GIS, as long as a nearinfrared (NIR) and red (R) band is included:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

The DOP-mosaic with NIR band was used to calculate the NDVI, whereby the resulting values ranged between  $-1$  (water),  $0$  (bare soil) and  $+1$  (trees, healthy vegetation). After visual inspection, a threshold of  $0$  was set for unsealed surface extraction, including agricultural uses and bare soils. As water is also representing an unsealed surface, an extraction threshold was set on  $-0.95$ . The degree of unsealed ground was derived by utilizing moving window technique in FRAGSTATS with a window size of  $100$  m, because at this stage first variations in land use were visually pointed out in the study area. As slopes are increasing, surface water run-off tends to cause erosion on land cover, so it was also important to respect terrain characteristics for heavy rainfall events. Therefore, the generation of slopes as degree levels in GIS with the high resolution DTM finally quantified the second complementary indicator for retention sites. A detailed analysis of the local sewer system may be an important factor

too, but would go beyond the scope of this paper. The classification corresponds to ( $0^{\circ}$ – $2^{\circ}$ , flat), ( $3^{\circ}$ – $6^{\circ}$ , slowly), ( $7^{\circ}$ – $15^{\circ}$ , oblique), ( $16^{\circ}$ – $25^{\circ}$ , steep), and ( $>25^{\circ}$ , very steep) conditions.

The influence on public health of urban green spaces has become an increasingly important topic for many municipalities, as urban green spaces tend to have direct and indirect positive contributions to the psychological, mental and social wellbeing. Furthermore, they also have a compensatory function with regard to noise pollution or climatic extremes, offer opportunities for social contacts and an incentive for physical activities. Open and green spaces like forests, urban parks and cemeteries with a size of  $\geq 1$  ha were extracted from the ATKIS dataset, respecting the accessibility to the general public which led to the exclusion of land containing private allotments. For a proper network analysis, entrances as point data have been assessed by intersecting the perimeters of open and green spaces with the footway line network created out of the OSM dataset [89]. With the performance of an Origin/Destination (OD) Cost-Matrix in Network Analyst, minimum distances from every point (Origins) in Dortmund to the closest entrances (Destinations) were modelled. Meters were chosen as impedance, because walking speed strongly depends on individual conditions. The thresholds are (0–250 m, very close), (250–500 m, close), (500–750 m, moderate), (750–1000 m, far), ( $>1000$  m, very far) [80]. In addition, to create a transitional raster grid for air status in the city, the point data of cold-air flow in  $\text{m}^3/\text{s}$  was interpolated using Inverse Distance Weighting (IDW) method and classified according to the LANUV categorization ( $>300$ – $1500$   $\text{m}^3/\text{s}$ , moderate), ( $>1500$ – $2700$   $\text{m}^3/\text{s}$ , high), ( $>2700$   $\text{m}^3/\text{s}$ , very high).

By confronting the status quo with reference cases that already took place in the real world, a more realistic picture of climate resilience can be drawn. Correspondingly, in order to detect regions with heat stress potential, land surface temperatures (LST) have been derived with band 10 (Thermal Infrared) of the Landsat 8 satellite image on a hot summer day in 2018. After image calibration for band 10, at-satellite brightness temperature ( $T_B$ ) in  $^{\circ}\text{C}$  was calculated:

$$T_B = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} - 273.15 \quad (2)$$

$K_1$  (774.8853) and  $K_2$  (1321.0789) are channel-specific coefficients which can be retrieved from the supplied metadata, while  $L_\lambda$  is at-sensor spectral radiance of band 10.  $T_B$  illustrates a theoretical value which has to be further adjusted by spectral emissivity ( $\varepsilon$ ) [90]. The value of  $\varepsilon$  can be derived from existing literature:

$$\varepsilon = \varepsilon_v * P_v + \varepsilon_s * (1 - P_v) \quad (3)$$

whereby  $\varepsilon_v$  is the in situ emissivity of vegetation,  $\varepsilon_s$  is the emissivity of bare soils and  $P_v$  is the ratio of vegetation and bare soils [91]. The value for  $\varepsilon_v$  corresponds to 0.973 and for  $\varepsilon_s$  0.966 when using Band 10 of a Landsat 8 scene [92].  $P_v$  can be calculated with the NDVI, which is to be retrieved from Landsat 8 NIR and R bands:

$$P_v = \left( \frac{NDVI - NDVI_{MIN}}{NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN}} \right)^2 \quad (4)$$

$NDVI_{MIN}$  represents the threshold for bare soil and  $NDVI_{MAX}$  the threshold where green vegetation occurs. A value of 0.2 was set for  $NDVI_{MIN}$  and 0.5 for  $NDVI_{MAX}$  [93]. After retrieving  $\varepsilon$  and  $P_v$ , the calculation of LST, represented by  $T_s$ , according to Boltzmann's law was retrieved as follows:

$$T_s = \frac{1}{\varepsilon^{1/4}} * T_B \quad (5)$$

Krüger et al. conceived a linear correlation ( $r = 0.735$ ) between LST of Landsat imagery and the measured physiological equivalent temperature ( $PET$ ) in the German City of Dresden [82]. As a result, the formula for transforming LST into estimated  $PET$  values is as follows:

$$PET = 17.077 + 0.465 * LST \quad (6)$$

We applied this formula to our calculated LST values, totally aware of the fact that Dortmund may be confronted with other environmental conditions as Dresden, but both cities are located in Germany, share a similar size in population as well as administrative area and lie on almost the same latitude. The final PET-thresholds were set as (18–23 °C, no thermal stress), (23–29 °C, slight heat stress), (29–35 °C, moderate heat stress), (35–41 °C, strong heat stress) and (>41 °C, extreme heat stress). The same thresholds have been used in a previous study [94]. As another environmental stressor, noise pollution was considered in our analysis, because high noise level exposures have adversely effects on the public wellbeing [95]. For the noise pollution indicator, the three input raster datasets on different noise pollutants have undergone a logarithmic aggregation in GIS, resulting in a 10 × 10 m raster image on a day-evening-night level ( $L_{DEN}$ ) in decibels (dB). High noise levels are defined as noise levels above 55 dB on  $L_{DEN}$ , so the final classification was set as (10–25 dB, very quiet), (25–40 dB, quiet), (40–55 dB, moderate), (55–70 dB, loud), (>70 dB, very loud) [96].

#### 4.2.2. Society

As heavy rainfall events are a crucial issue for the City of Dortmund, flood hazard rating ( $HR$ ) was carried out with the heavy rainfall raster images in GIS, using the following formula of DEFRA, which was also applied for a flood risk assessment in Spain [97]:

$$HR = h(v + 0.5) + df \quad (7)$$

Whereby  $h$  represents flood depth in m,  $v$  velocity in m/s and  $df$  the debris factor, ranging between 0 and 1 depending on flood depths, velocities and dominant land uses. There is a low hazard if  $HR < 0.75$ , danger for some if  $0.75 < HR < 1.5$ , danger for most if  $1.5 < HR < 2.5$  and danger for all if  $HR > 2.5$  [98].

We chose infants and small children (0 to 11 years), the elderly (+65 years) and single households as sensitive population groups who are particularly prone to extreme weather events, because they tend to have less physical or personal abilities to flee from water or to cope with heat stress, while also being unable to reach safety for themselves [83]. Assuming an average storey height of 3.35 m in Dortmund [99], with the use of the building footprints of the ALKIS dataset and the nDSM, average heights of each building with residential or mixed land use could be automatically extracted and rescaled to story numbers. Concerning the resulted story numbers and the demographic data on sub-district level, we applied a dasymetric mapping method to disaggregate population subgroups onto a pixel size of 10 × 10 m:

$$P = \frac{(R_n A_n) * N}{E} \quad (8)$$

where  $P$  is the number of people within a pixel,  $R_n$  is the relative density of the mapping unit population with land-cover type  $A$ .  $A_n$  is the area of mapping unit.  $N$  is the actual population of each statistical sub-district.  $E$  is the expected population of enumeration unit calculated using relative densities.  $E$  equals the sum of the products of relative density and the proportion of each land-cover type in each enumeration unit [100,101]. Drawing on a previous study on Dortmund which contained expert knowledge about relative density values for four land cover classes, we assigned the same weightings for apportioning the sub-district related data [67]:

1. residential use, up to two storeys: 15%,
2. residential use, three to five storeys: 30%,
3. residential use, more than five storeys: 40%, and
4. residential mixed use: 15%.

Consequently, all uninhabited areas (agriculture, forests, water etc.) were reclassified to a value of 0. After the disaggregating process for each subgroup, the synthetic population estimations were standardized to equal intervalled z-scores as standard deviations from mean to point out hotspot

locations. Besides the spatial population sensitivity identification, it was also important to map chains of effects, where climate related extreme events occurred in the past and led to physical damages or helplessness for local residents. In order to calculate the density of fire brigade events of the last decade, we initially used the incremental Moran's I tool in ArcGIS to evaluate an appropriate search radius for density mapping. This procedure allows to inform the user whether the spatial pattern of a set of points is grouped or random by gradually increasing the search radius. If the results show a statistical significance at a certain search distance, a positive Moran's I index value indicates a tendency to clustering. Setting a search distance of 2400 m as clustering threshold, the final kernel raster grid was created. Five equal intervals concerning standard deviation from mean were created for classification.

#### 4.2.3. Infrastructure

Critical infrastructures are organizations or institutions of special importance to society (i.e., transportation, energy and water supply, emergency services etc.). In the event of a failure or functional impairments, it would lead to significant disturbances of social life and public safety as well as to negative cascade effects [102]. Following the categorization of the German Federal Ministry of the Interior (BMI), technical and social infrastructure as well as traffic and road infrastructure (Table A2) have been extracted by the corresponding codes from the ALKIS dataset and masked out of the HR-raster image. This procedure allowed us to identify hazard related infrastructures.

Enhancing the spatial and time-based accessibility of fire services is important to improve emergency response, minimize property loss as well as to reduce injuries and deaths [85]. Fire brigades (including volunteers) were extracted from the POI dataset. Drive time in minutes outgoing from fire brigade locations to every point in Dortmund was calculated with an OD Cost Matrix for vehicle driving network dataset. In the event of an emergency call, fire brigades have free access on roads, so that no barriers or restrictions (e.g., traffic lights or one way roads) in the network dataset were taken into account. The fire brigade should arrive at the place of hazard within 8 min after emergency call in order to be able to carry out human rescues still in time [103]. Therefore, the final classification of drive time was set as ( $\leq 4$  min, very quick), ( $>4-8$  min, quick), (8–12 min, moderate), (12–16 min rather late), ( $>16$  min, late).

By using the same network dataset, hospital locations in Dortmund were extracted by the POI dataset, followed by the calculation of drive time in minutes from every location in Dortmund with the max speed and the length of each line segment as variables. We classified the results into five equal intervals, ranging from (0–3 min, very fast), (3–6 min, fast), (6–9 min, moderate), (9–12 min, far), and ( $>12$  min, very far).

#### 4.2.4. Economy

The economic attractiveness of a city is a crucial factor for new companies. Cities with a high diversity of businesses across multiple sectors tend to ensure a more pronounced adaptability and faster recovery from external shocks, since there are more opportunities to provide social services and cultural programs. Furthermore, diversity enhances flexibility for different working fields and helps to diminish segregation processes (functional and social), which also corresponds to the equity component in resilience debates [104]. To assess business diversity, Shannon Diversity Index (SHDI) with 1 km square-width (A search radius of 1 km indicated clustering effects of the dataset after incremental Moran's I calculation.) moving window technique was calculated for each pixel in FRAGSTATS by using ALKIS building footprints excluding residential areas and uninhabited objects like transformer stations or garages as potential workplaces:

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i * \ln P_i) \quad (9)$$



$P_i$  is the proportion of the landscape occupied by patch class  $i$ . *SHDI* assumes values above 0, without upper limit, while *SHDI* = 0 (no diversity) when the regarded sample only contains one land use [70]. If the amount of different patch types (richness) increases and/or the proportional distribution of area among patch types becomes more even (evenness), *SHDI* increases simultaneously. Because there is no reference value to compare with, we standardized the *SHDI* values to standard deviations from mean and created five equal intervals for classification.

As pointed out in the expert interviews, unemployed people tend to have less monetary resources to adapt to climate risks. Therefore, the number SGBII and SGBXII recipients as indicator of unemployment was undergone the same dasymetric mapping procedure and z-standardization as the three indicators for sociodemographic structure in the society dimension.

#### 4.2.5. Institution

In order to create a better understanding about climate mitigation and resilience strengthening strategies, it is important to establish an overview about where and what measurements have been decided so far. The institutional aspect is only represented by one indicator, since it is difficult to capture qualitative adaptation targets in a quantitative manner. However, it is possible to map and rank decisions and measurements on climate resilience and adaptation to visualize their current allocation in an administrative area [105]. Considering theoretical questionnaires on a previous resilience study in Germany [50], official land use plans, research projects and climate adaptation measurements were assessed for the entire city and classified ordinal from 1 (worst) to 5 (best) with regard to their implementation status as follows:

1. No climate adaptation measurements are planned
2. Climate adaptation measurements will be planned
3. Climate adaptation measurements are planned, but not started yet to implement
4. Climate adaptation measurements are currently being tested or implemented
5. Climate adaptation measurements have been implemented (e.g., official land use plan is in force or plan approval procedure is finished)

#### 4.3. Fuzzy Logic Analysis

Although many researches have been undergone in the last decade, climate resilience still contains a lot of vagueness and complexity in its definition. Between the derived thresholds presented in Section 4.2, there are smooth transitions which calls for adequate spatial modelling techniques that respect uncertainties in a multi criteria decision making process [49]. In this work, SAMT2 was used for fuzzy modelling, which is completely programmed in python, so it is applicable on most computer systems.

##### 4.3.1. Fuzzification

Fuzzy logic results are ranging between 0 and 1 as intermediate values between concrete evaluations [106]. In order to convert raw crisp indicator values into fuzzy sets, it is to be determined, to which degree each indicator value belongs to a certain property (degree of membership) using linguistic variables, e.g., in case of PET values, "slight heat stress", "moderate heat stress", and "strong heat stress". Trapezoidal and triangular membership functions are the most commonly used linear types in the fuzzification process and easy to apply in SAMT2. The peak points of triangular or trapezoidal functions are representing a definite membership (thresholds) and vice versa. An overlap between the membership functions is desirable in order to allow smooth transitions between the ranges of indicator values. If information about indicator thresholds are limited, e.g., triangular membership function should be used [107]. A graphical illustration of the used membership functions and thresholds for each indicator grid can be obtained in Figure A1.

#### 4.3.2. Indicator Combination and Inference Method

For each crisp value of a variable, the degree of membership of the associated fuzzy set is checked with IF-THEN-rules. In the THEN-part of the rule, an assignment is made to the output variable as a fuzzy set. The default rule for conclusion finding (fuzzy singleton) in SAMT2 is based on IF X AND Y THEN Z. The AND operator is widely used as premise in a fuzzy rule-based evaluation. Five linguistic terms correspond to 125 ( $5^3$ ) inference rules to set up for with three indicator grids, which explains why not more than three indicators should be concerned per criterion [108]. After defining rules with membership functions and linguistic variables, singletons were created, where truth membership values are transformed into fuzzy sets with values ranging between 0 and 1. For instance, one rule in SAMT2 was defined as follows:

IF (raster value of indicator PET is {no thermal stress  $\vee$  slight heat stress  $\vee$  moderate heat stress  $\vee$  strong heat stress  $\vee$  extreme heat stress} regarding climate resilience) AND

IF (raster value of indicator NP is {very quiet  $\vee$  quiet  $\vee$  moderate  $\vee$  loud  $\vee$  very loud} regarding climate resilience) THEN

(raster value of environmental burdens is {more robust  $\vee$  rather more robust  $\vee$  moderate robust  $\vee$  rather less robust  $\vee$  less robust}).

All fuzzy sets were transformed using MAX-PROD inference method. We chose an equally weighting for all indicators, because methods for determining weights like the Analytic Hierarchy Process (AHP) by Thomas L. Saaty are always somewhat subjective and do not necessarily reflect real priorities [109]. Furthermore, the use of 18 indicators makes it difficult and time-consuming for experts to significantly allocate different weights, as the more indicators are concerned, no well-defined priorities can be figured out. Finally, relative importance on indicators vary between sectors and over time as local foci are permanently changing [110].

#### 4.3.3. Defuzzification

The last step in fuzzy logic analysis is to transform the cumulated fuzzy inference results back into a crisp set in order to perform further analyses in GIS. In other words, a single-valued output had to be calculated as the best representative within the aggregated fuzzy sets. In SAMT2, the center of gravity (COG) technique is automatically modelled, which can be stated as the weighted sum of the results:

$$x^* = \frac{\sum_x \mu(x)x}{\sum_x \mu(x)} \quad (10)$$

whereby  $x^*$  indicates the defuzzified crisp value ranging between 0 and 1, and  $\mu(x)$  the output membership function of the output variable  $x$  (fuzzy singleton).

#### 4.4. Compromise Programming and Sensitivity Analysis

The use of fuzzy membership functions inhibits a high sensitivity on the resulting maps. Therefore, the reliability and usability of the method had to be examined by comparing fuzzy logic results with a traditional crisp value-based MCDA method. Compromise Programming (CP), a multi-attributive decision method proposed by M. Zeleny [111], is based on the assumption that the achievement of an overall objective (e.g., climate resilience) lays in the nature of human and that the best compromise solution is considered to be given when it is as close as possible to the ideal state. To put it in a mathematical way, an alternative (here: pixel value) measured by several indicators is suitable as a compromise solution, if:

$$L_p(W) = \left[ \sum_{j=0}^n W_j^p \left| \frac{Z_j^* - Z_j(x)}{Z_j^* - Z_{*j}} \right|^p \right]^{1/p} \rightarrow \min \quad (11)$$

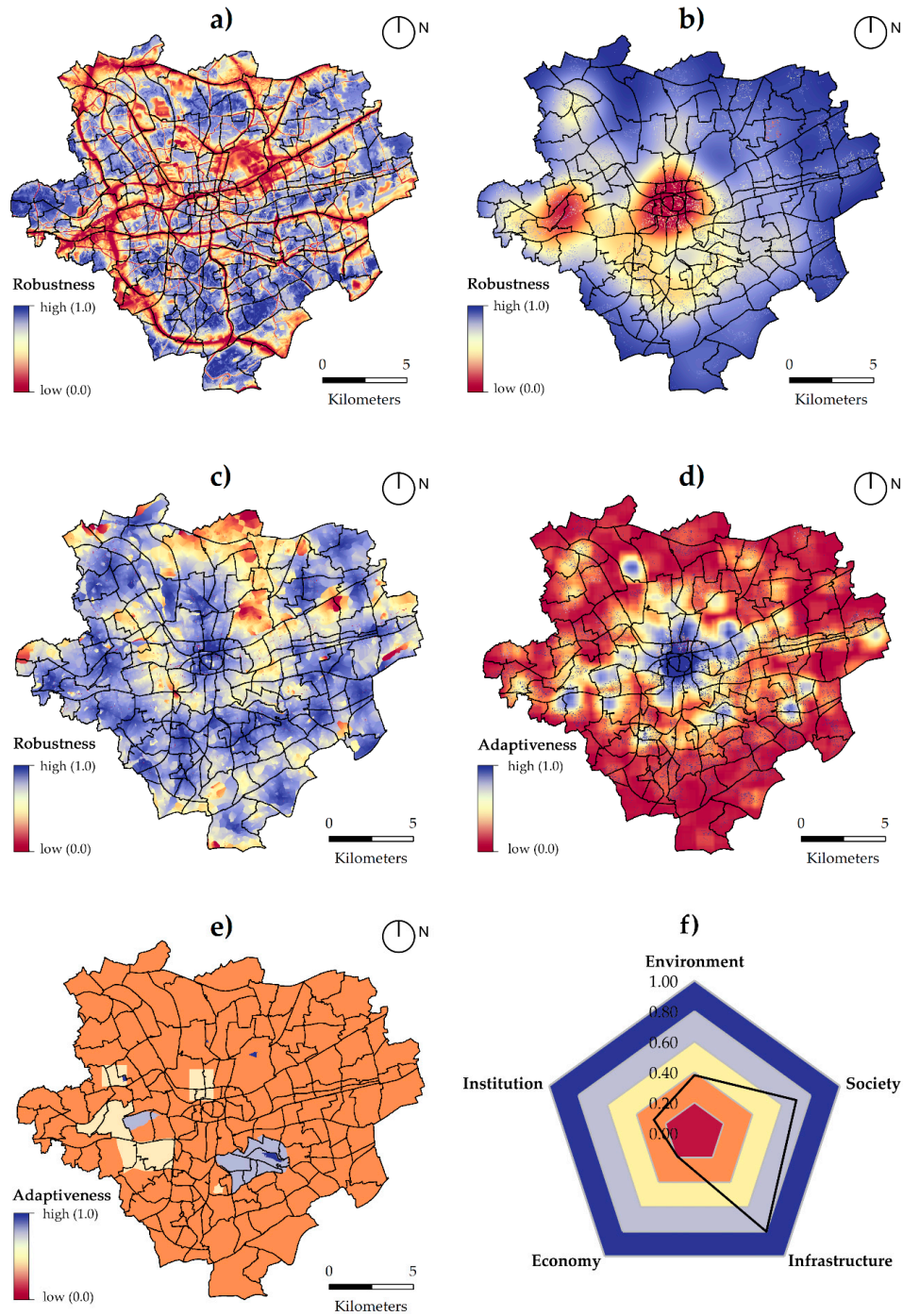
whereby  $W_j$  ( $W_j > 0$ ,  $W_1 + W_2 + \dots + W_n = 1$ ) is the individual weight of each indicator (in this work all weightings are equal). Therefore,  $L_p(W)$  reflects the weighted distance of each alternative to the ideal

point  $Z_j^*$  (here: 1). The more  $L_p(W)$  reaches towards 0 ( $\rightarrow \min$ ), the closer the alternative to climate resilient and vice versa. Given a natural value of  $\geq 1$ ,  $p$  is expressed as the degree of compensation and is used to weigh the discrepancy between the ideal point and the real value of an indicator  $Z_j(x)$ . If  $p = 1$ , a City-Block-Norm exists, in which worse rated indicator values can be fully compensated by better rated values. The Maximum-Norm with  $p = \infty$  represents the opposite (no compensation). In case of  $1 < p < \infty$ , the Euclidean-Norm with partial compensation applies. Since  $p$  is directly influencing the compromise solution, we applied the CP formula for our normalized crisp valued indicator set respecting each Norm in ArcGIS in order to investigate potential driving forces on the decision analysis [90]. We reclassified our normalized indicator grids into five equal classes between 0 and 1, corresponding to less resilient (0.0–0.2), rather less resilient (0.2–0.4), moderate resilient (0.4–0.6), rather more resilient (0.6–0.8) and more resilient (0.8–1.0) [20]. Consequently, the fuzzy logic result was statistically compared to the three results of CP.

## 5. Results

### 5.1. Mapping the Subsystems

After the defuzzification processes for every hierarchical step, initially five maps have been obtained, representing the five dimensions of the indicator set. Figure 3 illustrates the interdisciplinarity as well as the diverging foci of resilience. It is plausible that in case of environmental robustness, open and green spaces with high ventilation status, proper accessibility and low sealing are rated higher (blue) than industrial sites or major traffic roads (red). Especially industrial sites are sealed to a high degree and make the highest land surface temperatures ( $>40^\circ\text{C}$ ) measured by Landsat 8 in the study area. On the other hand, existing forests in the south are partially environmental affected by crossing major roads or not suitable to serve as natural retention sites due to steep slopes. On the societal component, two fire brigade operation hotspots tempt to cluster in the center and the west. The western hotspot is a result of the destructive heavy rain event in Dortmund Marten and Dorstfeld sub-districts, while the city center is also an area of numerous extreme weather related operations in the past. The northern sub-districts surrounding the city center are home to a large amount of infants and children, whereas the southern and eastern suburban districts are more represented by the elderly. Single households are mostly concentrated in the urban core. Regarding infrastructural resilience, it becomes clear that especially the northern edge is less spatially connected to nearby hospitals or fire brigades than the rest of the territory. From the economical adaptiveness point of view, Figure 3 indicates that Dortmund tends to have multiple centers varying in size with a high diversity or evenness throughout the administrative area. However, most of these accumulations are located in the center and the south, whereas the northern part is more influenced by large logistics and industrial sites. In addition, the northern central sub-districts are characterized by a high degree of unemployment. Because the entire city will be regarded for the development of an integrated masterplan on climate adaptation, no raster value was rated worst in the institutional adaptiveness section. However, throughout the city, several climate adaptation or resilience research projects, land use plans and measurements could be carried out. For instance, the sub-districts Dortmund Marten, Nordstadt and Huckarde are currently sceneries for social living labs aiming to increase climate resilience and reduce social and ecological inequalities. Generally speaking, there is a shift in favor of the societal and infrastructural dimension, whereas the institutional, environmental and economical dimensions seem to be less pronounced in the study area. Nevertheless, each dimension is concurring with each other, e.g., if there are more natural areas, which are important for cold air production, recreation and biodiversity, the business diversity is automatically shrinking.



**Figure 3.** Fuzzy analysis results for the five dimensions, (a) environment, (b) society, (c) infrastructure, (d) economy, (e) institution, (f) comparison of mean values in the study area.

### 5.2. Urban Climate Resilience Index (UCRI)

Figure 4 presents a five staged rating of the final result in the study area after fuzzy logic application. To follow the spirit of the fuzzy concept, there is no distinct linguistic determination of the resilient area, which is why we chose equally sized classes as z-scores for the visual Urban Climate Resilience Index (UCRI) interpretation. The majority of the calculated pixel values demonstrate moderate or rather more resilient levels, which accounts for the compensation and competing effects between the thematically diverging indicators and dimensions. In addition, there is a tendency that more resilient areas are located outside the urban core, while less resilient land uses like major roads, rail networks and overheated industrial sites are scattered throughout the entire study area. In the urban core (especially the north), a moderate accessibility to green areas, high PET values and soil sealings, low ventilation status, high proportions of single households and unemployment result in rather less climate resilience. The negative influence of fire brigade operations in the last decade stays persistent also in the aggregation of all indicators and become particularly noticeable in the west and the center. Environmental burdens are also a crucial factor for the analysis results, as noise pollution or heat stress will not be perceived less annoying through a good accessibility to public open and green spaces. In general, unsealed areas like forests and lakes in the rural parts of the city tend to be more robust regarding the environmental dimension, while urbanized clusters and industrial sites are rated worse.

Figure 5 shows the UCRI in a more detailed way by comparing the three sub-districts Dortmund Marten, Dortmund Hörde and Clarenberg. It becomes noticeable that the sub-districts vary in population conditions and their environmental states. While in Dortmund Marten the environment is ranked as rather less resilient because of high noise pollution due to highways and interregional railways, the major environment in Hörde and Clarenberg is rated more resilient. Established on a former steelworks area, the artificial lake Phoenix in Hörde represents a public green and open space as well as a climate adaptation measure, as it serves as a potential retention basin of the adjacent Emscher tributary. Furthermore, the district of Hörde is subject to climate adaptation measurements, which ends up in a high resilient rating of the UCRI. On the other hand, although there seems to be an adequate accessibility to public green and open spaces (e.g., lake phoenix), residential areas in the south (Clarenberg) may not be able to adapt or be robust against climate extreme events due to monetary or physical conditions, which implies that issues on climate resilience are taking place on different dimensions within the urban system.

### 5.3. Sensitivity Analysis

With regard to Figure 6, the environmental and societal dimensions tend to act as dominant driving factors for the UCRI. The increase of  $p$  values results in a decrease of standard deviation, although the Maximum-Norm ( $p = 10$ ) reveals some disparities in the worst class assignments (less resilient). In our fuzzy analysis, the environmental dimension was regarded with no compensation between the indicators, because people won't feel less burdened in a very hot but quiet environment. This fact explains why on the City-Block-Norm and Euclidean-Norm of the CP-method streets and rail networks are rated much higher due to full compensation. In conclusion, the fuzzy logic results may range between the Euclidean-Norm and the Maximum-Norm with a certain degree of compensation. For future climate resilience decisions, it is important to consider all compensation methods in order to find the best solution for different problems.

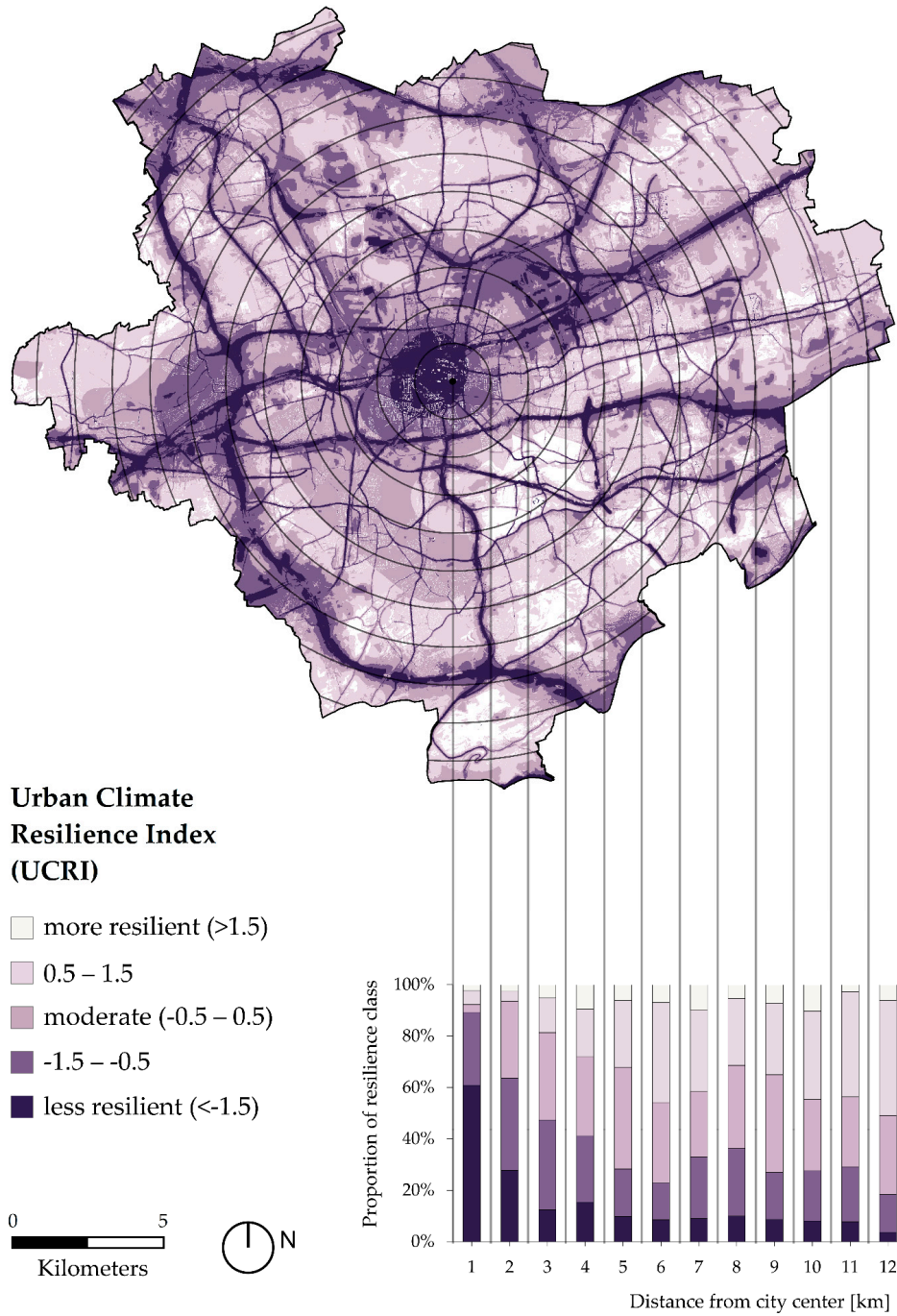
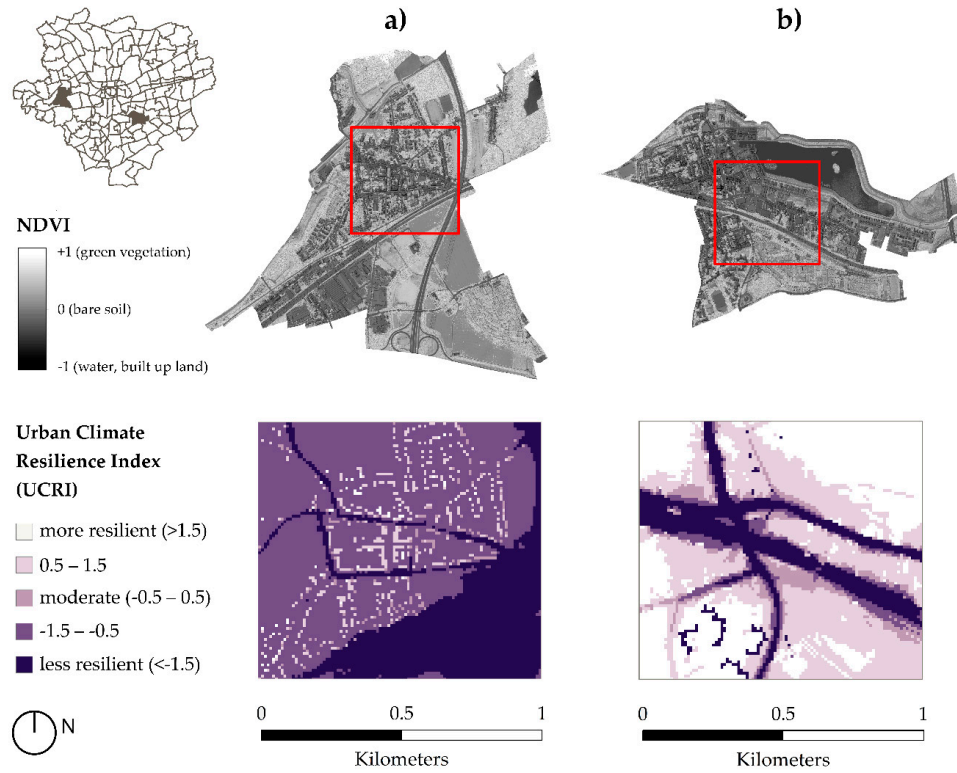
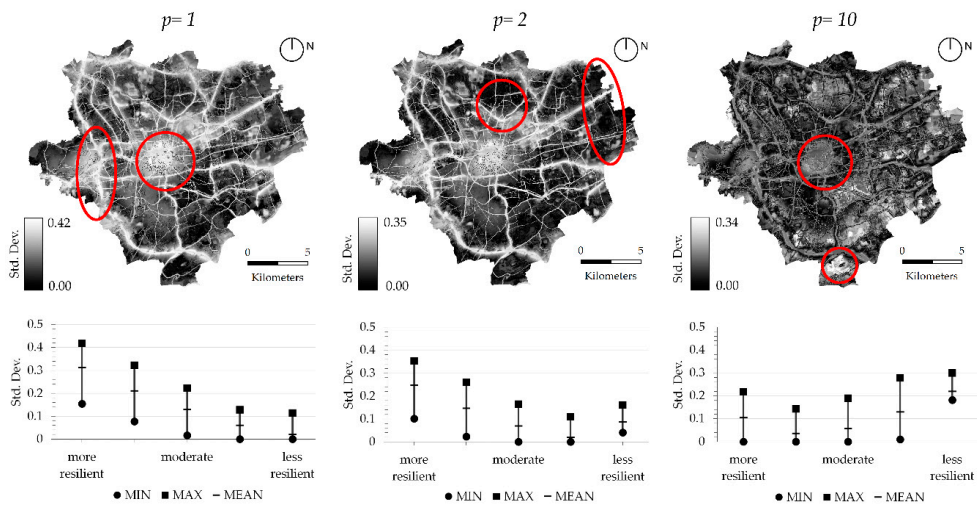


Figure 4. Urban Climate Resilience Index (UCRI) in Dortmund.



**Figure 5.** Contrasts in Dortmund. Residential uses in (a) Marten sub-district, (b) Hörde and Clarenberg sub-districts.

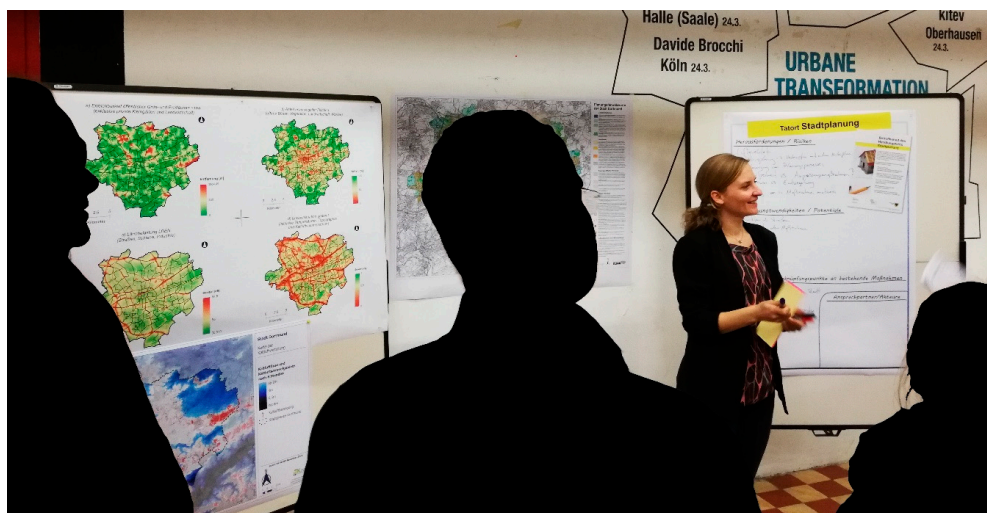


**Figure 6.** Standard deviation between Compromise Programming (CP) results and fuzzy logic regarding different compensation scenarios ( $p = 1$ , City-Block-Norm;  $p = 2$ , Euclidean-Norm;  $p = 10$ , Maximum-Norm).

## 6. Discussion and Conclusions

With this work we presented a GIS-based fuzzy logic analysis on climate resilience in the City of Dortmund. It was the aim of the authors to get an impression of how climate resilience can be quantified by indicators in a multidimensional manner and mapped both on municipality scale as well as on the neighborhood level. As quantitative proxies are a fundamental part of the process of resilience-building, our results allow a comparative overview of the spatial distribution of the robustness and adaptiveness for different subsystem dimensions with regard to social-ecological disparities. Nevertheless, the real reasons why certain disparities do exist, remain unknown.

Due to the fine resolution, the results can be implemented in future local climate adaptation plans or serve as an initiator for local grass roots projects concerning climate resilience and social-ecological disparities. Organized by the environmental planning office, on 5 December 2019 a participatory event for the integrated climate adaptation masterplan Dortmund (MiKaDo) was undergone with citizens, stakeholders and association members [112]. Initial ideas were collected and discussed with 68 participants, using parts of the resulted environmental maps in this paper for new climate adaptation strategies regarding green and open spaces, health related measurements as well as urban redevelopments (Figure 7). With this in mind, the results will be further discussed with the environmental planning office in the future.



**Figure 7.** Impressions of the interactive discussion phase at the kick-off event for MiKaDo (source: authors' own).

Despite of the fact that the revealed results are new to the scale around resilience measurements, the method used is rather static and reactive, while resilience also embraces a dynamic picture. In order to accomplish this limitation, a second analysis and validation process with the same indicators should be carried out in the future to unveil new emerging or decreasing disparities and identify the relative importance of climatic against societal changes for future climate risks. From a methodological point of view, it would be interesting to change the arrangement of indicators and criteria in order to find out any differences in the output maps, whereas the development of individual rules in fuzzy logic modelling is a time-consuming issue. Some burdens like noise pollution or heat stress are directly noticeable, while air pollution may not be recognized when it is not related to smoke or odors. Therefore, it is also important to capture the perception of environmental threads by the individuals, whose results may completely differ from the presented approach.



Compared to previous studies on the accessibility of green and open spaces, the conducted network analysis revealed more realistic results [67]. However, this procedure is much more time-consuming and the results do not vary significantly from Euclidean distances, which is in line with the findings of Richter et al. [113]. Remote sensing plays an important role in monitoring resilience, as it provides a self-perpetuating, up-to-date, and often freely available digital geodatabase [114]. With this in mind, threatened areas can be examined without being physically on site, which enables the generation of pre- and post-disaster situation maps or evolutionary assessments of urban resilience in regular intervals [115]. Using the NDVI on a high spatial resolution was a noticeable benefit for the analysis, as it is also possible to capture the recovery of potential forest fires or urban flooding. Since heavy rainfalls are sudden onset events and heat waves are slow-onset ones, the temporal dimension should be considered, too. On the practical side, adequate spatial planning strategies and innovative on site measurements are needed. The population dasymetric mapping results delivered estimations close to reality. However, it is important to note that the results only represent synthetic allocations based on density values and land uses. The SHDI revealed satisfying results for the economic dimension. On the other hand, distributional effects of the economic sector should be brought into a regional context as well, especially in agglomerations like the Ruhr-Area. In this sense, our local small-scale approach may emerge unknown connections between regional large-scale disparities.

In the field of open geodata, especially in NRW the last two years have shown a huge step towards new possibilities in geoprocessing and small scale analysis, which in parallel encourages a certain transferability of the proposed method to other cities in this federal state in Germany. With this in mind, our indicator set can be scaled up to the regional level, which could be also interesting for regional planning authorities. However, some indicators are only possible to capture through local surveys, so there is still a need for municipalities to discuss the topic qualitatively with citizens. When it comes to resilience metrics, other indicators like economic loss or post-emergency costs could be worth to be included, but are also difficult to measure as these phenomena are indirect damages. In addition, populations change location over time, so that social dynamics should be taken into account in future monitoring purposes. This is also why population dynamics may be another indicator for the institutional subsystem, but it remains a geostatistical challenge to measure such processes on a fine scale. The same belongs to the availability of cars in case of an extreme event for evacuation capacity. Complementary, poverty is changing over time, too, as individuals can get into it, but also can get out of it. Individuals who are located in flood prone areas may choose their residence accepting the hazard and potential costs because of other factors, e.g., accessibility to working places. On the other hand, individuals who are unemployed may be “rich in relationships” and thus more able to cope with external crisis than better-off individuals [9]. Furthermore, climate plans and measurements do not always include local grass root activities within neighborhoods, which are also relevant to adaptation and mitigation “but not labelled as such” [105]. Health status, social skills (learning, transforming, etc.) or language abilities are also important factors for resilience preparedness assessment and may be included for sensitive groups in the future.

Although the presented method inherits some limitations regarding the institutional and economical resilience assessment, it provides a cost-effective workflow on assessing and visualizing climate resilience to identify potential weaknesses. Nonetheless, the full potential of measured phenomena by indicators only unfolds by investigating how they develop over time. Despite possible monitoring processes that could be carried out in the future, it is the real policy which shapes climate resilience. In this context, it is also to be observed whether future climate adaptation strategies exclude certain social and ethnic groups or even enhance existing disparities. There should be more research efforts on social-ecological systems feedbacks on climate extreme events across multiple spatial scales in order to assess the effectiveness, but also potential side effects of different policy fields.

**Author Contributions:** M.S. developed the methodology design, acquired necessary (geo-)data, performed the analysis, visualized the results and wrote the paper. N.X.T. substantially contributed to the conceptualization of the presented work and commented on the manuscript. S.G. reviewed and edited the manuscript and is the

coordinator of the research project Zukunft-Stadt-Region-Ruhr (ZUKUR). All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This research was funded by the German Ministry for Education and Research (BMBF), grant number 01LR1721A.

**Acknowledgments:** The presented study was undertaken as part of the German research project Zukunft-Stadt-Region-Ruhr (ZUKUR) to increase climate resilience and decrease social-ecological disparities in regions, cities and neighborhoods. We would like to thank the Environmental and Municipal Drainage Offices as well as the Institute of Fire Service and Rescue Technology of the City of Dortmund for the reliable provision of geodata.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Appendix A

**Table A1.** OSM-road types and corresponding max speed values used for network analyses.

| Road Type      | Max Speed |
|----------------|-----------|
| Motorway       | 120 km/h  |
| Motorway_link  | 50 km/h   |
| Trunk          | 120 km/h  |
| Trunk_link     | 50 km/h   |
| Primary        | 50 km/h   |
| Primary_link   | 40 km/h   |
| Secondary      | 50 km/h   |
| Secondary_link | 40 km/h   |
| Tertiary       | 50 km/h   |
| Tertiary_link  | 40 km/h   |
| Residential    | 30 km/h   |
| Living_street  | 5 km/h    |
| Service        | 20 km/h   |
| Track          | 20 km/h   |
| Unclassified   | 30 km/h   |

**Table A2.** Critical and sensitive infrastructures used including ALKIS-Codes.

| Sectors                                       | Subsectors   | ALKIS-Code   |
|---|--|--|
| Energy  | Electricity, Gas, Oil  | 2571, 2580, 2590, 2520, 2523, 2501, 2570, 2130, 2522                   |
| Information technology and telecommunications | Telecommunications, Information Technology   | 3035, 2540   |
| Transport and traffic                         | Air transport, Inland waterways transport, Rail transport, Road transport  | 42,015, 42,016, 42,010, 42,001   |
| Health  | Medical services, Pharmaceuticals and vaccines, Laboratories, hospitals, old people's homes, shelter for homeless  | 1022, 3050, 3051, 3052, 2056, 3053, 3064                               |
| Water   | Public water supply, Public sewage disposal  | 2610, 2611, 2510, 2512, 2513   |
| Finance and insurance industry                | Banks, Stock exchanges, Insurance companies, Financial service providers   | 2020, 2030, 2040   |
| Government and public administration          | Government and public administration, Judicial bodies, Emergency/rescue services including civil protection        | 3066, 3010, 3011, 3012, 3014, 3015, 3016, 3019, 3071, 3072, 3070, 3100 |
| Media and culture                             | Broadcasting (television and radio), print and electronic media, Cultural property, Structures of symbolic meaning | 2171, 3030, 3060, 3040, 3041, 3033, 3032, 3034, 3031, 3036             |

Appendix B

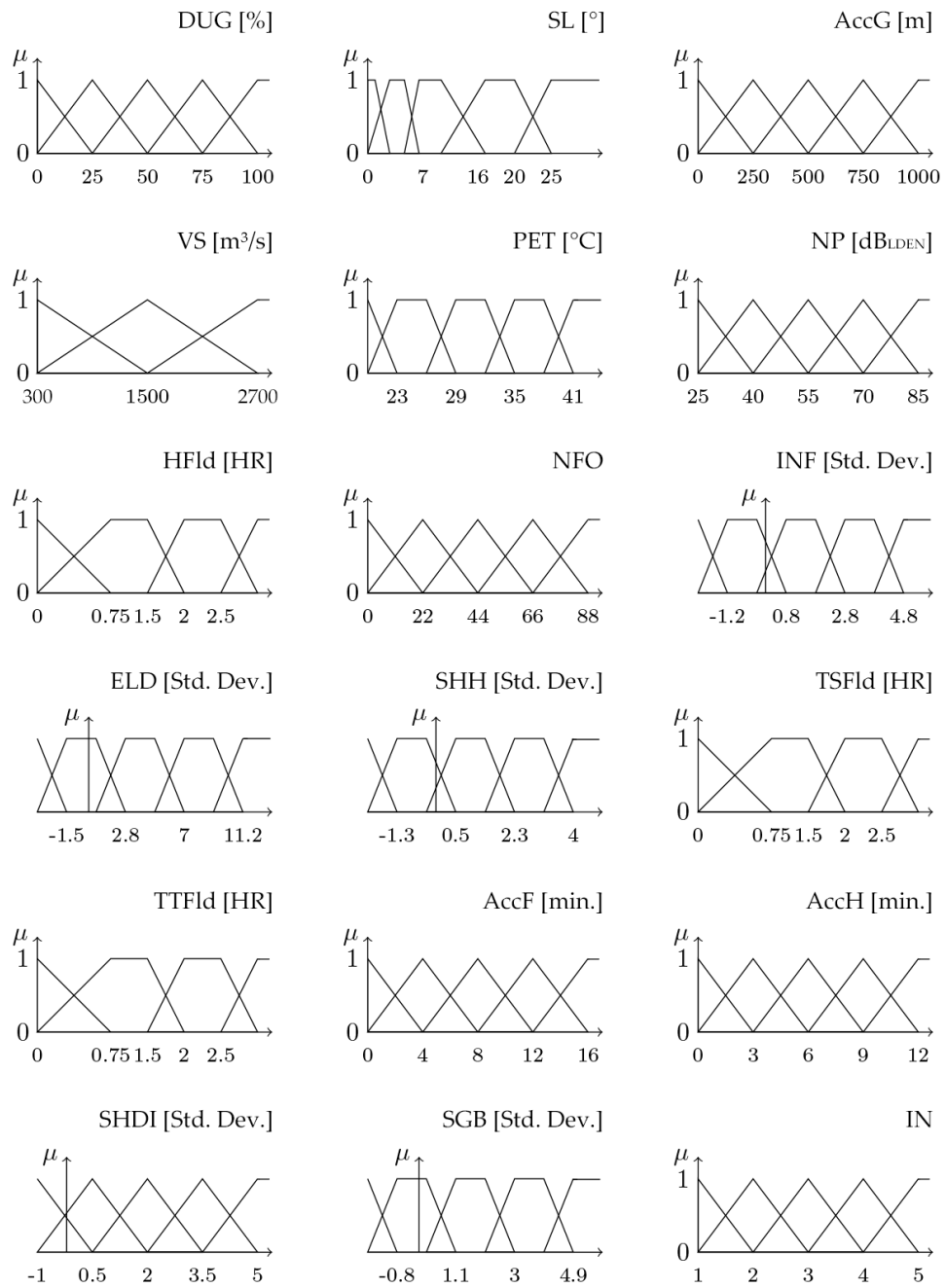


Figure A1. Fuzzy membership functions for the selected indicators.

## References

- Hagedorn, G.; Kalmus, P.; Mann, M.; Vicca, S.; van den Berge, J.; van Ypersele, J.-P.; Bourg, D.; Rotmans, J.; Kaaronen, R.; Rahmstorf, S.; et al. Concerns of young protesters are justified. *Science* **2019**, 139–140. [CrossRef]
- Allgaier, J. Science and Environmental Communication on YouTube: Strategically Distorted Communications in Online Videos on Climate Change and Climate Engineering. *Front. Commun.* **2019**, *4*, 36. [CrossRef]
- United Nations, Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. 2018. Available online: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf> (accessed on 4 July 2019).
- European Environment Agency (EEA). Economic Losses from Climate-Related Extremes in Europe. 2019. Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/direct-losses-from-weather-disasters-3/assessment-2> (accessed on 1 July 2019).
- Imbery, F.; Friedrich, K.; Haeseler, S.; Koppe, C.; Janssen, W.; Bissolli, P. Vorläufiger Rückblick auf den Sommer 2018—Eine Bilanz Extremer Wetterereignisse. Available online: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180803\\_bericht\\_sommer2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180803_bericht_sommer2018.pdf?__blob=publicationFile&v=10) (accessed on 29 October 2018).
- Imbery, F.; Friedrich, K.; Koppe, C.; Janssen, W.; Pfeifroth, U.; Daßler, J.; Bissolli, P. 2018 Wärmster Sommer im Norden und Osten Deutschlands. Stand 6 September 2018. Available online: [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180906\\_waermstersommer\\_nordenosten2018.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=7](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180906_waermstersommer_nordenosten2018.pdf?__blob=publicationFile&v=7) (accessed on 13 November 2018).
- Walker, B.H.; Salt, D.A. *Resilience Thinking: Sustaining Ecosystems and People in a Changing World*; Island Press: Washington, DC, USA, 2006; ISBN 9781597260930.
- Caniglia, B.S.; Frank, B.; Delano, D.; Kerner, B. Enhancing environmental justice research and praxis: The inclusion of human security, resilience and vulnerabilities literature. *IJISD* **2014**, *8*, 409. [CrossRef]
- Friend, R.; Moench, M. What is the purpose of urban climate resilience? Implications for addressing poverty and vulnerability. *Urban Clim.* **2013**, *6*, 98–113. [CrossRef]
- Sandoval, V.; Gonzalez-Muzzio, C.; Alborno, C. Resilience and Environmental Justice: Potential Linkages. *Procedia Econ. Financ.* **2014**, *18*, 416–424. [CrossRef]
- Pellow, D.N. Environmental Inequality Formation: Toward a Theory of Environmental Injustice. *Am. Behav. Sci.* **2000**, *43*, 581–601. [CrossRef]
- Mayer, B. A framework for improving resilience. In *Resilience, Environmental Justice and the City*; Caniglia, B.S., Vallée, M., Frank, B.F., Eds.; Routledge: Abingdon/Oxon, UK; New York, NY, USA, 2017; pp. 37–56. ISBN 9781138119895.
- Collier, M.J.; Nedović-Budić, Z.; Aerts, J.; Connop, S.; Foley, D.; Foley, K.; Newport, D.; McQuaid, S.; Slaev, A.; Verburg, P. Transitioning to resilience and sustainability in urban communities. *Cities* **2013**, *32*, S21–S28. [CrossRef]
- Denton, F.; Wilbanks, T.J.; Abeysinghe, A.C.; Burton, I.; Gao, Q.; Lemos, M.C.; Masui, T.; O'Brien, K.L.; Warner, K. Climate-resilient pathways: Adaptation, mitigation, and sustainable development I. In *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2014; pp. 1101–1131.
- Davoudi, S. Just Resilience. *City Community* **2018**, *17*, 3–7. [CrossRef]
- Greiving, S.; Arens, S.; Becker, D.; Fleischhauer, M.; Hurth, F. Improving the Assessment of Potential and Actual Impacts of Climate Change and Extreme Events Through a Parallel Modeling of Climatic and Societal Changes at Different Scales. *J. Extrem. Events* **2017**, *4*, 1850003. [CrossRef]
- Folke, C. Resilience (Republished). *ES* **2016**, *21*. [CrossRef]
- Meerow, S.; Stults, M. Comparing Conceptualizations of Urban Climate Resilience in Theory and Practice. *Sustainability* **2016**, *8*, 701. [CrossRef]
- Christmann, G.; Balgar, K.; Mahlkow, N. Local Constructions of Vulnerability and Resilience in the Context of Climate Change. A Comparison of Lübeck and Rostock. *Soc. Sci.* **2014**, *3*, 142–159. [CrossRef]
- Cutter, S.L.; Burton, C.G.; Emrich, C.T. Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *J. Homel. Secur. Emerg. Manag.* **2010**, *7*. [CrossRef]

21. Davoudi, S.; Shaw, K.; Haider, L.J.; Quinlan, A.E.; Peterson, G.D.; Wilkinson, C.; Fünfgeld, H.; McEvoy, D.; Porter, L. Resilience: A Bridging Concept or a Dead End? *Plan. Theory Pract.* **2012**, *13*, 299–333. [CrossRef]
22. Zadeh, L.A. Fuzzy sets. *Inf. Control* **1965**, *8*, 338–353. [CrossRef]
23. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Zukunftsstadt. Strategische Forschungs-Und Innovationsagenda. 2015. Available online: <https://www.fona.de/mediathek/pdf/Zukunftsstadt.pdf> (accessed on 12 May 2019).
24. Werner, E.E.; Bierman, J.M.; French, F.E. *The Children of Kauai. A longitudinal Study from the Prenatal Period to Age Ten*; University of Hawaii Press: Honolulu, HI, USA, 1971; ISBN 0870228609.
25. Holling, C.S. Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* **1973**, *4*, 1–23. [CrossRef]
26. Adewale, S.; Godson, A.; Sokan-Adeaga, A.; Sokan-Adeaga, M.; Deborah, E. Resilience and Sustainability of the Ecosystem: An Environmental Health Perspective. *Lond. J. Res. Sci. Nat. Form.* **2018**, *18*, 7–26.
27. Mileti, D.; Noji, E.K. *Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United States*; Joseph Henry Press: Washington, DC, USA, 1999; ISBN 978-0-309-26173-9.
28. European Commission, Directorate-General for Environment. *Guidance on Integrating Climate Change and Biodiversity into Strategic Environmental Assessment*; Publications Office: Luxembourg, 2013; ISBN 978-92-79-29016-9.
29. Fekkak, M.; Fleischhauer, M.; Greiving, S.; Lucas, R.; Schinkel, J.; von Winterfeld, U. “Resiliente Stadt-Zukunftsstadt”. Im Auftrag des Ministeriums für Bauen, Wohnen, Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (MBWSV); Forschungsgutachten November 2016. Available online: [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6614/file/6614\\_Resiliente\\_Stadt.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6614/file/6614_Resiliente_Stadt.pdf) (accessed on 14 January 2020).
30. Wilbanks, T.J. Integrating climate change and sustainable development in a place-based context. *Clim. Policy* **2003**, *3*, 147–154. [CrossRef]
31. World Commission on Environment and Development (WCED). *Our Common Future: Towards Sustainable Development*; WCED: Oxford, UK, 1987.
32. Birkmann, J.; Bach, C.; Vollmer, M. Tools for Resilience Building and Adaptive Spatial Governance. *Raumforsch. Raumordn.* **2012**, *70*, 293–308. [CrossRef]
33. Hassler, U.; Kohler, N. Resilience in the built environment. *Build. Res. Inf.* **2014**, *42*, 119–129. [CrossRef]
34. Wang, Y.; Du, M.; Zhou, L.; Cai, G.; Bai, Y. A Novel Evaluation Approach of County-Level City Disaster Resilience and Urban Environmental Cleanliness Based on SDG11 and Deqing County’s Situation. *Sustainability* **2019**, *11*, 5713. [CrossRef]
35. Meerow, S.; Newell, J.P.; Stults, M. Defining urban resilience: A review. *Landsc. Urban Plan.* **2016**, *147*, 38–49. [CrossRef]
36. Moser, S.; Meerow, S.; Arnott, J.; Jack-Scott, E. The turbulent world of resilience: Interpretations and themes for transdisciplinary dialogue. *Clim. Chang.* **2019**, *153*, 21–40. [CrossRef]
37. Cutter, S.L. The landscape of disaster resilience indicators in the USA. *Nat. Hazards* **2016**, *80*, 741–758. [CrossRef]
38. Wu, J.; Wu, T. Ecological Resilience as a Foundation for Urban Design and Sustainability. In *Resilience in Ecology and Urban Design*; Pickett, S.T.A., Cadenasso, M.L., McGrath, B., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2013; pp. 211–229. ISBN 978-94-007-5340-2.
39. Figueiredo, L.; Honiden, T.; Schumann, A. *Indicators for Resilient Cities*; OECD Regional Development Working Papers; OECD Publishing: Paris, France, 2018.
40. Feldmeyer, D.; Wilden, D.; Kind, C.; Kaiser, T.; Goldschmidt, R.; Diller, C.; Birkmann, J. Indicators for Monitoring Urban Climate Change Resilience and Adaptation. *Sustainability* **2019**, *11*, 2931. [CrossRef]
41. Abramson, D.M.; Grattan, L.M.; Mayer, B.; Colten, C.E.; Arosemena, F.A.; Bedimo-Rung, A.; Lichtveld, M. The resilience activation framework: A conceptual model of how access to social resources promotes adaptation and rapid recovery in post-disaster settings. *J. Behav. Health Serv. Res.* **2015**, *42*, 42–57. [CrossRef]
42. Neil Adger, W.; Arnell, N.W.; Tompkins, E.L. Successful adaptation to climate change across scales. *Glob. Environ. Chang.* **2005**, *15*, 77–86. [CrossRef]
43. Xu, L.; Marinova, D.; Guo, X. Resilience thinking: A renewed system approach for sustainability science. *Sustain. Sci.* **2015**, *10*, 123–138. [CrossRef]
44. Leichenko, R. Climate change and urban resilience. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* **2011**, *3*, 164–168. [CrossRef]

45. Platt, S.; Brown, D.; Hughes, M. Measuring resilience and recovery. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2016**, *19*, 447–460. [CrossRef]
46. Weichselgartner, J.; Kelman, I. Geographies of resilience. *Prog. Hum. Geogr.* **2015**, *39*, 249–267. [CrossRef]
47. Nelson, D.R.; Adger, W.N.; Brown, K. Adaptation to Environmental Change: Contributions of a Resilience Framework. *Annu. Rev. Environ. Resour.* **2007**, *32*, 395–419. [CrossRef]
48. Adger, W.N. Social and ecological resilience: Are they related? *Prog. Hum. Geogr.* **2000**, *24*, 347–364. [CrossRef]
49. Willows, R. (Ed.) *Climate Adaptation. Risk, Uncertainty and Decision-Making*; UK Climate Impacts Programme: Oxford, UK, 2003; ISBN 9780954483005.
50. Kötter, T.; Weiß, D. *Stresstest Stadt—Wie Resilient Sind Unsere Städte? Unsicherheiten der Stadtentwicklung Identifizieren, Analysieren und Bewerten; Stand: February 2018*; Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR): Bonn, Germany, 2018; ISBN 978-3-87994-224-4.
51. Folke, C.; Carpenter, S.; Walker, B.; Scheffer, M.; Chapin, T.; Rockström, J. Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecol. Soc.* **2010**, *15*, 1–9. [CrossRef]
52. Choko, O.P.; Schmitt Olabisi, L.; Onyeneke, R.U.; Chiemela, S.N.; Liverpool-Tasie, L.S.O.; Rivers, L. A Resilience Approach to Community-Scale Climate Adaptation. *Sustainability* **2019**, *11*, 3100. [CrossRef]
53. Renschler, C.S.; Frazier, A.E.; Arendt, L.A.; Cimellaro, G.P.; Reinhorn, A.M.; Bruneau, M. *A Framework for Defining and Measuring Resilience at the Community Scale: The PEOPLES Resilience Framework*; University of Buffalo State University of New York: Buffalo, NY, USA, 2010.
54. The Nature Conservancy. TNC Coastal Resilience Tool. Available online: <http://coastalresilience.org/natural-solutions/toolkit/> (accessed on 26 October 2018).
55. Winderl, T. Disaster Resilience Measurements: Stocktaking of Ongoing Efforts in Developing Systems for Measuring Resilience. Available online: [https://www.preventionweb.net/files/37916\\_disasterresiliencemeasurementsundpt.pdf](https://www.preventionweb.net/files/37916_disasterresiliencemeasurementsundpt.pdf) (accessed on 26 October 2018).
56. Rockefeller Foundation. 100 Resilient Cities. Available online: <http://www.100resilientcities.org/> (accessed on 21 June 2019).
57. Resilience Alliance. Available online: <https://www.resalliance.org/> (accessed on 21 June 2019).
58. Pestel Institut. Regionale Krisenfestigkeit: Eine Indikatoren gestützte Bestandsaufnahme auf der Ebene der Kreise und Kreisfreien Städte. Available online: [https://www.braunschweig.de/politik\\_verwaltung/fb\\_institutionen/staedtische\\_gesellschaften/bsmportal/spitzenposition/Regionale-Krisenfestigkeit-Pestel-Institut\\_011211.pdf](https://www.braunschweig.de/politik_verwaltung/fb_institutionen/staedtische_gesellschaften/bsmportal/spitzenposition/Regionale-Krisenfestigkeit-Pestel-Institut_011211.pdf) (accessed on 5 June 2019).
59. Brunetta, G.; Salata, S. Mapping Urban Resilience for Spatial Planning—A First Attempt to Measure the Vulnerability of the System. *Sustainability* **2019**, *11*, 2331. [CrossRef]
60. Moghadas, M.; Asadzadeh, A.; Vafeidis, A.; Fekete, A.; Kötter, T. A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* **2019**, *35*, 101069. [CrossRef]
61. Jelinski, D.E.; Wu, J. The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology. *Landsc. Ecol.* **1996**, *11*, 129–140. [CrossRef]
62. Stadt Dortmund, Stabsstelle Dortmunder Statistik. *Jahresber. Bevoelk.* **2019**, *206*, 1–48.
63. Stadt Dortmund. 20. Jahrhundert—“Heute”: Strukturkrise und-Wandel. Available online: [https://www.dortmund.de/de/leben\\_in\\_dortmund/ausunsererstadt/stadtportraet/stadtgeschichte/20jahrhundert/strukturkrise\\_und\\_wandel/index.html](https://www.dortmund.de/de/leben_in_dortmund/ausunsererstadt/stadtportraet/stadtgeschichte/20jahrhundert/strukturkrise_und_wandel/index.html) (accessed on 9 September 2019).
64. Strohmeier, K.P.; Bader, S. Demographic Decline, Segregation, and Social Urban Renewal in Old Industrial Metropolitan Areas. Available online: <https://difu.de/publikationen/demographic-decline-segregation-and-social-urban-renewal-in.html> (accessed on 9 September 2019).
65. Greiving, S.; Pratzler-Wanczura, S.; Sapountzaki, K.; Ferri, F.; Grifoni, P.; Firus, K.; Xanthopoulos, G. Linking the actors and policies throughout the disaster management cycle by “Agreement on Objectives”—A new output-oriented management approach. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2012**, *12*, 1085–1107. [CrossRef]
66. Greiving, S.; Lindner, C. Assessment of Flash Flood Risk in a Continuous Urban Fabric by the Example of the City of Dortmund. In *Urban Flood Risk Management—Approaches to Enhance Resilience of Communities*; Zenz, G., Hornich, R., Eds.; Verlag der Technischen Universität Graz: Graz, Austria, 2011; pp. 257–262.

67. Shrestha, R.; Flacke, J.; Martinez, J.; van Maarseveen, M. Environmental Health Related Socio-Spatial Inequalities: Identifying “Hotspots” of Environmental Burdens and Social Vulnerability. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2016**, *13*, 691. [CrossRef] [PubMed]
68. Flacke, J.; Schüle, S.A.; Köckler, H.; Bolte, G. Mapping Environmental Inequalities Relevant for Health for Informing Urban Planning Interventions-A Case Study in the City of Dortmund, Germany. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2016**, *13*, 711. [CrossRef] [PubMed]
69. Caffier, A.; Elsner, C.; Rath, C.; Robens, F.; Seidel, J.; Will, K. Offene Geobasisdaten für NRW. *Z. Geodäsie Geoinf. Landmanag. (Zfv)* **2017**, *142*, 133–145.
70. McGarigal, K. FRAGSTATS HELP. Available online: <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats.help.4.2.pdf> (accessed on 14 September 2017).
71. McGarigal, K. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Available online: [https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/downloads/fragstats\\_downloads.html](https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/downloads/fragstats_downloads.html) (accessed on 9 January 2020).
72. Wieland, R.; Voss, M.; Holtmann, X.; Mirschel, W.; Ajibefun, I. Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT): 1. Structure and possibilities. *Ecol. Inform.* **2006**, *1*, 67–76. [CrossRef]
73. Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V. Müncheberg. Programme zum Herunterladen—ZALF. Available online: [http://www.zalf.de/de/forschung\\_lehre/software\\_downloads/Seiten/default.aspx](http://www.zalf.de/de/forschung_lehre/software_downloads/Seiten/default.aspx) (accessed on 9 January 2020).
74. Comber, A.; Brunsdon, C.; Green, E. Using a GIS-based network analysis to determine urban greenspace accessibility for different ethnic and religious groups. *Landsc. Urban Plan.* **2008**, *86*, 103–114. [CrossRef]
75. Schwarze, B. Eine Methode zum Messen von Naherreichbarkeit in Kommunen. Ph.D. Thesis, TU Dortmund University, Dortmund, Germany, 14 July 2015.
76. Brugge, D.; Patton, A.P.; Bob, A.; Reisner, E.; Lowe, L.; Bright, O.-J.M.; Durant, J.L.; Newman, J.; Zamore, W. Developing Community-Level Policy and Practice to Reduce Traffic-Related Air Pollution Exposure. *Environ. Justice* **2015**, *8*, 95–104. [CrossRef]
77. Gilmore, S.; Saleem, A.; Dewan, A. Effectiveness of DOS (Dark-Object Subtraction) method and water index techniques to map wetlands in a rapidly urbanising megacity with Landsat 8 data. In Proceedings of the Research@Locate in Conjunction with the Annual Conference on Spatial Information in Australia and New Zealand, Brisbane, Australia, 10–12 March 2015; pp. 100–108.
78. Zadeh, L.A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets Syst.* **1997**, *90*, 111–127. [CrossRef]
79. Zhang, Z.; Sheng, L.; Yang, J.; Chen, X.-A.; Kong, L.; Wagan, B. Effects of Land Use and Slope Gradient on Soil Erosion in a Red Soil Hilly Watershed of Southern China. *Sustainability* **2015**, *7*, 14309–14325. [CrossRef]
80. Honold, J.; Beyer, R.; Lakes, T.; van der Meer, E. Multiple environmental burdens and neighborhood-related health of city residents. *J. Environ. Psychol.* **2012**, *32*, 305–317. [CrossRef]
81. Zheng, Y.; Xie, X.-L.; Lin, C.-Z.; Wang, M.; He, X.-J. Development as adaptation: Framing and measuring urban resilience in Beijing. *Adv. Clim. Chang. Res.* **2018**, *9*, 234–242. [CrossRef]
82. Krüger, T.; Held, F.; Hoehstetter, S.; Goldberg, V.; Geyer, T.; Kurbjuhn, C. A new heat sensitivity index for settlement areas. *Urban Clim.* **2013**, *6*, 63–81. [CrossRef]
83. Bach, C.; Birkmann, J.; Kropp, J.; Olonscheck, M.; Setiadi, N.; Vollmer, M.; Walther, C. *Assessing Vulnerability to Heat Waves and Heavy Rainfall at a Community Level*, 11st ed.; Federal Office of Civil Protection and Disaster Assistance (BBK): Bonn, Germany, 2014; pp. 1–157.
84. Bradford, K.; Abrahams, L.; Hegglin, M.; Klima, K. A Heat Vulnerability Index and Adaptation Solutions for Pittsburgh, Pennsylvania. *Environ. Sci. Technol.* **2015**, *49*, 11303–11311. [CrossRef] [PubMed]
85. Kiran, K.C.; Corcoran, J.; Chhetri, P. Measuring the spatial accessibility to fire stations using enhanced floating catchment method. *Socio-Econ. Plan. Sci.* **2018**, *100673*. [CrossRef]
86. Caniglia, B.S.; Frank, B. Revealing the resilience infrastructure of cities: Preventing environmental injustices-in-waiting. In *Resilience, Environmental Justice and the City*; Caniglia, B.S., Vallée, M., Frank, B.F., Eds.; Routledge: Abingdon/Oxon, UK; New York, NY, USA, 2017; pp. 57–75. ISBN 9781138119895.
87. Palka, G.; Grădinaru, S.R.; Jørgensen, G.; Hersperger, A.M. Visualizing Planning Intentions: From Heterogeneous Information to Maps. *J. Geovisualizat. Spat. Anal.* **2018**, *2*, 617. [CrossRef]
88. Telesca, L.; Lasaponara, R. Pre- and post-fire behavioral trends revealed in satellite NDVI time series. *Geophys. Res. Lett.* **2006**, *33*, 2293. [CrossRef]

89. Halkia, M.; Ferri, S.; Siragusa, A.; Pafi, M. *Measuring the Accessibility of Urban Green Areas. A Comparison of the Green ESM with Other Datasets in Four European Cities*; Publications Office: Luxembourg, 2016; ISBN 9279612867.
90. Schaefer, M.; Thinh, N.X. Evaluation of Land Cover Change and Agricultural Protection Sites: A GIS and Remote Sensing Approach for Ho Chi Minh City, Vietnam. *Heliyon* **2019**, *5*, e01773. [[CrossRef](#)]
91. Sobrino, J.A.; Jiménez-Muñoz, J.C.; Paolini, L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sens. Environ.* **2004**, *90*, 434–440. [[CrossRef](#)]
92. Wang, F.; Qin, Z.; Song, C.; Tu, L.; Karnieli, A.; Zhao, S. An Improved Mono-Window Algorithm for Land Surface Temperature Retrieval from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor Data. *Remote Sens.* **2015**, *7*, 4268–4289. [[CrossRef](#)]
93. Avdan, U.; Jovanovska, G. Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data. *J. Sens.* **2016**, *2016*, 1480307. [[CrossRef](#)]
94. Matzarakis, A.; Amelung, B. Physiological Equivalent Temperature as Indicator for Impacts of Climate Change on Thermal Comfort of Humans. In *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*; Thomson, M.C., Garcia-Herrera, R., Beniston, M., Eds.; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2008; pp. 161–172. ISBN 978-1-4020-6876-8.
95. European Environment Agency. *Noise in Europe 2014*; Publications Office: Luxembourg, 2014; ISBN 9292135058.
96. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise. 2002. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2002:189:0012:0025:EN:PDF> (accessed on 14 January 2020).
97. Foudi, S.; Osés-Eraso, N.; Tamayo, I. Integrated spatial flood risk assessment: The case of Zaragoza. *Land Use Policy* **2015**, *42*, 278–292. [[CrossRef](#)]
98. DEFRA. *R&D Outputs: Flood Risks to People Phase 2. FD2321/TR2 Guidance Document*; DEFRA: London, UK, 2006.
99. Taubenböck, H.; Wurm, M.; Klein, I.; Esch, T. Verwundbarkeitsanalyse urbaner Räume: Ableitung von Indikatoren aus multisensoralen Fernerkundungsdaten. In *REAL CORP 2011: Change for Stability: Lifecycles of Cities and Regions: The Role and Possibilities of Foresighted Planning in Transformation Process, Proceedings of the 16th International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society = Beiträge zur 16. Internationalen Konferenz zu Stadtplanung, Regionalentwicklung und Informationsgesellschaft, Essen, Germany, 18–20 May 2011*; Schrenk, M., Popovich, V., Zeile, P., Eds.; CORP, Competence Center of Urban and Regional Planning: Schwechat-Rannersdorf, Austria, 2011; pp. 1107–1118. ISBN 978-3-9503110-1-3.
100. Mileu, N.; Queirós, M. Development of a QGIS Plugin to Dasyetric Mapping. *Free Open Source Softw. Geospat. (Foss4g) Conf. Proc.* **2018**, *18*. [[CrossRef](#)]
101. Holloway, S.; Schumacher, J.; Redmond, R. *People & Place: Dasyetric Mapping Using ArcInfo*; High Mountain Press: Missoula, MT, USA, 1997.
102. Federal Ministry of the Interior (BMI). National Strategy for the Protection of Critical Infrastructures (KRITIS-Strategie). Available online: <https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/themen/bevoelkerungsschutz/kritis.html> (accessed on 27 July 2019).
103. Stein, J. *Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten*; AGBF-Bund: Bonn, Germany, 2015.
104. Gonçalves, C.; Marques da Costa, E. *Framework and Indicators to Measure Urban Resilience: Assay in Caldas da Rainha and Évora. Urban Systems*; AESOP/ACSP Congress: Dublin, Ireland, 2013.
105. Reckien, D.; Flacke, J.; Dawson, R.J.; Heidrich, O.; Olazabal, M.; Foley, A.; Hamann, J.J.-P.; Orru, H.; Salvia, M.; de Gregorio Hurtado, S.; et al. Climate change response in Europe: What's the reality? Analysis of adaptation and mitigation plans from 200 urban areas in 11 countries. *Clim. Chang.* **2014**, *122*, 331–340. [[CrossRef](#)]
106. Kayacan, E.; Khanesar, M.A. *Fundamentals of Type-1 Fuzzy Logic Theory. Fuzzy Neural Networks for Real Time Control Applications*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2016; pp. 13–24. ISBN 9780128026878.
107. Piegat, A. *Fuzzy Modeling and Control*; Physica-Verlag HD: Heidelberg, Germany, 2001; ISBN 9783790824865.
108. Thinh, N.X.; Hedel, R. Vergleich zwei räumlicher Bewertungsmethoden—Compromise Programming und regelbasierte hierarchische Fuzzy-Bewertung. In *Simulation in Umwelt-und Geowissenschaften*; Wittmann, J., Thinh, N.X., Eds.; Umweltinformatik, Shaker Verlag: Aachen, Germany, 2005; pp. 57–66.
109. Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* **2008**, *1*, 83–98. [[CrossRef](#)]



110. Haddad, B.M. Ranking the adaptive capacity of nations to climate change when socio-political goals are explicit. *Glob. Environ. Chang.* **2005**, *15*, 165–176. [[CrossRef](#)]
111. Zeleny, M. *Multiple Criteria Decision Making*. Kyoto, 1975; Springer: Berlin, Germany, 1976; ISBN 0387076840.
112. Lokalkompass Dortmund-Ost. Projektaufakt: Masterplan Integrierte Klimaanpassung Dortmund (MiKaDo). Available online: [https://www.lokalkompass.de/dortmund/c-politik/projektaufakt-masterplan-integrierte-klimaanpassung-dortmund-mikado\\_a1260159](https://www.lokalkompass.de/dortmund/c-politik/projektaufakt-masterplan-integrierte-klimaanpassung-dortmund-mikado_a1260159) (accessed on 9 December 2019).
113. Richter, B.; Grunewald, K.; Meinel, G. Analyse von Wegedistanzen in Städten zur Verifizierung des Ökosystemleistungsindikators “Erreichbarkeit städtischer Grünflächen”. In *AGIT 2-2016: Journal für Angewandte Geoinformatik, 1., Neuerscheinung*; Strobl, J., Zagal, B., Griesebner, G., Blaschke, T., Wichmann, H., Eds.; Wichmann Verlag: Berlin, Germany, 2016; pp. 472–481. ISBN 978-3-87907-622-2.
114. Laux, P.; Nguyen, P.N.B.; Cullmann, J.; Kunstmann, H. Impacts of Land-Use/Land-Cover Change and Climate Change on the Regional Climate in the Central Vietnam. In *Land Use and Climate Change Interactions in Central Vietnam: LUCCi*, 1st ed.; Nauditt, A., Ribbe, L., Eds.; Springer: Singapore, 2017; pp. 143–151. ISBN 978-981-10-2623-2.
115. Liu, Z.; Xiu, C.; Song, W. Landscape-Based Assessment of Urban Resilience and Its Evolution: A Case Study of the Central City of Shenyang. *Sustainability* **2019**, *11*, 2964. [[CrossRef](#)]



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



## Artikel 2: Eckdaten und Autorenbeiträge

|                 |   |
|-----------------|---|
| <b>Referenz</b> | Schaefer, M., Ebrahimi Salari, H., Köckler, H., und Thinh, N. X. (2021). Assessing local heat stress and air quality with the use of remote sensing and pedestrian perception in urban microclimate simulations. <i>Science of The Total Environment</i> , 794(3):148709  |
| <b>Beiträge</b> | <b>M.S.:</b> Literaturlauswertung, methodisches Design, Beschaffung und Aufbereitung notwendiger (Geo-)Daten, Modellierung, Simulation und Analyse, Feldforschung (inkl. Planung), Validierung, Visualisierung der Ergebnisse, vollständige Erarbeitung des Manuskripts; <b>H.E.S.:</b> Substanzielle Hinweise zum Manuskript, Konzeptualisierung, Feldforschung; <b>H.K.:</b> Substanzielle Hinweise zum Manuskript, Konzeptualisierung; <b>N.X.T:</b> Substanzielle Hinweise zum Manuskript, Beschaffung und Bereitstellung notwendiger Messinstrumente |
| <b>Historie</b> | Eingereicht: 06. Mai 2021<br>Akzeptiert: 23. Juni 2021<br>Veröffentlicht: 26. Juni 2021   |

Als *Open Access* unter der [Creative Commons \(CC-BY\) 4.0 Lizenz](#) veröffentlicht.



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)

## Assessing local heat stress and air quality with the use of remote sensing and pedestrian perception in urban microclimate simulations

Mathias Schaefer<sup>a,\*</sup>, Haniyeh Ebrahimi Salari<sup>a</sup>, Heike Köckler<sup>b</sup>, Nguyen Xuan Thinh<sup>a</sup>

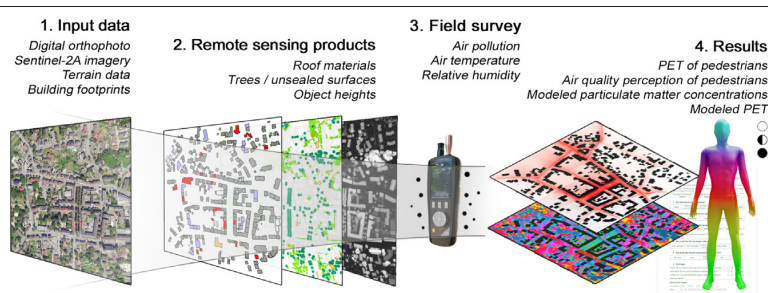
<sup>a</sup> Research Group of Spatial Information Management and Modelling (RIM), TU Dortmund University, 44227 Dortmund, Germany

<sup>b</sup> Department of Community Health, Hochschule für Gesundheit (University of Applied Science), 44801 Bochum, Germany

### HIGHLIGHTS

- Multiple environmental stressors need to be regarded in microclimate modelings.
- Essential input information was derived through remote sensing techniques.
- Experienced air quality and thermal comfort of pedestrians were obtained.
- Highest health risks were observed near unshaded and busy one-way roads.
- The presented workflow can be deployed by urban planners and architects.

### GRAPHICAL ABSTRACT



### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 6 May 2021

Received in revised form 15 June 2021

Accepted 23 June 2021

Available online 26 June 2021

Editor: Pavlos Kassomenos

#### Keywords:

ENVI-met  
Heatwaves  
Urban planning  
Air pollution  
Field measurements  
Outdoor thermal comfort

### ABSTRACT

Cities are increasingly confronted with multiple environmental and climatic stressors. Especially during heatwaves, street canyons are both producers and sufferers of air pollution and urban heat island (UHI) effects, with severe risks on public health. To better design mitigation measures, it is important to consider both the microclimate behaviors as well as the perceptions of the local population. Therefore, this study examined pedestrian perceptions and microclimate modelings to understand outdoor thermal comfort conditions and air pollution dispersion in the case study neighborhood of Dortmund Marten, Germany. A field survey with measurement points at two street canyons for climatic variables and questionnaires on subjective thermal comfort and air pollution was conducted on a hot day during the heatwave period in August 2020. As a cost-effective method for modeling input generation, we extracted spatial and spectral data like albedo, roof materials and tree locations out of remote sensing imageries. Finally, we compared the modeling results of the physiological equivalent temperature (PET) index, particulate matter concentrations and air temperatures with empirical field measurement data and the questionnaire responses. Results indicate that during hot summer days with light winds from the east, the north-south orientated street canyon with tree arrangements tends to act as a tunnel for particulate matter accumulation. Coincidentally, pedestrians show less thermal discomfort than calculated PET values in that particular area during morning and daytime, which underlines the dichotomy of such places. On the other hand, the low rise east-west orientated street canyon shows higher PET votes than predicted by the model. However, particulate matter concentrations were considerably underestimated by the model, while air temperature predictions provided meaningful results. The proposed workflow shows the potential to accelerate future preparations of input data for microclimate modelings, while the results can enhance wind-sensitive planning procedures and heat stress resilience in mid-latitude urban neighborhoods.

© 2021 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

\* Corresponding author.

E-mail address: [mathias.schaefer@tu-dortmund.de](mailto:mathias.schaefer@tu-dortmund.de) (M. Schaefer).

## 1. Introduction

Climate change and rapid urban expansion tend to be the most important challenges for urban planners in the 21st century. Coincidentally, besides flooding and heavy rain events, heatwaves (HWs) tend to increase in frequency and intensity in the future (Karl and Easterling, 1999; Smith, 2011). For example, since the beginning of systematic weather records in 1881, the HW in August 2020 in Germany was the second hottest after August 2003 (Deutscher Wetterdienst (DWD), 2020). Depending on the duration and intensity, such HWs cause severe harm to economies, infrastructures, and urban ecology. Most notably, HWs lead to significant adverse effects on public health, especially to the human thermal comfort during hot days ( $>30\text{ }^{\circ}\text{C}$  air temperature peaks during 6:00 am–6:00 pm) and tropical nights ( $>20\text{ }^{\circ}\text{C}$  air temperature during 6:00 pm–6:00 am), making HWs the deadliest climate extreme events in various countries (He et al., 2021). It follows that over 70,000 deaths in 16 states of Europe were estimated during the HW in the summer of 2003 (Robine et al., 2008).

While other weather-related disasters like flooding and heavy rain events were thoroughly analyzed in the last years, HWs and their impacts on regions, cities and human thermal comfort gained great attention to academic urban planning research in the recent decade (Keith et al., 2020; Rohat et al., 2019). Although HWs often occur cross-regional, they are especially pronounced in cities where people and dense building structures are concentrated in a relatively small space. Compared to their natural surroundings, artificial building materials and soil sealings in cities show an increased heat storage capacity with less evaporative cooling, widely known as the Urban Heat Island (UHI) effect (Howard, 1820). Another UHI characteristic is the variation in wind speed and direction, which also induces the accumulation of air pollutants like  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  in urbanized areas (Di Sabatino et al., 2020; Feizizadeh and Blaschke, 2013). Such effects can mainly be observed in urban street canyons with continuous high-rise buildings on both roadsides (Huang et al., 2021b). HWs can even intensify UHI effects, with multiplying consequences for the urban environment, which is why both heat stress and air pollution must be considered in measures aiming at reducing cumulative environmental burdens and risks (Founda and Santamouris, 2017; Zhao et al., 2018). Here, spatial planning institutions and local risk management are the key actors for making cities inclusive, safe, resilient and sustainable, which is also summarized in the Sustainable Development Goals 11 and 13 of the United Nations Agenda 2030 (United Nations, 2015). This commitment implies a health-promoting urban development, given special priority to building materials and wind-sensitive planning to improve thermal comfort conditions and therefore increase the quality of life in urban neighborhoods (He et al., 2020a, 2020b).

As an approximation to this issue, microclimatic modelings are widely used to calculate and visualize wind behaviors, thermal comfort, and air pollution dispersion in a built environment. Unfortunately, microscale numerical modelings are still rarely embedded into the realities of municipal planning practice, not at least because the manual editing of the modeling environment and input parameters is often time-consuming, especially for larger study areas. Indeed, essential input parameters for environmental characteristics (e.g., roof materials, tree locations and vegetation surfaces, or albedo) can also be assessed using remote sensing techniques (Heldens et al., 2017; Heldens et al., 2020). However, microclimatic simulation outputs need to be validated with in-situ measurements to assess the reliability of the simulation results and derived climate adaptation strategies, which is still no common practice (Crank et al., 2020; Tsoka et al., 2018).

The objective quantification of heat stress and air pollution via numerical modelings is an essential contribution to the anticipation of health-related risks at the neighborhood level. On the other hand, the perception of potential environmental harms is highly referred to as the individual: While HWs are short-term incidents that concentrate on a specific period with immediate health risks, air pollution can be interpreted as an accumulative and daily disturbance over years.

Therefore, with regard to urban planning decisions, the individual comfort in urban environments needs to be analyzed simultaneously, as the subjective human sensation not only influences outdoor activities and well-being, but also how people respond to potential adaptation measures (Cohen et al., 2013; Pantavou et al., 2017).

Given these insights, this study aims to quantify human thermal comfort and air pollution dispersion via comprehensive microclimatic modelings in the case study neighborhood Dortmund Marten, Germany. Concurrently, we conducted an on-site questionnaire survey in the study area to explore the perceived thermal comfort, air quality sensation and coping techniques of pedestrians on a hot day during the HW in August 2020 in Germany. We introduce an advanced method for the microclimatic modeling procedure to ascertain the required physical and environmental characteristics only with open geodata and contemporary remote sensing techniques. For validation purposes, we compared our modeling outcome with the questionnaire responses and on-site measurements on air temperature and particulate matter concentrations.

The objectives of this study are 1) to understand the variations of human perception on thermal comfort and air pollution during an extreme heat event at the local scale, 2) to point out the spatial interplay between the built environment, UHI, and air pollution dispersion with a focus on street canyons, and 3) to examine the proficiency of remote sensing-based numerical microclimate modeling predictions in terms of air temperature, particulate matter dispersion, and human thermal comfort. Our interdisciplinary study therefore promotes spatial and wind-sensitive planning responses to urban heat problems, opens new discussions about roadside air pollution in urban neighborhoods, and enhances the efficiency of the modeling input generation with the use of remote sensing.

## 2. Materials and methods

For our analysis, we applied the holistic microclimatic modeling software ENVI-met (Bruse and Fleer, 1998), which allows the simulation of particulate matter dispersion and up-to-date thermal comfort indices under specific weather conditions. For instance, ENVI-met is widely used as a three-dimensional tool to investigate the cooling effects of green infrastructures on urban areas (Bartessaghi Koc et al., 2018), to assess the impact of existing urban geometry on thermal comfort, wind velocity and the spatial distribution of air pollution (Abhijith et al., 2017; Chatzinikolaou et al., 2018; Sharmin et al., 2017; Tsoka, 2017), or to compare the potential effects of urban planning purposes to the local microclimate (Koch et al., 2018).

Since the winter release of 2017/2018, it is possible to automatically transfer vector-based geodata with corresponding database codes into the ENVI-met environment, which significantly eases the preparation phase to run the model. The ENVI-met software needs two primary information schemes for initiation: First, the Area Input File (AIF), which describes the setting of the environment like roof materials and facades, vegetation, water and soils, or artificial surfaces like asphalt. Second, the Simulation File (SF) for weather and air pollution conditions. More than half of the AIF-parameters can mainly be generated through optical remote sensing data and 3D surface models, a promising and practically tested approach introduced by (Heldens et al., 2017), which was partly adopted and applied to open geodata in this study.

For the comparison with the modeling output, we collected first-hand measurement data on the local climate conditions and air quality as well as information on human perception using a questionnaire survey at two sites in Dortmund Marten. Fig. 1 describes all methodological working steps conducted in this study. After introducing the study area, each working step will be explained in the subsequent sections.

### 2.1. Case study area

The City of Dortmund (602,566 inhabitants) is located in the center of North Rhine-Westphalia (NRW) and is part of the Ruhr area, the most

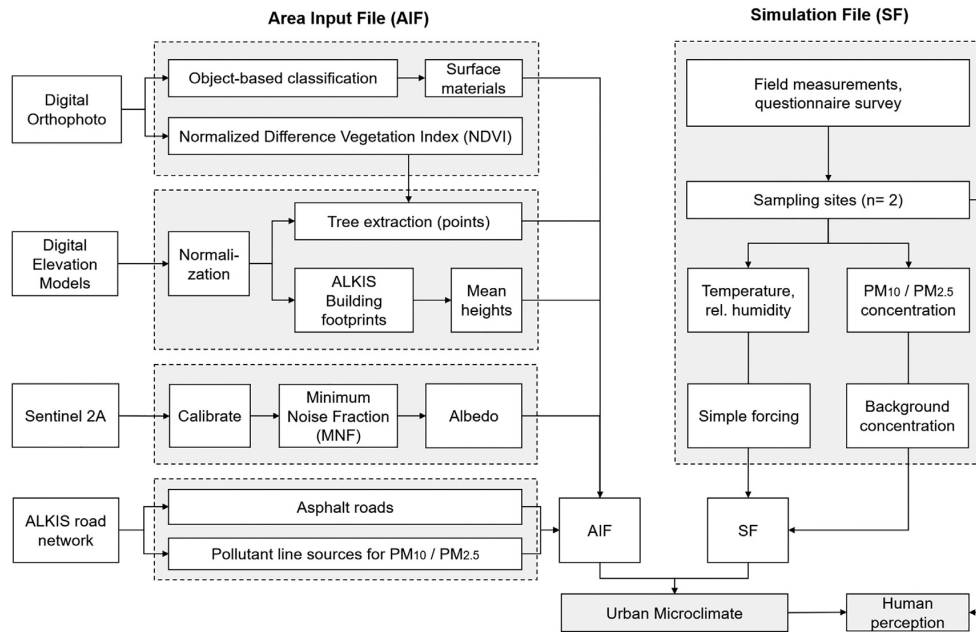


Fig. 1. Framework for the generation of ENVI-met input parameters and the comparison of the modeling output with measurement data and human perceptions of the local climate.

urbanized agglomeration in Germany (Stadt Dortmund, 2019). From a macroclimate perspective, Dortmund is located in northwest Germany, which belongs to the west wind belt. Due to the proximity to the Atlantic Ocean, the climate in this part of Germany is marine-influenced, with relatively cool summers and mild winters. However, due to continental climatic influences, higher temperatures and dry periods with light winds from the east can also be obtained in summer (Lüftner, 1996; Regionalverband Ruhr (RVR), Referat Geoinformation und Raumbewachung, 2019).

The statistical sub-district Dortmund Marten is located in the western part of Dortmund. Since the post-industrial neighborhood is confronted with several environmental and climatic issues, Dortmund Marten evolved into a hotspot for urban planning practitioners and scientists: On July 26th 2008, large parts of Dortmund Marten were exposed to a heavy rain event with 203 mm precipitation in two and a half hours, leading to severe damages to housing and infrastructures (Greiving and Lindner, 2011). Compared to other sub-districts, previous studies on city-scale concluded that Dortmund Marten offers limited access to public open and green spaces and is affected by higher levels of noise pollution due to the proximity to railways in the south and traffic-loaded street canyons like “In der Meile” and “Martener Straße” (Fig. 2) (Flacke et al., 2016; Schaefer et al., 2020; Shrestha et al., 2016). More than 70% of the urban core area (Marten center) is completely sealed and dominated by a high building density of three- to five-story mixed-use block development, combining living and working in a small space. Additionally, due to the isolation from major ventilation corridors and the absence of nearby cold air production zones, the urban core is prone to significant UHI effects and air pollution. In summer, nocturnal air temperatures can stay above 21 °C (Regionalverband Ruhr (RVR), Referat Geoinformation und Raumbewachung, 2019). On top of that, the core area is home to a high proportion of the 5,707 residents in Dortmund Marten with an unemployment rate of 11.8% (31.12.2018, Dortmund: 9.8%), which amplifies the issues mentioned above (Stadt Dortmund, 2019).

Consequently, the study was carried out for the urban core and its adjacent surroundings to investigate its microclimatic interplay with the natural and built environment (Fig. 2). We particularly focused on the two street canyons “In der Meile” and “Martener Straße”, as they

are highly frequented by motor vehicles and pedestrians, making them areas of interest for human thermal comfort and air pollution assessments.

## 2.2. Fieldwork

### 2.2.1. Particulate matter and microclimate assessment

Objective measurements on the microclimate and air quality conditions needed to be carried out as a viable reference source for the predicted modeling results. We considered a hot day during the summer HW in August 2020 in Germany to demonstrate an analysis for a real climate extreme event. For this reason, the field measurements took place on August 11th 2020 on a regular working day with peak temperatures above 30 °C on daytime and wind coming from the east (Fig. 3).

Two sampling sites were set at the two street canyons “Martener Straße” (1) and “In der Meile” (2), respecting a 25 m distance to traffic lights and traffic junctions according to the EU clean air directive requirements on measuring air quality (European Parliament, Council of European Union, 2008). Mobile particle counter devices PCE-PCO2 recorded PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations in µg/m<sup>3</sup> with 17 one-hour means at 60 s intervals (06:00 am–11:00 pm, except for 5:00 pm) at a constant height of 1.5 m above ground (breathing zone). Air temperatures and relative humidity were measured in parallel using the same devices and intervals, while both measurement points were placed in shaded areas throughout the whole survey.

### 2.2.2. Questionnaire survey and thermal comfort calculation

During the on-site air quality and temperature assessment, structured interviews were conducted with pedestrians passing by the two measurement sites. The first part of the questionnaire considered personal characteristics like gender (female/male), age (<18, 18–30, 31–50, 51–70, 71–80, >80 years old), activity before the interview (sleeping, sitting, standing, walking, sports), place of residence (to take account of thermal adaptation) and how frequently the interviewee passes by this place (daily, several times a week, a few times a week, a few times a month, occasionally, first time). The second part consisted of questions about the perceived thermal comfort and air quality as well as personal coping techniques on heat stress (Table 1)

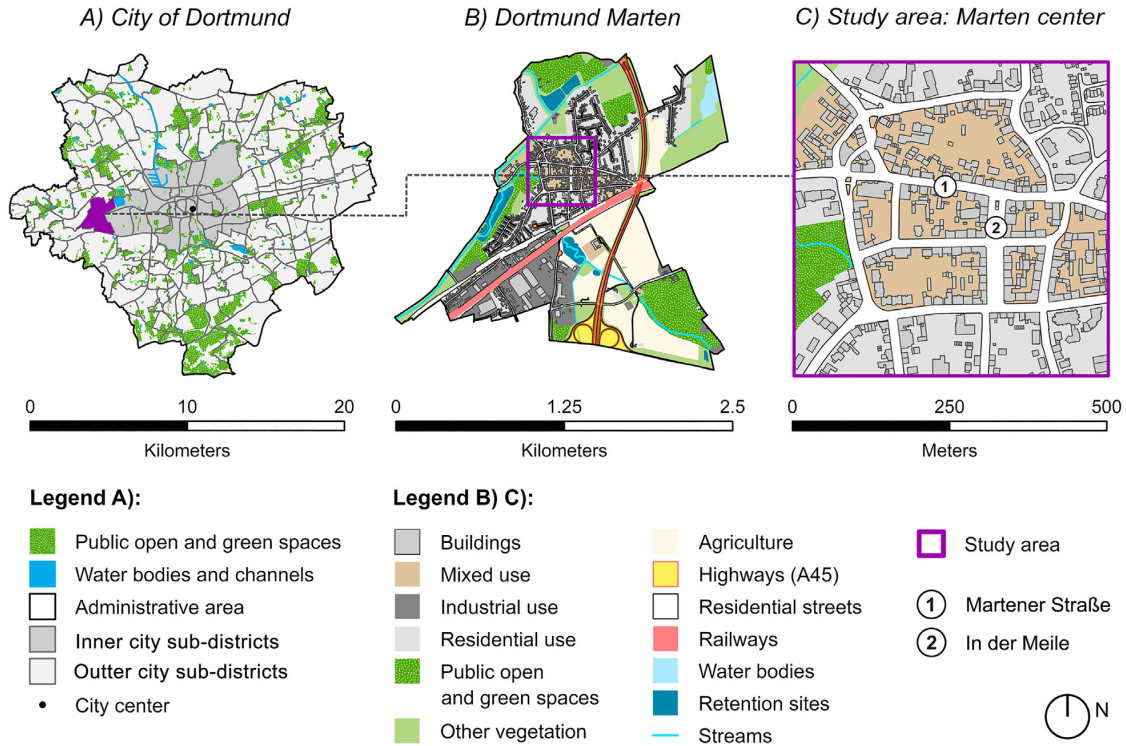


Fig. 2. Location and land use information of the study area in the City of Dortmund.

(Nikolopoulou et al., 2011; Pantavou et al., 2017). The seven-point thermal sensation categories are in line with the physiological equivalent temperature (PET) classifications by (Matzarakis and Amelung, 2008), which are transferred ranges of the predicted mean vote (PMV) psychophysical scale of (Fanger, 1970). PET, expressed in °C, is an outdoor thermal comfort index that combines thermo-physiological parameters (e.g., clothing, metabolism and activity) and environmental parameters (air temperature [°C], mean radiant temperature [°C], horizontal wind speed [m/s], and specific humidity [g/kg]) (Walther and Goetschel, 2018). For non-experts, the linguistic categories are easy to understand, while it also allowed a direct comparison to the modeling results of PET (Table 2). The PET values were estimated in ENVI-met from the microclimate modelings in the study area, according to a 35 years old adult with a height of 1.75 m, 0.57 heat transfer resistance of clothing in summer and constant internal heat production of 80 W (Salata et al., 2016).

### 2.3. Area input file

#### 2.3.1. Data and preprocessing

The methodical challenge was to derive information about the environment materials without detailed on-site observations, which called for relevant data with a similar up-to-dateness. We considered various geodata, e.g., a digital orthophoto (DOP) with Near-Infrared Band, building footprints, and land use information that are freely available for the whole federal state of NRW, Germany (Caffier et al., 2017). Beyond, we used a cloud-free Sentinel-2A Level 1C Product (hereafter S2A1C) for a similar date as the DOP, which was converted to reflectance values with a factor of 1/10,000 (Gascon et al., 2017) in the remote sensing software ENVI 5.4 (Exelis Visual Information Solutions). The urban morphology did not change between 2018 and 2020, so we used data from different years but in the same season. Due to a lack of metadata

information, it was not possible to calibrate the DOP into radiometric values, which means that the following working steps are based on 8-bit grey levels ( $n = 256$ ) for each band.

For our purpose, we initially rasterized LiDAR (light detection and ranging) point clouds to a digital terrain model (DTM) and a digital surface model (DSM). After normalizing, only height information of the objects on top of the terrain (trees, buildings) was represented (nDSM). Every dataset was clipped to the study area and projected to the coordinate system Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 32 N in ArcGIS Pro 2.6 (Environmental Systems Research Institute, ESRI). Table 3 provides an overview of the dataset used in this study.

#### 2.3.2. Object-based classification

Computer-based classifications of remotely sensed imageries are an efficient way to generate useful information about land cover characteristics of an area of interest. Although pixel-based classification methods undergo enhancements by implementing height data and spectral unmixing algorithms (Degerickx et al., 2019), the usage of object-based classifiers shows significant improvements in the classification accuracy as they rely not only on spectral information but also on spatial information (groups of pixels) of an image dataset (Myint et al., 2011). As the spatial resolution of the resampled DOP is reasonably high (1 m) and there is no option for spectral calibration due to the lack of metadata, we applied the example-based feature extraction tool in ENVI for object identification. With a scale level of 20 and a merging level of 95, we initially delineated the boundaries of features such as roads, rooftops and trees in the DOP within the segmentation process (Im et al., 2008). Finally, we could identify 12 classes in the study area, namely:

1. Tiles (red)
2. Tiles (dark)

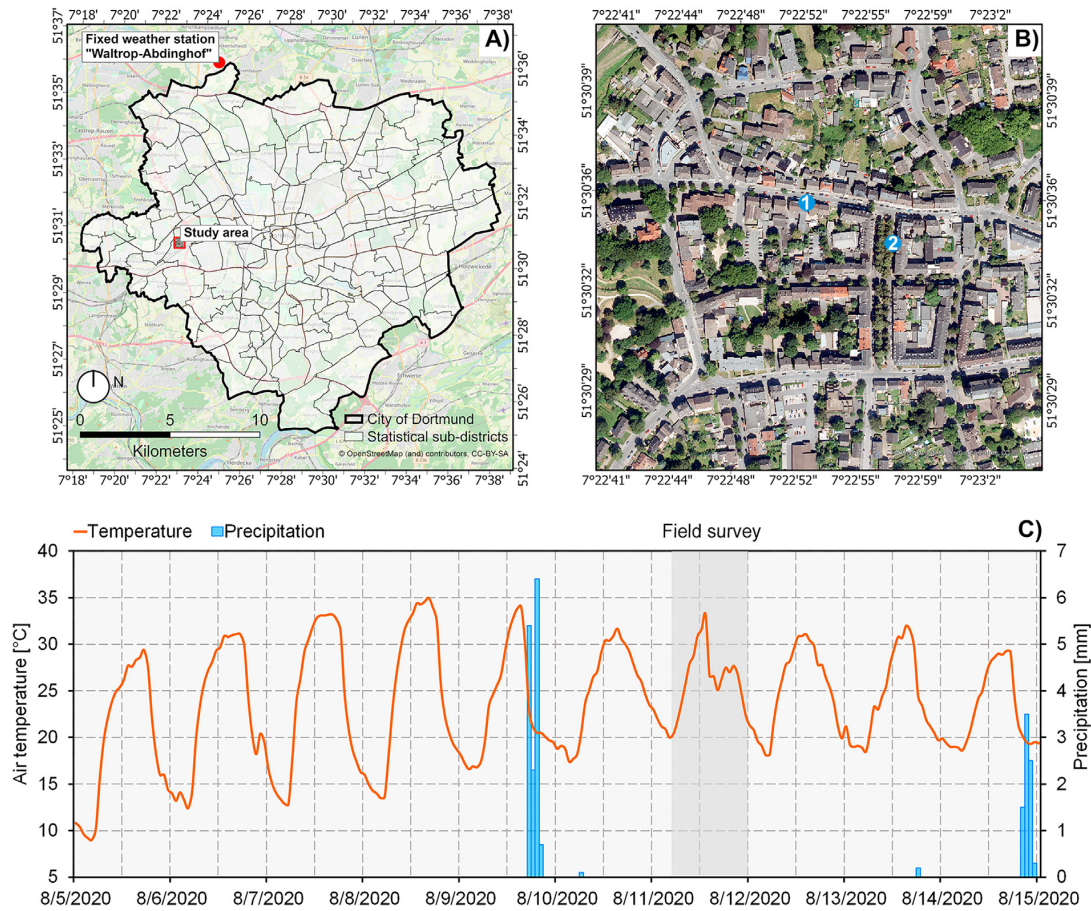


Fig. 3. A) Location of the nearest weather station “Waltrop-Abdinghof”, B) Location of the two measurement sites in the study area, C) Hourly observations of air temperature at 2 m above ground and precipitation amount at the weather station “Waltrop-Abdinghof” during the HW between August 5th and August 15th 2020. (Source: Deutscher Wetterdienst (DWD) Climate Data Center (CDC), version v19.3, last accessed: May 28th 2021)

Table 1

Excerpt of the questionnaire (modified version of (Pantavou et al., 2017)).

|   |                |               |                |                  |      |
|---|----------------|---------------|----------------|------------------|------|
| <b>1. How do you feel overall at this site?</b>                                 |                |               |                |                  |      |
| Very uncomfortable  | Uncomfortable  | Neutral       | Comfortable    | Very comfortable |      |
| <b>2. How do you perceive the current air temperature at this site?</b>         |                |               |                |                  |      |
| Cold  | Cool           | Slightly cool | Comfortable    | Slightly warm    | Warm |
|   |                |               |                |                  | Hot  |
| <b>3. How do you perceive the air quality in relation to dust at this site?</b> |                |               |                |                  |      |
| Very dusty  | Slightly dusty | Neutral       | Slightly clean | Very clean       |      |

Table 2

PET thresholds and corresponding thermal perception categories with grades of thermal heat stress by (Matzarakis and Amelung, 2008).

| PET thresholds [°C] | Thermal perception | Grade of thermal stress (PET) |
|---------------------|--------------------|-------------------------------|
| <4                  | Very cold          | Extreme cold stress           |
| 4–8                 | Cold               | Strong cold stress            |
| 8–13                | Cool               | Moderate cold stress          |
| 13–18               | Slightly cool      | Slight cold stress            |
| 18–23               | Comfortable        | No thermal stress             |
| 23–29               | Slightly warm      | Slight heat stress            |
| 29–35               | Warm               | Moderate heat stress          |
| 35–41               | Hot                | Strong heat stress            |
| >41                 | Very hot           | Extreme heat stress           |

3. Zinc
4. Bitumen
5. Gravel
6. Trees
7. Grass
8. Hedges
9. Bare soil
10. Asphalt
11. Pavement
12. Shadows

Post-classification reduction of salt and pepper effects (e.g., cars and road markings) was used to reveal the study area’s dominant land covers and roof materials with a zonal majority filter. Next, shadows were reclassified with the help of the nDSM and the Normalized



**Table 3**  
Data used.

| Data type                            | Name  | Date       | Spatial resolution  | Source  |
|--------------------------------------|---|------------|---|---|
| Multispectral remote sensing imagery | Sentinel-2A Level 1C Product (S2A1C)  | 07.07.2018 | 10 m–60 m   | Copernicus Sentinel data, processed by European Space Agency (ESA)    |
|                                      | Digital orthophoto (UTM 32387_5707)   | 29.06.2018 | 0.1 m. Resampled to 1 m   | GeobasisNRW (dl-zero-de/2.0)  |
| LiDAR remote sensing data            | Digital terrain model (DTM) and digital surface model (DSM)   | 2018       | Point data with 0.5 m spacing. Normalized and resampled to 1 m (nDSM) | GeobasisNRW (dl-zero-de/2.0)  |
| GIS data                             | Sub-districts (n = 170) and administrative boundary   | 2019       | –   | City of Dortmund, Surveying and Land Register Office (dl-zero-de/2.0) |
|                                      | Building footprints, road network, CityGML (Level of Detail 2), authoritative real estate cadaster information system (ALKIS) | 2019       | Parcel level  | GeobasisNRW (dl-zero-de/2.0)  |
|                                      | Land Use, Digital Landscape Model of the Federal topographic information system (ATKIS Basis-DLM)                             | 2019       | 1:10,000  |   |

Difference Vegetation Index (NDVI) of the DOP (Huang et al., 2021a). We set a threshold of  $NDVI > -0.2$  and  $nDSM < 5$  m for low-lying vegetated areas and a threshold of  $NDVI < -0.2$  for asphalt based on visual interpretation. After vectorizing the object-based classification results, we extracted two input types for further processing: Roof materials (tiles, zinc, bitumen, gravel) and ground unsealed surfaces (bare soil, grass, hedges, trees). Since pavement is set as the default soil type for urban areas in ENVI-met, we did not export this class as an additional input parameter. Nonetheless, we used the pavement classification for comparison of a proper assignment of the model. Similarly, we used the road network of the freely available ALKIS-dataset for better asphalt assignments in the ENVI-met environment.

Subsequently, an accuracy assessment was performed to evaluate the correctness of the classification results. For each of the remaining 11 classes, we assigned 50 sample points using the stratified random algorithm, resulting in a total sample of 550 points (Congalton, 1991). The high-resolution DOP (0.1 m) served as a suitable reference source for ground truth information. Through an error matrix, statistical parameters such as overall accuracy ( $O_A$ ), kappa coefficient ( $k$ ), user's and producer's accuracy ( $U_A$ ,  $P_A$ ) were computed.

### 2.3.3. Albedo

Surface materials are characterized by a distinct spectral reflectance across the electromagnetic spectrum, which directly influences the surface energy balance of an object. The ratio of incoming solar radiation to outgoing radiation reflected by an object is referred to as the albedo, which can be determined by satellite remote sensing while also considering the aging and weathering of surface materials. Higher albedo values correspond to more reflectance and less absorption of solar radiation, making surface albedo a vital driver for the local climate (Alchapar and Correa, 2016; Cao et al., 2018).

We approximated roof surface albedo values by utilizing S2A1C visible bands (red, green, blue) with 10 m resolution according to the provided coefficients by (Li et al., 2018). The choice for the 10 m resolution bands was made after inspecting the building contours, which mainly range between 12 and 15 m in the study area. At this point, with the use of a Minimum Noise Fraction (MNF) Transformation for denoising, we derived one mean albedo value of pure pixels as a representative for each dominant roof material. In order to ensure a proper assignment, we compared our albedo estimations and roof materials to existing spectral libraries (Heiden et al., 2001; Kotthaus et al., 2014) while also implementing the corresponding density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], emissivity [%], thermal conductivity [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ], thickness [m] and specific heat capacity [ $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ] into our database (Clarke, 2001). We imposed default walls with moderate insulation as the standard facade material for all buildings.

### 2.3.4. Tree extraction

Trees contribute important services to the local microclimate and social well-being, such as air pollution reduction and cooling effects through shadowing (Akbari et al., 2001; Wang and Akbari, 2016b). Speaking of microclimate modeling, accurate 3D information about tree structures in an urban settlement must be generated in order to properly examine its effects on the surrounding environment (Perini et al., 2017). Methods about morphological tree extraction from detailed LiDAR point clouds are well established and therefore also applied in this study (Liu et al., 2013). We used the NDVI of the DOP and created a vegetation mask with NDVI values above 0.1, which was then intersected with the nDSM. After visual inspection of the masked nDSM, we extracted pixels with a height of  $\geq 2$  m, representing potential tree crowns. Using 6 m focal statistics and a slope filter for crown diameters around maximum tree heights, we extracted georeferenced points from the nDSM for each tree. The results were compared to the official tree cadaster of Dortmund and, where necessary, manually corrected in its positioning (Stadt Dortmund, Vermessungs- und Katasteramt, 2020).

The three-dimensional structure of a single tree can be represented by the Leaf Area Density (LAD) distribution, which describes the leaf area per height interval and unit volume [ $\text{m}^2/\text{m}^3$ ] (Oshio et al., 2015). We assigned three standardized deciduous tree types according to their height range (5 m, 15 m, 25 m) with fixed LAD-values (LAD = 1.1). Similarly, for both grass and hedges classes, default LAD-values of the ENVI-met database (LAD = 0.3 for grass, LAD = 2.5 for hedges) were set according to their specific height. Sandy loam was automatically positioned underneath every vegetation class as a natural ground surface.

### 2.3.5. Building heights

There is broad evidence that building height and arrangement has a relevant influence on wind flow patterns and, thus, on temperatures and the distribution of pollutants in an urban environment (Shareef and Abu-Hijleh, 2020). Building height information is getting more and more implemented in crowdsourced platforms like OSM (Fan and Zipf, 2016). However, in most German cities, such information is still relatively sparse. As an alternative, pixel-based mean building heights for each building footprint were extracted from the nDSM and linked to the vector shape (Garnett and Adams, 2018). Roofs are generally flat in the ENVI-met block model, but regarding our study goal (thermal comfort at pedestrian height) and to avoid too much complexity in the model simulation, these simplifications are negligible.

**Table 4**  
Accuracy assessment results for object-based classification output (%).

|       | Tiles (red)        | Tiles (dark) | Zinc | Bitumen | Gravel | Trees | Grass | Hedges | Bare soil | Asphalt | Pavement |
|-------|--------------------|--------------|------|---------|--------|-------|-------|--------|-----------|---------|----------|
| $U_A$ | 100.0              | 78.95        | 90.7 | 85.11   | 96.0   | 90.2  | 100.0 | 90.2   | 93.88     | 100.0   | 67.16    |
| $P_A$ | 94.0               | 90.0         | 78.0 | 80.0    | 96.0   | 92.0  | 96.0  | 92.0   | 92.0      | 80.0    | 90.0     |
| $O_A$ | 89.09              |              |      |         |        |       |       |        |           |         |          |
| $k$   | 0.88<br>(unitless) |              |      |         |        |       |       |        |           |         |          |

### 2.3.6. Sources for air pollution modeling

In ENVI-met, it is possible to simulate air pollution dispersion by linear emission sources depending on assumptions about the traffic volume, the number of lanes, emission factors of vehicles, and its relative shares. We derived five street types with different emitter behaviors and vehicle shares according to our field observations and the official clean air plan of the eastern Ruhr Area, Germany (Bezirksregierung Arnsberg, 2011; Bezirksregierung Arnsberg, 2020): 1,000 vehicles/day (one lane), 1,000 vehicles/day (two lanes), 2,000 vehicles/day (one lane), 5,000 vehicles/day (two lanes), 10,000 vehicles/day (two lanes). Likewise, we implemented mean emission factors concerning  $PM_{10}$ , provided by the European Environment Agency for each vehicle type (European Environment Agency (EEA), 2019). With regard to the known  $PM_{10}$  emission factors, for  $PM_{2.5}$ , a fraction of 36% for roads with minor traffic (1,000 vehicles/day) and 53% with major traffic (>1,000 vehicles/day) were set, based on our values measured during the field survey. The final air pollution sources are represented as vectorized line segments with unique codes for the assigned street type.

### 2.3.7. Inputting spatial information into ENVI-met

After preparing the spatial parameters mentioned above, we applied the ENVI-met MONDE 4.4.5 feature for an automatic transformation of the 2.5D building and vegetation information, bare soils, and the road network with pollutant sources into the AIF. We also included a DTM, as the topography plays an important role in microclimate ventilation dynamics. The DTM used in this study is a product of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), distributed by OpenTopography with 1 arc sec resolution (30 m) (Farr et al., 2007). In ENVI-met MONDE, the DTM can be automatically extracted for the area of interest and is resampled to the simulation grid resolution. As a trade-off between accuracy and computation time, the final model extends to a horizontal resolution of 250 m × 250 m with a grid size of 2 m as well as a vertical resolution of 20 m with a grid size of 3 m.

### 2.4. Simulation file

For best modeling results, it is advised to use representative local meteorological measurement data rather than secondary information of the nearest weather station, especially when simulating particulate matter dispersion in ENVI-met (Paas and Schneider, 2016; Sharmin et al., 2017). Consequently, we used the hourly air temperature and relative humidity values of our measurements in simple forcing mode as boundary conditions in the ENVI-met simulation. The lowest measured mean values of air pollution served as background concentrations of particulate matter in the study area, 17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for  $PM_{10}$  and 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for  $PM_{2.5}$ , respectively. According to local investigations and data of the weather station "Waltrop-Abdinghof", the wind direction was set for 90° (east) with a speed of 2.2 m/s at a height of 10 m. For wind behavior modeling, the roughness length  $z_0$  [m] was calculated as a spatially weighted sum of the land cover classification (Montazeri et al., 2017) in the study area (0.68) according to the updated Davenport roughness classification (Wieringa, 1992). The simulation duration was set for 18 h (05:00 am–11:00 pm) on August 11th 2020, starting one hour before dawn (06:00 am), while results about the microclimate and air pollution dispersion were automatically saved every hour.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Classification results

Table 4 summarizes the classification accuracy results: With an  $O_A$  of 89.09% and a kappa coefficient of 0.88, the high-resolution DOP seems to be suitable for object-based classification of heterogeneous urban areas, albeit no spectral information was available for more detailed object identification. The lowest accuracies can be found in pavement and dark tiles classes, as both classes share similar radiometric values. Although the shadow removal with the NDVI and nDSM helped to identify roads and pavements located under trees or other obstacles, the utilization of administrative data is highly recommended, especially when the analysis includes air pollution modeling. This implies that using image segmentation alone does not assure a completely satisfying material classification. Nevertheless, as described in Section 2.3.2., we used pavement as the default ground material in ENVI-met, which is why the lower accuracy for this class did not affect the microclimate modeling results. Conversely, trees, hedges and grass yielded very high classification accuracies, which was necessary for a decent linkage to the ENVI-met database. Given these results, with the use of open geodata and high-resolution imageries, our method is applicable but also limited to any other urban neighborhood in NRW (see Section 2.3.1). All remote sensing outputs are illustrated in Fig. 4, while the final 3D model for microclimate simulation can be obtained in Fig. 5.

### 3.2. Urban microclimate and air pollution dispersion modeling

As illustrated in Fig. 6, unshaded areas with a lack of vegetation are highly affected by UHI effects, as can be seen in the northeast corner of the study area as well as non-vegetated asphalt roads of "Martener Straße". Considering the spatial distribution of PET values, trees seem to have a remarkable effect on daytime temperatures due to their shadow casts. It is also worthy to note that the constellation of street orientation and adjacent building heights seem to affect air temperatures and thermal comfort: North-south and east-west orientations with taller buildings show lower values throughout the street area than east-west orientations with lower buildings which receive less shadings and larger amounts of solar radiation during the day (Figs. 4 E, 6). This effect can also be evidenced by the findings of (Ali-Toudert and Mayer, 2006). Although the western park area is highly vegetated with comparably low air temperatures around 29 °C, PET values dramatically rise above 40 °C (extreme heat stress) around unshaded grass surfaces. Following this line of thought, public parks with little shaded areas may serve lower air temperatures than unshaded sealed surfaces but still need to be reconsidered in terms of potential heat stress.

It can be anticipated that the dense urban morphology of Dortmund Marten restricts air pollution dispersion, which is particularly remarkable in the street canyon "In der Meile" (Fig. 7): Due to the east wind direction on August 11th 2020 and the north-south orientation of the street, the left windward sided buildings and courtyards slow down wind speed below 0.5 m/s and hinder particle diffusion (Fig. 8). In addition, the adjacent street trees tend to act as a natural tunnel for particulate matter accumulation. This specific case was also investigated in other microclimate modelings with similar study sites (Abhijith et al., 2017;

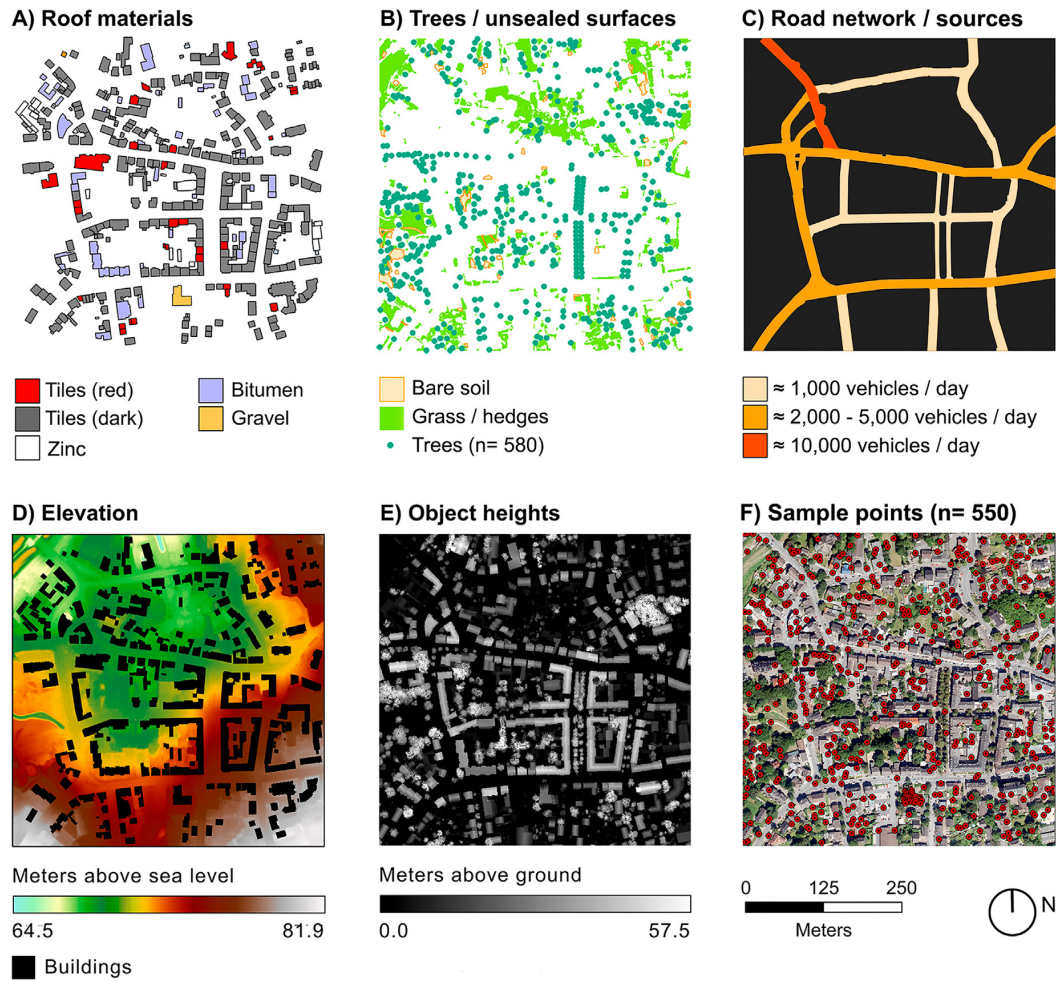


Fig. 4. Remote sensing products, accuracy assessment sample points and geospatial input data for urban microclimate modeling in ENVI-met.

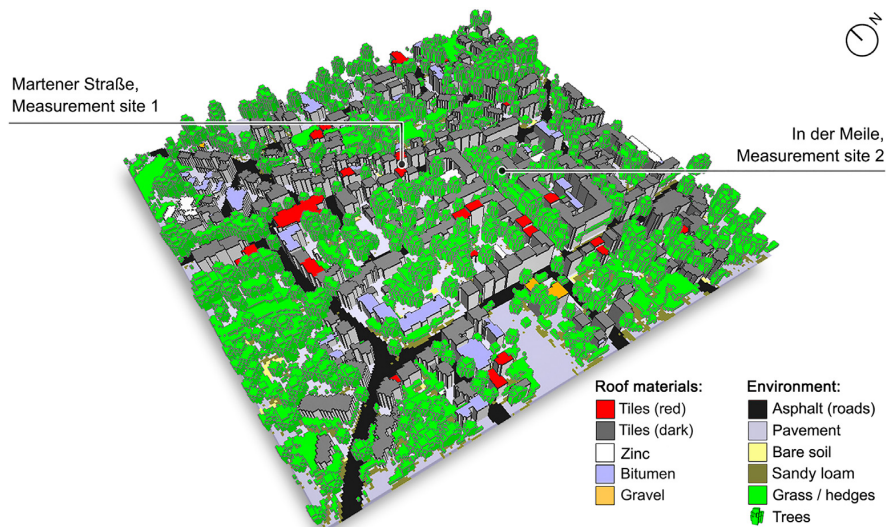


Fig. 5. 3D model of the AIF based on object-based classification results.

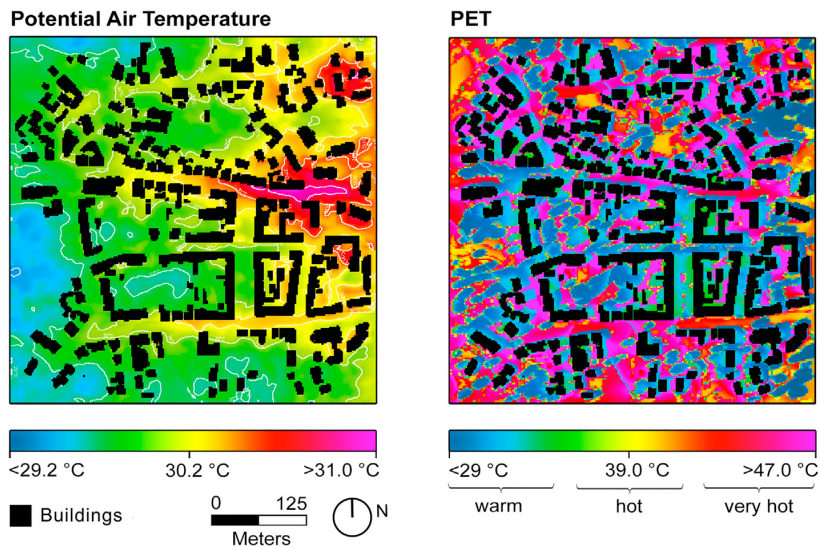


Fig. 6. Comparison of modeled potential air temperatures and PET categorized according to (Matzarakis and Amelung, 2008) at a height of 1.5 m on 3:00 pm.

Tsoka, 2017) and shows the ambivalence of vegetated street canyons in terms of lower air temperatures but higher particulate matter accumulation.

Except for “In der Meile”, the highest particulate matter predictions can be observed in direct proximity to the road segments, declining rapidly with increasing distance to the emission sources. As mentioned above, the park area in the west is mainly characterized by grass fields and detached single trees, not providing impermeable obstacles for particle accumulation. Indeed, this area is also partly exposed to the

emissions of the adjacent traffic road, which is a common issue in urban public and open spaces (Paas et al., 2016). On the contrary, it can be expected that these results would change with different wind direction settings, which should be considered in further scenario evaluations.

As illustrated in Fig. 9, measured  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations are much higher at the “Martener Straße” than “In der Meile”, which could be explained by a different traffic composition with a greater amount of heavy duty vehicles (HDV) and corresponding emission factors. As the

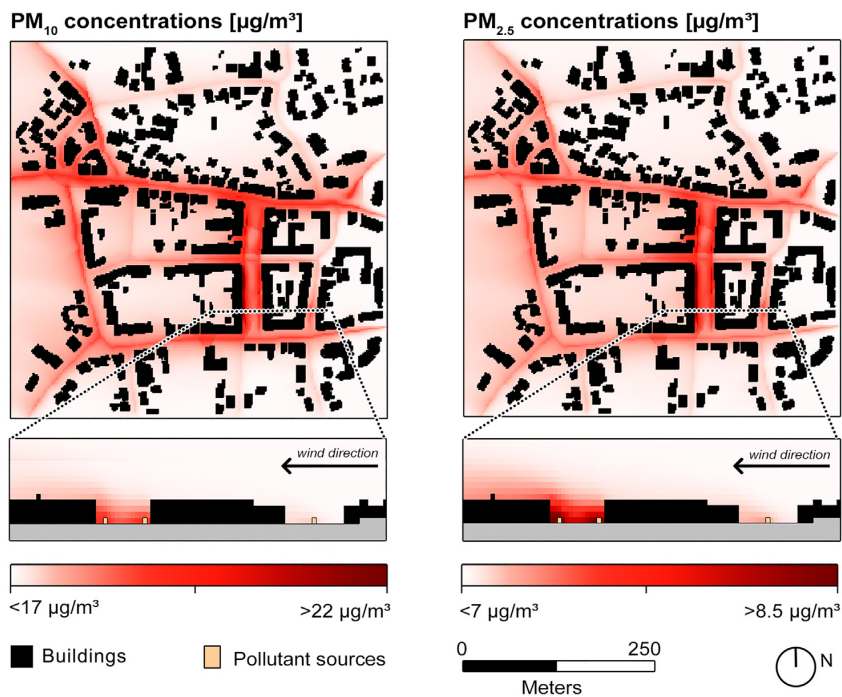


Fig. 7. Comparison of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations in the study area on 3:00 pm with transverse section for the street canyon “In der Meile”.

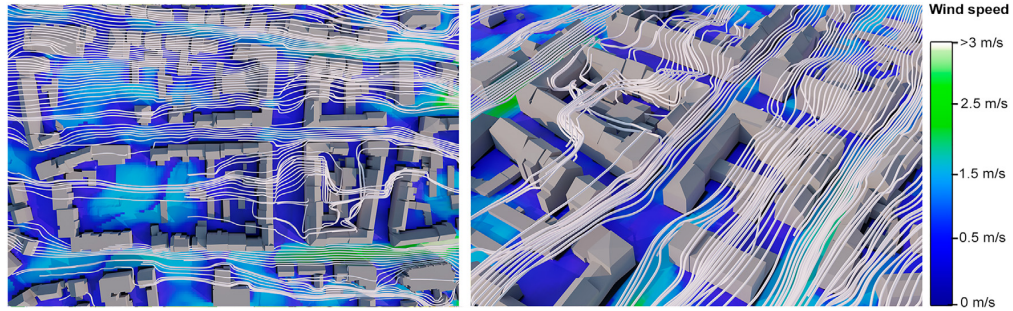


Fig. 8. 3D illustration of modeled wind vectors (white tubes) up to 15 m and wind speed at a height of 1.5 m in the inner core of the study area on 3:00 pm (wind coming from east).

“Martener Straße” is designed as a single one-way street, the significant  $PM_{2.5}$  peak at 09:00 am ( $45.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) is not re-occurring in the afternoon hours like “In der Meile”, where two one-way streets are divided by a tree avenue (Fig. 9 C, D). This phenomenon could justify why measured  $PM_{10}$  values were mostly constantly higher at “In der Meile” throughout the field survey. More sophisticated traffic counts over an extended period could reveal potential interdependencies, especially when considering commuter traffics.

However, the ENVI-met model considerably underpredicted observed  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations at both measurement sites, a characteristic which can be evidenced by the findings of Paas and Schneider about ENVI-met particle dispersion performance (Paas and Schneider, 2016). While only the total amount of vehicles per day can be adjusted in the traffic tools in ENVI-met, the hourly traffic flow is

relatively stable and cannot be changed, which, in the end, leads to little fluctuations in modeled  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations over time. As a result, for one-way roads at urban fringes with significant commuter traffic in the morning and afternoon hours, peaks in traffic flow cannot be appropriately modeled. The strong western drift of particulate matter concentrations also indicates that ENVI-met wind turbulence calculations are primarily affected by wind vectors, meaning that wind speed and wind direction conditions play another critical role in predicting particulate matter dispersion. Perry et al. argue that wind direction uncertainties in the simulation can also cause distorted modeling results, although it may be well-performing otherwise (Perry et al., 2005). In the simple forcing mode used in this study, wind speed and direction boundary settings are constant throughout the simulation, while the full forcing mode enables hourly changes with a considerable increase

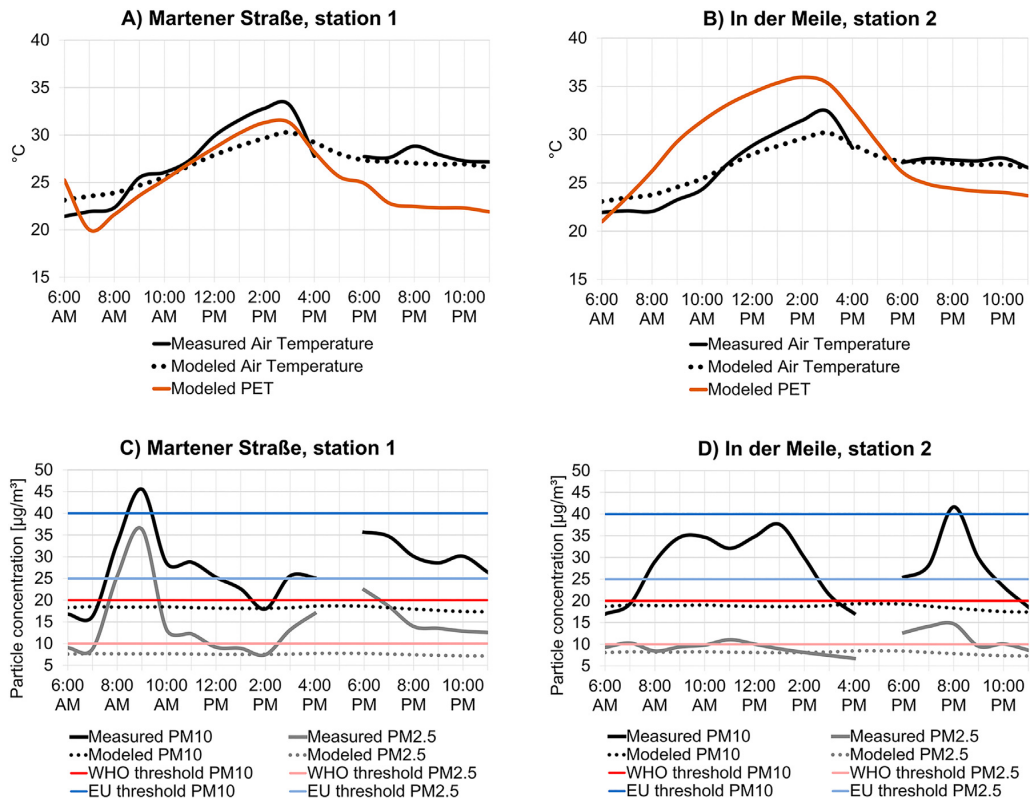


Fig. 9. Comparison of modeled and measured air temperatures,  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations over time on August 11th 2020, considering different particulate matter thresholds (yearly means) (European Parliament, Council of European Union, 2008; World Health Organization (WHO), 2006).

**Table 5**  
Relative frequencies of the questionnaire survey responds (n = 42).

| Variable           | Value                 | Percentage    | Variable               | Value              | Percentage |
|--------------------|-----------------------|---------------|------------------------|--------------------|------------|
| Gender             | Male                  | 52.4          | Overall Comfort        | Very uncomfortable | 4.8        |
|                    | Female                | 47.6          |                        | Uncomfortable      | 11.9       |
| Age (years)        | <18                   | 11.9          |                        | Neutral            | 35.7       |
|                    | 18–30                 | 33.3          |                        | Comfortable        | 31.0       |
|                    | 31–50                 | 26.2          | Very comfortable       | 16.7               |            |
|                    | 51–70                 | 26.2          | Thermal comfort        | Cold               | 0.0        |
|                    | 71–80                 | 2.4           |                        | Cool               | 2.4        |
| >80                | 0.0                   | Slightly cool |                        | 4.8                |            |
| Activity           | Sitting               | 24.4          | Comfortable            | 14.3               |            |
|                    | Walking               | 75.6          | Slightly warm          | 21.4               |            |
| Place of residence | Living in Marten      | 66.7          | Warm                   | 23.8               |            |
|                    | Working in Marten     | 9.5           | Hot                    | 33.3               |            |
|                    | Neither               | 23.8          | Air Quality Perception | Very dusty         | 9.5        |
| Frequency          | First time            | 4.8           |                        | Slightly dusty     | 33.3       |
|                    | Occasionally          | 7.1           |                        | Neutral            | 35.7       |
|                    | Several times a month | 2.4           |                        | Slightly clean     | 21.4       |
|                    | Once a week           | 9.5           |                        | Very clean         | 0.0        |
|                    | Several times a week  | 4.8           |                        |                    |            |
|                    | daily                 | 71.4          |                        |                    |            |

in computation time. To date, it remains unclear if this option guarantees more accurate results (Crank et al., 2020). Moreover, since the presented simulation only considers line-based automobile exhaust, other potential emitters like adjacent industrial sites, whirling dust from road surfaces, or the eastern highway A 45 outside of the study area remain neglected by the model. Increasing the emission factors of each vehicle type while decreasing the wind speed may contribute to match the measured particulate matter concentrations. However, this operation would lead to a biased modeling output, not representing the reality's emission factors and wind speeds. Apart from the underestimated concentration values, the actual spatial dispersion of particulate matter could be investigated and unveiled potential hotspots in the study area. This is primarily important for urban planners and architects when deciding to allocate new trees and buildings for shading purposes and improve particulate matter reduction properly.

When comparing measured and modeled air temperatures, the values reached high correlations of 0.95 in station one and 0.99 in station two. The lower correlation value for station one can be explained by the temporary sunset temperature increase at 8:00 pm during the survey, which was not reproduced by the ENVI-met modeler (Fig. 9, A). On average, measured and modeled air temperatures differ by 2.7 °C at station one and 2.6 °C at station two, which is an improvement compared to previous air temperature modelings in ENVI-met (Wang and Akbari, 2016a). Thus, overall, ENVI-met was able to somewhat recreate the local air temperature of the study area. However, inherent limitations on the estimation of heat fluxes still led to certain deviations over time, while larger regional effects on air temperatures are also excluded by the model (Sharmin et al., 2017).

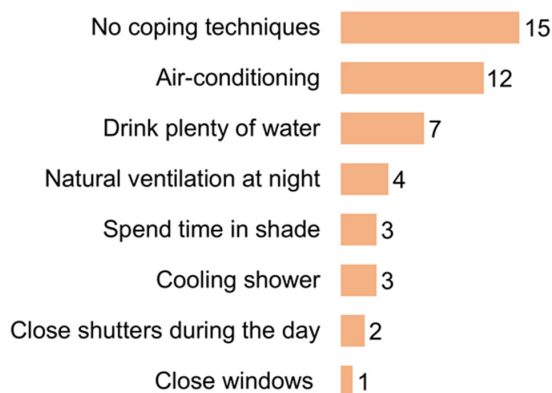
### 3.3. Comparison of predicted and subjective thermal sensation and air quality

Table 5 provides the relative frequencies of the questionnaire survey responds (n = 42). Most interviewees (66.2%) live in Dortmund Marten and frequent the points of measurements daily (71.4%), which shows that they are somewhat familiar with those places and their climatic characteristics.

Although 15 interviewees (36%) stated that they do not take any coping techniques against heat stress (Fig. 10), a clear trend towards warm and hot thermal perception (57.1%) existed during the field survey (Fig. 11 C, E). With this in mind, it would be meaningful to find

out whether those people do not need, cannot take, or do not know about relevant coping strategies during extreme heat. It should be noted that the rather small sampling size may imply a bias towards heat-resistant pedestrians or general toleration of hot temperatures during summer, especially when regarding the low number of responses of the elderly and young people as a vulnerable group (Fig. 11, A). Contrary to the subjective perception of air temperature, most interviewees did not vote towards very dusty air quality and overall on-site comfortability in parallel, although factual air pollution measurements often exceeded international thresholds during the field survey (Figs. 11, 9 C, D). Such perceptions may either result from habituation, difficulties in interpretation, or that interviewees intuitively thought of specific air conditions from the past instead of the present situation. Future studies should examine this subject in more detail to understand possible cause-effect relationships.

We also examined the thermal perception over time, as with increasing air temperatures during the day, the subjective perception changes in parallel. The hourly modeling output made it possible to divide our PET results (Fig. 9 A, B) into three time classes, namely morning (06:00–11:00 am), midday (12:00–5:00 pm) and evening (06:00–11:00 pm). At this point, we used the PET thresholds in °C and corresponding thermal perception classes of Table 2 for the ENVI-met



**Fig. 10.** Absolute count of behavior coping techniques against heat stress by the interviewees (multiple answers possible).

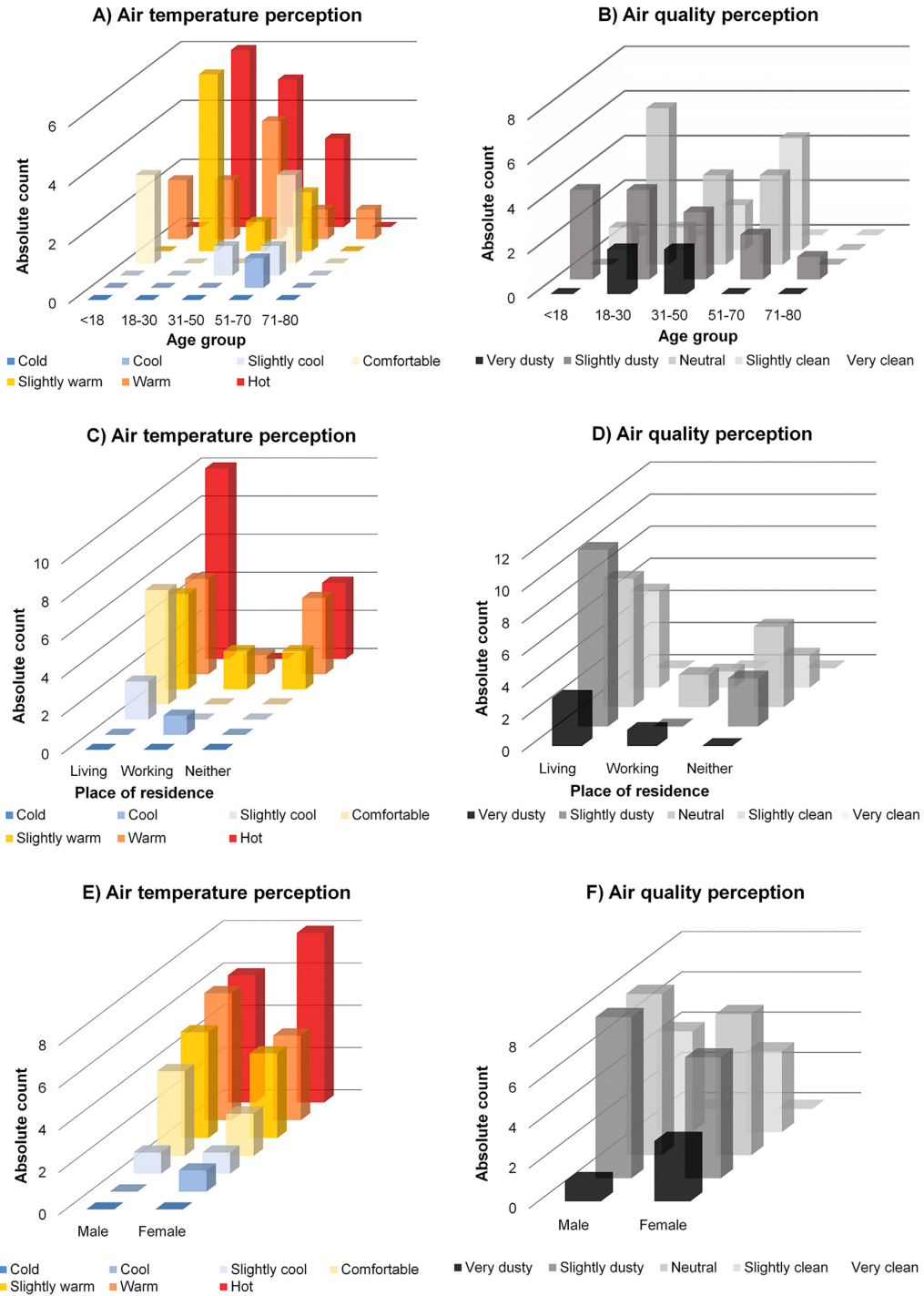


Fig. 11. Comparison between thermal sensation and air quality votes by all interviewees (n = 42) on August 11th 2020, considering age groups, place of residence and sex.

output assignments. In doing so, we calculated relative frequencies of the questionnaire responses and the hourly modeling output separately for each of the three time classes (Fig. 12) (Roshan et al., 2018). Compared to the modeling results, it becomes clear that the participants at the “Martener Straße” perceived more thermal discomfort throughout the day, which may be due to the lack of shady objects at this particular

street canyon (Fig. 6). Furthermore, particulate matter concentrations were considerably high in the morning hours at “Martener Straße”, which also can influence the subjective thermal comfort experience (Fig. 9, C) (Pantavou et al., 2017). Conversely, interviewees at “In der Meile” perceived less thermal discomfort in the morning and midday hours than assumed by the model. Accordingly, the tree arrangement

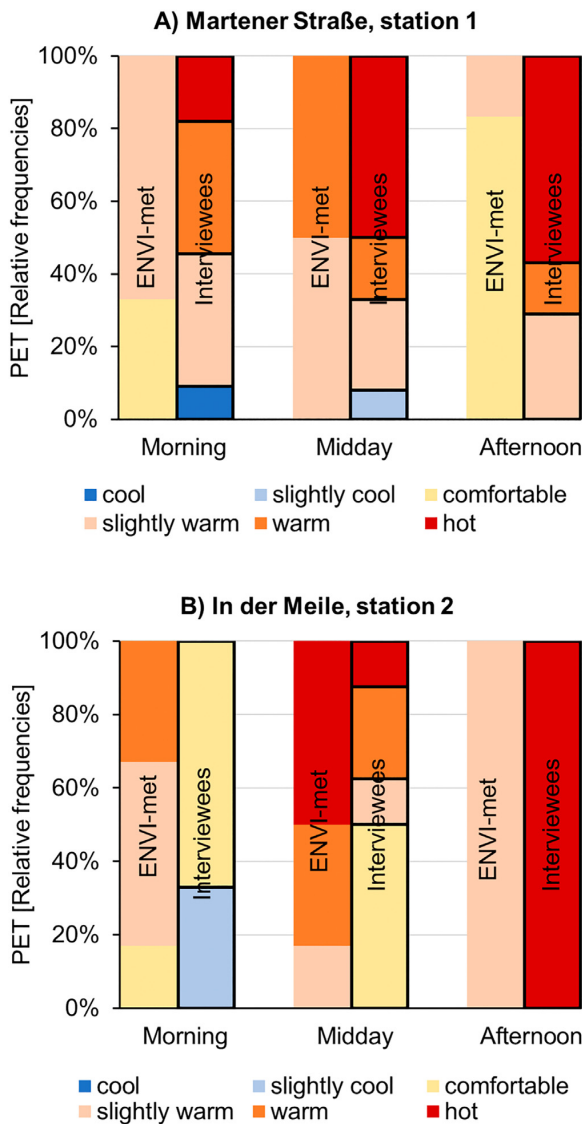


Fig. 12. Relative frequencies and temporal variations of the PET modeling output 1.5 m above ground (no outline) and corresponding PET ratings by the interviewees (black outline) at both measurement sites on August 11th 2020.

at “In der Meile” could make a more significant cooling contribution than predicted, while wind speed seemed not to be the driving factor for thermal comfort/discomfort of the interviewees (due to the building structure and wind direction, wind speeds are significantly lower at “In der Meile” than at “Martener Straße” (Fig. 8)).

However, as we used standardized physiological variables under summer conditions for modeling PET, the predictions may not fit every characteristic of the interviewees. Furthermore, the parameters used for PET calculation (see Section 2.2.2) could also be extended by additional psychological, physiological, and environmental variables (e.g., air pollution and health status) in the future to model human thermal comfort more realistically in urban environments. Finally, additional platforms like online surveys that also capture daily habits and individual health problems may be used for further data collection (Hatvani-Kovacs et al., 2016).

#### 4. Conclusions and outlook

This study analyzed real-world pedestrian perceptions and remote sensing-based urban microclimate modelings to assess local heat stress and air pollution dispersion for a hot summer day in the case study neighborhood Dortmund Marten. In conclusion, our findings are threefold:

First, our data-driven approach pointed out the capabilities of open geodata and remote sensing techniques for the semi-automatic generation of microscale input parameters in ENVI-met. The clear advantage here is the cost- and time-effectiveness of computer-based feature extractions in contrast to manual editings of large study areas. Roof materials and corresponding surface albedos, elevation information, building heights, and vegetated areas were implemented using freely available geodata in NRW. With an  $O_A$  of 89.09% and a kappa coefficient of 0.88, the accuracy assessment revealed reasonable classification results for the study area. Nevertheless, it is important not only to enrich the quantity and availability of open geodata but also to improve its quality (e.g., comprehensive metadata and spectral information) to further increase the accuracy of derived remote sensing products. Future studies should also examine the seasonal and spatial albedo variations from remotely sensed platforms on the microclimate modeling, especially in heterogeneous urban environments.

Second, the empirical findings of the conducted questionnaire survey allowed the first insight into pedestrians’ outdoor thermal comfort and perceived air quality in Dortmund Marten. Overall, more than half of the interviewees perceived air temperatures as either warm or hot, while air quality votes mostly ranged between neutral and slightly dusty. Simulated PET values were either slightly under- or overestimated, depending on the time of the day and the measurement site: Although the simulated PET values and measured particulate matter concentrations were constantly high at the station “In der Meile”, most interviewees voted for lower thermal discomfort during morning and midday hours. Only in the afternoon hours, thermal sensations of the interviewees at both stations were significantly hotter than predicted PET values. Here, planning practitioners need to focus on new design ideas for well-aerated and heat resilient neighborhoods during day- and nighttime, while also being in accordance with the citizens’ perceptions. In this context, advanced visualization tools like virtual reality (VR) and gamification should be tested in future studies to communicate the analyzed microclimatic dynamics to the general public. Especially those citizens that are living in Dortmund Marten and showed less sensation for atmospheric pollution may increase risk awareness when being vividly confronted with invisible stressors. Obviously, as a result of a one-day on-site study, the participant sample ( $n = 42$ ) is undersized for drawing general conclusions and precise relationships between, e.g., air pollution perception and thermal comfort. This limitation is probably rooted in the extreme heat during the field survey and the COVID-19-pandemic, leading to a decreased time people spend outdoors. Under those circumstances, the participant sample is yet satisfactory.

Third, the study confirmed air pollution prediction issues of the ENVI-met model postulated in the relevant literature through comprehensive on-site measurements. While air temperature modelings revealed acceptable outcomes, simulated particulate matter concentrations were underestimated by ENVI-met. Thus, the relevance for validating predictive modelings with field data to formulate sufficient and evidence-based conclusions could be emphasized. Nevertheless, necessary improvements on the performance of particulate matter concentration prediction warrant further research on this topic.

Finally, we have demonstrated the creation and application of microclimatic modelings while showing that urban neighborhoods can be affected by multiple environmental stressors at the same time. In this light, the presented results underline the complexity of outdoor thermal comfort and air quality perception, influenced by the natural and built environment, psychological adaptation, and physiological



acclimatization. Compared to other studies that exclusively focus on one environmental stressor, the parallel consideration of air pollution and heat stress in this work is a clear advantage and valuable for new bioclimatic design choices in urban street canyons. In an era of ongoing transformation processes that cities are facing worldwide, this study sustained the relevance of cross-disciplinary analyses, public involvement, and open data policy to make cities not hotter but safer places to live.

### CRedit authorship contribution statement

**Mathias Schaefer:** Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing, Visualization. **Haniyeh Ebrahimi Salari:** Conceptualization, Investigation. **Heike Köckler:** Conceptualization, Supervision. **Nguyen Xuan Thinh:** Resources, Supervision.

### Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

### Acknowledgments

This work is part of the interdisciplinary research project “Zukunft-Stadt-Region-Ruhr” (English: “Future-City-Region-Ruhr”, ZUKUR), aiming to find urban planning solutions to reduce social-ecological inequalities and to increase climate resilience in regions, cities, and urban neighborhoods. We would like to express our gratitude to the anonymous reviewers that helped to improve the manuscript.

### Funding

This work was supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF) [grant number 01LR1721A].

### References

- Abhijith, K.V., Kumar, P., Gallagher, J., McNabola, A., Baldauf, R., Pilla, F., et al., 2017. Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – a review. *Atmos. Environ.* 162, 71–86.
- Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H., 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Sol. Energy* 70 (3), 295–310.
- Alchapar, N.L., Correa, E.N., 2016. The use of reflective materials as a strategy for urban cooling in an arid “OASIS” city. *Sustain. Cities Soc.* 27, 1–14.
- Ali-Toudert, F., Mayer, H., 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Build. Environ.* 41 (2), 94–108.
- Bartasaghi Koc, C., Osmond, P., Peters, A., 2018. Evaluating the cooling effects of green infrastructure: a systematic review of methods, indicators and data sources. *Sol. Energy* 166, 486–508.
- Bezirksregierung Arnsberg, 2011. Luftreinhalteplan Ruhrgebiet 2011, Teilplan Ost. [https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/luftreinhalteplanung/aktionsplaene/lrp\\_ruhrgebiet\\_ost/lrp\\_ruhr\\_ost.pdf](https://www.bezreg-arnsberg.nrw.de/themen/luftreinhalteplanung/aktionsplaene/lrp_ruhrgebiet_ost/lrp_ruhr_ost.pdf). (Accessed 8 October 2020).
- Bezirksregierung Arnsberg, 2020. Lokale Ergänzung 2020 für die Stadt Dortmund zum Luftreinhalteplan Ruhrgebiet 2011 Teilplan Ost. [https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads\\_umweltamt/luftreinhaltung/Lokale\\_Ergaenzung\\_DO\\_LRP\\_Entwurfassung\\_fuer\\_Bekanntmachung\\_und\\_Auslegung.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads_umweltamt/luftreinhaltung/Lokale_Ergaenzung_DO_LRP_Entwurfassung_fuer_Bekanntmachung_und_Auslegung.pdf). (Accessed 12 October 2020).
- Bruse, M., Fleer, H., 1998. Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ. Model. Softw.* 13 (3–4), 373–384.
- Caffier, A., Elsner, C., Rath, C., Robens, F., Seidel, J., Will, K., 2017. Offene Geobasisdaten für NRW. *Z. Geod. Geoinform. Landmanag.* 142 (3), 133–145.
- Cao, C., Lee, X., Muhlhausen, J., Bonneau, L., Xu, J., 2018. Measuring landscape albedo using unmanned aerial vehicles. *Remote Sens.* 10 (11), 1812.
- Chatzinkolou, E., Chalkias, C., Dimopoulou, E., 2018. Urban microclimate improvement using ENVI-met climate model. *Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens. Spat. Inf. Sci. XLII-4*, 69–76.
- Clarke, J., 2001. *Energy Simulation in Building Design*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Cohen, P., Potchter, O., Matzarakis, A., 2013. Human thermal perception of Coastal Mediterranean outdoor urban environments. *Appl. Geogr.* 37, 1–10.
- Congalton, R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37 (1), 35–46.
- Crank, P.J., Middel, A., Wagner, M., Hoots, D., Smith, M., Brazel, A., 2020. Validation of seasonal mean radiant temperature simulations in hot arid urban climates. *Sci. Total Environ.* 141392, 749.
- Degerickx, J., Roberts, D.A., Somers, B., 2019. Enhancing the performance of Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) for urban land cover mapping using airborne lidar data and band selection. *Remote Sens. Environ.* 221, 260–273.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2020. Monatlicher Klimastatus Deutschland August 2020. [www.dwd.de/klimastatus](http://www.dwd.de/klimastatus) (accessed May 20, 2021).
- Di Sabatino, S., Barbano, F., Brattich, E., Pulvirenti, B., 2020. The multiple-scale nature of urban heat island and its footprint on air quality in real urban environment. *Atmosphere* 11 (11), 1186.
- European Environment Agency (EEA), 2019. EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- European Parliament, Council of European Union, 2008. Directive 2008/50/EC on Ambient Air Quality and Cleaner Air for Europe.
- Fan, H., Zipf, A., 2016. Modelling the world in 3D from VGI/Crowdsourced data. In: Capineri, C., Haklay, M., Huang, H., Antoniou, V., Kettunen, J., Ostermann, F., Purves, R. (Eds.), *European Handbook of Crowdsourced Geographic Information*. Ubiquity Press, London, pp. 435–446.
- Fanger, P.O., 1970. *Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill, New York.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., et al., 2007. The shuttle radar topography mission. *Rev. Geophys.* 45 (2), 1485.
- Feizizadeh, B., Blaschke, T., 2013. Examining urban heat island relations to land use and air pollution: multiple endmember spectral mixture analysis for thermal remote sensing. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 6 (3), 1749–1756.
- Flacke, J., Schüle, S.A., Köckler, H., Bolte, G., 2016. Mapping environmental inequalities relevant for health for informing urban planning interventions—a case study in the City of Dortmund, Germany. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13 (7).
- Founda, D., Santamouris, M., 2017. Synergies between urban heat island and heat waves in Athens (Greece), during an extremely hot summer (2012). *Sci. Rep.* 7 (1), 10973.
- Garnett, R., Adams, M., 2018. LiDAR—a technology to assist with smart cities and climate change resilience: a case study in an urban Metropolis. *IJGI* 7 (5), 161.
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., et al., 2017. Copernicus sentinel-2A calibration and products validation status. *Remote Sens.* 9 (6), 584.
- Greiving, S., Lindner, C., 2011. Assessment of flash flood risk in a continuous urban fabric by the example of the City of Dortmund. In: Zenz, G., Hornich, R. (Eds.), *Urban Flood Risk Management – Approaches to Enhance Resilience of Communities*. Verlag der Technischen Universität Graz, pp. 257–262.
- Hatvani-Kovacs, G., Belusko, M., Skinner, N., Pockett, J., Boland, J., 2016. Heat stress risk and resilience in the urban environment. *Sustain. Cities Soc.* 26, 278–288.
- He, B.-J., Ding, L., Prasad, D., 2020a. Relationships among local-scale urban morphology, urban ventilation, urban heat island and outdoor thermal comfort under sea breeze influence. *Sustain. Cities Soc.* 60, 102289.
- He, B.-J., Ding, L., Prasad, D., 2020b. Wind-sensitive urban planning and design: precinct ventilation performance and its potential for local warming mitigation in an open midrise gridiron precinct. *J. Build. Eng.* 29, 101145.
- He, B.-J., Wang, J., Liu, H., Ulpiani, G., 2021. Localized synergies between heat waves and urban heat islands: implications on human thermal comfort and urban heat management. *Environ. Res.* 193, 110584.
- Heiden, U., Roessner, S., Segl, K., Kaufmann, H., 2001. Analysis of spectral signatures of urban surfaces for their identification using hyperspectral HyMap data. *IEEE/ISPRS Joint Workshop on Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas (Cat. No.01EX482)*; 8–9 Nov. 2001. IEEE, Rome, Italy.
- Heldens, W., Heiden, U., Esch, T., Mueller, A., Dech, S., 2017. Integration of remote sensing based surface information into a three-dimensional microclimate model. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 125, 106–124.
- Heldens, W., Burmeister, C., Kanani-Sühring, F., Maronga, B., Pavlik, D., Sühring, M., et al., 2020. Geospatial Input Data for the PALM Model System 6.0: Model Requirements, Data Sources, and Processing.
- Howard, L., 1820. *The Climate of London: Deduced From Meteorological Observations, Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis*. 2nd ed. Piccadilly.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J.P., Wang, Y., Shao, G., 2021a. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *J. For. Res.* 32 (1), 1–6.
- Huang, Y., Lei, C., Liu, C.-H., Perez, P., Forehead, H., Kong, S., et al., 2021b. A review of strategies for mitigating roadside air pollution in urban street canyons. *Environ. Pollut. (Barking, Essex 1987)* 116971, 280.
- Im, J., Jensen, J.R., Tullis, J.A., 2008. Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. *Int. J. Remote Sens.* 29 (2), 399–423.
- Karl, T.R., Easterling, D.R., 1999. Climate extremes: selected review and future research directions. *Clim. Chang.* 42 (1), 309–325.
- Keith, L., Meerow, S., Wagner, T., 2020. Planning for extreme heat: a review. *J. Extreme Events* 6 (2), 1–27.
- Koch, F., Bilke, L., Helbig, C., Schlink, U., 2018. Compact or cool? The impact of brownfield redevelopment on inner-city micro climate. *Sustain. Cities Soc.* 38, 31–41.
- Kotthaus, S., Smith, T.E., Wooster, M.J., Grimmond, C., 2014. Derivation of an urban materials spectral library through emittance and reflectance spectroscopy. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 94, 194–212.
- Li, Z., Erb, A., Sun, Q., Liu, Y., Shuai, Y., Wang, Z., et al., 2018. Preliminary assessment of 20-m surface albedo retrievals from sentinel-2A surface reflectance and MODIS/VIIRS surface anisotropy measures. *Remote Sens. Environ.* 217, 352–365.

- Liu, J., Shen, J., Zhao, R., Xu, S., 2013. Extraction of individual tree crowns from airborne LiDAR data in human settlements. *Math. Comput. Model.* 58 (3–4), 524–535.
- Lüftner, H., 1996. *Das Regionalklima im Ruhrgebiet: Entwicklung, Analyse und Darstellungsmöglichkeiten des Klimas in einem urban-industriellen Verdichtungsraum*. Lang, Frankfurt am Main, Berlin, Bern, New York, Paris, Wien.
- Matzarakis, A., Amelung, B., 2008. Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In: Thomson, M.C., Garcia-Herrera, R., Beniston, M. (Eds.), *Seasonal Forecasts, Climatic Change and Human Health*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 161–172.
- Montazeri, H., Toparlar, Y., Blocken, B., Hensen, J., 2017. Simulating the cooling effects of water spray systems in urban landscapes: a computational fluid dynamics study in Rotterdam, The Netherlands. *Landsc. Urban Plan.* 159, 85–100.
- Myint, S.W., Gober, P., Brazel, A., Grossman-Clarke, S., Weng, Q., 2011. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. *Remote Sens. Environ.* 115 (5), 1145–1161.
- Nikolopoulou, M., Kleissl, J., Linden, P.F., Lykoudis, S., 2011. Pedestrians' perception of environmental stimuli through field surveys: focus on particulate pollution. *Sci. Total Environ.* 409 (13), 2493–2502.
- Oshio, H., Asawa, T., Hoyano, A., Miyasaka, S., 2015. Estimation of the leaf area density distribution of individual trees using high-resolution and multi-return airborne LiDAR data. *Remote Sens. Environ.* 166, 116–125.
- Paas, B., Schneider, C., 2016. A comparison of model performance between ENVI-met and Austal2000 for particulate matter. *Atmos. Environ.* 145, 392–404.
- Paas, B., Schmidt, T., Markova, S., Maras, I., Ziefle, M., Schneider, C., 2016. Small-scale variability of particulate matter and perception of air quality in an inner-city recreational area in Aachen, Germany. *Meteorol. Z.* 25 (3), 305–317.
- Pantavou, K., Lykoudis, S., Psiloglou, B., 2017. Air quality perception of pedestrians in an urban outdoor Mediterranean environment: a field survey approach. *Sci. Total Environ.* 574, 663–670.
- Perini, K., Chokhachian, A., Dong, S., Auer, T., 2017. Modeling and simulating urban outdoor comfort: coupling ENVI-Met and TRNSYS by grasshopper. *Energy Build.* 152, 373–384.
- Perry, S.G., Cimarelli, A.J., Paine, R.J., Brode, R.W., Weil, J.C., Venkatram, A., et al., 2005. AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. Part II: model performance against 17 field study databases. *J. Appl. Meteorol.* 44 (5), 694–708.
- Regionalverband Ruhr (RVR), Referat Geoinformation und Raumbeobachtung, 2019. *Klimaanalyse Stadt Dortmund*. [https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads\\_umweltamt/klimafolgenanpassung/Klimaanalyse\\_Stadt\\_Dortmund\\_Oktober-2019\\_WEB.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads_umweltamt/klimafolgenanpassung/Klimaanalyse_Stadt_Dortmund_Oktober-2019_WEB.pdf) accessed May 23, 2021.
- Robine, J.-M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.-P., et al., 2008. Death toll exceeded 70,000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biol.* 331 (2), 171–178.
- Rohat, G., Flacke, J., Dosio, A., Pedde, S., Dao, H., van Maarseveen, M., 2019. Influence of changes in socioeconomic and climatic conditions on future heat-related health challenges in Europe. *Glob. Planet. Chang.* 172, 45–59.
- Roshan, G., Yousefi, R., Kovács, A., Matzarakis, A., 2018. A comprehensive analysis of physiologically equivalent temperature changes of Iranian selected stations for the last half century. *Theor. Appl. Climatol.* 131 (1–2), 19–41.
- Salata, F., Golasi, I., de Lieto Vollaro, R., de Lieto Vollaro, A., 2016. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. *Sustain. Cities Soc.* 26, 318–343.
- Schaefer, M., Thinh, N.X., Greiving, S., 2020. How can climate resilience be measured and visualized? Assessing a vague concept using GIS-based fuzzy logic. *Sustainability* 12 (2), 635.
- Shareef, S., Abu-Hijleh, B., 2020. The effect of building height diversity on outdoor microclimate conditions in hot climate. A case study of Dubai-UAE. *Urban Clim.* 32, 100611.
- Sharmin, T., Steemers, K., Matzarakis, A., 2017. Microclimatic modelling in assessing the impact of urban geometry on urban thermal environment. *Sustain. Cities Soc.* 34, 293–308.
- Shrestha, R., Flacke, J., Martinez, J., van Maarseveen, M., 2016. Environmental health related socio-spatial inequalities: identifying “hotspots” of environmental burdens and social vulnerability. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 13 (7).
- Smith, M.D., 2011. The ecological role of climate extremes: current understanding and future prospects. *J. Ecol.* 99 (3), 651–655.
- Stadt Dortmund, 2019. *Statistikatlas: Dortmund Statistik 2019*. [https://www.dortmund.de/media/p/statistik/pdf\\_statistik/veroeffentlichungen/statistikatlas/215\\_-\\_Statistikatlas\\_-\\_2019.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/statistik/pdf_statistik/veroeffentlichungen/statistikatlas/215_-_Statistikatlas_-_2019.pdf). (Accessed 26 June 2020).
- Stadt Dortmund, Vermessungs- und Katasteramt, 2020. *Baumkataster*. [https://geoweb1.digistadt.de/doris\\_gdi/mapapps/resources/apps/Umwelt\\_und\\_Klima/index.html?lang=de&preview=true&center=390874.2672918561%2C5707792.577399263%2C25832&scale=72646.67537081605&layers=%2B%3ABaumkataster\\_1589275047518&lod=0](https://geoweb1.digistadt.de/doris_gdi/mapapps/resources/apps/Umwelt_und_Klima/index.html?lang=de&preview=true&center=390874.2672918561%2C5707792.577399263%2C25832&scale=72646.67537081605&layers=%2B%3ABaumkataster_1589275047518&lod=0) (accessed October 28, 2020).
- Tsoka, S., 2017. Investigating the relationship between urban spaces morphology and local microclimate: a study for Thessaloniki. *Procedia Environ. Sci.* 38, 674–681.
- Tsoka, S., Tsikaloudaki, A., Theodosiou, T., 2018. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—a review. *Sustain. Cities Soc.* 43, 55–76.
- United Nations, 2015. *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>.
- Walther, E., Goetschel, Q., 2018. The P.E.T. comfort index: questioning the model. *Build. Environ.* 137, 1–10.
- Wang, Y., Akbari, H., 2016a. Analysis of urban heat island phenomenon and mitigation solutions evaluation for Montreal. *Sustain. Cities Soc.* 26, 438–446.
- Wang, Y., Akbari, H., 2016b. The effects of street tree planting on urban heat island mitigation in Montreal. *Sustain. Cities Soc.* 27, 122–128.
- Wieringa, J., 1992. Updating the Davenport roughness classification. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 41 (1–3), 357–368.
- World Health Organization (WHO), 2006. *Air Quality Guidelines: Global Update 2005*. World Health Organization, Copenhagen.
- Zhao, L., Oppenheimer, M., Zhu, Q., Baldwin, J.W., Ebi, K.L., Bou-Zeid, E., et al., 2018. Interactions between urban heat islands and heat waves. *Environ. Res. Lett.* 13 (3), 34003.

## Artikel 3: Eckdaten und Autorenbeiträge

|                 |  |
|-----------------|--|
| <b>Referenz</b> | Schaefer, M. (2022). Between vision and action: the predicted effects of co-designed green infrastructure solutions on environmental burdens. <i>Urban Ecosystems</i> , 25(6):1805–1824                                  |
| <b>Beiträge</b> | <b>M.S.:</b> Literaturlauswertung, methodisches Design, Modellierung, Simulation und Analyse, Validierung, Umfragedesign, Workshop-Vorbereitung, Visualisierung der Ergebnisse, vollständige Erarbeitung des Manuskripts |
| <b>Historie</b> | Eingereicht: 11. Februar 2022<br>Akzeptiert: 08. Juli 2022<br>Veröffentlicht: 09. August 2022  |

Als *Open Access* unter der [Creative Commons \(CC-BY\) 4.0 Lizenz](#) veröffentlicht.



# Between vision and action: the predicted effects of co-designed green infrastructure solutions on environmental burdens

Mathias Schaefer<sup>1</sup>

Accepted: 8 July 2022 / Published online: 9 August 2022  
© The Author(s) 2022

## Abstract

Green Infrastructure (GI) is gaining wide recognition in cooperative research projects seeking to find solutions for climate adaptation in urbanized areas. However, the potential effects of co-produced GI plans and the underlying preparation process are rarely evaluated. To bridge this gap, the aim of this article is to examine what works in addressing environmental burdens in the urban neighborhood of Dortmund Marten, Germany. As part of a larger transdisciplinary process, selective GI measures were delineated in the case study area through a cooperative workshop between scientists and urban planners. Workshop ideas were incorporated into a mitigative scenario considering a hot summer day to quantify the effects of the derived GI measures on thermal comfort and particulate matter dispersion ( $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ). To evaluate the experiences of the science-practice collaboration, the viewpoints of researchers and urban planners on learning effects, knowledge integration, and GI planning were summarized and compared via an online survey. The results indicate that the proposed GI measures could reduce physiological equivalent temperature (PET) by 25 °C. At the same time, additional roadside trees could increase  $PM_{10}$  concentrations by up to 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  due to wind blocking effects. Reflections on the science-practice workshop show that learning effects were higher for the participating researchers than for planning practitioners, while the integration of individual expertise during the workshop was more difficult for academics. These findings point to the importance of continuous reflections on individual understandings in cooperating stakeholder groups and the value of the evaluation of outcomes in transdisciplinary GI planning.

**Keywords** Urban planning · Transdisciplinarity · Heat · Air pollution · Numerical simulation

## Introduction

Cities are in a state of permanent change, shaped by past design decisions influencing today's microclimate and social well-being. Urbanized areas in particular are confronted with more hazardous effects than those faced by their rural surroundings; in cities, air and noise pollution originating from a variety of emitters often accumulate, while urban heat islands (UHIs) are intensifying through dense building structures and climate change. Many cities worldwide are setting goals to achieve change, paving the way for the greater vision of sustainability (United Nations 2015). A prerequisite for this transformation is that cities

act in a resilient manner, which means to exhibit robustness to climate extremes and establish a transformative capacity to anticipate future challenges (Folke et al. 2010). At the same time, it is assumed that heat-related health risks will increase with ongoing climate change and urbanization rates (IPCC 2021). In fact, notable correlations between vulnerable neighborhoods and exposure to multiple hazards have been observed more frequently, leading to an uneven distribution of environmental burdens and disadvantaged social groups (Pagliacci and Russo 2020). Thus, considering the need for transformative and resilient cities as a whole, it is vital to strengthen disadvantaged areas against environmental burdens.

Green Infrastructure (GI), a strategy with great appeal among academics and planning practitioners, is becoming increasingly prominent as a nature-based solution to minimize the adverse effects of existing climate conditions in cities and regions (Hoover et al. 2021; Meerow et al. 2021). Among the numerous definitions of GI (Shao et al.

✉ Mathias Schaefer  
mathias.schaefer@tu-dortmund.de

<sup>1</sup> Research Group of Spatial Information Management and Modelling (RIM), TU Dortmund University, 44227 Dortmund, Germany

2021), there exists a growing interest in relevant politics, implementation, and trade-offs (Meerow 2020). Similar to man-made gray infrastructure, GI as an interconnected system should serve specific needs of people, a contrast to conventional, isolated green space planning (Benedict and McMahon 2006).

Within the urban context, a key justification for promoting GI is the attribution and maximization of multiple functionalities for society, ecology, and local climate to increase the efficiency of limited available space (Demuzere et al. 2014; Hansen and Pauleit 2014; Meerow 2020). This multifunctionality of GI can be categorized by urban planners in two ways: first, the capital concept (maximizing the public quality of life) and, second, the risk-based concept (minimizing environmental threats) (Matthews et al. 2015). For instance, risk-based benefits associated with GI comprise stormwater infiltration, air pollution reduction (Abhijith et al. 2017), or cooling functions in UHIs (Koc et al. 2018). The capital concept, however, seeks to promote public well-being, e.g., providing access to open spaces for obesity reduction (Coombes et al. 2010), building coping capacities by supporting people's ability to grow their own food (Barthel et al. 2010), or providing recreational facilities for stress reduction (Mansor et al. 2012).

Based on both concepts, GI can directly impact the vulnerability of an urban system and is thus widely interpreted as a resilience-strengthening measure (Liu et al. 2020). Taking into account the conceptualization of GI measures, collaboration among scientists, residents, and city administration constitutes a vital approach to socio-ecological problems, e.g., insufficient access to green and open spaces or air pollution due to nearby road traffic. Here, local planning departments occur at the intersection of research and society that need to translate scientific findings on complex environmental topics into policy decisions (Home and Bauer 2021). However, in reality, research is often perceived as existing in a theoretical bubble, detached from everyday life experiences, while municipalities tend to suffer from dependencies on conventional structures in the planning process (Puntub et al. 2022). Through the high discursive potential of GI, science and planning practice can share context-specific knowledge and benefit from each other to find tangible solutions for successful urban transformations. This collaboration, meanwhile termed 'ecology with cities', is inherently transdisciplinary by focusing on a transformation-oriented problem statement at the beginning of a mutual learning process and research outcomes relevant to both society and science (Byrne 2022).

While there are many advantages in mapping the status quo of environmental burdens and benefits in socio-ecological research (Fairburn et al. 2009; Glatter-Götz et al. 2019; Lakes et al. 2013; Ohlmeyer et al. 2022; Rüttenauer 2018; Shrestha

et al. 2016), potential environmental burdens and benefits induced by intended policy interventions should be given the same attention. In this context, the investigation of the microscale plays an important role, as urban neighborhoods are the places where people shape their everyday lives and the effects of urban planning decisions become perceivable.

To determine what works for addressing environmental burdens at the microscale, this paper serves a double purpose: the first part of this study examines the benefits and trade-offs of GI measures in regard to environmental burdens considering primary health concerns among citizens. In detail, the outdoor effects of the aforementioned risk-based GI concept (minimizing environmental threats) are analyzed with the microclimate modeling software ENVI-met, namely, thermal comfort and air pollution. ENVI-met has been employed for a variety of previous urban greenery scenarios with respect to thermal comfort and air pollution (Balany et al. 2020; Rui et al. 2019; Tsoka et al. 2018) and is therefore appropriate for this study. The input for the analysis was a draft GI plan, which was the outcome of a collaborative workshop between science and planning practice during the transdisciplinary research project 'Zukunft-Stadt-Region-Ruhr' (ZUKUR). ZUKUR aimed to obtain urban planning solutions to reduce socio-ecological inequalities and to leverage climate resilience at the regional (Ruhr area), city-wide (city of Bottrop), and urban neighborhood scale (Dortmund Marten). In this work, the focus is on the neighborhood scale (microscale), with Dortmund Marten as the case study area:

*Research question 1 (RQ1): What are the physical effects of GI on heat stress and air pollution at the microscale?*

The second part of this study is devoted to the underlying transdisciplinary process in the research project ZUKUR by exploring the strengths and challenges of science-practice collaboration in the realm of addressing environmental burdens through GI:

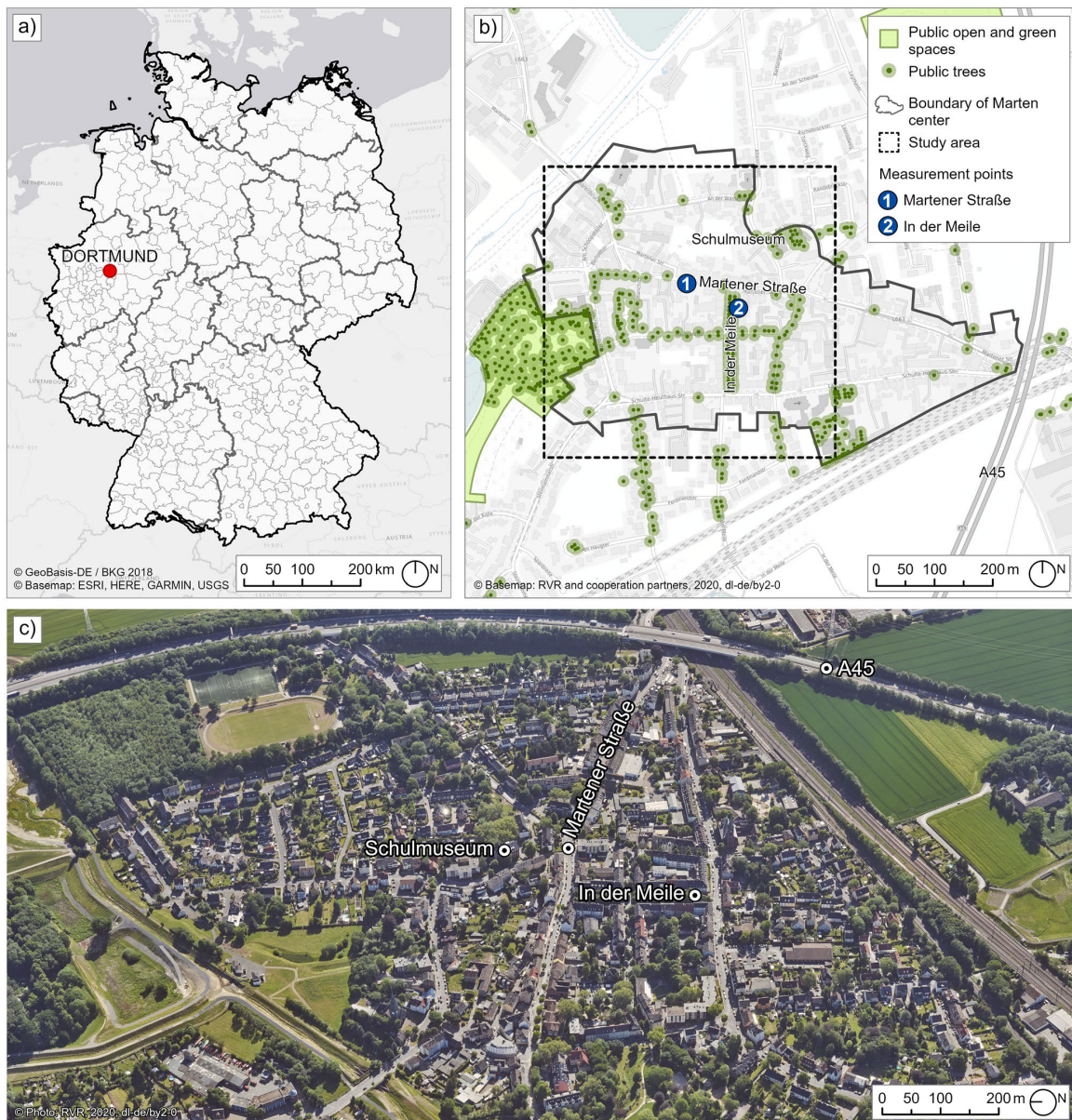
*RQ2: How can science-practice collaboration stimulate the development of GI solutions at the microscale?*

The main aim of this study is therefore to analyze the product of a cooperative workshop as well as to provide insights into the process that has shaped the corresponding ideas of both science and planning practice. The simulation results contribute to an increased understanding of the effects of street trees, pocket parks and roof materials in terms of extreme summer conditions and air pollution. Furthermore, reflections of the participating researchers and planning practitioners on cooperation and GI planning will be discussed to improve future processes of knowledge exchange and greening interventions in urban neighborhoods.

### Case study area and previous work

As one of the 80 cities with more than 100,000 inhabitants in Germany, the city of Dortmund ranks 59th in terms of its proportion of public and private green areas (Taubenböck et al. 2021) (Fig. 1a). In particular, large public open green spaces are more located throughout the

southern districts of the city. In addition to an uneven distribution of green areas, an initial GIS-based Multi Criteria Fuzzy Analysis by Schaefer et al. (2020) revealed that health-related environmental burdens such as heat stress and noise pollution are clustered on different spatial scales across the entire city, with the Dortmund Marten subdistrict as one hotspot.



**Fig. 1** a Location of the city of Dortmund in Germany; b study area (500 m x 500 m) in Dortmund Marten center, where 1 and 2 are the measurement points for model validation; c aerial view of the study area facing east

Dortmund Marten is located in the western part of Dortmund and has an above average unemployment rate of 11.8% (Stadt Dortmund 2019). The center is surrounded by heavily used one-way roads, representing the gray arteries of the study area (Fig. 1b). As this neighborhood serves as a transit hub with connections to several highways, such as A45 and Mallinckrodtstraße, high emissions are caused by commuter traffic. Furthermore, due to the low proportion of public green and open spaces, there is insufficient access to suitable climatic compensation areas. For instance, during the period from 1981–2010, Marten reached a yearly average of 10 hot days ( $> 30$  °C peaks between 6:00 am and 6:00 pm), projected to increase to 35 by 2050, with the center of Marten as an UHI hotspot in Dortmund (Regionalverband Ruhr 2019).

According to the grades of thermal heat stress by Matzarakis and Amelung (2008), a preliminary questionnaire field survey on ambient air temperature sensation revealed that pedestrians perceived strong heat stress at Martener Straße on a hot day in summer (Schaefer et al. 2021). The questionnaire survey was coupled with meteorological measurements and took place at two hotspots with high traffic volumes (Fig. 1b) on 11<sup>th</sup> August 2020 during a heat wave occurring between 6<sup>th</sup> and 15<sup>th</sup> August 2020. The results indicated that pedestrians are very aware of outdoor heat stress, but 36% did not even consider any coping mechanisms. Most noted coping strategies referred to the indoor environment, e.g., air conditioning. This behavior suggests that additional public greening may contribute to outdoor heat stress reduction during daytime, especially among residents in Dortmund Marten who are unable to properly adapt on their own.

## Methods

As illustrated in Fig. 2, this study is organized around the characteristic features of a transdisciplinary process (Scholz and Steiner 2015), with the TU Dortmund University and planning practitioners of the city of Dortmund as co-leaders of the neighborhood scale in the ZUKUR project.

For each spatial scale (region, city, neighborhood), a learning process between science and planning practice with regard to climate resilience and socio-ecological equalities was pursued. Through topic-specific workshops, new and applicable knowledge was to be jointly generated for urban planning practice, while accompanying spatial analyses delivered new insights for research.

In the beginning of phase 1, participatory mapping exercises with citizens of Dortmund Marten framed the first relevant environmental stressors at the neighborhood scale, such as air and noise pollution, access to public open

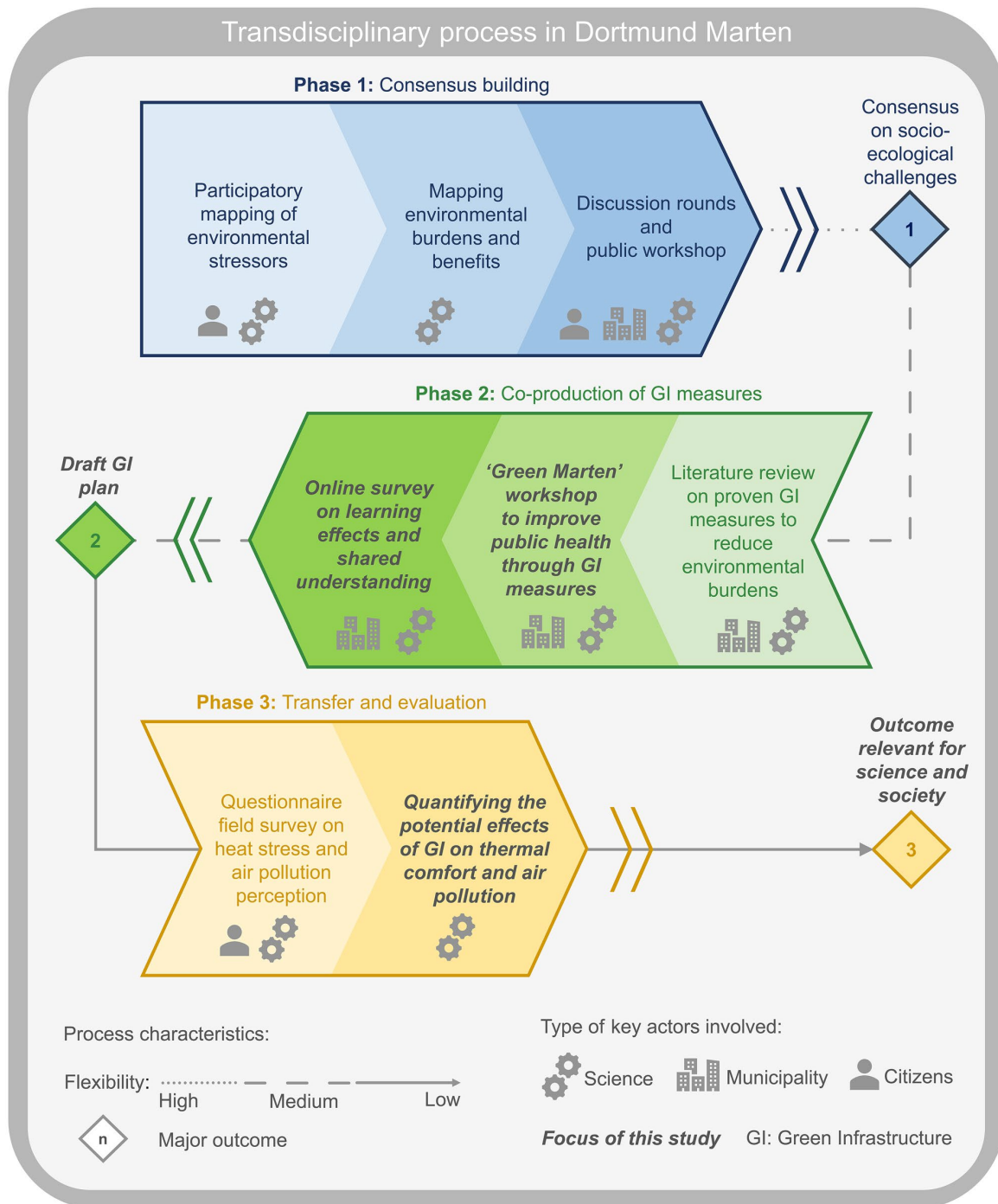
and green spaces, and heat stress. After identifying environmental stressors for the local citizens, indicator-based mappings of environmental burdens and benefits were carried out by the researchers of TU Dortmund University. Through small discussion rounds with representatives of the city of Dortmund, different viewpoints were iteratively adapted and incorporated into the indicator mappings. At the end of phase 1, a public workshop with internal and external planning practitioners, citizens, and scientists was held to establish a common ground on socio-ecological challenges in Dortmund Marten.

This joint consensus statement induced a cross-disciplinary workshop on GI measures with scientists and urban planners, which comprised the main pillar of this study (phase 2). With the help of the preliminary mappings of environmental burdens and benefits in phase 1, municipal experts delineated concrete measures to qualify and connect GI at major hotspots in a draft GI plan. Through the application of a semi-structured online survey, potential learning effects and shared understanding of GI characteristics among local planning practitioners and scientists were identified at the end of phase 2.

Subsequently, the performance of the derived GI measures was quantified via the three-dimensional holistic microclimate modeling software ENVI-met version 5.0.2 (phase 3). The challenge here was to contextualize and evaluate the GI solutions proposed by urban planners by acknowledging the environment and local climate in Dortmund Marten. These real-world conditions were assessed through the field survey in the beginning of phase 3 and used for a mitigative GI scenario in this study. As can be seen in Fig. 2, the flexibility in adapting to new thoughts and evidence is reduced with every phase due to the increase in joint consensus and the decrease in the number of different stakeholder types involved. The next sections will focus on the workshop and online survey in phase 2 as well as the quantification of the effects of the draft GI plan in phase 3.

### 'Green Marten' cooperative workshop

As part of the ZUKUR project, a cross-disciplinary workshop was held on 2 March 2020. To ensure optimal knowledge sharing, all attendees represented different backgrounds, comprising six scientific researchers (including the author) of TU Dortmund University with research experience in risk planning, geospatial analyses, environmental planning, and urban development as well as five municipal representatives from the city of Dortmund, with expertise in climate adaptation, environmental planning, GI, and drainage. The workshop was held in the Meilenstein forum at the center of Dortmund Marten, acting as the arena for local collaboration at the neighborhood scale in the ZUKUR project.



**Fig. 2** Schematic overview of the applied transdisciplinary process in ZUKUR with resulting outcomes in Dortmund Marten, based on Hansen et al. (2021)



To achieve a joint problem definition, current environmental challenges in Dortmund Marten were introduced by the attending planning practitioners and ZUKUR research team at the beginning of the workshop. After presentations and an explanation of the session objectives, all participants entered into two mixed working groups to outline strategies and appropriate measures for GI considering climate adaptation and public health equities. Two printed maps of the study area helped to localize the proposed ideas (Fig. 3). During the group work, it became clear that space for greening intervention in Dortmund Marten is limited, shifting the focus on connecting and qualifying existing GI with the purpose of providing multiple benefits for society.

For equity reasons, another precondition was that GI interventions need to be accessible within walking distance and publicly available for citizens in Dortmund Marten. With subject-specific knowledge of the specialists and GIS-based indicator maps of Schaefer et al. (2020), the first measures were outlined and mapped by both working groups to identify possible hotspots for action. The role of science was to provide information on current analysis results, while the practice participants contributed tangible measures in this area. As such, theoretical findings rooted in science could be adjusted based on practical experiences, and, furthermore, practical measures could be formulated on a sound basis. After the group working phase, the developed arguments



**Fig. 3** Insights into the cooperative workshop and draft GI plan for the Dortmund Marten center, which indicates additional roadside trees at Martener Straße, unsealing procedures at Schulmuseum, and roof greening

of both groups were synthesized to frame constructive GI measures.

Both working groups emphasized a clear need for action regarding the street canyon of Martener Straße, mainly associated with the absence of shaded areas and a high traffic volume. Another hotspot for urban greenery intervention was the unused impermeable area at the Schulmuseum. The strategy here was to introduce amenities and aesthetic value through the addition of vegetated surfaces. As an outcome of the workshop, several adaptation measures, such as unsealing procedures, roof greening, and roadside tree planting, were highlighted in the study area as a draft GI plan (Fig. 3).

### Microclimate simulation of the status quo

ENVI-met is a computational fluid dynamics (CFD)-based model developed by Michael Bruse (Bruse and Fleer 1998) for three-dimensional numerical simulation applications. The high spatial resolution and the detailed representation of vegetation forms in ENVI-met allow extensive microclimate scenario simulations considering real-world physics (Liu et al. 2021). Since the implementation of the MONDE tool in 2018, it has been possible to import vector-based GIS data into the modeling environment, which greatly eases input preparation. The input generation for microclimate modeling in this research relied on a data-driven approach employed by the author using GIS and remote sensing in a previous study of Dortmund Marten. A detailed description of the open geodata employed and the applied workflow is presented in Schaefer et al. (2021). The five main working steps were as follows:

1. Object-based classification of a digital orthophoto (1 m) was performed with mean height information derived by a normalized digital surface model.
2. Albedo information was extracted to determine dominant roof surface materials using pure pixels in calibrated Sentinel 2C multispectral satellite data at a 10 m resolution.
3. Physical parameters such as the specific heat capacity, emissivity, and density were added based on albedo and literature values as references.
4. Classified vector data and physical information (buildings, roof surfaces, trees, hedges, grasslands, sand areas, asphalt, and pavement) were imported into the ENVI-met database to establish a 2.5D model of Dortmund Marten.
5. To determine meteorological conditions, on-site measurements of the air temperature, relative humidity and  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  concentrations at a 1.5 m height (breathing zone) were carried out using mobile particle counter devices PCE-PCO2 (Table 1). Data collection occurred during a hot day on 11<sup>th</sup> August 2020 between

05:00 am and 11:00 pm (except for 05:00 pm) at two measurement points (Fig. 1b) with 17 one-hour means at 60 s intervals.

It is worth noting that ENVI-met suffers limitations in traffic-induced particulate matter prediction, leading to considerable errors in the measured concentration, especially during rush hours (morning and afternoon) in Dortmund Marten (Schaefer et al. 2021). Given that it is not possible to adjust the hourly traffic volume (absolute number of cars per simulation hour) in the ENVI-met environment, the predicted particulate matter concentration varied little over time. To overcome this issue, the emission rates for each hour were recalculated in Microsoft Excel considering the total sum of all emission rates for the whole simulation duration. Consequently, the total sum of the emission rates remained unchanged, while fluctuations in the traffic volume could be simulated according to the traffic behavior observed during field measurements. Instead of the standard representation of line-based emission sources [ $\mu\text{g}/\text{m}^*\text{s}$ ] in the model, area-based implementation [ $\mu\text{g}/\text{m}^2*\text{s}$ ] of emitters (here, road traffic) throughout the whole road area simulated the stop-and-go effect more realistically in ENVI-met (Paas and Schneider 2016).

### Green infrastructure scenario

The design ideas of the collaborative workshop constituted an appropriate point of departure to investigate their microclimate effects on the surrounding environment. Within this context, it is necessary to provide scientific evidence to determine whether the measure outcomes also meet the objectives set by the workshop participants.

Green roofs are widely acknowledged to mitigate the UHI effect through increased evapotranspiration (Berardi 2016). Green roofs are the sum of multiple construction layers, typically comprising the building itself, drainage materials, geotextile filters, and soil, with a vegetation layer at the outer end. Generally, there are two engineering types of urban green roofs in the literature, namely, intensive (soil layer depth  $> 150$  mm) and extensive (soil layer depth  $\leq 150$  mm) roofs (Berndtsson 2010). However, a consensus is lacking regarding the specific soil layer depth of both green roof types, but it has been reported that intensive green roofs demand a much larger soil thickness than extensive roofs due to more complex vegetation forms and corresponding deeper root networks. As a consequence, especially for low-rise buildings, intensive green roofs, applied as roof gardens, generate a higher cooling contribution to the outdoor air temperature and building energy demand. In turn, these installations are more cost-intensive applications and require significantly greater maintenance efforts than those required by extensive green roofs (Aboelata 2021; Berndtsson 2010;

**Table 1** Input parameters and meteorological conditions under the baseline and GI scenarios in ENVI-met version 5.0.2

| Parameter                            | Description                                   | Value                        |
|--------------------------------------|---|------------------------------|
| Model dimensions                     |   |                              |
|                                      | Number of grid cells (x, y, z)                | 250, 250, 20                 |
|                                      | Size of grid cells (x, y, z)                  | 2, 2, 3                      |
|                                      | Number of nesting grids                       | 7                            |
|                                      | Digital terrain model                         | Not applied                  |
| Simulation settings                  |   |                              |
|                                      | Simulation day                                | 11 <sup>th</sup> August 2020 |
|                                      | Simulation start time                         | 05:00 am                     |
|                                      | Simulation end time                           | 11:00 pm                     |
|                                      | Output interval                               | 60 min                       |
|                                      | Wind speed at 10 m above ground level         | 2.2 m/s                      |
|                                      | Prevailing wind direction                     | East (90°)                   |
|                                      | Roughness length [m]                          | 0.677                        |
|                                      | Minimum air temperature (05:00 am)            | 21.1 °C                      |
|                                      | Maximum air temperature (03:00 pm)            | 32.4 °C                      |
|                                      | Minimum relative humidity (03:00 pm)          | 40.8%                        |
|                                      | Maximum relative humidity (07:00 am)          | 71.7%                        |
| Air pollution settings               |   |                              |
|                                      | Background concentration of PM <sub>10</sub>  | 17 µg/m <sup>3</sup>         |
|                                      | Background concentration of PM <sub>2.5</sub> | 7 µg/m <sup>3</sup>          |
| Human parameters for PET calculation |   |                              |
|                                      | Age   | 35 years                     |
|                                      | Height  | 1.75 m                       |
|                                      | Weight  | 75 kg                        |
|                                      | Work metabolism                               | 80 W                         |
|                                      | Clothes                                       | 0.57, clothing in summer     |

Morakinyo et al. 2017). With respect to practicability in the study area, under this scenario, extensive green roofs with a soil layer of 200 mm and full coverage of the roof surface were considered. The application of a 200 mm soil thickness allows extensive green roofs and provides the opportunity for intensive green roofs in the future. Roof greening measures were applied to suitable roofs with a minimum area of 20 m<sup>2</sup> (Fig. 3) according to the green roof cadaster of the Regional Association Ruhr (RVR) (Regionalverband Ruhr 2022). The greening type was grass with a height of 30 cm.

To create a green connection with the avenue trees along the street 'In der Meile', 28 deciduous trees were added to the unshaded sidewalks along Martener Straße at intervals of 8 m, with the same height (15 m) and crown width (9 m) as those of existing trees. The 8 m interval was chosen because optimum cooling at the pedestrian level is achieved when the distance between trees matches the crown width (Zheng et al. 2018). This layout also avoided unnecessary shadow overlapping.

Even though GI measures are often large, interconnected systems within a region or city (Verdú-Vázquez et al. 2020; Wang et al. 2021), small and accessible parks of less than

1 ha are also capable of improving thermal comfort (Müller et al. 2014). Therefore, a pocket park (1,600 m<sup>2</sup>) with grass and sandy soil surfaces below the dense tree cluster near the Martener Schulmuseum was implemented in the model environment to allow recreational use. Likewise, the additional evaporative cooling of vegetation lowers the air temperature, decreases wind velocity and increases atmospheric humidity between the Schulmuseum and its surrounding built-up environment, enhancing the cold island effect during hot days (Xue et al. 2019).

Finally, the GI scenario was simulated with the same meteorological and temporal parameters as those of the baseline scenario to quantify the direct impact of the applied GI measures during an extreme heat event (Table 1). The output files of both scenarios are provided in the availability of data and material section. To gain a comprehensive understanding of the design recommendations, relevant microclimate indicators were calculated, namely, the potential air temperature, relative humidity, wind speed, mean radiant temperature (MRT), roof and facade surface temperatures, and the physiological equivalent temperature (PET) for outdoor human thermal comfort (Liu et al. 2021).

In regard to air pollution, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations were simulated.

To evaluate the model prediction performance, the squared correlation coefficient ( $R^2$ ), mean absolute percentage error (MAPE), root mean squared error (RMSE), and Willmott’s index of agreement ( $d$ ) (Willmott 1981) were calculated between the simulated and measured parameters.

### Online survey

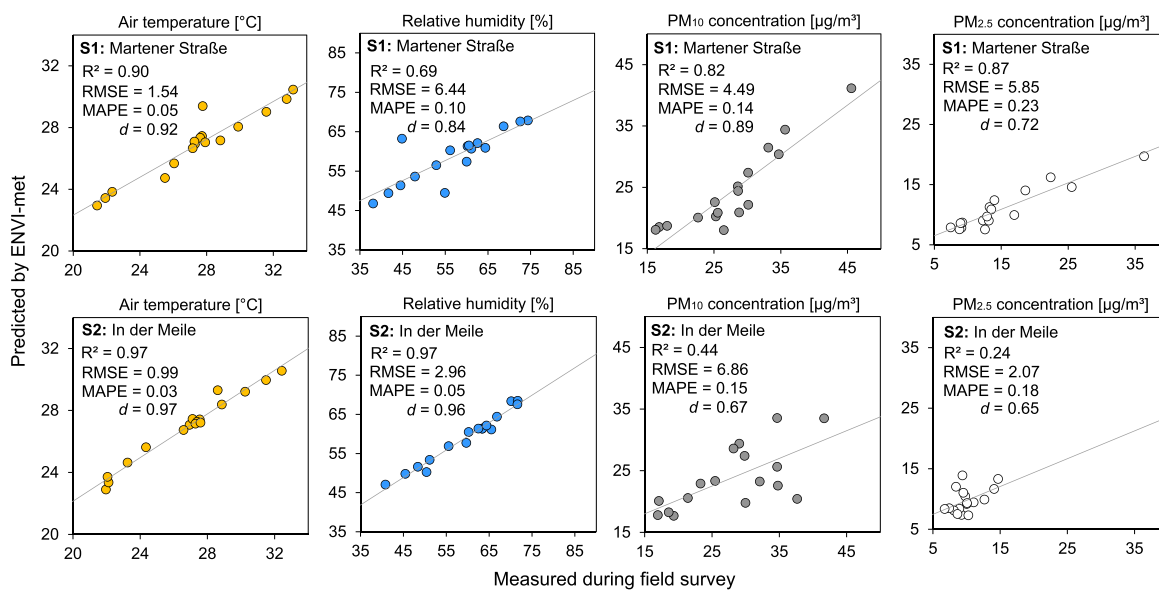
An online survey was conducted with the participants of the ‘Green Marten’ workshop to gain insights into the subjective experience of the science-practice working relationship. The intention of the survey was to identify the impact of the GI workshop relevant to planning practice and science. First, questions about potential learning effects and knowledge applications during the workshop were asked. In a second block, based on the findings of Matthews et al. (2015), expectations for successful GI planning were obtained. For every question, a five-point Likert scale was employed encompassing strongly agree, rather agree, neutral, rather disagree, and strongly

disagree. The online questionnaire survey was created in LimeSurvey and sent to the five practice participants, other city department staff members and the scientific researchers of the workshop by direct mailing. The survey was conducted anonymously, while all participants were informed beforehand about the usage of their data in this research.

## Results

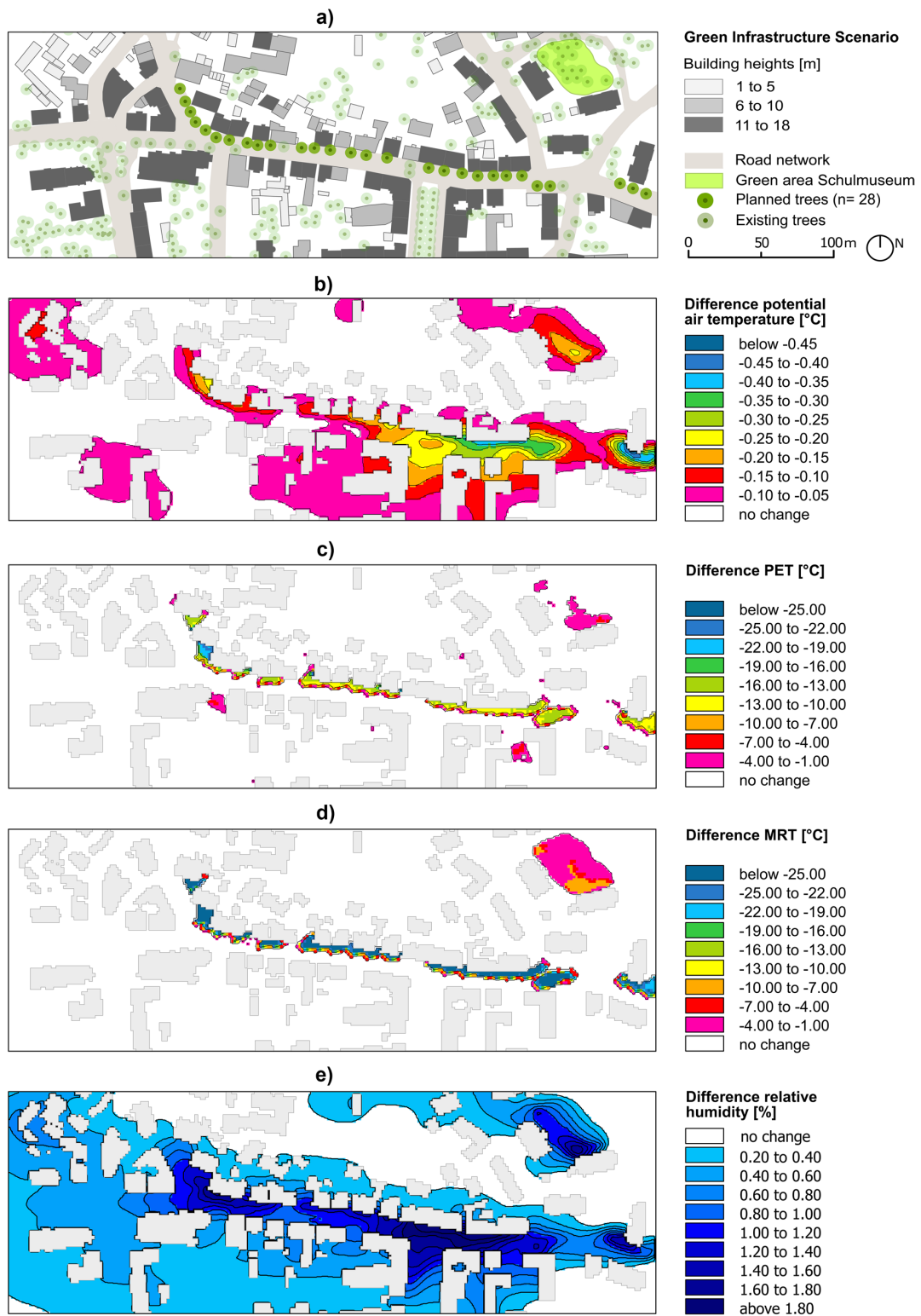
### Simulation validation

The statistical validation metrics for the air temperature and relative humidity measurements revealed a high agreement with the remote sensing-based ENVI-met baseline simulations (Fig. 4). Based on the adjustments in air pollution settings, particulate matter prediction could be greatly enhanced. However, compared to Martener Straße, the air pollution predictions at In der Meile still show lower agreement values with field survey measurements. These larger errors may be a result of different peak traffic hours and road designs. For instance, at Martener Straße, air pollution dispersion reaches traffic peaks at 09:00 am and 06:00 pm,



**Fig. 4** Baseline scenario scatterplots of the measured and simulated parameters during each simulation hour ( $n=17$ ) with statistical performance indicators for model prediction accuracy assessment

( $R^2$ =squared correlation coefficient, RMSE=root mean squared error, MAPE=mean absolute percentage error,  $d$ = index of agreement)



**Fig. 5** Impact of the GI scenario on the meteorological and thermal comfort parameters in the Martener Straße canyon and Schulmuseum at the pedestrian level of 1.5 m at peak temperatures (03:00 pm)

while at In der Meile, air pollution is constantly high due to the wind blocking effects of trees and buildings. Compared to the real world, such turbulence is more difficult to simulate in a cubic model, which leads to a higher chance of error during simulation (Schaefer et al. 2021).

Nevertheless, with a MAPE of 0.14 for  $PM_{10}$  and 0.23 for  $PM_{2.5}$  at Martener Straße and 0.15 for  $PM_{10}$  and 0.18 for  $PM_{2.5}$  at In der Meile, the generated output satisfied the requirements of a ‘good’ air quality dispersion model (Chang and Hanna 2004). Combined with the high agreements in air temperature and relative humidity, the numerical simulation output of ENVI-met can be considered to draw meaningful conclusions regarding the local microclimate and air pollution in Dortmund Marten.

### Predicted GI performance in terms of the microclimate

Figure 5 reveals the effects of the proposed roadside tree plantings and green area near the Schulmuseum on microclimate metrics. Due to the east–west orientation of the street canyon, the presence of trees along Martener Straße could produce shading on the northern sidewalk. The effects on thermal comfort (expressed via MRT and PET) rapidly declined with increasing distance to the tree canopy (Fig. 5c, d). In contrast, the air temperature decreases by 0.4–0.1 °C and the relative humidity rises by 0.2–1.8% due to an increased evapotranspiration process across a larger area following the wind direction (Fig. 5b, e). As shown in Fig. 5b–d, the proposed replacement of impervious surfaces by a 1,600-m<sup>2</sup> pocket park near the Schulmuseum slightly influenced thermal comfort ( $PET = -4$  °C).

In Martens microclimate, additional roadside tree plantings could reduce not only PET by 13–25 °C at 1.5 m but also the surface temperature of nearby building facades by 6–21 °C (Fig. 6). This effect is particularly relevant for heat sensation in adjacent retail stores or offices at ground level.

In regard to roof materials, maximum temperatures occurred between 12:00 and 02:00 pm (Fig. 7). When nighttime was reached between 09:00 and 11:00 pm, all roof materials shared a similar surface temperature of approximately 25 °C. The most notable temperature reduction by green roofs in comparison to zinc and bitumen roofs was up to 42 °C (Fig. 7). Where existing trees shaded roofs, the average cooling effect of –10 °C was considerably lower (Fig. 6). Green roofs on the upwind side also yielded a

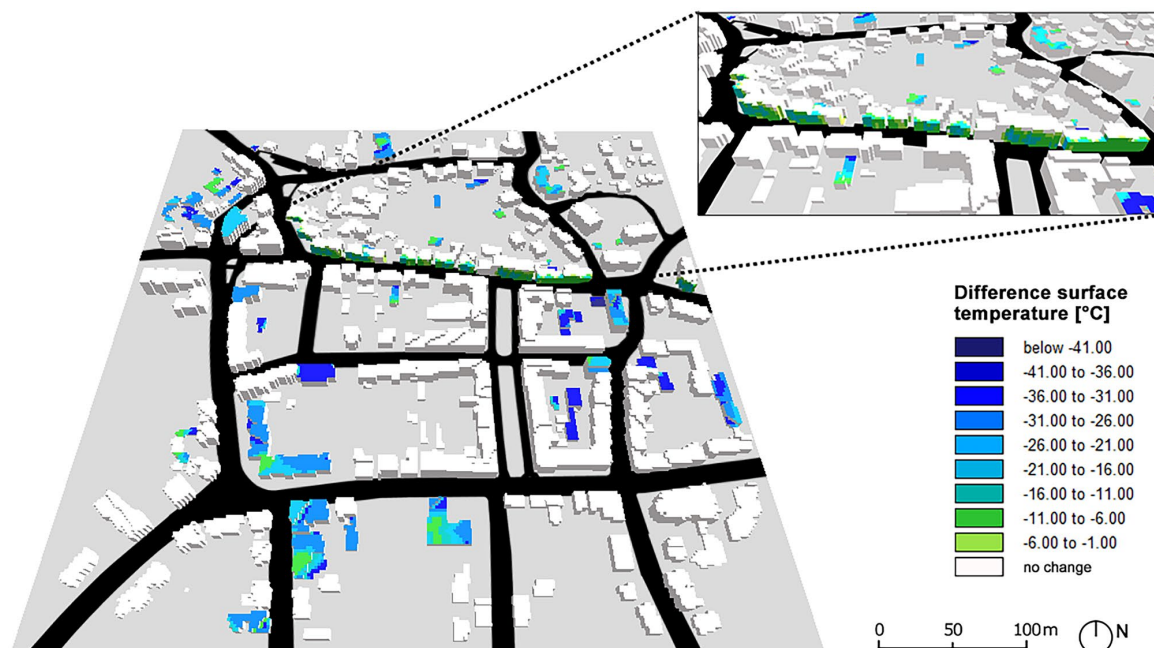
slightly positive effect on the resultant pedestrian air temperature and relative humidity levels during the daytime, as the temperature was reduced by 0.1 °C on the leeward side (Fig. 5b). However, the given building designs and heights in the study area imposed the greatest influence on the environment (He et al. 2019). As extensive green roofs generally provided no additional shading, with increasing building height, green roof cooling at the pedestrian level diminished, which is in line with the findings of Zhang et al. (2019). Conversely, the greater the distance between buildings, the more ventilation occurs, but exposure to solar radiation is also greater (Ali-Toudert and Mayer 2006), which cannot be compensated by the extensive green roofs.

### Predicted GI performance in terms of air pollution

Compared to the reference case, the new tree patterns enhanced the obstacle effect, where wind speeds were reduced by up to 1 m/s, and the proposed patterns significantly inhibited particulate matter diffusion along the high-traffic Martener Straße (Fig. 8b–d). This disturbance to the ventilation corridor was also significantly influenced by the width and geometry of the canyon combined with the proposed tree plantings. This effect was particularly evident in the eastern part of the study area, where particulate matter was only increased by 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for  $PM_{10}$  and 3.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  for  $PM_{2.5}$ , but the wind speed was still reduced by 0.6 m/s (Fig. 8b–d). Similar observations were reported in another study with respect to parallel wind directions (Gromke and Ruck 2012). The planned grass surface near the Schulmuseum did not affect the particulate matter concentration.

### Reflections on science–practice collaboration and shared understanding in GI planning

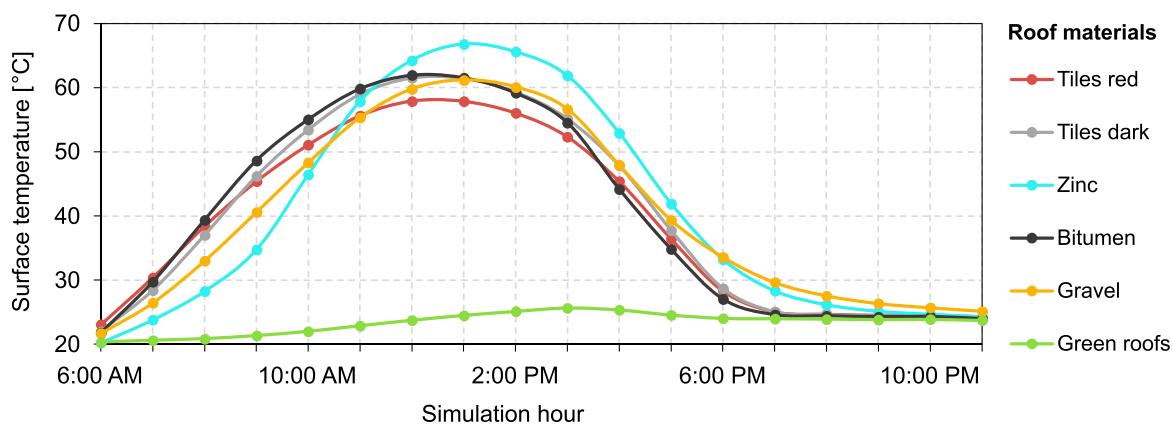
Figure 9 shows a summary of the reflections on the ‘Green Marten’ workshop. One expert who did not attend the workshop completed the online survey on institutional expectations for GI planning, while another expert who participated in the workshop began the survey but did not complete the questions related to the institutional expectations for GI planning. Both urban planners and researchers were widely aware of the climatic and environmental conditions in Dortmund Marten. Surprisingly, the experts experienced no issues integrating their practical knowledge during the workshop, whereas the scientists reported less ability to integrate their expertise. In contrast, the overall learning outcome of the planning practitioners was rather neutral, while the majority of the participating scientists confirmed a learning effect through the workshop.



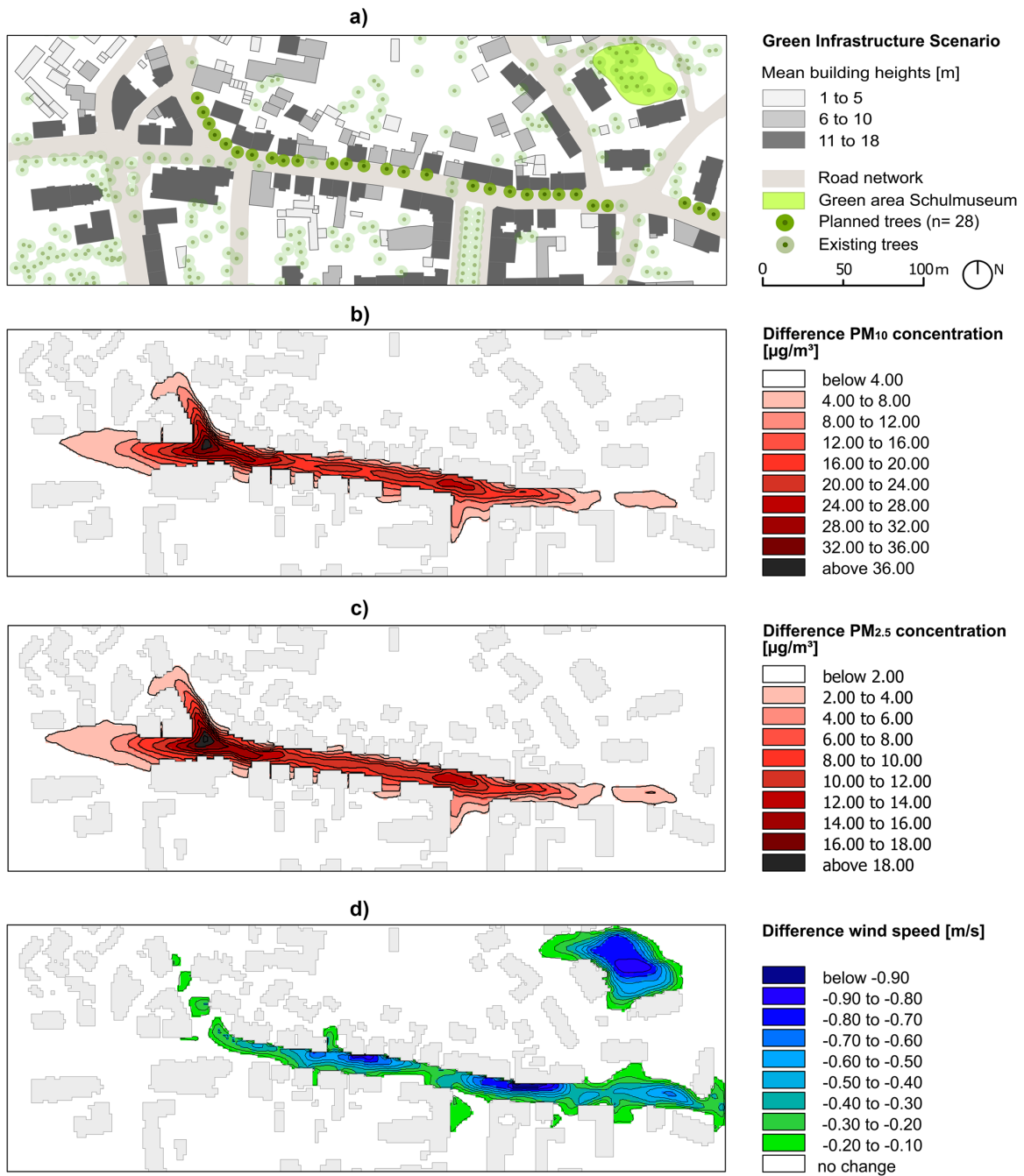
**Fig. 6** Impact of green roofs and roadside trees on the building surface temperatures in the study area during peak-temperature hours (03:00 pm)

Figure 10 reveals the opinions and expectations of the survey respondents regarding GI planning. Overall, the survey outcome indicates that practitioners and scientists

approached GI planning differently in regard to the deployment of new instruments and methods in the planning process. In addition to clear agreements on institutional

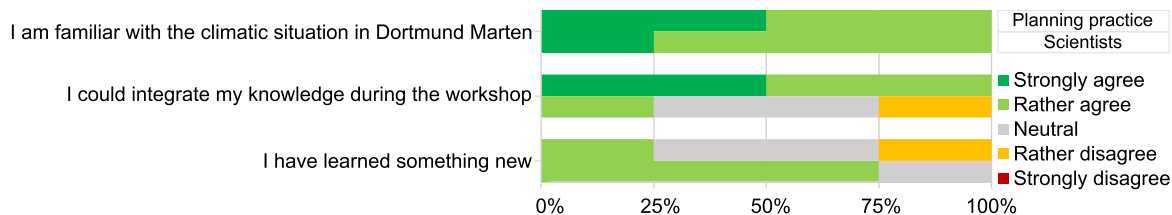


**Fig. 7** Predicted surface temperatures for all roof materials in the study area (25 pixels/100 m<sup>2</sup> for all roof materials not affected by shading of tree crowns)



**Fig. 8** Impact of the GI scenario on the wind speed, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Martener Straße canyon and Schulmuseum during peak traffic hours at the pedestrian height (1.5 m) at 09:00 am

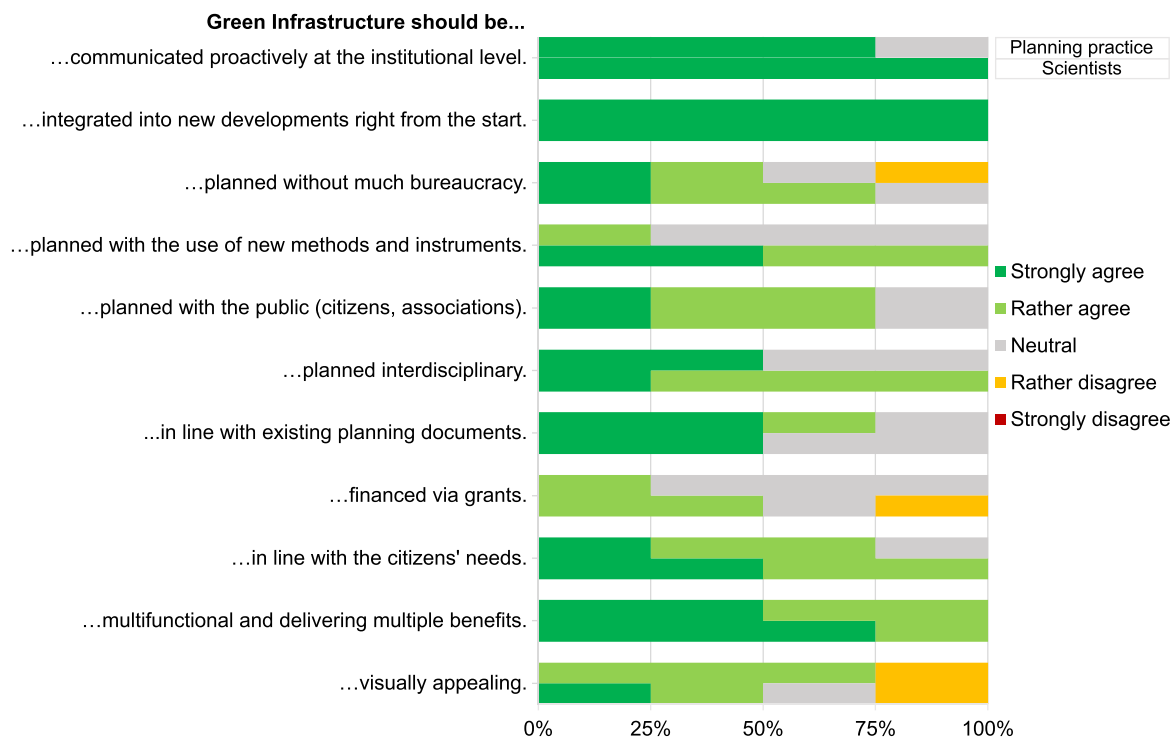




**Fig. 9** Evaluation of the ‘Green Marten’ workshop impact on the planning practitioners ( $n=4$ ), represented by the upper bars, and the scientists ( $n=4$ ), represented by the lower bars

communication, land use planning integration and multi-functionality, diverging expectations on the visual appeal of GI occurred not only between science and practice but also

within both groups. The same divergence of opinions was found regarding the statement on planning GI without much bureaucracy, particularly among planning practitioners.



**Fig. 10** Evaluation of the survey responses of planning practitioners ( $n=4$ ), represented by the upper bars, and scientists ( $n=4$ ), represented by the lower bars, in regard to expectations for GI planning

## Discussion

In this study, a collaborative workshop within a transdisciplinary process induced a tangible GI concept at the neighborhood scale, which could be analyzed with the microclimatic simulation software ENVI-met. After presenting validated simulation results, the benefits and trade-offs of the derived GI measures will be discussed in “What works in addressing environmental burdens at the microscale?”, which addresses RQ1. The strengths and limitations of the cooperation between science and planning practice in regard to GI planning will be critically explored in “How can science-practice collaboration stimulate the development of GI solutions?” and “Limitations and risks of the transdisciplinary approach” to provide answers to RQ2.

### What works in addressing environmental burdens at the microscale?

#### What are the physical effects of GI on heat stress and air pollution?

Aerodynamic interactions along Martener Straße indicated that tree plantings did not per se enhance air pollution accumulation; instead, their orientation within this street canyon was the main influencing factor. Thus, both ends of the tree line along Martener Straße remain of interest for future installation. Another option for ventilation enhancement lies in increasing the distance between tree plantings, which could in turn reduce the cooling effect during the daytime due to a lower green cover ratio and fewer shadow casts (Rui et al. 2019). Likewise, the design or type of trees was not considered in the workshop, despite the importance of these factors in regard to temperature regulation, irrigation, and allergic reactions to pollen (Hoover et al. 2021; Rahman et al. 2020).

Although green roofs in Dortmund Marten should reach the highest cover ratio possible to accomplish the best cooling effect, care should be taken beforehand to determine whether a green roof in tree-shaded areas is appropriate and what its purpose is (cooling or surface runoff). This is especially relevant for roof materials with a high heat capacity, such as zinc, dark tiles, and bitumen. However, tree shade and green roofs are only effective in reducing the temperature during daytime, while during warm nights (> 20 °C during 6:00 pm and 6:00 am), other cooling strategies that enhance ventilation should be discussed and scientifically validated in the future.

The analyzed measures referred to passive climate adaptation strategies (tree planting, surface unsealing, and roof greening), which could be adjusted by the instruments of

urban planning. However, human health is affected not only by high temperatures but also by a lack of cooling areas and individual vulnerabilities (Pickett et al. 2021). Therefore, in case the draft GI plan will be put into practice in the future, active strategies should be considered in parallel, e.g., accessible cooling centers for those without air conditioning, training modules for firefighters and early warning systems as a robust response to heat threats (Keith et al. 2020).

In terms of air pollution, it could only be concluded that additional road greening could lead to an increase in the surface roughness of the street canyon and thus increase particulate matter accumulation. In turn, there should be more studies involving different simulation tools over a longer period to calculate the particulate matter absorption degree of roadside trees. ENVI-met therefore serves as an accurate tool to identify the critical climatic functions of GI but not its cultural, educational, or recreational quality.

### Socio-ecological challenges

In contrast to other GI programs focusing on public property, the presented GI suggestions affect both public (streets, open places) and private property (roofs), which occupy a remarkable proportion of urban land. The actual roof surface material was not considered in the cooperative workshop but could be identified and integrated into the modeling environment via remote sensing techniques, leading to more realistic results with the ability to capture the effect of replacing various roof materials with green roofs. Here, roof surfaces such as red and dark tiles that could reach particularly high temperatures on hot days are rarely suitable for greening interventions due to the gable roof design. With this knowledge, it can be asserted that adaptation measures for these specific roof types are less feasible and could leverage additional climate adaptation inequalities.

Although the project focused on socio-ecological issues in Dortmund Marten, attention should be given not only to risk minimization but also to poverty and exclusion reduction (Hamstead and Sauer 2021). Critically seen, urban greening interventions in deprived neighborhoods such as Dortmund Marten could foster green gentrification processes, thereby excluding minorities and low-income residents from their intended positive impacts (Angelovski et al. 2019). As documented by the online survey, including the voices of the public represents an important aspect by the planning practitioners of Dortmund (Fig. 10). This empowerment was given in phase 1 of the research project as framing from the outset but should also be reinforced in the siting process to reduce mistrust among local residents and therefore increase the legitimacy of GI frameworks (Cook et al. 2021; Paavola and Adger 2006). With regard to the reduction in flexibility during the transdisciplinary approach,

the inclusion of citizens in Dortmund Marten would have been meaningful in phase 2, especially when it comes to the planting of trees in front of people's houses.

Regarding socio-ecological inequalities in the long run, environmental factors and demographic data should be monitored via indicators to quantify advantages and disadvantages to the local population after GI implementation. The Urban Climate Resilience Index (UCRI) proposed by Schaefer et al. (2020) would serve as a suitable example. The Meilenstein office in Dortmund Marten should be consolidated as a fixed infrastructure, evolving into a persistent living laboratory to collect profound feedback on the analysis results while also giving attention to continuous optimization in response to citizen and stakeholder interaction. The basis for the above is that everyone should speak the same language, especially when it comes to the involvement of actors not familiar with scientific methods or terms.

### How can science-practice collaboration stimulate the development of GI solutions?

#### Consensus versus knowledge gaining

The results of the online survey point to a low level of shared learning effects but a high level of shared values and perspectives between planning practice and science (Figs. 9 and 10). The minor learning effect on the practical side could refer to a preexisting knowledge of the environmental and climatic indicator mappings in Dortmund Marten of phase 1. Furthermore, and as a prerequisite for the 'Green Marten' workshop, the participating practitioners were experts in climate change adaptation and environmental planning. With this in mind, the learning effect might increase if planners with other backgrounds (e.g., infrastructure planning, biodiversity) were also integrated into the workshop. For the participating researchers, the knowledge gain during the workshop was comparably higher, as the urban planning practitioners communicated unknown barriers in GI implementation (e.g., maintenance costs and loss of parking lots). However, with each stage of progress in co-research, the learning effect tends to diminish as the core team develops more expertise on the topic.

Bureaucracy remains an important issue on the practical side. Scientific innovation efforts are therefore still in conflict with anchored routines in practice, which can also be obtained in the statement about using new methods and instruments in GI planning (Fig. 10). This communication issue also manifests in the difficulty the researchers experienced in integrating their expertise during the workshop, which warrants the installation of a mediator in future transdisciplinary collaborations. To obtain a better learning outcome on the practical side, instead of printed maps, the adoption of interactive map-based support systems (Shrestha

et al. 2018) could steer the communication on environmental indicators.

The mix of consultation and co-creation throughout the transdisciplinary process ensured that the theoretical research outcome complements practical needs. For science, the derived GI measures of phase 2 are essential to confirm the authenticity of the developed scenarios so that the results can be further applied at early stages of future land-use planning procedures. In this light, there also exists strong agreement on the need to include GI in new urban planning projects right from the beginning, since retrofits in binding land-use plans may be impeded by several legal barriers.

The online survey revealed that the project involved several individuals with different interpretations of GI planning, even within both stakeholder groups. Joint consensus building is therefore an important factor to overcome uncertainties but should be re-evaluated in each phase to provide sufficient flexibility, with the ability to adapt intermediate results to new viewpoints or scientific evidence. Despite some existing tensions with the use of new methods, the broad consensus of both science and practice participants on GI characteristics became clear. Nevertheless, these tensions are especially worth investigating and discussing during co-research rather than only relying on commonalities.

#### Multifunctionality: the more, the better?

Overall, the investigated effects of the derived GI measures were rather monofunctional without documentable synergies, while potential secondary effects of the capital GI concept were beyond the scope of this study. Accordingly, other functionalities (including aesthetic, educational and biodiversity value) of the suggested GI measures were respected but less relevant for the workshop participants. This monofunctional framing of GI originated in the group consensus to advance socio-ecological equity by targeting critical GI functions such as heat mitigation and air pollution reduction. Although the proposed greening interventions at the Schulmuseum will not significantly affect thermal comfort and air pollution, unsealing procedures still contribute to the visual aspects of the location or generate educational benefits for local ecosystems. On the other hand, with every demand on additional functions of GI, the cumulative effects diminish, as not all functions serve the same beneficial objective (Hansen and Pauleit 2014). It is therefore crucial to define what kind of multifunctionality is pursued and which functions should dominate at the beginning of the workshop.

#### A matter of scale?

The geographic area of the Dortmund Marten center only covered an investigation scope of 500 m × 500 m. Since Dortmund Marten is surrounded by large agricultural sites

in the north, east, and south (Fig. 1c), the joint focus on GI interventions in the core area of Dortmund Marten is reasonable. Surprisingly, this spatial limitation turned out to be a benefit during the cooperative workshop, forcing all attendees to formulate precise and space-saving GI measures. Furthermore, the actual size of the study area made it possible to evaluate the proposed measures in ENVI-met within a reasonable computing time. Larger areas of interest would have been needed to be treated with other simulation tools at the meso-scale (Heldens et al. 2020). Thus, as a learning for city administration, the investigation scope should be as small as possible to formulate clear and cohesive measures that can induce short-term impulses for local residents. This downscaling to a small section of realistic complexity complements the conclusions of other cooperative research projects in the context of urban climate adaptation (Sieber et al. 2022). Nevertheless, city-wide or region-wide strategic documents about GI planning should be carried out and cross-referenced in parallel to be in line with long-term mission statements.

Since the proposed GI interventions are not only framed by a small group of researchers and practical experts but also tailored to the specific conditions in Dortmund Marten, the produced measures of the workshop are not one-to-one transferable to other neighborhoods. Indeed, the resulted draft GI plan is highly context specific and dependent on the backgrounds of both scientists and practitioners. On the other hand, the described simulation methods allow replication in other urban settings with similar data availability. Considering the above, especially in Dortmund, remote sensing-based modeling input generation could be applied to the whole city pattern and employed to evaluate other greening interventions in terms of public health factors.

### Limitations and risks of the transdisciplinary approach

The transdisciplinary process helped to combine unrelated knowledge with regard to a specific task by developing a strategic focus on reducing environmental burdens in a deprived neighborhood. Due to the heterogeneous spectrum of the workshop participants and the mixed working groups, decisions on GI measure placement were not dominated by a certain stakeholder group, which cannot be taken for granted regarding other transdisciplinary approaches (Hansen et al. 2021). For society, the microclimate simulation results could be utilized as an empirically validated public resource, which provides informative environmental data for complex real-world problems.

However, as transdisciplinarity is a transformation-oriented process over time periods of several years to decades, the transferability of such approaches should be treated with caution. Furthermore, in the case of ZUKUR, the time

schedule and willingness of urban planning practitioners set the pace for active collaboration. Hence, the uptake of transdisciplinary collaborations is a privilege to those who possess the personal and financial resources to conduct a mutual learning process over a longer time period. Funded research projects such as ZUKUR are always temporary and seek to achieve a specific goal, but real transdisciplinarity can only succeed if all participants also maintain a commitment to change after project funding. In the case of a typical research project funded over three years, there is always a risk that science and practice will merely enter into a 'temporary relationship', losing momentum and curiosity by the end of the project. Accordingly, the simulation results were generated after project funding and therefore not fed back with the public or representatives of the urban planning department, which is a pending limitation of this study.

It is worth noting that the draft GI plan was a legally nonbinding outcome of a cooperative research project with no real-life conflicts for the participating planning practitioners to fear, which is why the results are not comparable to traditional planning procedures. The reality is that the urban planning participants cannot represent the entire city administration and, thus, rather act as contact people than having the final political power to implement the GI ideas of the workshop. This can be a source of frustration for researchers who often expect a transfer of scientific results to the real world. In general, it is also important for scientists not to be instrumentalized by the political agenda of the city administration, which can clearly manipulate the co-research in a biased direction. Especially -but not only- for academics, fluctuations in the number of staff members should also be expected during the learning process, which requires a suitable transfer of information to every new project participant.

### Conclusion

This case study combined reflections from urban planning practitioners and academia on joint collaboration with microclimatic simulations to evaluate the strengths and challenges of transdisciplinary research projects as well as the outdoor effects of GI measures on extreme heat and air pollution in the neighborhood of Dortmund Marten.

Overall, the derived GI measures exhibited a positive effect on outdoor heat stress and building surface temperature reduction but were highly place-dependent with few synergistic effects. As a trade-off, new tree patterns in a given street canyon could increase the obstacle effect, which in turn could lead to an increase in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> concentrations. Indeed, it is recommended to plant new roadside trees at both ends of the street canyon to maintain ventilation while still decreasing thermal heat stress. After defining *what* must be accomplished and *where* this should

occur, the question arises as to which measure should be implemented by *whom* and *when*. The answer lies on the institutional side, while the validated simulation output comprises an informative resource for society and urban planners prior to GI installations at the microscale.

Based on the online survey, it turned out that certain challenges remain in knowledge integration and learning effects between science and planning practice. Furthermore, the article showed the relevance of self-reflection and joint consensus building during the concept development process, while flexibility to adapt to new viewpoints should remain high throughout the project. The focus on a small geographic area allowed the precise development of GI measures, which is recommended when working cooperatively on complex real-world problems and uncertainties.

In conclusion, the multifunctional character of GI alone cannot serve as a policy panacea for heat mitigation or air pollution reduction in urban areas. Nevertheless, the outcomes of the presented research project have demonstrated that GI can be directed as a driver for transdisciplinary co-production processes. However, the integration of these cooperative procedures in administrative and academic structures still requires great effort in communication on both sides. For the larger vision of urban resilience, new urban planning projects must focus even more proactively on a balanced mix of sustainable building materials, nature-based solutions, and experimental knowledge generation between scientists, urban planners, and the public.

**Acknowledgements** I appreciate the engagement of my co-researchers and all planning practitioners throughout the course of the research project ‘Zukunft-Stadt-Region-Ruhr’ (ZUKUR). ZUKUR was a large-scale research project between July 2017 and September 2020, comprising 10 research groups of the Department of Spatial Planning, TU Dortmund University, and three urban/regional planning committees in the Ruhr area, Germany.

**Funding** Open Access funding was enabled and organized by Project DEAL. Parts of the presented work were supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF), grant number 01LR1721A.

**Availability of data and material** The output dataset of the microclimatic simulation is made available online to support the findings of this study: <https://doi.org/10.5281/zenodo.6367504>

**Code availability** Not applicable.

## Declarations

**Ethics approval** Not applicable.

**Consent to participate** Not applicable.

**Consent for publication** Not applicable.

**Competing interests** The author has no conflicts of interest to declare that are relevant to the content of this article.

**Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

## References

- Abhijith KV, Kumar P, Gallagher J, McNabola A, Baldauf R, Pilla F, Broderick B, Di Sabatino S, Pulvirenti B (2017) Air pollution abatement performances of green infrastructure in open road and built-up street canyon environments – a review. *Atmos Environ* 162:71–86. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.014>
- Aboelata A (2021) Assessment of green roof benefits on buildings' energy-saving by cooling outdoor spaces in different urban densities in arid cities. *Energy* 219:119514. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119514>
- Ali-Toudert F, Mayer H (2006) Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Build Environ* 41:94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- Anguelovski I, Connolly JJT, Garcia-Lamarca M, Cole H, Pearsall H (2019) New scholarly pathways on green gentrification: What does the urban ‘green turn’ mean and where is it going? *Prog Hum Geogr* 43:1064–1086. <https://doi.org/10.1177/0309132518803799>
- Balany F, Ng AWM, Muttill N, Muthukumaran S, Wong MS (2020) Green infrastructure as an urban heat island mitigation strategy—a review. *Water* 12:3577. <https://doi.org/10.3390/w12123577>
- Barthel S, Folke C, Colding J (2010) Social–ecological memory in urban gardens—retaining the capacity for management of ecosystem services. *Glob Environ Chang* 20:255–265. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.001>
- Benedict MA, McMahon E (2006) *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press, Washington, DC
- Berardi U (2016) The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings* 121:217–229. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.021>
- Berndtsson JC (2010) Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: a review. *Ecol Eng* 36:351–360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- Bruse M, Fleer H (1998) Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environ Model Softw* 13:373–384. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(98\)00042-5](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(98)00042-5)
- Byrne LB (2022) Ecology with cities. *Urban Ecosyst*. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01185-5>
- Chang JC, Hanna SR (2004) Air quality model performance evaluation. *Meteorol Atmos Phys*. <https://doi.org/10.1007/s00703-003-0070-7>
- Cook EM, Berbés-Blázquez M, Mannetti LM, Grimm NB, Iwaniec DM, Muñoz-Erickson TA (2021) Setting the Stage for Co-Production. In: Hamstead ZA, Iwaniec DM, McPhearson T, Berbés-Blázquez M, Cook EM, Muñoz-Erickson TA (eds) *Resilient urban futures*. Springer International Publishing, Cham, pp 99–111
- Coomes E, Jones AP, Hillsdon M (2010) The relationship of physical activity and overweight to objectively measured green space

- accessibility and use. *Soc Sci Med* 70:816–822. <https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2009.11.020>
- Demuzere M, Orru K, Heidrich O, Olazabal E, Geneletti D, Orru H, Bhawe AG, Mittal N, Feliu E, Faehnle M (2014) Mitigating and adapting to climate change: Multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *J Environ Manage* 146:107–115. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>
- Fairburn J, Butler B, Smith G (2009) Environmental justice in South Yorkshire: Locating social deprivation and poor environments using multiple indicators. *Local Environ* 14:139–154. <https://doi.org/10.1080/13549830802522038>
- Folke C, Carpenter SR, Walker B, Scheffer M, Chapin T, Rockström J (2010) Resilience thinking: Integrating resilience, adaptability and transformability. *Ecol Soc* 15
- Glatter-Götz H, Mohai P, Haas W, Plutzer C (2019) Environmental inequality in Austria: Do inhabitants' socioeconomic characteristics differ depending on their proximity to industrial polluters? *Environ Res Lett* 14:74007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1611>
- Gromke C, Ruck B (2012) Pollutant concentrations in street canyons of different aspect ratio with avenues of trees for various wind directions. *Boundary-Layer Meteorol* 144:41–64. <https://doi.org/10.1007/s10546-012-9703-z>
- Hamstead ZA, Sauer J (2021) Mapping vulnerability to weather extremes: Heat and flood assessment approaches. In: Hamstead ZA, Iwaniec DM, McPhearson T, Berbés-Blázquez M, Cook EM, Muñoz-Erickson TA (eds) *Resilient urban futures*. Springer International Publishing, Cham, pp 47–66
- Hansen R, Pauleit S (2014) From multifunctionality to multiple ecosystem services? A conceptual framework for multifunctionality in green infrastructure planning for urban areas. *Ambio* 43:516–529. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0510-2>
- Hansen R, van Lierop M, Rolf W, Gantar D, Šuklje Erjavec I, Rall EL, Pauleit S (2021) Using green infrastructure to stimulate discourse with and for planning practice: Experiences with fuzzy concepts from a pan-European, a national and a local perspective. *Socio Ecol Pract Res* 3:257–280. <https://doi.org/10.1007/s42532-021-00087-2>
- He B-J, Ding L, Prasad D (2019) Enhancing urban ventilation performance through the development of precinct ventilation zones: a case study based on the Greater Sydney, Australia. *Sustain Cities Soc* 47:101472. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101472>
- Heldens W, Burmeister C, Kanani-Sühring F, Maronga B, Pavlik D, Sühring M, Zeidler J, Esch T (2020) Geospatial input data for the PALM model system 6.0: Model requirements, data sources, and processing
- Home R, Bauer N (2021) Researchers working with city administrations: Reflecting on transdisciplinary collaboration under conditions of shared goals but different constraints. *Urban Ecosyst*. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01146-y>
- Hoover F-A, Meerow S, Grabowski ZJ, McPhearson T (2021) Environmental justice implications of siting criteria in urban green infrastructure planning. *J Environ Pol Plan* 1–18. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1945916>
- IPCC (2021) Summary for policymakers. In: V Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (ed) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press
- Keith L, Meerow S, Wagner T (2020) Planning for extreme heat: a review. *J Extreme Events* 6:1–27
- Koc CB, Osmond P, Peters A (2018) Evaluating the cooling effects of green infrastructure: a systematic review of methods, indicators and data sources. *Sol Energy* 166:486–508. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.03.008>
- Lakes T, Brückner M, Krämer A (2013) Development of an environmental justice index to determine socio-economic disparities of noise pollution and green space in residential areas in Berlin. *J Environ Planning Manage* 57:538–556. <https://doi.org/10.1080/09640568.2012.755461>
- Liu Z, Xiu C, Ye C (2020) Improving urban resilience through green infrastructure: an integrated approach for connectivity conservation in the Central City of Shenyang, China. *Complexity* 2020:1–15. <https://doi.org/10.1155/2020/1653493>
- Liu Z, Cheng W, Jim CY, Morakinyo TE, Shi Y, Ng E (2021) Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: a systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. *Build Environ* 200:107939. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939>
- Mansor M, Said I, Mohamad I (2012) Experiential contacts with green infrastructure's diversity and well-being of urban community. *Procedia Soc Behav Sci* 49:257–267. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.07.024>
- Matthews T, Lo AY, Byrne JA (2015) Reconceptualizing green infrastructure for climate change adaptation: Barriers to adoption and drivers for uptake by spatial planners. *Landsc Urban Plan* 138:155–163. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.010>
- Matzarakis A, Amelung B (2008) Physiological equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. In: Thomson MC, Garcia-Herrera R, Beniston M (eds) *Seasonal forecasts, climatic change and human health*, vol 92. Springer, Netherlands, Dordrecht, pp 161–172
- Meerow S (2020) The politics of multifunctional green infrastructure planning in New York City. *Cities* 100:102621. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102621>
- Meerow S, Helmrich AM, Andrade R, Larson KL (2021) How do heat and flood risk drive residential green infrastructure implementation in Phoenix, Arizona? *Urban Ecosyst*. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01088-x>
- Morakinyo TE, Dahanayake K, Ng E, Chow CL (2017) Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: a co-simulation parametric study. *Energy and Buildings* 145:226–237. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.066>
- Müller N, Kuttler W, Barlag A-B (2014) Counteracting urban climate change: Adaptation measures and their effect on thermal comfort. *Theor Appl Climatol* 115:243–257. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0890-4>
- Ohlmeyer K, Schaefer M, Kirstein M, Gruehn D, Greiving S (2022) Introducing environmental-justice analysis into urban planning practices in the city of Bottrop, Germany. *Town Planning Review* 93:187–210. <https://doi.org/10.3828/tpr.2021.20>
- Paas B, Schneider C (2016) A comparison of model performance between ENVI-met and AUSTAL 2000 for particulate matter. *Atmos Environ* 145:392–404. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.031>
- Paavola J, Adger WN (2006) Fair adaptation to climate change. *Ecol Econ* 56:594–609. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2005.03.015>
- Pagliacci F, Russo M (2020) Be (and have) good neighbours! Factors of vulnerability in the case of multiple hazards. *Ecol Ind* 111:105969. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105969>
- Pickett STA, Cadenasso ML, Rademacher AM (2021) Coproduction of place and knowledge for ecology with the city. *Urban Ecosyst*. <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01190-8>
- Puntub W, Schnittfinke T, Fleischhauer M, Birkmann J, Garschagen M, Sandholz S, Wannowitz M (2022) Linking science and practice in participatory future-oriented assessment and planning of human heat stress vulnerability in Bonn, Germany. *J*

- Environ Plan Manag 1–20. <https://doi.org/10.1080/09640568.2022.2043260>
- Rahman MA, Stratopoulos LM, Moser-Reischl A, Zölch T, Häberle K-H, Rötzer T, Pretzsch H, Pauleit S (2020) Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis. *Build Environ* 170:106606. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>
- Regionalverband Ruhr (2019) Klimaanalyse Stadt Dortmund. [https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads\\_umweltamt/klimafolgenanpassung/Klimaanalyse\\_Stadt\\_Dortmund\\_Oktober-2019\\_WEB.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/umweltamt/downloads_umweltamt/klimafolgenanpassung/Klimaanalyse_Stadt_Dortmund_Oktober-2019_WEB.pdf). Accessed 23 May 2021
- Regionalverband Ruhr (2022) Gründachkataster. <https://www.rvr.ruhr/themen/oekologie-umwelt/startseite-klima/gruendachkataster/>. Accessed 23 Jun 2022
- Rui L, Buccolieri R, Gao Z, Gatto E, Ding W (2019) Study of the effect of green quantity and structure on thermal comfort and air quality in an urban-like residential district by ENVI-met modelling. *Build Simul* 12:183–194. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0498-9>
- Rüttenauer T (2018) Neighbours matter: a nation-wide small-area assessment of environmental inequality in Germany. *Soc Sci Res* 70:198–211. <https://doi.org/10.1016/j.ssresearch.2017.11.009>
- Schaefer M, Thinh NX, Greiving S (2020) How can climate resilience be measured and visualized? Assessing a vague concept using GIS-based Fuzzy logic. *Sustainability* 12:635. <https://doi.org/10.3390/su12020635>
- Schaefer M, Ebrahimi Salari H, Köckler H, Thinh NX (2021) Assessing local heat stress and air quality with the use of remote sensing and pedestrian perception in urban microclimate simulations. *Sci Total Environ* 794:148709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148709>
- Scholz RW, Steiner G (2015) The real type and ideal type of transdisciplinary processes: Part II—what constraints and obstacles do we meet in practice? *Sustain Sci* 10:653–671. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0327-3>
- Shao H, Kim G, Li Q, Newman G (2021) Web of science-based green infrastructure: a bibliometric analysis in CiteSpace. *Land* 10:711. <https://doi.org/10.3390/land10070711>
- Shrestha R, Flacke J, Martinez J, van Maarseveen M (2016) Environmental health related socio-spatial inequalities: Identifying “Hotspots” of environmental burdens and social vulnerability. *Int J Environ Res Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph13070691>
- Shrestha R, Flacke J, Martinez J, van Maarseveen M (2018) Interactive cumulative burden assessment: Engaging stakeholders in an adaptive, participatory and transdisciplinary approach. *Int J Environ Res Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph15020260>
- Sieber R, Faulenbach L, Fuchs M, Gülleken L (2022) The challenges of co-research in labs in real-world contexts: empirical findings from four labs in the context of urban climate-change research. *Town Plan Rev* 93:139–163. <https://doi.org/10.3828/tpr.2021.24>
- Stadt Dortmund (2019) Statistikatlas: Dotmunder Statistik 2019. [https://www.dortmund.de/media/p/statistik/pdf\\_statistik/veroeffentlichungen/statistikatlas/215\\_-\\_Statistikatlas\\_-\\_2019.pdf](https://www.dortmund.de/media/p/statistik/pdf_statistik/veroeffentlichungen/statistikatlas/215_-_Statistikatlas_-_2019.pdf). Accessed 26 Jun 2020
- 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. *Comput Environ Urban Syst* 89:101687. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbysys.2021.101687>
- Tsoka S, Tsikaloudaki A, Theodosiou T (2018) Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—a review. *Sustain Cities Soc* 43:55–76. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.08.009>
- United Nations (2015) Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Accessed 4 Oct 2020
- Verdú-Vázquez A, Fernández-Pablos E, Lozano-Diez RV, López-Zaldívar Ó (2020) Green space networks as natural infrastructures in PERI-URBAN areas. *Urban Ecosyst* 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01019-w>
- Wang J, Rienow A, David M, Albert C (2021) Green infrastructure connectivity analysis across spatiotemporal scales: a transferable approach in the Ruhr Metropolitan Area, Germany. *Sci Total Environ* 813:152463. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152463>
- Willmott CJ (1981) On the validation of models. *Phys Geogr* 2:184–194. <https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213>
- Xue J, Gui D, Lei J, Sun H, Zeng F, Mao D, Zhang Z, Jin Q, Liu Y (2019) Oasis microclimate effects under different weather events in arid or hyper arid regions: a case analysis in southern Taklimakan desert and implication for maintaining oasis sustainability. *Theor Appl Climatol* 137:89–101. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2567-5>
- Zhang G, He B-J, Zhu Z, Dewancker BJ (2019) Impact of morphological characteristics of green roofs on pedestrian cooling in subtropical climates. *Int J Environ Res Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph16020179>
- Zheng B, Bernard BEDRAK, Zheng J, Wang G (2018) Combination of tree configuration with street configuration for thermal comfort optimization under extreme summer conditions in the urban center of Shantou City, China. *Sustain* 10:4192. <https://doi.org/10.3390/su10114192>





# Weitere Publikationen

Der Autor hat zu den folgenden referierten Zeitschriftenartikeln beigetragen, die zwar im Zusammenhang mit dem Dissertationsthema stehen, jedoch von geringerer Bedeutung für das eigene Forschungsvorhaben sind:

1. Kirstein, M., Schaefer, M., Schnittfinke, T., Greiving, S., und Küsters, R. (2022). Impacts of river flooding on urban agglomerations: a climate-impact analysis and the role of strategic planning for the Ruhr, Germany. *Town Planning Review*, 93(2):165–185
2. Ohlmeyer, K., Schaefer, M., Kirstein, M., Gruehn, D., und Greiving, S. (2022). Introducing environmental-justice analysis into urban planning practices in the city of Bottrop, Germany. *Town Planning Review*, 93(2):187–210

Unter der [Creative Commons \(CC-BY\) 4.0 Lizenz](#) veröffentlicht.