

# Stadtklimaanalyse Bremen

## Teil A – Ergebnisse und Planungshinweise



2024



## Auftraggeberin

## Auftragnehmerin

---

### Freie Hansestadt Bremen

Die Senatorin für Umwelt, Klima  
und Wissenschaft  
An der Reeperbahn 2  
28217 Bremen



### GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a  
30161 Hannover  
Tel: (0511) 388 72-00  
[www.geo-net.de](http://www.geo-net.de)





# Inhaltsverzeichnis

|  |            |
|--|------------|
| <b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>  | <b>II</b>  |
| <b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....</b>   | <b>III</b> |
| <b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>   | <b>V</b>   |
| <b>0. INHALT UND AUFBAU .....</b>  | <b>1</b>   |
| <b>1. MODELLERGEBNISSE .....</b>   | <b>2</b>   |
| 1.1 NACHTSITUATION .....   | 3          |
| 1.1.1 <i>Nächtliches Temperaturfeld</i> .....  | 3          |
| 1.1.2 <i>Kaltluft</i> .....  | 8          |
| 1.2 TAGSITUATION .....   | 12         |
| 1.2.1 <i>Einfluss einer zunehmenden Trockenheit auf die Wärmebelastung am Tage</i> ..... | 18         |
| <b>2. KLIMAANALYSEKARTEN .....</b>   | <b>20</b>  |
| <b>3. GRUNDLAGEN ZU DEN BEWERTUNGSKARTEN UND ZUR PLANUNGSHINWEISKARTE .....</b>          | <b>25</b>  |
| 3.1 HINTERGRUND .....  | 25         |
| 3.2 GEOMETRISCHE BASIS .....   | 26         |
| <b>4. BEWERTUNGSKARTEN .....</b>   | <b>28</b>  |
| 4.1 BEWERTUNGSMETHODIK DER NACHTSITUATION .....  | 28         |
| 4.1.1 <i>Wirkraum</i> .....  | 28         |
| 4.1.2 <i>Ausgleichsraum</i> .....  | 30         |
| 4.1.3 <i>Weiterer Karteninhalt</i> .....   | 31         |
| 4.2 BEWERTUNGSMETHODIK DER TAGSITUATION .....  | 32         |
| 4.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN .....  | 32         |
| <b>5. PLANUNGSHINWEISKARTE .....</b>   | <b>40</b>  |
| 5.1 METHODIK FÜR WIRKRAUM UND AUSGLEICHSRAUM .....                                       | 40         |
| 5.2 ERGEBNISSE PLANUNGSHINWEISKARTE .....  | 46         |
| 5.3 MAßNAHMENKATALOG STADTKLIMA .....  | 49         |
| <b>6. STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM .....</b>   | <b>65</b>  |
| <b>QUELLENVERZEICHNIS .....</b>  | <b>66</b>  |
| <b>GLOSSAR .....</b>   | <b>67</b>  |



# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR FÜR DIE REFERENZSITUATION. .... 4

ABBILDUNG 2: ZOOM AUF DIE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR FÜR DIE IST-SITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL RCP8.5\_2085). .... 6

ABBILDUNG 3: ZOOM AUF DIE ÜBERSEESTADT UND WOLTMERSHAUSEN. DIFFERENZEN DER NÄCHTLICHEN LUFTTEMPERATUR ZWISCHEN DEN ZUKUNFTSSZENARIEN UND DER REFERENZSITUATION. NEGATIVE WERTE BEDEUTEN EINE TEMPERATURABNAHME, POSITIVE WERTE EINE TEMPERATURZUNAHME. AUßERHALB DER STADTENTWICKLUNGSFLÄCHEN WIRD EINE GLEICHMÄßIGE TEMPERATURZUNAHME IM STADTGEBIET DEUTLICH. INNERHALB DER STADTENTWICKLUNGSFLÄCHEN FÜHRT DIE NUTZUNGSÄNDERUNG ZU EINER VERSTÄRKTEN ODER ABGESCHWÄCHTEN TEMPERATURZUNAHME. ÜBER EINIGEN GEPLANTEN PARKFLÄCHEN WIRD LANGFRISTIG AUCH EINE ABKÜHLUNG ERREICHT..... 7

ABBILDUNG 4:PRINZIPIKIZZE KALTLUFTVOLUMENTSTROM. .... 8

ABBILDUNG 5: KALTLUFTVOLUMENSTROM FÜR DIE REFERENZSITUATION. .... 9

ABBILDUNG 6: ZOOM AUF DIE ÜBERSEESTADT UND WOLTMERSHAUSEN. DIFFERENZEN DES NÄCHTLICHEN KALTLUFTVOLUMENSTROMS ZWISCHEN DEN ZUKUNFTSSZENARIEN UND DER REFERENZSITUATION. NEGATIVE WERTE BEDEUTEN EINE ABNAHME, POSITIVE WERTE EINE ZUNAHME. VERÄNDERUNGEN SIND VOR ALLEM IM UNMITTELBAREN BEREICH DER STADTENTWICKLUNGSFLÄCHEN SICHTBAR, DIE DURCH NEU ERRICHTETE GEBÄUDE DIE STRÖMUNGSDYNAMIK DER KALTLUFT MODIFIZIEREN. .... 11

ABBILDUNG 7: WÄRMEBELASTUNG IN DER REFERENZSITUATION. .... 13

ABBILDUNG 8: WÄRMEBELASTUNG DER REFERENZSITUATION. ZOOM AUF DIE ALTSTADT UND WALLANLAGEN SOWIE AUF DIE NEUSTADT. .... 14

ABBILDUNG 9: ZOOM AUF DEN INNERSTÄDTISCHEN BEREICH. PET FÜR DIE IST-SITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 16

ABBILDUNG 10: ZOOM AUF DIE ÜBERSEESTADT UND WOLTMERSHAUSEN. DIFFERENZEN DER PET ZWISCHEN DEN ZUKUNFTSSZENARIEN UND DER REFERENZSITUATION. NEGATIVE WERTE BEDEUTEN EINE ABNAHME, POSITIVE WERTE EINE ZUNAHME..... 17

ABBILDUNG 11: EFFEKT EINER ZUNEHMENDEN TROCKENHEIT IM ZUGE DES KLIMAWANDELS ANHAND DER DIFFERENZ DER PET ZWISCHEN DEN ZUKUNFTSSZENARIEN TRRCP4.5\_2050 UND RCP4.5\_2050. POSITIVE WERTE BEDEUTEN EINE ZUNAHME, NEGATIVE WERTE EINE ABNAHME DER PET..... 18

ABBILDUNG 12: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN..... 21

ABBILDUNG 13: AUSSCHNITT DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE IST-SITUATION. .... 23

ABBILDUNG 14: ZOOM AUF DIE KLIMAANALYSEKARTEN DER IST-SITUATION UND DER ZUKUNFTSSZENARIEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 24

ABBILDUNG 15: LINKS DIE RASTERBASIERTE MODELLERGEBNISSE UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE (BEISPIEL NICHT AUS BREMEN)..... 27

ABBILDUNG 16:VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) ..... 29

ABBILDUNG 17: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IN DER NACHT AUF BASIS DER LUFTTEMPERATUR. DIE KLASSENGRENZEN DER KLASSEN „GÜNSTIG“ BIS „UNGÜNSTIG“ WURDEN AUF BASIS DER STATISTISCHEN VERTEILUNG DER WERTE AUS DEM IST-SZENARIO UND DEM ZUKUNFTSSZENARIO RCP4.5\_2050



ABGELEITET. DIE KLASSENGRENZEN DER KLASSEN „SEHR UNGÜNSTIG“ UND „EXTREM UNGÜNSTIG“ WURDEN AUS DER STATISTISCHEN WERTEVERTEILUNG AUS SZENARIO RCP8.5\_2085 ABGELEITET UND SIND NUR FÜR DIESES SZENARIO RELEVANT. .... 30

ABBILDUNG 18: BEWERTUNGSGRUNDLAGEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM/DIE GRÜNFLÄCHEN (GF) IN DER NACHT. 31

ABBILDUNG 19: LEGENDENSYMBOL DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM. .... 31

ABBILDUNG 20: BEWERTUNGSKLASSEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION AM TAGE FÜR WIRKRAUM UND AUSGLEICHSPAUM. .... 32

ABBILDUNG 21: ZOOM AUF DIE BEWERTUNGSKARTEN NACHT DER IST-SITUATION UND DER ZUKUNFTSSZENARIOEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 34

ABBILDUNG 22: STATISTIKEN FÜR DEN WIRKRAUM IN DER NACHT. PROZENTUALE VERTEILUNG DER BEWERTUNGSKLASSEN FÜR DIE IST-SITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIOEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 35

ABBILDUNG 23: STATISTIKEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM IN DER NACHT. PROZENTUALE VERTEILUNG DER BEWERTUNGSKLASSEN FÜR DIE IST-SITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIOEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 36

ABBILDUNG 24: ZOOM AUF DIE BEWERTUNGSKARTEN TAG DER IST-SITUATION UND DER ZUKUNFTSSZENARIOEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 38

ABBILDUNG 25: STATISTIKEN FÜR DEN WIRKRAUM AM TAGE. PROZENTUALE VERTEILUNG DER BEWERTUNGSKLASSEN FÜR DIE IST-SITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIOEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 39

ABBILDUNG 26: STATISTIKEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM AM TAGE. PROZENTUALE VERTEILUNG DER BEWERTUNGSKLASSEN FÜR DIE IST-SITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIOEN DER NAHEN ZUKUNFT (MITTLERER KLIMAWANDEL, RCP4.5\_2050) UND DER FERNEN ZUKUNFT (SCHWACHER KLIMAWANDEL, RCP2.6\_2085 UND STARKER KLIMAWANDEL, RCP8.5\_2085). .... 39

ABBILDUNG 27: EINORDNUNG DES WIRKRAUMS: VERKNÜPFUNG DER TAG- UND NACHTBEWERTUNG. .... 41

ABBILDUNG 28: EINORDNUNG DES AUSGLEICHSPAUMS: VERKNÜPFUNG DER TAG- UND NACHTBEWERTUNG. .... 43

ABBILDUNG 29: SYMBOLOGIE ZUR BESCHREIBUNG EINER VERÄNDERTEN BEDEUTUNG IM ZUGE DES KLIMAWANDELS. .... 45

ABBILDUNG 30: STATISTIK ZUR PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR DEN WIRK- UND AUSGLEICHSPAUM. .... 46

ABBILDUNG 31: AUSSCHNITT DER PLANUNGSHINWEISKARTE. .... 48

ABBILDUNG 32: GIS-PROJEKT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE MIT AUSZUG AUS DER BASISGEOMETRIE (RECHTS). .... 65



## Tabellenverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| TABELLE 1: ÜBERSICHT ÜBER DIE MODELLSZENARIEN.....   | 2  |
| TABELLE 2: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN<br>(NACH VDI 2004). .....      | 12 |
| TABELLE 3: LEGENDEN-ELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN<br>KLIMAANALYSEKARTEN. .... | 22 |
| TABELLE 4: DEFINITION DER HANDLUNGSBEDARFE FÜR DEN WIRKRAUM. ....  | 41 |
| TABELLE 5: DEFINITION DER BEDEUTUNGSKLASSEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM. ....   | 44 |
| TABELLE 6: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT BREMEN.                            | 53 |



## 0. Inhalt und Aufbau

Der Bericht zur Stadtklimaanalyse Bremen gliedert sich in zwei Teile A und B. Der vorliegende **Teil A** konzentriert sich auf die Darstellung und Beschreibung der Ergebnisse der Modellanalyse. Neben den simulierten Klimaparametern werden darauf aufbauende Kartenprodukte gezeigt und erläutert. Diese fügen den Modellergebnissen eine Bewertungsebene hinzu und formulieren Planungshinweise. Darüber hinaus bietet ein Maßnahmenkatalog einen Überblick über Möglichkeiten der konkreten Ausgestaltung.

Für weitere fachliche Hintergrundinformationen, sowie zur Herleitung der Rahmenbedingungen, die der Modellanalyse zugrunde liegen, kann **Teil B** herangezogen werden.



# 1. Modellergebnisse

Die Modellergebnisse werden für die Ist-Situation (Referenzsituation) sowie für die verschiedenen Zukunftsszenarien dargestellt. Eine Übersicht über die verschiedenen Zeithorizonte und die damit verbundenen Rahmenbedingungen innerhalb der Modellrechnung zeigt Tabelle 1. Weitere Details zu den Szenarien liefert der Berichtsteil B in den Kapiteln 5.2 und 5.3.

Tabelle 1: Übersicht über die Modellszenarien.

| Szenario             | Betrachteter Zeitraum  | Stadtstruktur  | Starttemperatur des Modells | Starttemperatur Wasser |
|----------------------|--|--|-----------------------------|------------------------|
| <b>Ist-Situation</b> | Heutiges Klima   | Heutige Stadtstruktur  | 21,2 °C                     | 20,7 °C                |
| <b>RCP4.5_2050</b>   | RCP 4.5 für die nahe Zukunft (Mitte: 2050)                             | Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen | 22,8 °C                     | 21,5 °C                |
| <b>trRCP4.5_2050</b> | RCP 4.5 für die nahe Zukunft (Mitte: 2050) mit zunehmender Trockenheit | Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen | 22,8 °C                     | 21,5 °C                |
| <b>RCP2.6_2085</b>   | RCP 2.6 für die ferne Zukunft (Mitte: 2085)                            | Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen | 22,0 °C                     | 21,1 °C                |
| <b>RCP8.5_2085</b>   | RCP 8.5 für die ferne Zukunft (Mitte: 2085)                            | Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen | 25,8 °C                     | 23,0 °C                |

Für die verschiedenen Szenarien werden diverse rasterbasierte Parameter ausgegeben, die die Nacht- und Tagsituation beschreiben:

Nachtsituation um 04 Uhr (maximale Abkühlung)

- Lufttemperatur in 2 m ü. Gr.
- Strömungsfeld in 2 m ü. Gr.
- Kaltluftvolumenstrom

Tagsituation um 14 Uhr (maximale Einstrahlung)

- Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in 1,1 m ü. Gr.

Alle Parameter werden für die verschiedenen Szenarien ausgegeben und dargestellt. Eine Ausnahme bildet lediglich das Szenario trRCP4.5\_2050. Dieses unterscheidet sich von Szenario RCP4.5\_2050 ausschließlich in der angenommenen Bodenfeuchte, da hierdurch eine zunehmende Trockenheit abgebildet werden soll. Die Unterschiede zwischen diesen beiden Szenarien werden nur in der PET deutlich, weshalb für dieses Szenario allein die Tagsituation betrachtet wird.



Die einzelnen Parameter und die zugehörigen Karten werden im Folgenden erläutert. Alle Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert). Die meteorologischen Rahmenbedingungen sind durch eine autochthone Wetterlage gekennzeichnet (für mehr Informationen siehe Kapitel 4 in Teil A). Die Klassenschritte in den Farblegenden wurden so gewählt, dass die Unterschiede innerhalb der Stadt möglichst gut zur Geltung kommen.

## 1.1 NACHTSITUATION

Während der Nacht spielen Ausgleichsströmungen eine wichtige Rolle, indem sie kühlere Luft aus der Umgebung in die Stadt hineintransportieren. Sie entstehen aufgrund von Temperatur- und Geländeunterschieden. Weitere Informationen liefert das Kapitel 2 in Berichtsteil A. Die relevanten Parameter für die Beschreibung der Nachtsituation werden folgend beschrieben.

### 1.1.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb städtischer Bereiche bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung etwa in den Planungshinweiskarten auf diesen beruht.

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Bremer Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. Abbildung 1 zeigt die nächtlichen Lufttemperaturen für das gesamte Stadtgebiet für die Ist-Situation. So liegt die nächtliche bodennahe Lufttemperatur in der Ist-Situation bei Minimalwerten von etwa 12 °C über Freiflächen wie den siedlungsfernen landwirtschaftlichen Flächen sowie den Freiflächen im Bürgerpark. Gebiete mit dichtem Baumbewuchs, wie die Waldflächen in Bremen Nord, oder auch im Bürgerpark zeigen Temperaturen von 14,5 bis 17,1 °C. Sie kühlen in der Nacht aufgrund der Abschirmung durch das Kronendach nicht so stark aus wie die Acker- und Wiesenflächen. Deutlich höhere Werte von 19,2 °C werden

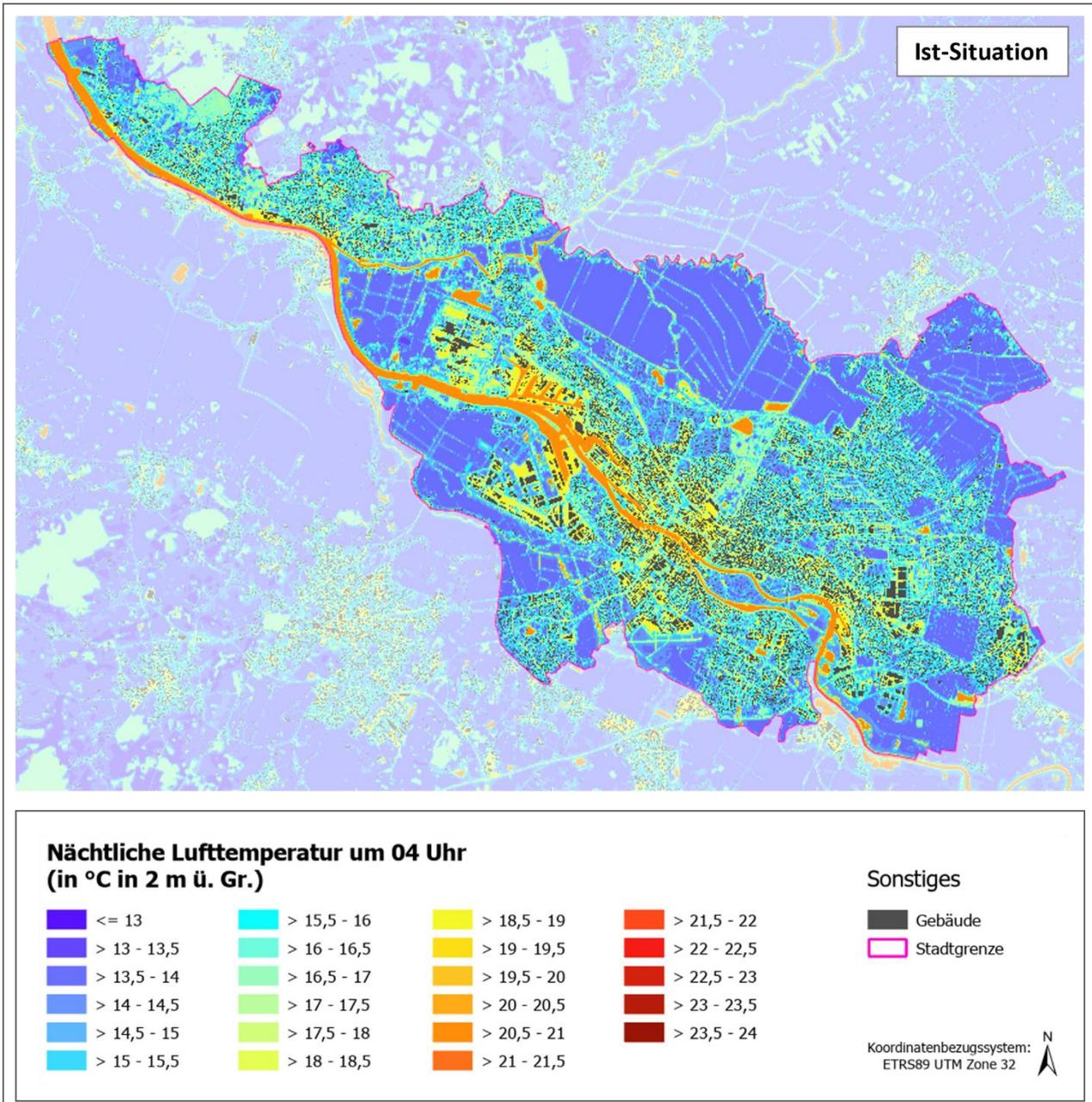


Abbildung 1: Nächtliche Lufttemperatur für die Referenzsituation.

über stark versiegelten Bereichen, wie beispielsweise der Altstadt oder Gewerbeflächen erreicht. Aufgebrochen wird diese Situation durch kleinräumige entsiegelte Bereiche, wie beispielsweise im Bibelgarten des Doms oder in den entsiegelten Hinterhöfen der Neustadt.

Areale mit aufgelockelter Bebauung und einem geringeren Versiegelungsgrad (z. B. Schwachhausen und Vege-sack) weisen geringere Temperaturen von bis zu etwa 17 °C auf. Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen geringen Tagesgang der Wassertemperatur. Dieser beeinflusst folglich auch die darüber liegende 2 m-Lufttemperatur, die sich am Tage und in der Nacht vergleichsweise konstant verhält.

Im Stadtgebiet liegt die Temperaturspannweite in der Nacht bei 9 K. Die mittlere Temperatur der Stadt liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 14,9 °C. Die Modellrechnung zeigt



den typischen Wärmeinseleffekt (Kapitel 2 in Teil B) und erlaubt darüber hinaus eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Aufgrund des in den Modellrechnungen angenommenen Klimawandels ist in den Zukunftsszenarien mit erhöhten Temperaturen zu rechnen. Das Szenario RCP4.5\_2050 erwartet bis zum Jahr 2050 eine Temperaturerhöhung von 1,6 °C im Vergleich zur Referenzperiode. Die Szenarien RCP2.6\_2085 und RCP8.5\_2085 erwarten bis zum Jahr 2085 eine Temperaturerhöhung von 0,8 °C bzw. 4,6 °C. Die Szenarien sind in Abbildung 2 in Vergleich zur Ist-Situation dargestellt. Während im Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 nun Werte zwischen 13 und etwa 22 °C im Stadtgebiet erreicht werden, steigen die Temperaturen im Szenario RCP8.5\_2085 auf Werte von etwa 16 bis 24 °C in der Nacht. Die klimawandelbedingte Erwärmung zeigt sich gleichermaßen stark auf den Siedlungsflächen wie auf den Grün- und Landwirtschaftsflächen, wodurch er Wärmeinseleffekt auch in den Zukunftsszenarien unverändert bestehen bleibt.

Werden die Differenzen zwischen den Modellrechnungen der Ist-Situation und der Zukunftsszenarien betrachtet, wird die gleichmäßige Temperaturzunahme im Zuge des Klimawandels im Stadtgebiet deutlich. Ausnahmen bilden die Stadtentwicklungsflächen, die in den Zukunftsszenarien einer Nutzungsänderung unterliegen. Durch die baulichen Entwicklungen unterliegen diese Flächen einer veränderten Temperaturentwicklung. Abbildung 3 stellt diese Differenzen dar. Abhängig von der Art der städtischen Entwicklung innerhalb der Plangebiete führt der Klimawandel in diesen Bereichen zu einer abgeschwächten oder verstärkten Temperaturzunahme, oder sogar zu einer Temperaturabnahme. So werden die Bereiche der geplanten Parkflächen auf der Überseeinsel in den Zukunftsszenarien als entsiegelt angenommen, was dazu führt, dass sie sich zukünftig deutlich stärker während der Nacht abkühlen als die hochversiegelten Flächen der derzeitigen Situation. In den modellierten Zukunftsszenarien RCP4.5\_2050 und RCP2.6\_2085 ist diese Abkühlung stärker als die Temperaturerhöhung im Zuge des Klimawandels, was dazu führt, dass die geplanten Parkflächen auch langfristig niedrigere nächtliche Temperaturen aufweisen als derzeit. Im Zukunftsszenario RCP8.5\_2085, welches eine sehr starke Klimaveränderung betrachtet, übersteigt das Klimadelta den Abkühleffekt, jedoch ist die Erwärmung auf den geplanten Parkflächen deutlich vermindert im Vergleich zum restlichen Stadtgebiet. Eine zusätzliche Versiegelung führt hingegen zu einer verstärkten Temperaturzunahme im Zuge des Klimawandels.

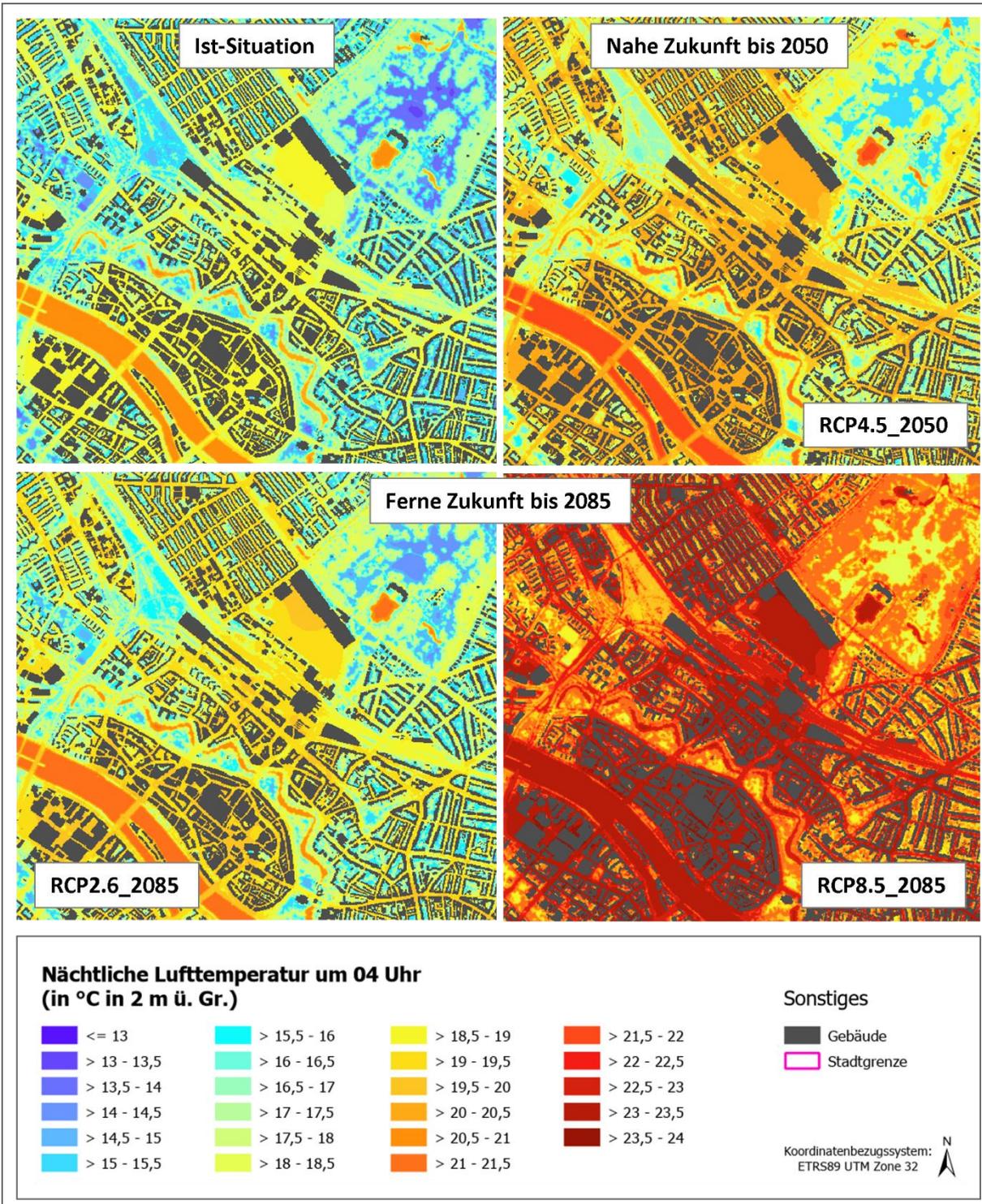


Abbildung 2: Zoom auf die nächtliche Lufttemperatur für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel RCP8.5\_2085).

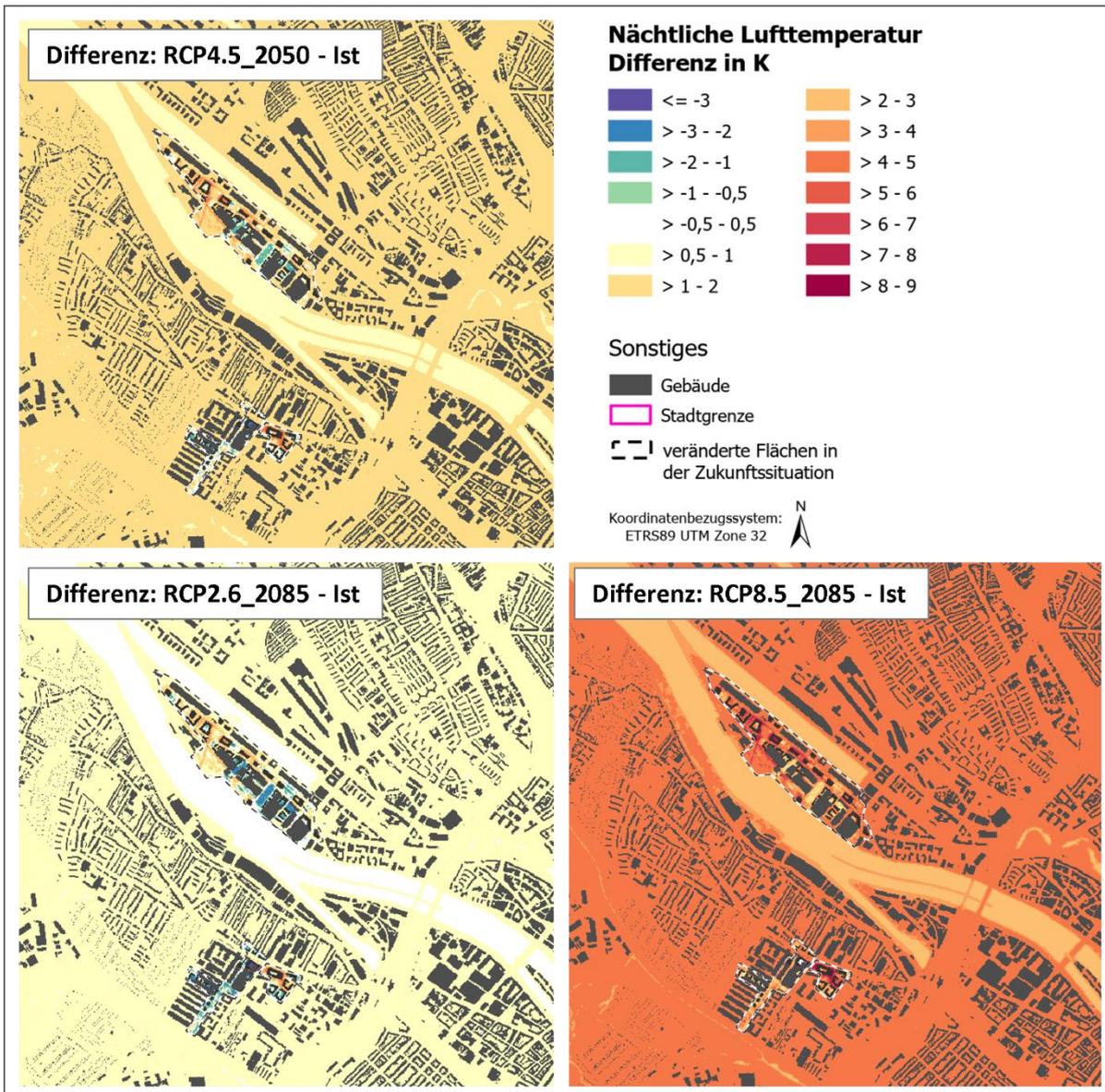


Abbildung 3: Zoom auf die Überseestadt und Woltmershausen. Differenzen der nächtlichen Lufttemperatur zwischen den Zukunftsszenarien und der Referenzsituation. Negative Werte bedeuten eine Temperaturabnahme, positive Werte eine Temperaturzunahme. Außerhalb der Stadtentwicklungsflächen wird eine gleichmäßige Temperaturzunahme im Stadtgebiet deutlich. Innerhalb der Stadtentwicklungsflächen führt die Nutzungsänderung zu einer verstärkten oder abgeschwächten Temperaturzunahme. Über einigen geplanten Parkflächen wird langfristig auch eine Abkühlung erreicht.



### 1.1.2 KALTLUFT

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere stadtplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung des Stadtkörpers herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

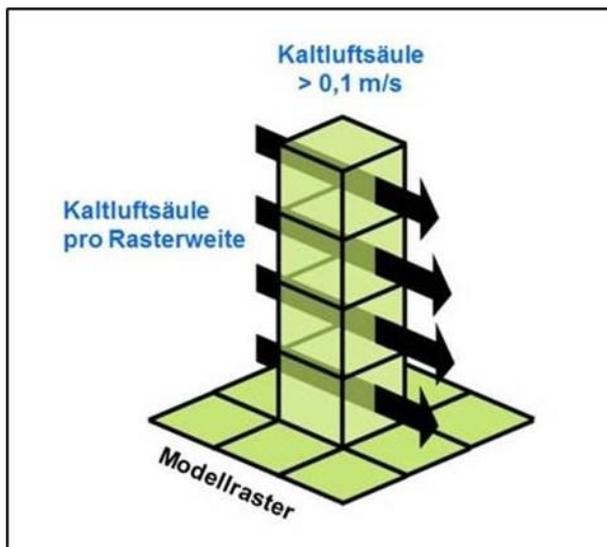


Abbildung 4: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit  $m^3$ , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abbildung 4).

Der modellierte Kaltluftvolumenstrom (Einheit  $m^3/s$ ) bezieht sich in dieser Arbeit auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit  $m^3/(s*m)$ ). Zur Vereinfachung wird in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ synonym verwendet.<sup>1</sup>

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Mächtigkeit der Kaltluftschicht nimmt im Verlaufe einer Nacht in der Regel zu und ist, genau wie die Luftaustauschprozesse allgemein, meist erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickelt.

<sup>1</sup> Der Kaltluftvolumenstrom in  $m^3/s$  beschreibt die Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Rasterzelle (hier: 5 m breit) fließt. Um Ergebnisse verschiedener Modellauflösungen miteinander vergleichbar zu machen, bietet sich der Kaltluftvolumenstrom als Dichte (in  $m^3/(s*m)$ ) an, da seine Intensität nicht von der Rasterzellenbreite abhängt.



Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig<sup>2</sup> markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee<sup>3</sup> zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen können. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebautes Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße und -struktur sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

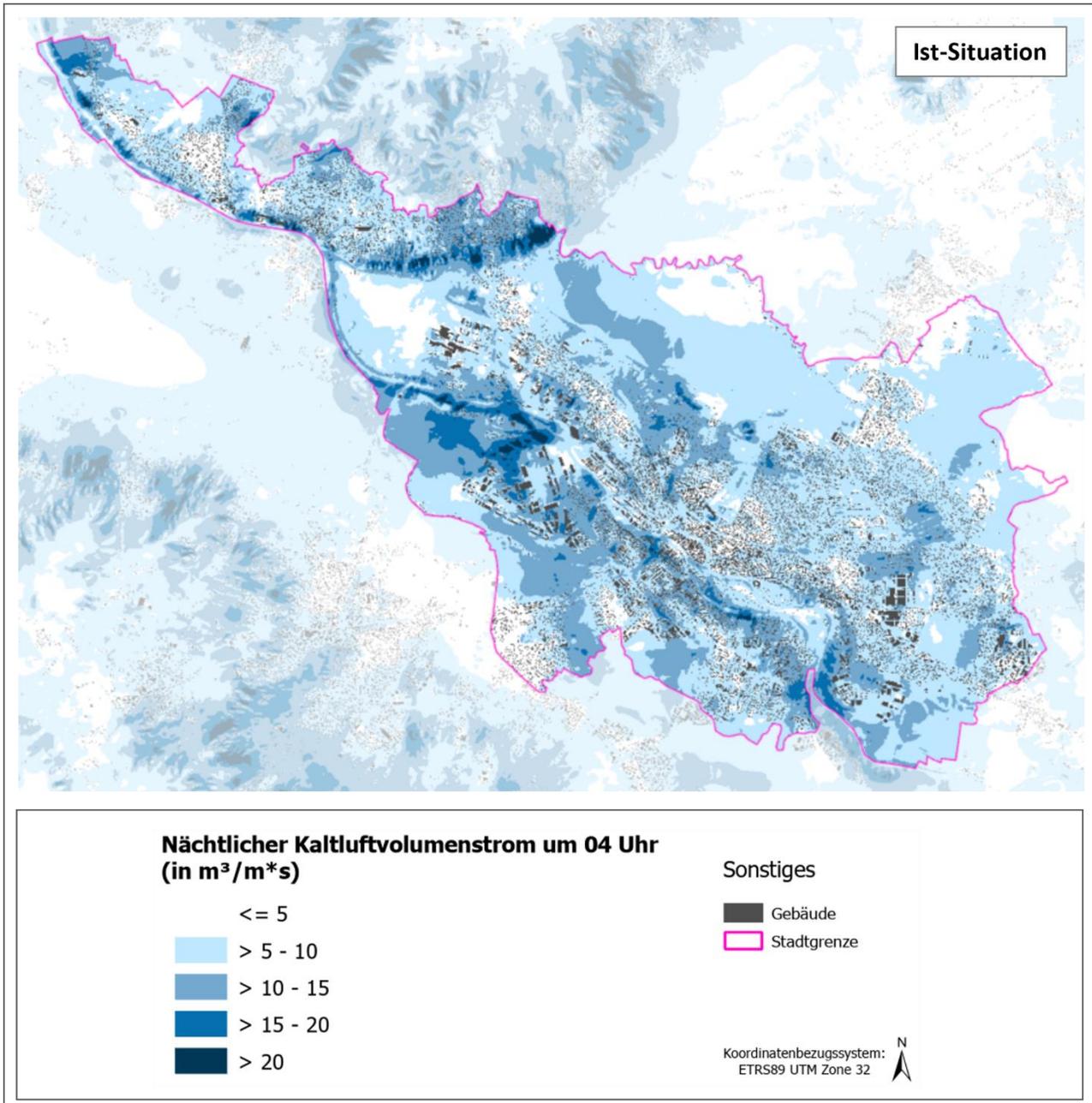


Abbildung 5: Kaltluftvolumenstrom für die Referenzsituation.

<sup>2</sup> dem Wind zugewandte Seite

<sup>3</sup> dem Wind abgewandte Seite



Der im Modell ermittelte Kaltluftvolumenstrom zeigt in der Stadt Bremen eine große Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu  $37 \text{ m}^3/\text{m}^*\text{s}$  (siehe Abbildung 5). Die Kaltluftströmung ist in Bremen vorwiegend durch Temperaturunterschiede bedingt. So strömt die kühle Luft der Grünflächen hin zu den wärmeren Siedlungsflächen, wie beispielsweise großräumig vom Blockland in Richtung Südwesten oder von Seehausen in Richtung Nordosten. Kleinräumige Kaltluftströmungen treten beispielsweise im Bereich der Galopprennbahn oder im Bereich des Kleingärtnerverein Kornblume östlich des Bürgerparks auf. Auch entlang weiterer rauigkeitsarmer Strukturen, wie z.B. entlang der B6 in der Neustadt oder entlang Bahntrassen tritt eine erhöhte Kaltluftdynamik auf. Diese transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grüngerprägte Strukturen, da sich die Kaltluft während des Transports über diesen Flächen erwärmt. Aufgrund der dichten Bebauung und der geringen Hangneigung wird die Kaltluftströmung in mehreren Siedlungsbereichen (z.B. in Schwachhausen oder in der Altstadt) stark abgebremst oder kommt ganz zum Erliegen. Weiterhin wird die Kaltluft in Richtung Wasserflächen, vor allem im Bereich der Weser, abgelenkt. Dadurch, dass sich die Wasserflächen während der Nacht nur geringfügig abkühlen, kommt es hier zu deutlichen Temperaturunterschieden der bodennahen Luftschichten, die die Kaltluft beschleunigen. Vorwiegend orographisch bedingte Kaltluftabflüsse treten im nordwestlichen Stadtgebiet im Bereich Lesum auf. Hier sorgen die Geländeunterschiede für relativ hohe Kaltluftabflüsse in Richtung Südosten.

Die Kaltluftdynamik verändert sich im Zuge des Klimawandels gegenüber der gegenwärtigen Situation nur geringfügig (Abbildung 6). Allerdings wird das Temperaturniveau zukünftig höher ausfallen und dementsprechend auch die Kaltluft wärmer sein als noch derzeit. Dennoch sind Veränderungen zwischen den Szenarien im Bereich der Stadtentwicklungsflächen zu erwarten. Es wird deutlich, dass im Zuge der Stadtentwicklung insbesondere Abnahmen des Kaltluftvolumenstromes zu erwarten sind. Neu errichtete Gebäude bilden zusätzliche Strömungshindernisse, die die Strömung abschwächen. Dieser Effekt ist jedoch lokal stark begrenzt. Lokal kann es durch Neubauten zu einer Erhöhung des Kaltluftstroms kommen, wenn beispielsweise Kanalisierungseffekte zwischen Gebäuden entstehen. Dies ist beispielsweise im Bereich der geplanten Gewerbefläche HansasträÙe zu beobachten (nicht in Abbildung 6 dargestellt). Insbesondere in der Differenzkarte „RCP8.5\_2085 – Ist“ ist weiterhin eine Abnahme der Kaltluftströmung im Uferbereich der Weser zu erkennen. Grund dafür ist die unterschiedliche Temperaturänderung der Wasserflächen und des Festlandes im Zuge des Klimawandels. In der Zukunftsmodellierung wird davon ausgegangen, dass sich die Wasserflächen weniger stark als das Festland erwärmen, dies führt zu verringerten Temperaturunterschieden zwischen den Luftmassen über den beiden Medien und somit zu abnehmenden Ausgleichsströmungen.

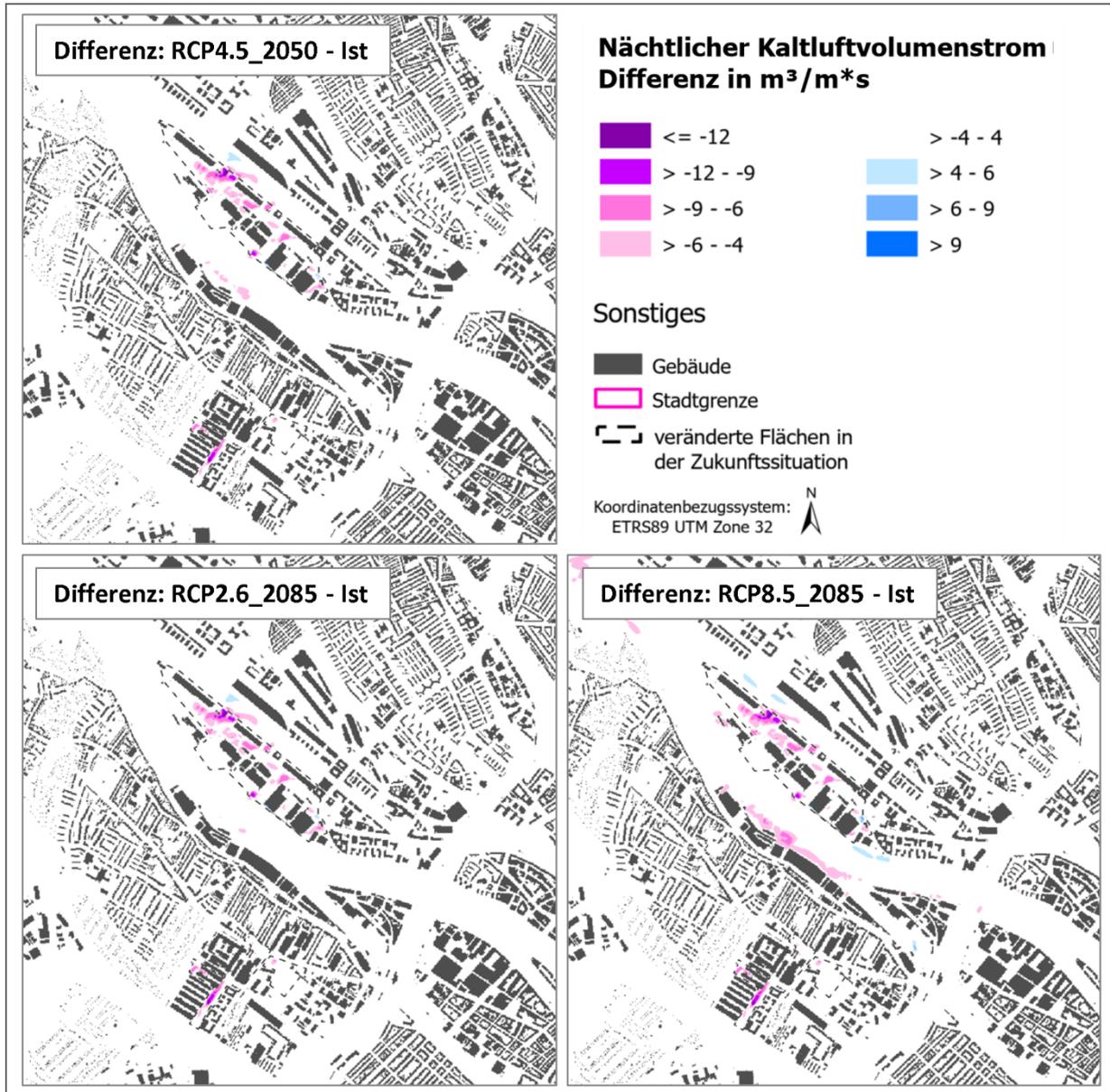


Abbildung 6: Zoom auf die Überseestadt und Woltmershausen. Differenzen des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms zwischen den Zukunftsszenarien und der Referenzsituation. Negative Werte bedeuten eine Abnahme, positive Werte eine Zunahme. Veränderungen sind vor allem im unmittelbaren Bereich der Stadtentwicklungsflächen sichtbar, die durch neu errichtete Gebäude die Strömungsdynamik der Kaltluft modifizieren.



## 1.2 TAGSITUATION

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen<sup>4</sup>. Weitere Informationen liefert Kapitel 2.1 in Berichtsteil B.

Tabelle 2: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).

| PET   | Thermisches Empfinden | Physiologische Belastungsstufe |
|-------|-----------------------|--------------------------------|
| 4 °C  | Sehr kalt             | Extreme Kältebelastung         |
| 8 °C  | Kalt                  | Starke Kältebelastung          |
| 13 °C | Kühl                  | Mäßige Kältebelastung          |
| 18 °C | Leicht kühl           | Schwäche Kältebelastung        |
| 20 °C | Behaglich             | Keine Wärmebelastung           |
| 23 °C | Leicht warm           | Schwache Wärmebelastung        |
| 29 °C | Warm                  | Mäßige Wärmebelastung          |
| 35 °C | Heiß                  | Starke Wärmebelastung          |
| 41 °C | Sehr heiß             | Extreme Wärmebelastung         |

In der vorliegenden Analyse wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis & Mayer 1999). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit intuitiver nachvollzogen werden zu können<sup>5</sup>. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler 2013). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (Tabelle 2).

Die PET in Bremen weist in der Referenzsituation mit Werten von 15,5 bis 44,5 °C eine Spannweite von 29 °C auf (Abbildung 7). Sie zeigt eine starke Abhängigkeit von der örtlichen Verschattungssituation. Eine schwache bis mäßige Wärmebelastung an wolkenlosen Sommertagen weisen dementsprechend dichte Baumgruppen und Waldbestände auf, wie beispielsweise innerhalb der Wallanlagen, im Bürgerpark oder in den Waldflä-

<sup>4</sup> Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m<sup>2</sup> Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. JENDRITZKY 1990).

<sup>5</sup> Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).



chen in Bremen Nord. Hier tragen die verminderte direkte Sonneneinstrahlung durch Schattenwurf der Vegetation und die Verdunstungsleistung der Pflanzen zum vergleichsweise geringen Belastungspotential bei. Weiterhin wird eine stark verminderte Wärmebelastung im Bereich von Wasserflächen, wie entlang der Weser oder im Bereich von Stehgewässern erreicht. Hier sorgt die Verdunstungsleistung des Wasserkörpers für eine Reduzierung der Wärmebelastung. Die höchsten PET-Werte werden über sonnenbeschienenen hochgradig versiegelten Flächen mit engstehender Bebauung erreicht, wie beispielweise auf den zentralen Plätzen der Altstadt oder in den relativ engen Straßen und Hinterhöfen der Neustadt. Hier wird während wolkenloser Sommertage flächendeckend eine extreme Wärmebelastung erreicht. Insbesondere in der Neustadt kommt hier zum Tragen, dass die Straßen während der strahlungsintensiven Stunden parallel zur Sonneneinstrahlung ausgerichtet sind, so dass der Schatten der angrenzenden Gebäude nicht auf die Straße fällt. Dabei ist

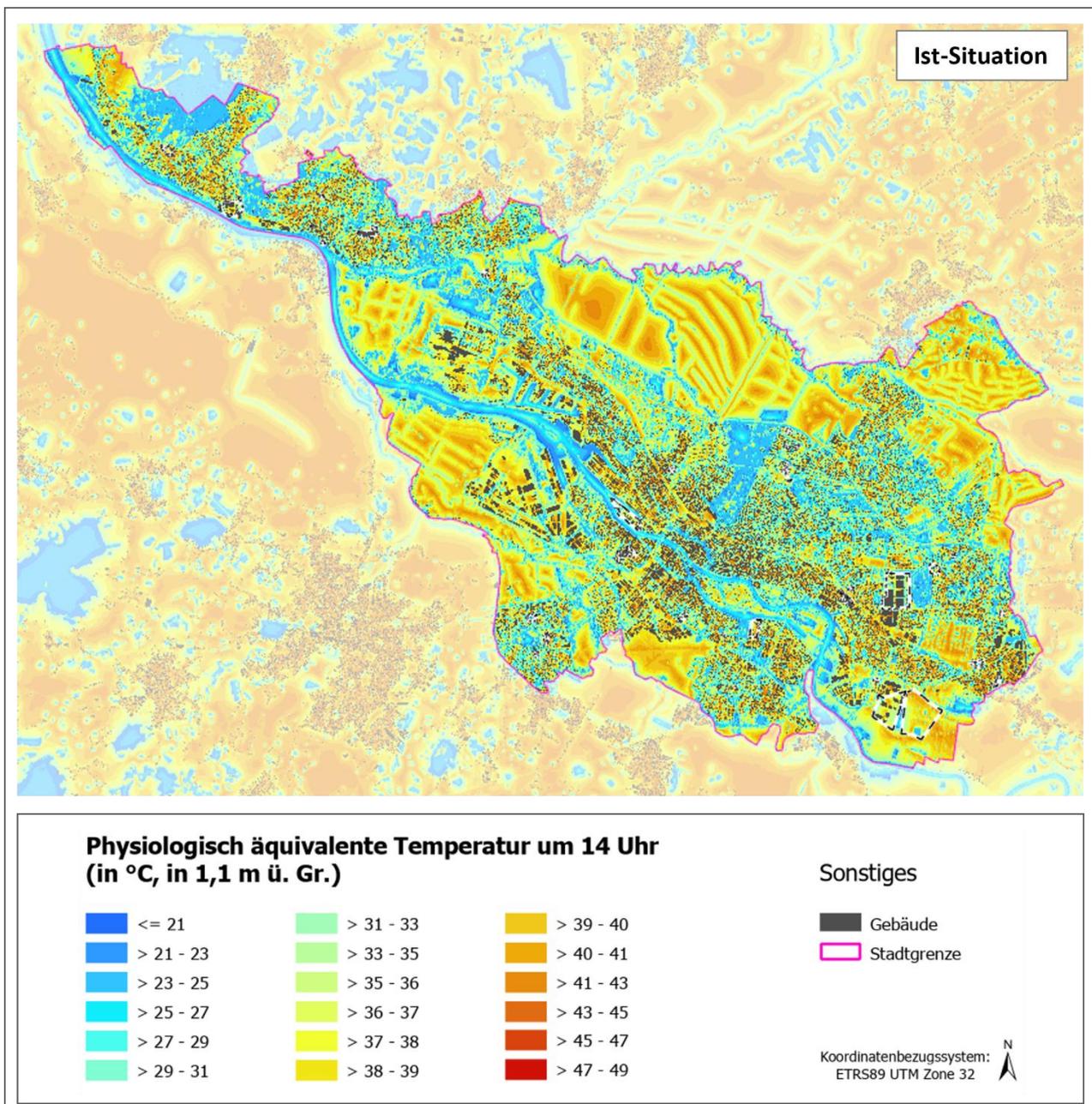


Abbildung 7: Wärmebelastung in der Referenzsituation.



die Belastungssituation kleinräumig sehr heterogen. Während die sonnenbeschienenen Flächen hohe Belastungswerte aufweisen, ist die Wärmebelastung auf Flächen, die im Schatten von Gebäuden oder Bäumen liegen, stark vermindert.

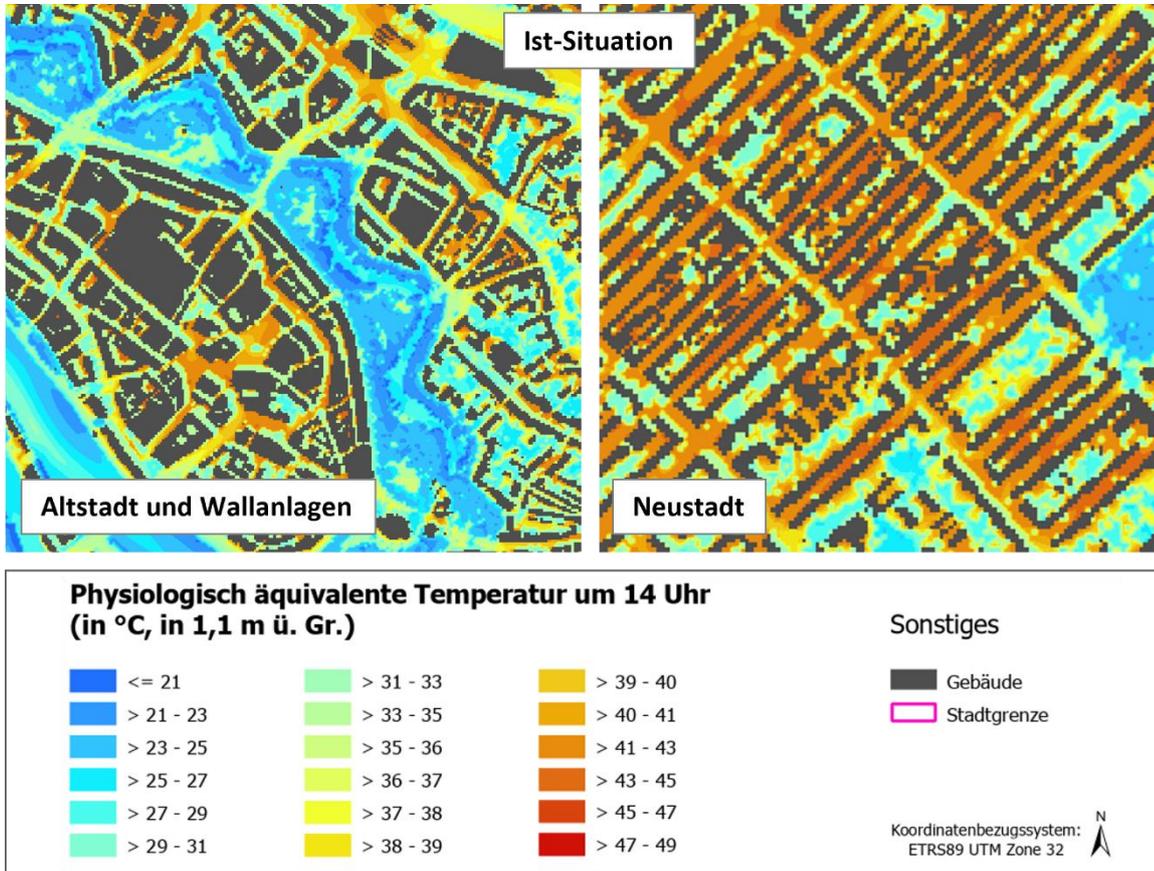


Abbildung 8: Wärmebelastung der Referenzsituation. Zoom auf die Altstadt und Wallanlagen sowie auf die Neustadt.

Relativ hohe PET-Werte werden nicht nur über sonnenbeschienenen versiegelten Flächen, sondern auch über Wiesen- und Ackerflächen ohne hohe Vegetation erreicht. Dies ist kleinräumig auf den Flächen des Bürgerparks sowie großräumig auf den weitläufigen Grünflächen am Stadtrand zu sehen.

Aber auch Einfamilien- und Reihenhausbebauungen – mit meist eher kleinen Bäumen im Garten sowie vergleichsweise niedrigen Gebäuden – besitzen häufig aufgrund der fehlenden Verschattung eine starke bis extreme Wärmebelastung. Dies zeigt sich z.B. in Kirchhuchting, Rablinghausen oder Weidedamm. In Kleingartenanlagen zeigt sich am Tag ebenfalls eine starke Wärmebelastung, da auch hier großkronige Bäume für eine Verschattung fehlen. Ähnlich verhält es sich auf Sportplätzen.

Analog zur Nachtsituation erzielen begrünte Innenhöfe mit hoher Vegetation bzw. stark durchgrünte Wohngebiete mit viel Baumbewuchs in der Stadt auch tagsüber eine starke Kühlwirkung. Hier ist erneut das Beispiel Bibelgarten am Dom zu nennen oder der Stadtteil Schwachhausen.



Im Zuge des Klimawandels nimmt die PET im Rahmen aller Zukunftsszenarien flächendeckend über das Stadtgebiet zu (Abbildung 9 und Abbildung 10). In vielen Teilen Bremens steigt bereits in der nahen Zukunft (Szenario RCP4.5\_2050) bedingt durch die klimawandelbedingte Temperaturzunahme von 1,6 °C die Wärmebelastung. So verändert sich die Wärmebelastung auf dem Marktplatz von „sehr stark“ zu „extrem“. Die ufernahen Bereiche der Weser sowie weite Teile der Wallanlagen unterliegen weiterhin einer schwachen bis mäßigen Wärmebelastung. In der fernen Zukunft unter einer relativ hohen Temperaturveränderung von 4,6 °C erhöht sich die Wärmebelastung der Siedlungsflächen dementsprechend. Die verschatteten Flächen der Wallanlagen und des Bürgerparks stehen mit PET-Werten von etwa 28 °C knapp unter der Klassengrenze von der mäßigen zur starken Wärmebelastung.

Aus Abbildung 10 wird deutlich, dass der Klimawandel in den Zukunftsszenarien RCP4.5\_2050 und RCP8.5\_2085 in den Siedlungsflächen einen mehr oder weniger gleichmäßigen Anstieg der Wärmebelastung zur Folge hat. Da das Zukunftsszenario RCP2.6\_2085 einem schwachen Klimawandel folgt, sind die stadtweite Effekte hier relativ gering. Ausnahmen bilden die Stadtentwicklungsflächen, auf denen sich die Wärmebelastung abhängig von der geplanten Nutzung deutlich stärker oder sogar schwächer ausbildet als in der Referenzsituation. Abbildung 10 zeigt beispielhaft die Stadtentwicklungsflächen Überseeinsel und Woltmershausen. Es wird deutlich, dass eine Nutzungsänderung eine hohe Auswirkung auf die Wärmebelastung haben kann. Durch die städtische Entwicklung ist lokal begrenzt im nahen Zukunftsszenario mit mittlerer Temperaturveränderung (Szenario RCP4.5\_2050) mit einer Erhöhung der PET-Werte um bis zu 20 °C zu erwarten. Diese sehr starke Veränderung wird auf den Flächen erreicht, die in der Ist-Situation mit hoher Vegetation bewachsen sind und noch sehr geringen PET-Werten und somit einer sehr geringen Wärmebelastung unterliegen und im Zuge der Stadtentwicklung von dieser Vegetation befreit und bebaut werden. Andersherum kann ein positiver Effekt in ähnlicher Größenordnung auf Flächen erreicht werden, die im Zuge der Flächenentwicklung neu begrünt werden. So kann selbst bei Betrachtung eines langfristigen Zukunftsszenarios mit starker Temperaturveränderung lokal eine Verbesserung der Wärmebelastung im Vergleich zur Ist-Situation erzielt werden (Differenz RCP8.5\_2085 – Ist).

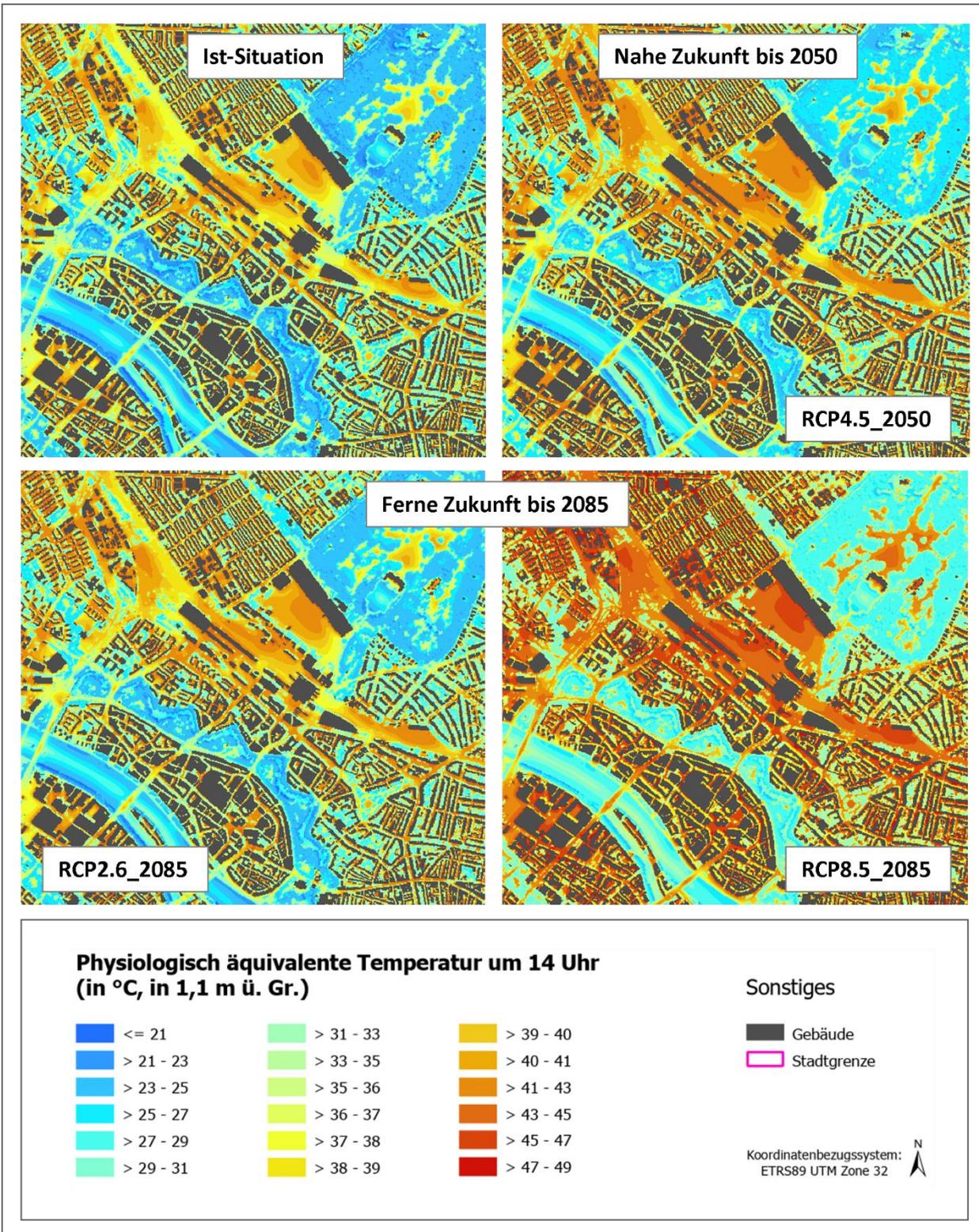


Abbildung 9: Zoom auf den innerstädtischen Bereich. PET für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).

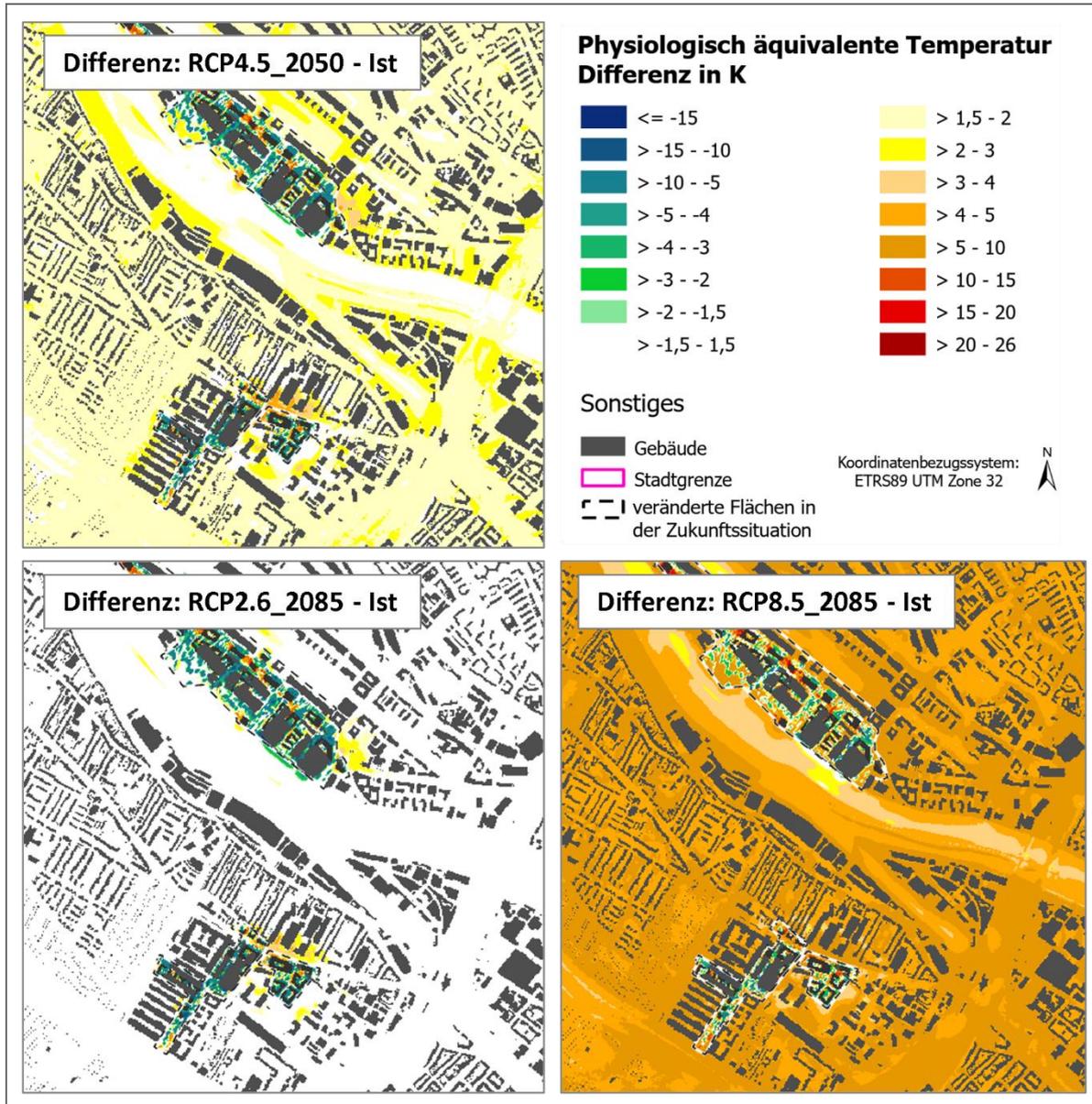


Abbildung 10: Zoom auf die Überseestadt und Woltmershausen. Differenzen der PET zwischen den Zukunftsszenarien und der Referenzsituation. Negative Werte bedeuten eine Abnahme, positive Werte eine Zunahme.



1.2.1 EINFLUSS EINER ZUNEHMENDEN TROCKENHEIT AUF DIE WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Neben den Zukunftsszenarien RCP4.5\_2050, RCP2.6\_2085 und RCP8.5\_2085, in denen der fortschreitende Klimawandel anhand eines Temperaturänderungssignal unterschiedlicher Stärke angenommen wird, wird im Zukunftsszenario trRCP4.5\_2050 zusätzlich der Einfluss einer erhöhten Trockenheit im Zuge des Klimawandels berücksichtigt. Dafür wurde für die Grün- und Ackerflächen eine Bodenfeuchte von 30 %, also ein Wert unterhalb des Welkepunkts, angenommen. Dies hat zur Folge, dass diese Flächen keine Verdunstungskühle am Tag mehr erzeugen. Die Effekte der Trockenheit sind dementsprechend nur in den Tagergebnissen sichtbar.

In Abbildung 11 wird das Trockenszenario trRCP4.5\_2050 direkt mit dem Szenario RCP4.5\_2050 verglichen. Beide Zukunftsszenarien unterliegen einem Temperaturdelta von 1,6 °C und unterscheiden sich nur in der

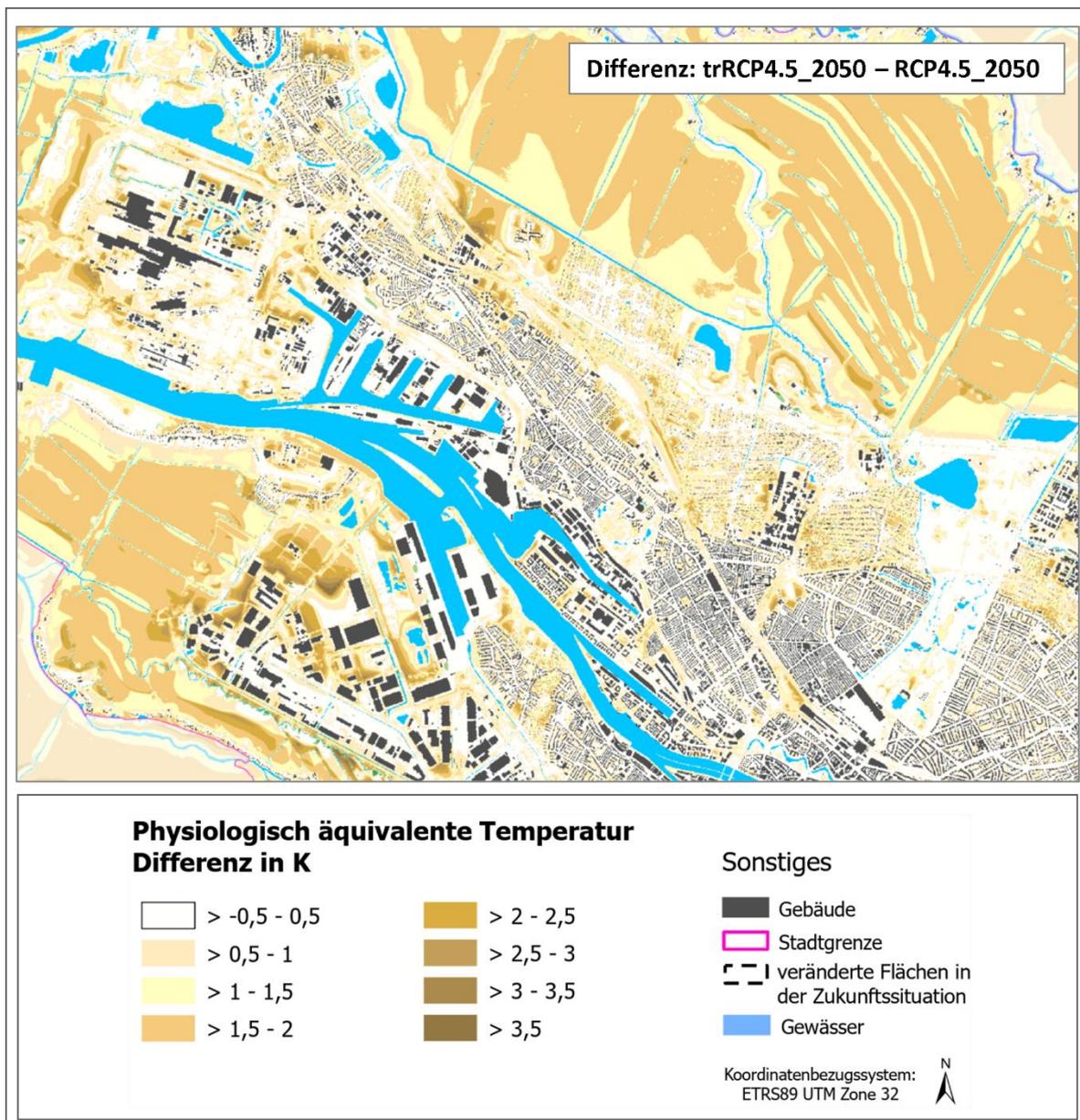


Abbildung 11: Effekt einer zunehmenden Trockenheit im Zuge des Klimawandels anhand der Differenz der PET zwischen den Zukunftsszenarien trRCP4.5\_2050 und RCP4.5\_2050. Positive Werte bedeuten eine Zunahme, negative Werte eine Abnahme der PET.



angenommenen Bodenfeuchte. Aus der Differenz der beiden Szenarien wird also rein der Effekt der zunehmenden Trockenheit ersichtlich, welcher zusätzlich zum Temperaturdelta zu erwarten ist. Anhand der Abbildung wird deutlich, dass die verringerte Bodenfeuchte eine zusätzliche Erhöhung der PET zur Folge hat. Lokal wird eine zusätzliche Wärmebelastung von bis zu 4,7 °C erreicht, weiträumig liegt die zusätzliche Wärmebelastung bei bis zu 2 °C. Die vermehrte Trockenheit betrifft insbesondere die oberen Bodenschichten. Die PET-Erhöhung betrifft daher im Wesentlichen die Grün- und Ackerflächen ohne hohe Vegetation, bewaldete Gebiete und Bereiche mit dichter hoher Vegetation sind davon nicht betroffen.



## 2. Klimaanalysekarten

Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte (KAK) die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 2015, S.4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen – für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss.

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 2015, S. 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine ganz wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehört demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, S. 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (Kapitel 3). Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario RCP4.5\_2050 „moderater Klimaschutz“ (nahe Zukunft, Zieljahr 2050)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario RCP2.6\_2085 „starker Klimaschutz“ (ferne Zukunft, Zieljahr 2085)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario RCP8.5\_2085 „hohe Emissionen“ (ferne Zukunft, Zieljahr 2085)“

Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Funktionen in der Nachtsituation zusammen. Eine Klimaanalysekarte für die Tagsituation auf Grundlage der PET wird von der VDI-Richtlinie nicht explizit gefordert. Weiterhin wird das Zukunftsszenario trRCP4.5\_2050 nicht in einer Klimaanalysekarte dargestellt. Da sich dieses Zukunftsszenario rein durch die Annahme einer zunehmenden Trockenheit von Szenario RCP4.5\_2050 unterscheidet und dies keine Effekte auf die Nachtsituation zur Folge hat, wird auf die Darstellung einer eigenen Klimaanalysekarte für das Szenario trRCP4.5\_2050 verzichtet.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der vier Klimaanalysekarten für die verschiedenen Szenarien wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 12). Diese gliedert sich in die Elemente Siedlungs- und Verkehrsraum, Grünflächen und landwirtschaftliche Flächen sowie Kaltluftprozesse. In den Grün- und landwirtschaftlichen Flächen ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpa-



ket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 5 m unmittelbar der Modellausgabe. In den Siedlungs- und Verkehrsflächen ist die absolute Lufttemperatur für das 2 m Niveau flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

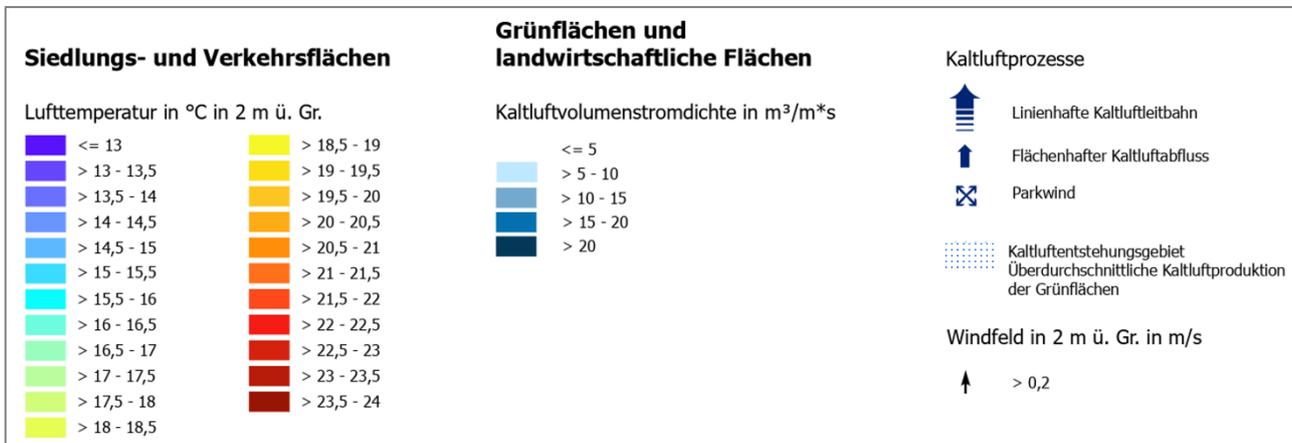


Abbildung 12: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten.

Die flächenhaften Darstellungen für die Siedlungs- und Verkehrsflächen und der Grünflächen und landwirtschaftlichen Flächen werden durch verschiedene Elemente grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 3). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 200 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,2 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z. B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Grün- und Siedlungsflächen) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Kombination mit dem mitgelieferten GIS-basierten Ergebnisdaten in Originalauflösung entnommen werden.

Für die Grünflächen und landwirtschaftlichen Flächen erfolgt die Darstellung der Kaltluftentstehungsgebiete. Diese mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktion gekennzeichneten Flächen weisen eine mittlere Kaltluftproduktionsrate von  $>25,5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  auf. Diese Größe wurde anhand einer Mittelwertberechnung über alle Grünflächen und landwirtschaftlichen Flächen der Stadt Bremen bestimmt und kennzeichnet die Flächen, die besonders viel Kaltluft produzieren. Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Bremen von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen insbesondere die linienhaften Kaltluftleitbahnen. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende sogenannte Ausgleichsräume (Grünflächen und landwirtschaftliche Flächen) und sogenannte Wirkräume (Siedlungs- und Verkehrsflächen) miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind diese aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können.

Flächenhafte Kaltluftabflussbereiche kennzeichnen großräumigere Kaltluftbewegungen. Sie sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Hangfolgende Kaltluftabflüsse reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten



der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen auch hier durchaus möglich und zu vermeiden bzw. auf ein verträgliches Maß zu reduzieren.

In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen immer auch ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. noch einmal intensiver zu prüfen ist.

Als weiteres Element wurde der Parkwind eingesetzt. Hierbei handelt es sich um kleinräumige Kaltluftströmungen aus innerstädtischen Grünflächen, die radial in die umgebenden Siedlungsflächen einströmen. Trotz ihrer geringen räumlichen Ausprägungen können sie einen wichtigen Ausgleichseffekt innehaben.

Tabelle 3: Legenden-Elemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

| Legendenelement               | Ableitungsmethode   |
|-------------------------------|---|
| Windfeld                      | auf 200 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,2 m/s                                       |
| Kaltluftentstehungsgebiete    | Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 25,5 m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> *h)   |
| Kaltluftleitbahn (linear)     | gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes, des Reliefs sowie der Nutzungsklassen |
| Kaltluftabfluss (flächenhaft) |   |
| Parkwind                      | Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes und der Nutzungsklassen                |

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes, des Reliefs sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für alle Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein.

Abbildung 13 zeigt einen Ausschnitt der Klimaanalysekarte der Referenzsituation mit Zoom auf den innerstädtischen Bereich. Deutlich sind die überwärmten Flächen der Altstadt sichtbar, wohingegen die lockerer bebauten Viertel deutlich kühler sind. Im direkten Umfeld und im weiteren innerstädtischen Bereich bilden sich über den Grünflächen verschiedene Ausgleichsströmungen aus. Die Wallanlagen sowie die Flächen des Bürgerparks entwickeln in der Nacht den sogenannten Parkwind, da hier die über den Grünflächen gebildete Kaltluft in die angrenzenden Siedlungsbereiche strömt und hier für einen Luftaustausch sorgt. Im Bereich des Kleingärtnervereins Sommerdeich bildet sich über den gering versiegelten Gartenflächen eine flächenhafte Kaltluftströmung in die nordwestlich und nördlich angrenzende Siedlungsbebauung von Woltmershausen.



Am nördlichen Rand des Bildausschnitts bildet sich eine linienhafte Kaltluftströmung aus den nördlichen Flächen des Bürgerparks über die Grünflächen des Kleingartenvereins Kornblume e.V. in Richtung Riensberg aus.

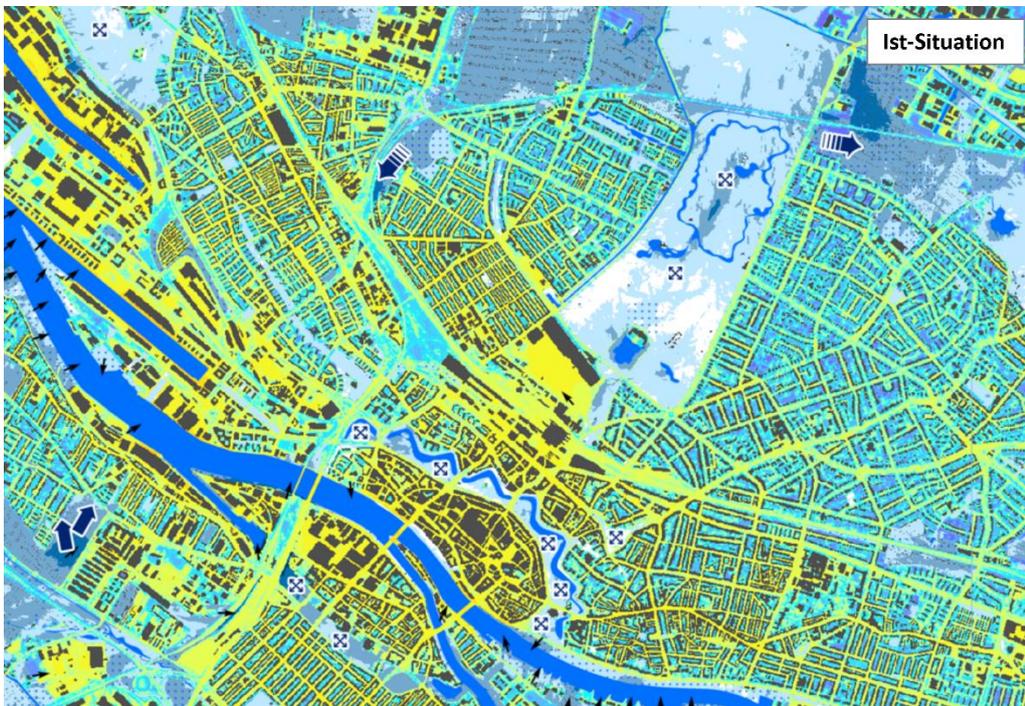


Abbildung 13: Ausschnitt der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation.

Die Kaltluftprozesse ändern sich nicht wesentlich in der Zukunft, wie bereits im Kapitel 1.1.2 erläutert. In Abbildung 14 sind die vier Klimaanalysekarten der Referenzsituation und der drei Zukunftsszenarien ausschnittsweise gegenübergestellt. Die Kaltluftlieferung der Grünflächen bleibt in den drei Zukunftsszenarien RCP4.5\_2050, RCP2.6\_2085 und RCP8.5\_2085 von Muster und Ausmaß im Wesentlichen bestehen. Lediglich die Stadtentwicklungsflächen verändern lokal die Kaltluftlieferung der überbauten Grünflächen (wie auch bereits in Kapitel 1.1.2 beschrieben und gezeigt). Die wesentlichen Kaltluftprozesse (Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabfluss und Parkwind) werden aber nicht beeinflusst.

Wie bereits zuvor erläutert, wird der Siedlungsraum in der Klimaanalysekarte über die nächtliche Lufttemperatur beschrieben. Diese nimmt aufgrund des Klimawandels in den verschiedenen Zukunftsszenarien unterschiedlich stark zu. Für das Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 wurde ein mittlerer Klimawandel mit Blick auf die nahe Zukunft bis ins Jahr 2050 angenommen. Das angenommene Klimaänderungssignal von 1,6 °C führt dazu, dass sich der bereits heute relativ warme Altstadtbereich in der nahen Zukunft auf bis zu 20,7 °C aufheizt. Auch das locker bebaute Schwachhausen unterliegt einer erhöhten nächtlichen Temperatur im Vergleich zur Ist-Situation, ist mit Werten zwischen 16,0 °C (Grünflächen) und 19,7 °C (vereinzelte Straßenzüge) im Mittel aber deutlich kühler als die Altstadt.

Die Annahme eines starken Klimawandels mit Blick auf das Jahr 2085 (Szenario RCP8.5\_2085) geht von einem deutlich stärkeren Klimaänderungssignal von 4,6 °C aus, was zu nächtlichen Lufttemperaturen von bis zu 23,7 °C in der Altstadt und von 18,5 bis 22,7 °C in Schwachhausen führt. Die Kaltluftdynamik bleibt zwar bestehen, jedoch erwärmen sich diese Luftmassen im Zuge des Klimawandels ebenfalls. Dies bedeutet, dass der abkühlende Effekt in den überwärmten Siedlungsflächen geringer ausfällt als in der Ist-Situation.

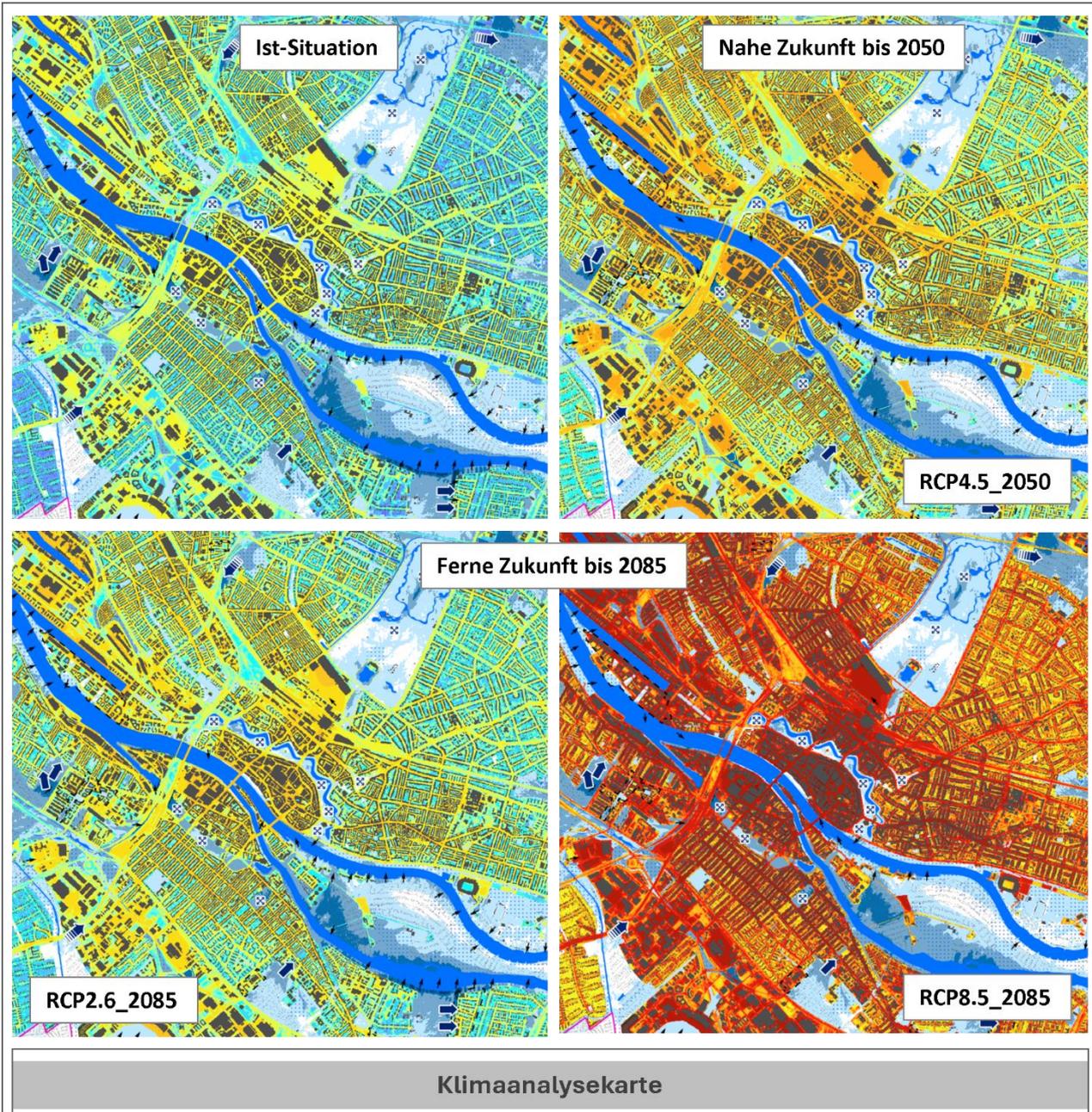


Abbildung 14: Zoom auf die Klimaanalysekarten der Ist-Situation und der Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).



## 3. Grundlagen zu den Bewertungskarten und zur Planungshinweiskarte

### 3.1 HINTERGRUND

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte um eine „Informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält“ (VDI 2015, S. 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben“ (VDI 2015, S. 5-6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist dabei zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grünflächen, landwirtschaftliche Flächen und Waldflächen mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Wirkraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine dreistufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine vierstufige Bewertung im Wirkraum vor, gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung und schlägt auch RGB-Farbcodes vor. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft ohne Beschluss der Stadtpolitik und unterliegt auch keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan) übernommen werden.

Da die Planungshinweiskarte die Informationen sowohl der Tag- und der Nachtsituation als auch von Referenz- und Zukunftssituation in einer Karte zusammenfasst, werden in einem vorgelagerten Schritt sogenannte Bewertungskarten erzeugt, die die Bewertung getrennt für die Tag- und Nachtsituation für jedes Szenario darstellen. In Abstimmung mit der Auftraggeberin wurden somit insgesamt acht Bewertungskarten erstellt.



## 8 Bewertungskarten:

- 2 x Ist-Situation: Tag- und Nachtsituation
- 2 x Zukunftsszenario RCP4.5\_2050: Tag- und Nachtsituation
- 2 x Zukunftsszenario RCP2.6\_2085: Tag- und Nachtsituation
- 2 x Zukunftsszenario RCP8.5\_2085: Tag- und Nachtsituation

## 1 Planungshinweiskarte:

Für die Erstellung der Planungshinweiskarte wurden nicht alle acht Bewertungskarten berücksichtigt, sondern ausschließlich die vier oben unterstrichenen Bewertungskarten:

- Ist-Situation: Tagsituation
- Ist-Situation: Nachtsituation
- Zukunftsszenario RCP4.5\_2050: Tagsituation
- Zukunftsszenario RCP4.5\_2050: Nachtsituation

Dies ist dadurch begründet, dass das Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 als Betrachter der nahen Zukunft besonders relevant für die Auftraggeberin ist.

## 3.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kapitel 1) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadtraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss:

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer möglichst standardisierten Fortschreibung unterliegen
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyseansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen.

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene nicht per se. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine gute Grundlage, die in Zusammenarbeit mit der Auftraggeberin entsprechend weiterqualifiziert wurde. Die Modifikation betraf dabei sowohl die Zusammenfassung von sehr kleinräumigen Strukturen (vorrangig im Stadtumland bzw. Ausgleichsraum) als auch die Aufteilung größerer zusammenhängender Flächen in kleinere Funktionseinheiten (vorrangig im Wirkraum). Alle rasterbasierten Modellergebnisse wurden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen) sowie der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Abbildung 15).

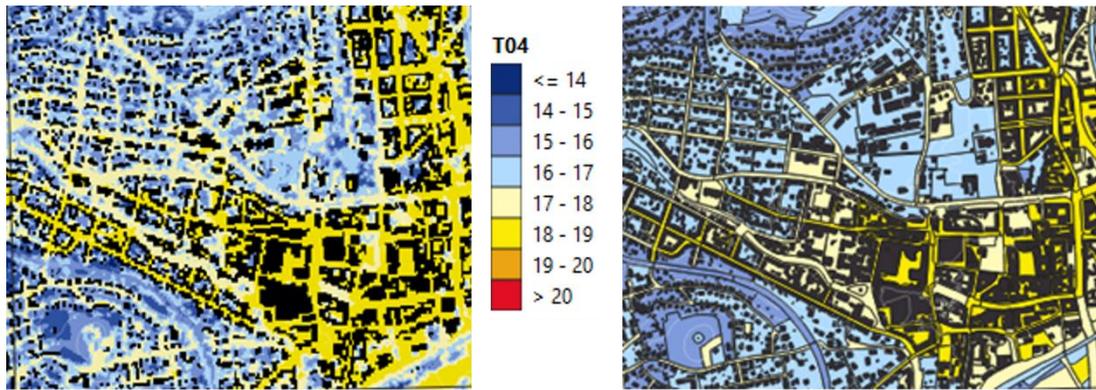


Abbildung 15: Links die rasterbasierten Modellergebnisse und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (Beispiel nicht aus Bremen).



## 4. Bewertungskarten

Die Bewertungskarten unterscheiden in den sogenannten Wirkraum (Siedlungsraum) und Ausgleichsraum (Grünflächen, landwirtschaftliche Flächen, Wald). Abhängig davon, ob die Situation am Tage oder in der Nacht betrachtet wird, sind für die Bewertung unterschiedliche Parameter relevant und unterschiedliche Vorgehensweisen wurden gewählt. In der Nacht ist für die Bewertung des Wirkraums die bodennahe Lufttemperatur maßgebend. Für die Bewertung des Ausgleichsraums in der Nacht wird der Kaltluftvolumenstrom herangezogen sowie die räumliche Lage der zu bewertenden Flächen.

Für die Bewertung der Tagsituation wird für Wirk- und Ausgleichsraum gleichermaßen die PET herangezogen. Die verschiedenen Bewertungsmethoden werden im Folgenden näher erläutert.

### 4.1 BEWERTUNGSMETHODIK DER NACHTSITUATION

#### 4.1.1 WIRKRAUM

Bei den Rasterergebnissen der nächtlichen Lufttemperatur, die den wertgebenden Parameter für den Wirkraum darstellt, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb mit dem gesetzten Temperaturniveau gültig sind. Tatsächlich existieren in der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere und kühlere Situationen. Die Flächenbewertung sollte auch auf andere Flächen übertragbar sein.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierenden z-Werte (dimensionslos, ohne Einheit) werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S1-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 16).

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet.



$$z = \frac{\chi - \mu}{\sigma}$$

Dabei ist

- $z$  standardisierter Wert der Variablen  $x$
- $\chi$  Ausgangswert der Variablen  $x$
- $\mu$  arithmetisches Mittel
- $\sigma$  Standardabweichung

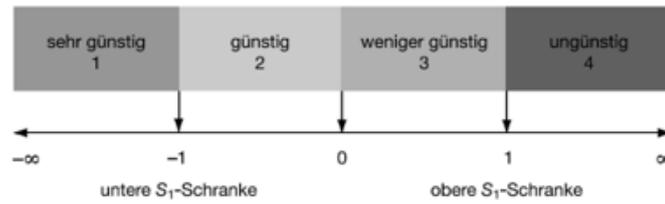


Abbildung 16: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

Die Lage der Klassengrenzen ist dementsprechend davon abhängig, welches Wertespektrum der statistischen Berechnung zugrunde gelegt wird. Da die Bewertungskarten als „Vor-Produkt“ zur Planungshinweiskarte angesehen werden können und diese die Szenarien der Ist-Situation und des Zukunftsszenarios RCP4.5\_2050 beinhaltet, werden als Grundlage für die Berechnung der statistischen Lagemaße ebenfalls die Lufttemperaturwerte, die in den Szenarien der Ist-Situation und des Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 auftreten, berücksichtigt. Dabei wurden ausschließlich solche Gitterpunktwerte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen, da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturwerte des Ausgleichsraums bleiben demnach unberücksichtigt. Für den Mittelwert der nächtlichen Lufttemperatur ergibt sich somit ein Mittelwert von 17,2 bei einer Standardabweichung von 1,6.

Die in der VDI-Richtlinie vorgeschlagene 4-stufige Bewertung wurde für die Stadt Bremen in eine 5-stufige Skala überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen (Abbildung 17). Dieses Vorgehen lässt sich damit begründen, dass durch die höhere Auflösung der Modelleingangsdaten und -ergebnisse eine höhere Genauigkeit erreicht wird, die ebenso in einer höheren Anzahl an Bewertungsklassen aufgehen kann, um die Unterschiede im Stadtgebiet sichtbar zu machen. Bei der Festlegung der zusätzlichen mittleren Klasse wurde darauf geachtet, die Klassengrenzen so festzulegen, dass es für die nächtliche Lufttemperatur jeweils gut zur statistischen Verteilung der Daten passt.

Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieses Möglichkeitskorridors auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist das Szenario RCP2.6\_2085, das keinen Einfluss auf die Berechnung der z-Statistik hatte, dessen Temperaturfelder sich aber mit dem Klimaänderungssignal von +0,8 °C zwischen der Ist-Situation und RCP4.5\_2050 einordnen. Dieses Szenario RCP2.6\_2085 kann daher mit derselben Methode bewertet werden. Für das Zukunftsszenario RCP8.5\_2085 trifft dies jedoch nicht zu. In diesem Szenario liegen die Temperaturwerte im Wirkraum vollständig oberhalb des höchsten Grenzwertes. Dies würde dazu führen, dass in der Bewertungskarte für das Zukunftsszenario RCP8.5\_2085 der gesamte Wirkraum der Klasse „ungünstig“ zugewiesen werden müsste. Um dennoch unterschiedliche Belastungsstufen auch im Szenario RCP8.5\_2085 sichtbar machen zu können, wurden für dieses Szenario zwei weitere Klassengrenzen gebildet. Diese bilden sich aus dem Mittelwert und der Standardabweichung der Werte des RCP8.5\_2085-Szenarios und sind rein für dieses Szenario relevant, da sie außerhalb der Wertebereiche der anderen Szenarien liegen.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass die Ableitung der Bewertungsklassen und die Einstufung einer Siedlungsfläche in eine „ungünstige“ bioklimatische Situation nicht automatisch bedeutet, dass hier unerträglich hohe Temperaturen zu erwarten sind, sondern dass diese Fläche im Vergleich zu anderen Flächen in



der Stadt mit einer beispielsweise „günstigen“ oder „mittleren“ bioklimatischen Situation schlechter abschneidet. Die einzelnen Kategorien von einer „sehr günstigen“ bis „sehr ungünstigen“ bioklimatischen Situation beschreiben somit keine absoluten Einstufungen mehr, sondern bilden lediglich das Spektrum der in Bremen vorhandenen Bandbreiten an klimatischen Unterschieden ab.

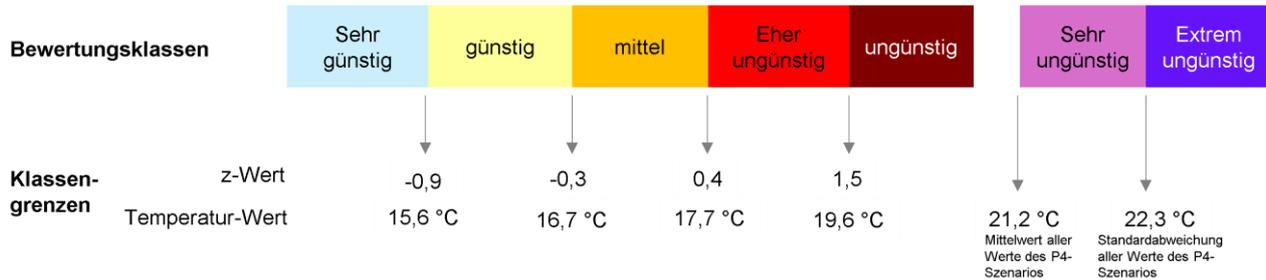


Abbildung 17: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation in der Nacht auf Basis der Lufttemperatur. Die Klassengrenzen der Klassen „günstig“ bis „ungünstig“ wurden auf Basis der statistischen Verteilung der Werte aus dem Ist-Szenario und dem Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 abgeleitet. Die Klassengrenzen der Klassen „sehr ungünstig“ und „extrem ungünstig“ wurden aus der statistischen Werteverteilung aus Szenario RCP8.5\_2085 abgeleitet und sind nur für dieses Szenario relevant.

#### 4.1.2 AUSGLEICHSRAUM

Während der Nacht steht im Ausgleichsraum vornehmlich die Bildung kühlerer und frischerer Luft im Fokus, die über Austauschbeziehungen humanbioklimatische Belastungen im Wirkraum vermindern kann. Ziel der Bewertungsmethodik ist es, den Grün-, Wald- und landwirtschaftlichen Flächen verschiedene Bedeutungsstufen zuzuordnen.

So erhielten diejenigen Ausgleichsflächen eine „sehr hohe Bedeutung“ zugewiesen, wenn sie sich direkt mit einer Kaltluftleitbahn, einem flächenhaften Kaltluftabfluss oder einem Parkwind überlagern oder in deren Einzugsbereich liegen. Liegen sie im weiteren Einflussbereich der Kaltluftströmung oder sind sie angrenzend an thermisch belasteten Wohnraum, wurde ihnen eine „hohe Bedeutung“ zugewiesen. Grenzen sie an Wohnraum, der nicht thermisch belastet ist, sind sie einer „mittleren Bedeutung“ zuzuordnen, liegen sie nicht in Nähe von Wohngebieten, aber wurden als Kaltluftentstehungsgebiete mit überdurchschnittlich hoher Kaltluftproduktion ausgewiesen oder bestehen aus Waldflächen, besitzen sie eine „geringe Bedeutung“. Abbildung 18 zeigt den schematisierten Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Angrenzend an Wohnraum: Entfernung max. 50 m Luftlinie
- Thermisch belasteter Wohnraum: Wirkraum mit Wohnfunktion, dem eine „ungünstige bioklimatische Situation“ oder schlechter zugewiesen wurde
- Kaltluftentstehungsgebiet: Kaltluftproduktion von 25,5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>\*h) oder mehr (gilt für alle Szenarien)

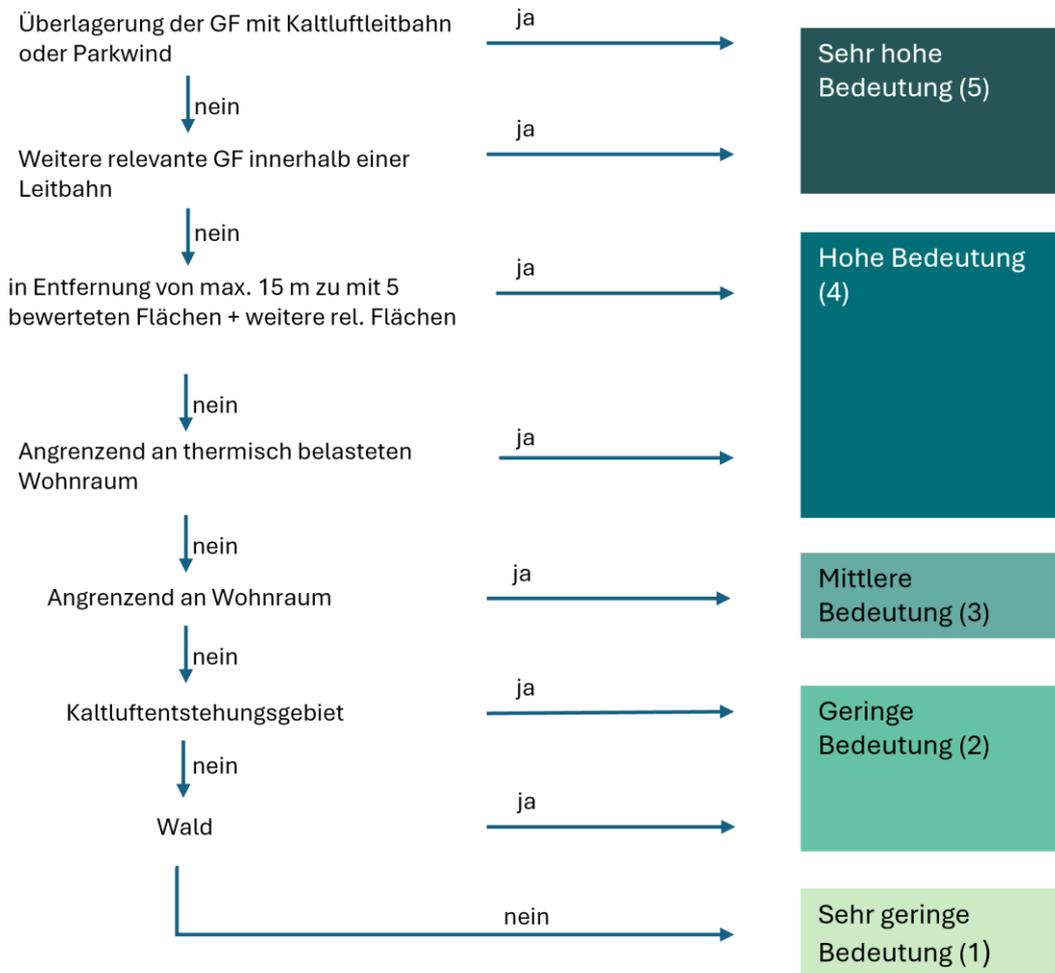


Abbildung 18: Bewertungsalgorithmus für den Ausgleichsraum/die Grünflächen (GF) in der Nacht.

#### 4.1.3 WEITERER KARTENINHALT

Analog zur Darstellung der Klimaanalysekarten ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen aufgetragen. Ebenso sind Kaltluftentstehungsgebiete durch eine Punktschraffur dargestellt (siehe Kapitel 2). Neben diesen die Ausgleichsflächen überlagernden Inhalten wird in den nächtlichen Bewertungskarten für den Wirkraum eine weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Der Kaltlufteinwirkungsbereich zeigt an, wie weit Kaltluft in die bestehenden Siedlungsräume eindringen kann (Abbildung 19). Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von  $7,9 \text{ m}^3/(\text{m}^*\text{s})$  und die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von  $0,2 \text{ m/s}$  (für die Zukunft identisch) erreichen oder überschreiten.



Abbildung 19: Legendensymbol der Kaltluftprozesse im Wirkraum.



## 4.2 BEWERTUNGSMETHODIK DER TAGSITUATION

Für die Tagsituation werden Wirk- und Ausgleichsraum gleichermaßen betrachtet und bewertet. Als Bewertungsgröße für die humanbioklimatische Situation liegt die PET zugrunde. Dabei liegt der Fokus auf einer möglichst hohen Aufenthaltsqualität. Während der Wirkraum häufig als Aufenthaltsbereich im Alltag dient und gleichzeitig hohen thermischen Belastungen unterliegen kann, können Parks- oder Waldflächen im Ausgleichsraum als Rückzugs- und Erholungsorte dienen. Im Unterschied zur Bewertung des Wirkraums in der Nachtsituation wurde für die Tagsituation in Abstimmung mit der Auftragnehmerin keine statistische Auswertung zur Klasseneinteilung verwendet, sondern die auf der VDI-Richtlinie basierenden Einstufungen der PET (siehe Kapitel 1.2). Um kleinräumige Unterschiede kenntlich zu machen, wird eine zusätzliche Klasse „erhöhte Wärmebelastung“ eingefügt (Abbildung 20). Das Vorgehen bietet eine direkte Verknüpfung der Belastungssituation mit den absoluten PET-Werten, jedoch muss berücksichtigt werden, dass diese Bewertung – im Unterschied zur Nachtsituation – nicht auf andere Wetterlagen bzw. andere Temperaturniveaus übertragbar ist.

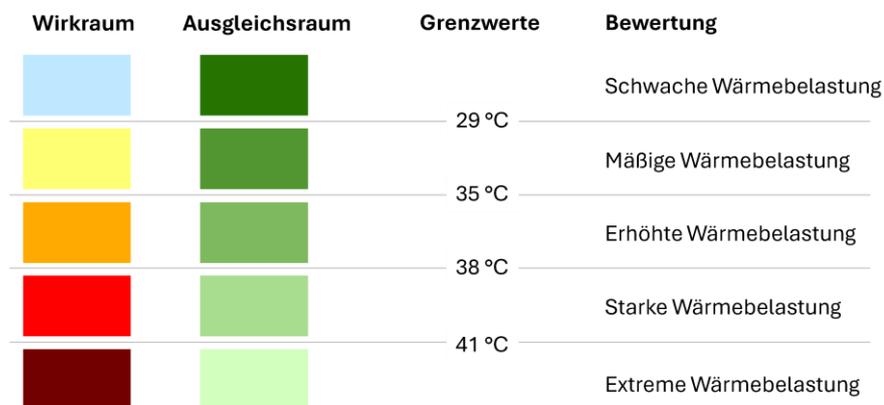


Abbildung 20: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation am Tage für Wirkraum und Ausgleichsraum.

## 4.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

Im Folgenden werden Ausschnitte der Bewertungskarten gezeigt und für die verschiedenen Szenarien vergleichend beschrieben. Dabei werden zuerst die Bewertungskarten der Nachtsituation betrachtet und anschließend die der Tagsituation.

### NACHTSITUATION

Abbildung 21 zeigt einen Ausschnitt der Bewertungskarten der Nachtsituation für Bremen, in welcher u.a. die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, erfolgte die Bewertung der Wirkräume relativ zueinander und auf Basis der Temperaturwerte der Ist-Situation und des Zukunftsszenarios RCP4.5\_2050. Die Bewertung der Ausgleichsräume erfolgte auf Basis ihrer Lage zu den Wirkräumen sowie der Kaltluftprozesse. Um die Unterschiede zwischen den Szenarien hervorzuheben, sind die prozentualen Flächenanteile der Bewertungsklassen für die verschiedenen Szenarien in den Abbildungen Abbildung 22 und Abbildung 23 gegenübergestellt.



Der Ausschnitt der Ist-Situation in Abbildung 21 zeigt, dass derzeit die Bremer Altstadt bis hin zum Hauptbahnhof flächendeckend mit einer eher ungünstigen humanbioklimatischen Situation bewertet ist. Ausnahmen bilden hier kleinräumige entsiegelte Bereiche wie beispielsweise der Bibelgarten des Doms. Gleiches gilt für einen Großteil der Gewerbeflächen im Stadtgebiet. Ebenso sind die meisten Straßenzüge in der Neustadt und den Ortsteilen Ostertor und Östliche Vorstadt mit einer „eher ungünstigen“ Bewertung belegt. Dahingegen unterliegen weite Teile von Schwachhausen einer „sehr günstigen“ humanbioklimatischen Situation. Diese Flächen weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung eine relativ starke nächtliche Abkühlung und Durchlüftung begünstigt. 29 % der Siedlungsflächen sind für die derzeitige Situation mit „sehr günstig“ bewertet. Einer „eher ungünstigen“ Situation unterliegen 12 % der Siedlungsflächen.

Der größte Teil des Siedungsgebietes (35 %) ist in der Ist-Situation mit einer „günstigen“ humanbioklimatischen Situation belegt. Diese klimatisch „günstig“ bewerteten Gebiete sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt und befinden sich flächendeckend in den Vororten Bremens, aber auch in den Hinterhöfen innerstadtnaher Bereiche (Osttor, Neustadt, nördliches Findorff). Sie sind gut mit Kaltluft versorgt oder besitzen einen höheren Grünanteil und sind weniger versiegelt. Etwa ein Viertel der Siedlungsflächen (24 %) unterliegt einer „mittleren“ Situation. Hierzu gehören dichter bebaute Flächen mit einem höheren Versiegelungsanteil, wie z. B. in der Alten Neustadt und im südlichen Findorff. Weiterhin unterliegen viele Gewerbeflächen einer „mittleren“ Bewertung. Darunter fallen die Flächen in Woltmershausen, westlich des Friedhofs Osterholz, das Gewerbegebiet Bremer Kreuz sowie am Autobahnkreuz Hemelingen. Eine „ungünstige“ Situation weist in der Ist-Situation keine der Flächen auf.

Die „ungünstige“ Klasse zeigt sich erst in den Zukunftsszenarien infolge des prognostizierten Klimawandels in Bremen. Das Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 zeigt, dass in der nahen Zukunft unter einem mittleren Klimawandel mit einer deutlichen Verschiebung der Klassen im Stadtgebiet zu rechnen ist. Die hier angenommene Temperaturveränderung von +1,6 °C führt dazu, dass 10 % der Siedlungsflächen einer „ungünstigen“ Situation unterliegen. Hierzu zählen viele der Flächen, die bereits in der Ist-Situation „eher ungünstig“ bewertet wurden, und deren Situation sich im Zuge des Klimawandels weiter verschlechtert (z.B. Altstadt, Straßenzüge in der Neustadt und der Östlichen Vorstadt). Während in der Ist-Situation noch ein Großteil der Siedlungsflächen mit „gut“ oder „sehr gut“ bewertet wurden (64 %), unterliegen die meisten Flächen im RCP4.5\_2050-Szenario einer „mittleren“ bis „eher ungünstigen“ Situation (83 %). Flächen mit einer „sehr günstigen“ Bewertung sind kaum noch vorhanden (0,2 %).

Im Zukunftsszenario RCP2.6\_2085, welches die ferne Zukunft betrachtet, sind die Klassen der „sehr günstigen“ bzw. der „günstigen“ Situation mit 4 % bzw. 32 % stärker belegt als im Szenario RCP4.5\_2050. Dies ist damit zu begründen, dass das Szenario RCP2.6\_2085 die Entwicklung eines schwachen Klimawandels annimmt, was dazu führt, dass die prognostizierte Temperaturänderung mit +0,8 °C langfristig unterhalb der von RCP4.5\_2050 verbleibt.

Dahingegen führt die Annahme eines langfristigen starken Klimawandels mit einer hohen Temperaturänderung von +4,6 °C im Szenario RCP8.5\_2085 dazu, dass ein Großteil der Siedlungsflächen (57 %) einer „ungünstigen“ Situation unterliegt. Dies betrifft vor allem die Vororte Bremens. Die hochversiegelten innerstädtischen Bereiche und Gewerbeflächen unterliegen einer „sehr ungünstigen“ bis „extrem ungünstigen“ Situation. Die Klassen der „sehr günstigen“, „günstigen“ oder „mittleren“ Situation sind nicht mehr belegt.

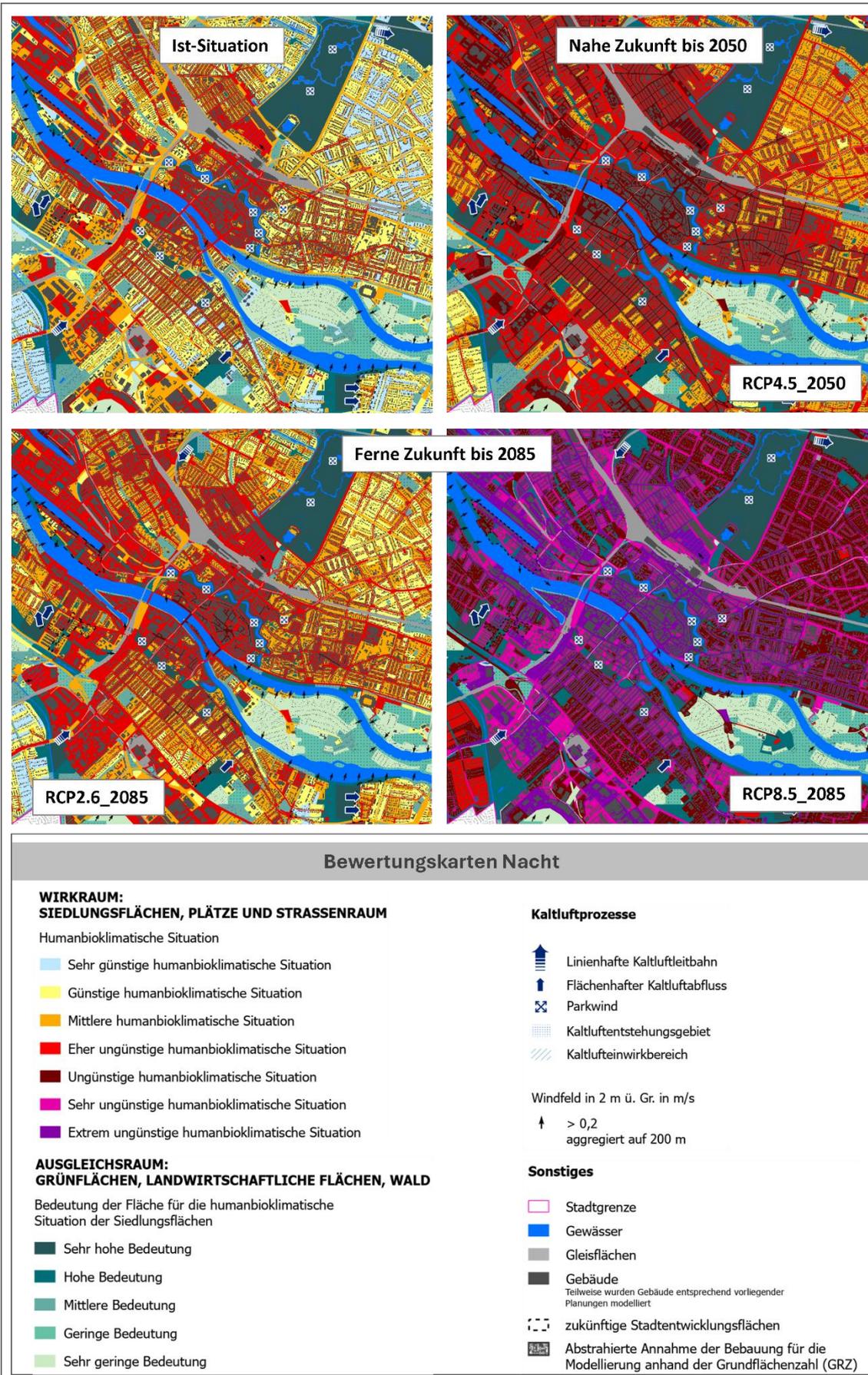
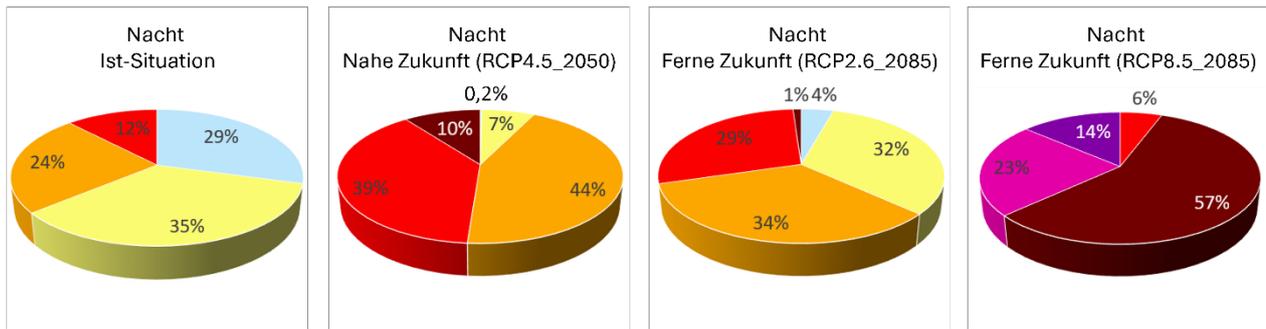


Abbildung 21: Zoom auf die Bewertungskarten Nacht der Ist-Situation und der Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).



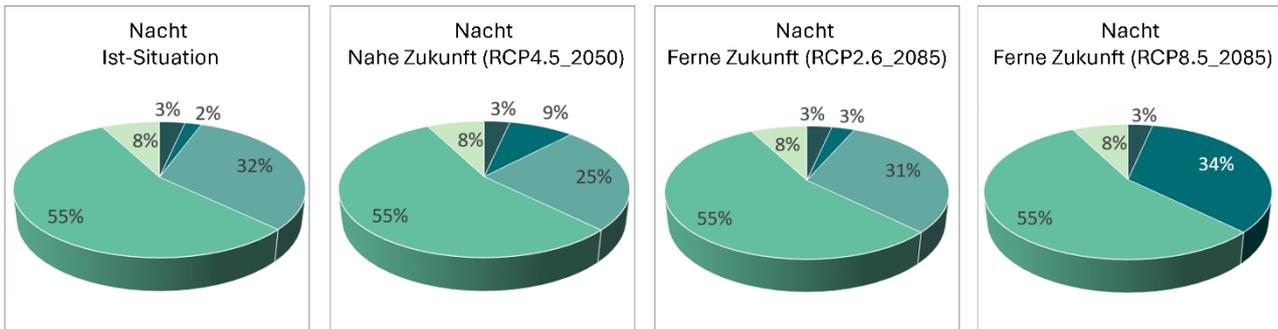
**Humanbioklimatische Situation im Wirkraum in der Nacht**

- 1 – sehr günstige Situation
- 2 – günstige Situation
- 3 – mittlere Situation
- 4 – eher ungünstige Situation
- 5 – ungünstige Situation
- 6 – sehr ungünstige Situation
- 7 – extrem ungünstige Situation

Abbildung 22: Statistiken für den Wirkraum in der Nacht. Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).

Neben der humanbioklimatischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im Ausgleichsraum für die Siedlungsgebiete thematisiert und eingeschätzt (siehe statistische Auswertungen in Abbildung 23). In der Ist-Situation werden dabei 3 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit einer „sehr hohen“ Bedeutung ausgewiesen. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung (siehe Abbildung 18) handelt es sich dabei um Flächen, die innerhalb von Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen oder Parkwinden liegen. Dazu zählen insbesondere siedlungsnahe bzw. innerstädtische Grünflächen, wie der Bürgerpark oder die Wallanlagen. Ausgleichsflächen mit einer „hohen“ Bedeutung sind mit einem Anteil von 2 % im Stadtgebiet zu finden. Dabei handelt es sich um Ausgleichsflächen, die entweder in direkter Umgebung von Kaltluftbahnen oder Parkwinden liegen, oder an thermisch belasteten Wohnraum angrenzen und dort wirksam werden. Der relativ kleine Anteil dieser Fläche ist damit zu erklären, dass in der Ist-Situation kein Siedlungsraum mit Wohnfunktion als thermisch belastet gilt („ungünstige“ Situation oder schlechter) und somit ausschließlich Flächen in der Peripherie oben genannter Kaltluftprozesse in diese Klasse fallen. Ausgleichsflächen, die an unbelasteten Wohnraum angrenzen und dort ausgleichend wirken können, werden als Flächen mit einer „mittleren“ Bedeutung eingeordnet. Diese Klasse nimmt in der Ist-Situation einen Anteil von 32 % ein. Der größte Anteil der Ausgleichsflächen entfällt mit 55 % auf die Flächen mit einer „geringen“ Bedeutung. In diese Kategorie fallen die Ausgleichsflächen, auf denen überdurchschnittlich viel Kaltluft produziert wird oder die von Waldflächen geprägt sind, die aber keinen direkten Bezug zum bewohnten Siedlungsraum haben. Darunter fallen die weitläufigen Naturschutzgebiete und Landschaftsschutzgebiete in Bremer Stadtgebiet, was den großen Anteil dieser Klasse erklärt. Ausgleichsflächen mit einer „sehr geringen“ Bedeutung nehmen einen Anteil von 8 % ein. Dabei handelt es sich um Grünflächen ohne Bezug zum bewohnten Siedlungsraum und ohne überdurchschnittliche Kaltluftproduktion.

Im Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 bleibt die Klasseneinteilung weitgehend vergleichbar mit dem Ist-Szenario. Veränderungen ergeben sich bei den Ausgleichsflächen einer „hohen“ und einer „mittleren“ Bedeutung. Die Bedeutung der Ausgleichsflächen nimmt unter Klimawandelbedingungen zu, da deren Funktion eng mit der Nähe zum (thermisch belasteten) Siedlungsraum verwoben sind. Dadurch, dass sich im Szenario RCP4.5\_2050 der Anteil an thermisch belastetem Wohnraum erhöht, werden auch die angrenzenden Ausgleichsflächen in ihrer Bedeutung hochgestuft. Die gleiche Entwicklung ist in den Szenarien RCP2.6\_2085 und



**Bedeutung der Fläche im Ausgleichsraum für die humanbioklimatische Situation der Siedlungsflächen in der Nacht**

- 1 – sehr hohe Bedeutung
- 2 – hohe Bedeutung
- 3 – mittlere Bedeutung
- 4 – geringe Bedeutung
- 5 – sehr geringe Bedeutung

Abbildung 23: Statistiken für den Ausgleichsraum in der Nacht. Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).

RCP8.5\_2085 zu erkennen. In RCP8.5\_2085 nimmt die Klasse mit „hoher“ Bedeutung einen relativ großen Anteil ein, da hier alle bewohnten Siedlungsflächen als thermisch belastet gelten und dementsprechend die Bedeutung der angrenzenden Ausgleichsflächen steigt.

**TAGSITUATION**

In der Tagsituation steht die Aufenthaltsqualität im Außenraum im Vordergrund. Dies gilt gleichermaßen für die Flächen im Wirkraum und im Ausgleichsraum. Der Bewertungsparameter ist hier die PET um 14 Uhr, die mit der oben beschriebenen Methodik bewertet wurde (siehe Kapitel 4.2). Abbildung 24 zeigt Ausschnitte der Bewertungskarten Tag für die verschiedenen Szenarien. Die zugehörigen Statistiken finden sich in den Abbildungen Abbildung 25/Abbildung 26. Aus der statistischen Auswertung wird ersichtlich, dass in der Ist-Situation im Wirkraum nur 4 % der Flächen mit einer „schwachen“ Belastung belegt sind und sich dieser Anteil in den Zukunftsszenarien noch verringert (RCP4.5\_2050: 1 %, RCP2.6\_2085: 3 % bzw. RCP8.5\_2085: 0 %). Der überwiegende Teil des Wirkraums (79 %) ist in der Ist-Situation einer „mäßigen“ (41 %) bis „erhöhten“ (38 %) Belastung zuzuordnen. 17 % der Flächen unterliegen einer „starken“ Belastung und lediglich 0,4 % einer „extrem starken“ Belastung. Die Anteile der „starken“ und „extrem starken“ Belastung nehmen in den Zukunftsszenarien deutlich zu und erreichen in der fernen Zukunft unter der Annahme eines starken Klimawandels (RCP8.5\_2085) einen Anteil von 75 %.

Es wird deutlich, dass sich wie auch bereits in der Nacht-Situation die Anteile der Klassen, die eine „ungünstige“ bis „extrem ungünstige“ Situation bzw. eine „starke“ bis „extrem starke“ Belastung beschreiben, im Zuge des Klimawandels deutlich zunimmt. Das Muster der räumlichen Verteilung der Belastungsklassen stellt sich am Tage generell jedoch anders dar als in der Nachtsituation. Da die PET sehr stark von der Verschattung durch Bäume oder Gebäude abhängt, sind beispielsweise in der Ist-Situation viele Innenstadtbereiche einer „schwachen“ bis „mäßigen“ Belastung zugeordnet, da die höheren Gebäude verschatten und dadurch die direkte Sonneneinstrahlung reduzieren. Dies zeigt sich beispielsweise entlang diverser Straßenzüge in der Altstadt. Dahingegen können Flächen, die in der Nacht als „günstig“ bis „sehr günstig“ bewertet werden, am Tage eine erhöhte Wärmebelastung aufweisen, da sie relativ offen gestaltet sind und nur wenige beschattete



Bereiche aufweisen. Ein Beispiel dafür ist der Stadtteil Habenhausen: Dieser ist geprägt von Einzelhausbebauung und großen Gartenflächen mit geringem Baumanteil. Daher weisen große Bereiche des Stadtteils eine „erhöhte“ bis „starke“ Belastung auf. Der Stadtteil Schwachhausen weist ebenfalls große Gartenflächen auf, die jedoch vermehrt mit Bäumen bepflanzt sind, die für Schatten sorgen. Daher ist das Belastungsniveau am Tage hier geringer als in Habenhausen.

17 % der Siedlungsflächen weisen im Ist-Zustand eine starke Belastung auf. Diese finden sich im gesamten Stadtgebiet und betreffen hoch versiegelte Flächen, die nicht von Sonneneinstrahlung geschützt sind, beispielsweise auf Gewerbeflächen und an der Bürgerweide, aber auch entlang von Straßenzügen, in die die Sonne während der Nachmittagsstunden ungehindert einstrahlen kann, wie beispielsweise in der Neustadt.

Da die Bewertung des Ausgleichsraum ebenfalls auf Basis der PET geschieht, tritt hier ebenfalls eine starke Abhängigkeit der Wärmebelastung von der Beschattungssituation auf. Die Beschattung durch hohe Vegetation sowie die Verdunstungsleistung der entsiegelten Flächen sorgt daher hier für eine verminderte Wärmebelastung. Im Gegensatz zum Wirkraum zeigt der Ausgleichsraum in der Ist-Situation mit 18 % einen deutlich höheren Anteil an Flächen mit einer „schwachen“ Belastungen als der Wirkraum. So zeigt beispielsweise der Bürgerpark über weite Bereiche eine „schwache“ Belastung. Der Anteil der „schwachen“ Belastung im Ausgleichsraum nimmt in den Zukunftsszenarien im Stadtgebiet ab, ist jedoch im Gegensatz zum Wirkraum in allen Zukunftsszenarien vertreten. So zeigt die Statistik, dass auch in der fernen Zukunft unter der Annahme eines starken Klimawandels noch Flächen mit einer „schwachen“ Belastung im Ausgleichsraum vorhanden sind (4 %). So weist auch der Bürgerpark weiterhin „schwach“ belastete Bereiche auf.

Den größten Flächenanteil des Ausgleichsraums in der Ist-Situation machen mit 30 bzw. 27 % die Klassen der „erhöhten“ und „starken“ Belastung aus. Diese bilden sich insbesondere über den weitläufigen Landwirtschaft- und Grünflächen am Stadtrand Bremens oder auch über der Galopprennbahn aus. Im Zuge des Klimawandels erhöht sich hier flächendeckend die Wärmebelastung, so dass die Flächen im Zukunftsszenario RCP4.5\_2050 vereinzelt und im Szenario RCP8.5\_2085 flächendeckend mit einer extremen Wärmebelastung belegt sind.

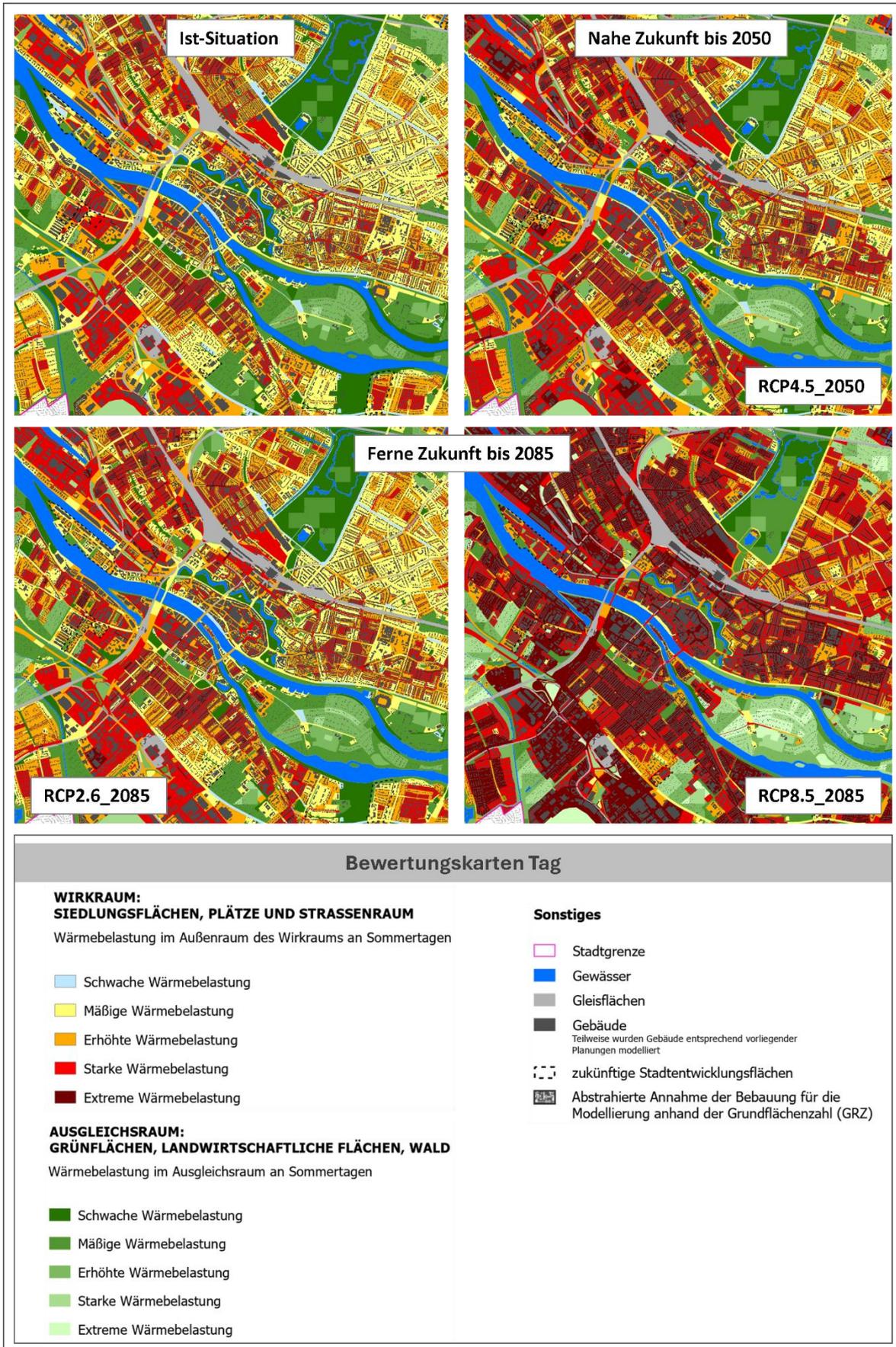
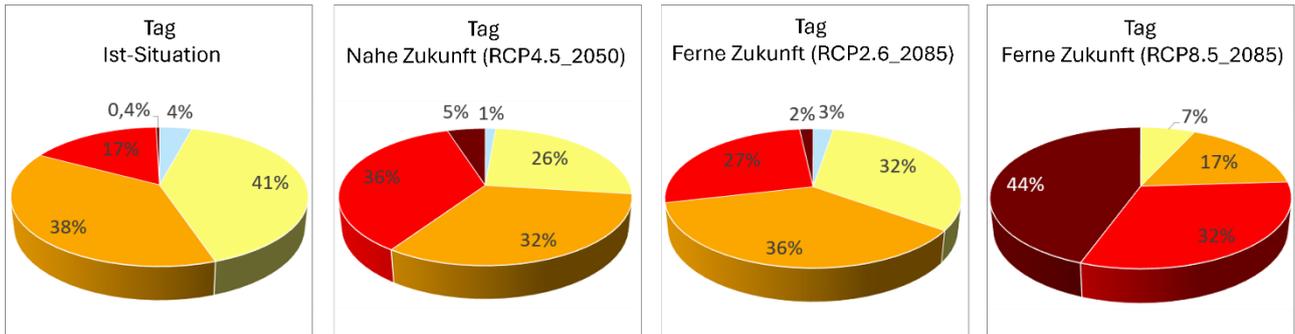


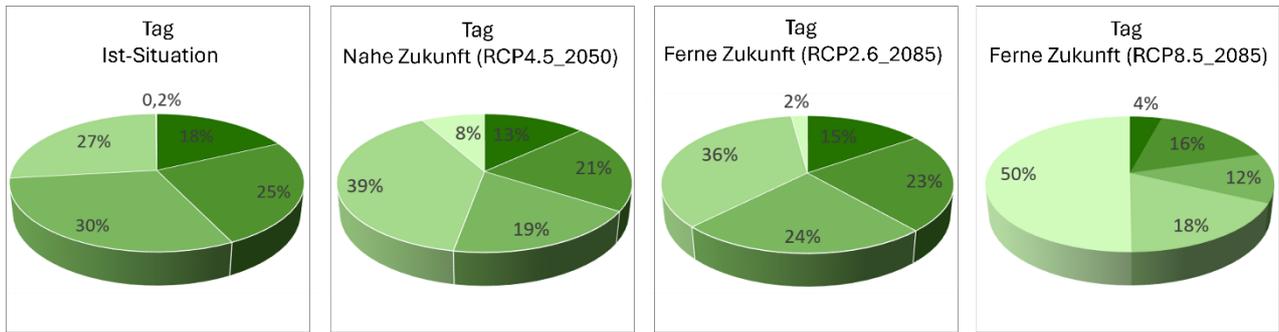
Abbildung 24: Zoom auf die Bewertungskarten Tag der Ist-Situation und der Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).



**Wärmebelastung im Wirkraum am Tage**

- 1 – schwache Belastung
- 2 – mäßige Belastung
- 3 – erhöhte Belastung
- 4 – starke Belastung
- 5 – extreme Belastung

Abbildung 25: Statistiken für den Wirkraum am Tage. Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).



**Wärmebelastung im Ausgleichsraum am Tage**

- 1 – schwache Belastung
- 2 – mäßige Belastung
- 3 – erhöhte Belastung
- 4 – starke Belastung
- 5 – extreme Belastung

Abbildung 26: Statistiken für den Ausgleichsraum am Tage. Prozentuale Verteilung der Bewertungsklassen für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien der nahen Zukunft (mittlerer Klimawandel, RCP4.5\_2050) und der fernen Zukunft (schwacher Klimawandel, RCP2.6\_2085 und starker Klimawandel, RCP8.5\_2085).



## 5. Planungshinweiskarte

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der Nacht- und der Tag-Situation von derzeitiger Situation und Zukunft zusammen und kann daher als finales Produkt der Klimaanalyse betrachtet werden. Für die Berücksichtigung der Zukunft werden nicht alle erstellten Zukunftsszenarien herangezogen, sondern ausschließlich das Szenario RCP4.5\_2050, welches einen mittleren Klimawandel und die Entwicklung der nahen Zukunft betrachtet und somit auch dem Planungshorizont der städtischen Planung abdeckt. Damit steht mit der Planungshinweiskarte ein Vorsorgeinstrument bereit, welches der Stadtplanung erlaubt, sich durch den Einsatz entsprechender Maßnahmen an den Klimawandel anzupassen und eine klimagerechte Stadtentwicklung umzusetzen. Als generalisierende Karte verbindet sie dabei alle vorangestellten Klimaanalyse-Darstellungen. Sie identifiziert und analysiert Ausgleichs- und Belastungsräume und gibt erste Empfehlungen zum planerischen Umgang aus stadtklimatologischer Sicht. Detaillierte flächenkonkrete Informationen zu einzelnen Klimaparametern und zur bioklimatischen Situation für Tag bzw. Nacht in den einzelnen Szenarien (Ist / RCP4.5\_2050 / RCP2.6\_2085 / RCP8.5\_2085) sind den Klimaanalysekarten und Bewertungskarten sowie den vorangestellten Kapiteln im Bericht zu entnehmen. Die stadtklimatologischen Ergebnisse sind im Rahmen von Planungsprozessen als ein Belang neben weiteren Faktoren abzuwägen.

### 5.1 METHODIK FÜR WIRKRAUM UND AUSGLEICHSPRAUM

Die Planungshinweiskarte unterscheidet bezüglich ihrer Darstellungen in den Wirkraum (Siedlungsflächen, Plätze und Straßenraum) und den Ausgleichsraum (Grünflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wald) und stellt hierfür entsprechende Handlungsansätze bereit.

#### WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN, PLÄTZE UND STRAßENRAUM

Für den Wirkraum werden aus der Gesamtbewertung der bioklimatischen Situation verschiedene Handlungsbedarfe abgeleitet. Dazu wurde die Tag- und die Nachtsituation aus den Bewertungskarten der Ist-Situation und des Zukunftsszenarios RCP4.5\_2050 jeweils miteinander kombiniert und zuletzt in einer 4-stufigen Skala zu Handlungsbedarfen zusammengefasst:

- 1 – Klimatischer Sanierungsbereich**
- 2 – Klimatischer Optimierungsbereich**
- 3 – Klimatischer Erhaltungsbereich**
- 4 – Klimatisch unbelasteter Bereich**



Die Kombination aus Tag- und Nachtsituation erfolgte für den gesamten Wirkraum mit einer gleichmäßigen Gewichtung von 50/50. Beiden Betrachtungszeiten wird demnach die gleiche Bedeutung in der Bewertung beigemessen. Die Verknüpfung beider Situationen ist anhand einer Matrix in Abbildung 27 dargestellt. Dieses Vorgehen wurde jeweils für die Ist-Situation und für das Zukunftsszenario durchgeführt.

|                           |          | Wirkraum                       |          |          |                 |            |
|---------------------------|----------|--------------------------------|----------|----------|-----------------|------------|
|                           |          | Bioklimatische Situation Nacht |          |          |                 |            |
|                           |          | sehr günstige                  | günstige | mittlere | eher ungünstige | ungünstige |
| Wärmebelastung<br>am Tage | schwache | 1                              | 2        | 2        | 3               | 3          |
|                           | mäßige   | 2                              | 2        | 3        | 3               | 4          |
|                           | erhöhte  | 2                              | 3        | 3        | 4               | 4          |
|                           | starke   | 3                              | 3        | 4        | 4               | 5          |
|                           | extreme  | 3                              | 4        | 4        | 5               | 5          |

Abbildung 27: Einordnung des Wirkraums: Verknüpfung der Tag- und Nachtbewertung.

Nach der erfolgten Kombination der Bewertungsklassen für Tag und Nacht in 5 Stufen, wurden diese jeweils für Ist und Zukunft in 4 Handlungsbedarfe übersetzt. Unterpunkte kategorisieren, ob sich die Einordnung auf die Ist-Situation oder auf das Zukunftsszenario bezieht (Tabelle 4).

Tabelle 4: Definition der Handlungsbedarfe für den Wirkraum.

| Einordnung des Wirkraums (Ergebnis der Tag-Nacht-Kombination, siehe Abbildung 27) | Übersetzung in Handlungsbedarf   |
|---|--|
| 5   | <b>1 Klimatischer Sanierungsbereich</b><br>1.1 bereits Ist-Situation betroffen<br>1.2 Ist-Situation noch nicht betroffen, aber nahe Zukunft            |
| 4   | <b>2 Klimatischer Optimierungsbereich</b><br>2.1 Ist-Situation und nahe Zukunft betroffen<br>2.2 Ist-Situation noch nicht betroffen, aber nahe Zukunft |
| 3   | <b>3 Klimatischer Erhaltungsbereich</b><br>3.1 Ist-Situation und nahe Zukunft betroffen<br>3.2 Ist-Situation noch nicht betroffen, aber nahe Zukunft   |
| 2 bzw. 1  | <b>4 Klimatisch unbelasteter Bereich</b>   |

Dabei sollen die Handlungsbedarfe keine vorgegebene Reihenfolge darstellen, die abzarbeiten ist, sie sollen vielmehr helfen, die bestehenden Siedlungsflächen nach ihrer thermischen Belastung einzuschätzen und relativ miteinander zu vergleichen. Die Bewertung nach Handlungsbedarfen soll eine Hilfestellung geben, auf welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Konkrete Handlungsempfehlungen unterscheiden sich nach lokalen Gegebenheiten und müssen individuell erarbeitet werden.

Bauliche Entwicklungen werden dabei als Chance zur Anpassung an den Klimawandel verstanden und genutzt. Im Zuge der Stadtentwicklung können Ziele und Maßnahmen zur Klimaanpassung frühzeitig in informellen Planungsprozessen berücksichtigt bzw. über Bebauungspläne verbindlich festgesetzt werden.



Nachfolgend werden die einzelnen Handlungsbedarfe erläutert.

### 1 – Klimatischer Sanierungsbereich

Diese Flächen erfahren bereits aktuell oder im betrachteten Zukunftsszenario eine sehr starke Wärmebelastung. Es besteht bereits jetzt ein sehr hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation. Im Rahmen baulicher Entwicklungen / Überplanung sollte eine Verbesserung der klimatischen Situation erzielt werden. Weitere städtebauliche Entwicklungen dürfen nicht zu einer Verschlechterung der klimatischen Situation im direkten Umfeld führen. Vulnerable Einrichtungen wie bspw. Kitas, Schulen, Pflege- und Gesundheitseinrichtungen sollten nach Möglichkeit nicht in diesen Flächen geplant werden oder bedürfen bei notwendigen Planungen weitreichender Hitzeschutzmaßnahmen.

-  1.1 Die Fläche ist bereits aktuell sehr stark wärmebelastet.
-  1.2 Die Fläche ist aktuell noch nicht sehr stark wärmebelastet, wird jedoch in der Zukunft (2050) sehr stark wärmebelastet sein.

### 2- Klimatischer Optimierungsbereich

Auf diesen Flächen ist bereits aktuell oder im betrachteten Zukunftsszenario eine starke Wärmebelastung vorhanden. Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind hier notwendig und es besteht ein hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen. Bauliche Entwicklungen sollten zu einer Verbesserung der klimatischen Situation auf der Fläche führen. Eine Verschlechterung der klimatischen Situation auf der Fläche und im direkten Umfeld sollte vermieden werden.

-  2.1 Die Fläche ist bereits aktuell und auch in der Zukunft (2050) stark wärmebelastet.
-  2.2 Die Fläche ist aktuell noch nicht wärmebelastet, wird jedoch in der Zukunft (2050) stark wärmebelastet sein.

### 3 – Klimatischer Erhaltungsbereich

Auf diesen Flächen ist bereits aktuell oder im betrachteten Zukunftsszenario eine mäßige Wärmebelastung vorhanden. Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen. Für bauliche Entwicklungen sind klimaökologische Aspekte zu beachten wie bspw. Baukörperstellung bei Kaltluftströmungen, geringe Versiegelung, Bäume mit ausreichend Wurzelraum, Fassadenbegrünung oder helle Dachflächen. Die bioklimatische Situation soll erhalten bleiben und nach Möglichkeit verbessert werden.

-  3.1 Die Fläche ist bereits aktuell und auch in der Zukunft (2050) mäßig wärmebelastet.
-  3.2 Die Fläche ist aktuell noch nicht mäßig wärmebelastet, wird jedoch in der Zukunft (2050) mäßig wärmebelastet sein.



#### 4 – Klimatisch unbelasteter Bereich

Auf diesen Flächen ist aktuell und auch im betrachteten Zukunftsszenario nur eine schwache Wärmebelastung vorhanden. Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation haben hier keine Priorität, sollten jedoch immer geprüft werden. Bei größeren baulichen Entwicklungen sind mögliche Auswirkungen auf die bioklimatische Situation zu beachten.

 Die Fläche unterliegt aktuell und im Zukunftsszenario (2050) nur einer schwachen Wärmebelastung.

#### AUSGLEICHSRaum: GRÜNFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN UND WALD

Für die Grün- und Waldflächen und landwirtschaftlichen Flächen erfolgt mit der Planungshinweiskarte die Bewertung der Bedeutung für die bioklimatische Situation anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt und als Rückzugsorte an heißen Tagen in einer 4-stufigen Skala:

**Sehr hohe Bedeutung**

**Hohe Bedeutung**

**Mittlere Bedeutung**

**Geringe Bedeutung**

Dazu werden – vergleichbar zum Wirkraum – die Tag- und die Nachtbewertungen miteinander verschnitten. Dies erfolgte jeweils für die Tag- und Nachtbewertungen der Ist-Situation und des Zukunftsszenarios RCP4.5\_2050. Die Gewichtung erfolgt weitestgehend gleichberechtigt, mit Ausnahme der höchsten nächtlichen Bewertungsklasse, welche zu 100 % in die Kombination eingeht. Dies bedeutet, dass sobald eine Grünfläche mit einer „sehr hohen“ nächtlichen Bedeutung belegt ist, erhält sie auch die höchste Gesamtbewertung, unabhängig von der Bewertung der Tagsituation. Dies ist dadurch begründet, dass damit entscheidende Klimafunktionen (Kaltluftentstehung, Kaltluftabfluss) einhergehen. Die Verknüpfung ist anhand einer Matrix in Abbildung 28 dargestellt und erfolgte für Ist- und Zukunftssituation.

|                           |          | Ausgleichsraum                    |      |          |         |              |
|---------------------------|----------|-----------------------------------|------|----------|---------|--------------|
|                           |          | Bedeutung der Fläche in der Nacht |      |          |         |              |
|                           |          | sehr hohe                         | hohe | mittlere | geringe | sehr geringe |
| Wärmebelastung<br>am Tage | schwache | 5                                 | 5    | 4        | 4       | 3            |
|                           | mäßige   | 5                                 | 4    | 4        | 3       | 3            |
|                           | erhöhte  | 5                                 | 4    | 3        | 3       | 2            |
|                           | starke   | 5                                 | 3    | 3        | 2       | 2            |
|                           | extreme  | 5                                 | 3    | 2        | 2       | 1            |

Abbildung 28: Einordnung des Ausgleichsraums: Verknüpfung der Tag- und Nachtbewertung.

Anschließend wurden die kombinierten Tag-Nacht-Bewertungen in eine 4-stufige Bewertungsskala übersetzt. Dabei wurde die jeweils höhere Bewertung aus Ist und Zukunft berücksichtigt: Weist beispielsweise eine Grünfläche in der Ist-Situation eine niedrigere Bedeutung auf als in der Zukunftssituation, wird für die finale Klassifizierung die höhere Bewertung übernommen (Tabelle 5).



Tabelle 5: Definition der Bedeutungsklassen für den Ausgleichsraum.

| Einordnung des Ausgleichsraums (Ergebnis der Tag-Nacht-Kombination, siehe Abbildung 28) | Übersetzung in Bedeutung für die bioklimatische Situation |
|---|---|
| Ist-Situation = 5 <b>oder</b><br>Zukunftsszenario RCP4.5_2050 = 5                       | Sehr hohe Bedeutung                                       |
| Ist-Situation = 4 <b>oder</b><br>Zukunftsszenario RCP4.5_2050 = 4                       | Hohe Bedeutung  |
| Ist-Situation = 3 <b>oder</b><br>Zukunftsszenario RCP4.5_2050 = 3                       | Mittlere Bedeutung  |
| Ist-Situation = 2 bzw. 1 <b>oder</b><br>Zukunftsszenario RCP4.5_2050 = 2 bzw. 1         | Geringe Bedeutung   |

### Sehr hohe Bedeutung

In diese Klasse fallen Flächen, die eine sehr hohe Bedeutung für die nächtliche Abkühlung haben, da sie im Einzugsgebiet einer bedeutenden Kaltluftströmung mit Siedlungsbezug liegen. Dazu zählen linienhafte Kaltluftleitbahnen, flächenhafte Kaltluftabflüsse und Parkwinde. Bauliche Entwicklungen sind äußerst maßvoll zu gestalten und sollten unter Erhalt der thermischen Ausgleichsfunktion erfolgen. Negative Auswirkungen auf angrenzende Siedlungsflächen sollten vermieden werden.

### Hohe Bedeutung

In diese Klasse fallen Flächen, die eine mäßige bis hohe Bedeutung für die nächtliche Abkühlung von angrenzenden Siedlungsflächen haben sowie als Rückzugsorte mit mäßiger bis geringer Wärmebelastung am Tage dienen. Dazu zählen Flächen, die Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüsse speisen, Kaltluftentstehungsgebiete sowie Grünflächen, die unmittelbar an Siedlungsbereiche angrenzen, aber auch siedlungsferne Grünflächen, die einen relativ hohen Verschattungsanteil aufweisen. Bauliche Entwicklungen sind maßvoll zu gestalten und sollten nur unter Erhalt der thermischen Ausgleichsfunktion erfolgen. Negative Auswirkungen auf angrenzende Siedlungsflächen sollten vermieden werden.

### Mittlere Bedeutung

In diese Klasse fallen Flächen, die entweder eine mäßige bis hohe Bedeutung für die nächtliche Abkühlung von angrenzenden Siedlungsflächen haben oder als Rückzugsort mit mäßiger bis schwacher Wärmebelastung am Tage dienen. Dazu zählen Flächen, die dem Kaltlufttransport in angrenzende Siedlungsbereiche dienen und einen relativ geringen Verschattungsanteil aufweisen sowie Bereiche (siedlungsnah und -fern) mit dichter Vegetation und viel Verschattung. Bauliche Entwicklungen sollten unter Berücksichtigung der thermischen Ausgleichsfunktion erfolgen. Negative Auswirkungen auf angrenzende Siedlungsflächen sollten vermieden oder minimiert werden.



### **Geringe Bedeutung**

In diese Klasse fallen Flächen, die eine mäßige bis sehr geringe Bedeutung für die nächtliche Abkühlung von angrenzenden Siedlungsflächen haben und nicht als Rückzugsort am Tage dienen, da sie eine erhöhte bis extreme Wärmebelastung aufweisen. Diese Flächen befördern während der Nacht nur geringe Mengen an Kaltluft zum Siedlungsraum und/oder besitzen keinen räumlichen Bezug dazu. Weiterhin weisen sie einen relativ geringen Verschattungsanteil auf. Bauliche Entwicklungen sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Insbesondere innerstädtische Grünstrukturen sollten erhalten und qualitativ verbessert werden.

Ergänzend zur Einordnung der Bedeutung des Ausgleichsraums, werden durch eine Umrandung Flächen hervorgehoben, deren Bedeutung für die bioklimatische Situation sich im Zuge des Klimawandels erhöht (Abbildung 29). Grund dafür, dass Grünflächen in ihrer Bedeutung zunehmen, können beispielsweise angrenzende Wohnbereiche sein, deren thermische Situation sich im Zuge des Klimawandels verschlechtert und die daher noch stärker auf die kühlende Funktion von Grünflächen angewiesen sind.

 Erhöhung der Bedeutung der Grünfläche; die Bedeutung dieser Flächen erhöht sich im Zuge des Klimawandels (bis 2050)

Abbildung 29: Symbologie zur Beschreibung einer veränderten Bedeutung im Zuge des Klimawandels.



## 5.2 ERGEBNISSE PLANUNGSHINWEISKARTE

Der Planungshinweiskarte liegt die Modellanalyse der Ist-Situation und des Zukunftsszenarios des mittleren Klimawandels in der nahen Zukunft (Szenario RCP4.5\_2050) zugrunde. Sie beinhaltet die Verknüpfung der Tag- und der Nachtsituation und weist den Flächen im Wirkraum verschiedene Handlungsbedarfe zu. Der Ausgleichsraum wird anhand seiner Bedeutung für die bioklimatische Situation klassifiziert. Die Flächenanteile der verschiedenen Bewertungsklassen sind in Abbildung 30 dargestellt. Abbildung 31 zeigt einen Ausschnitt der Planungshinweiskarte.

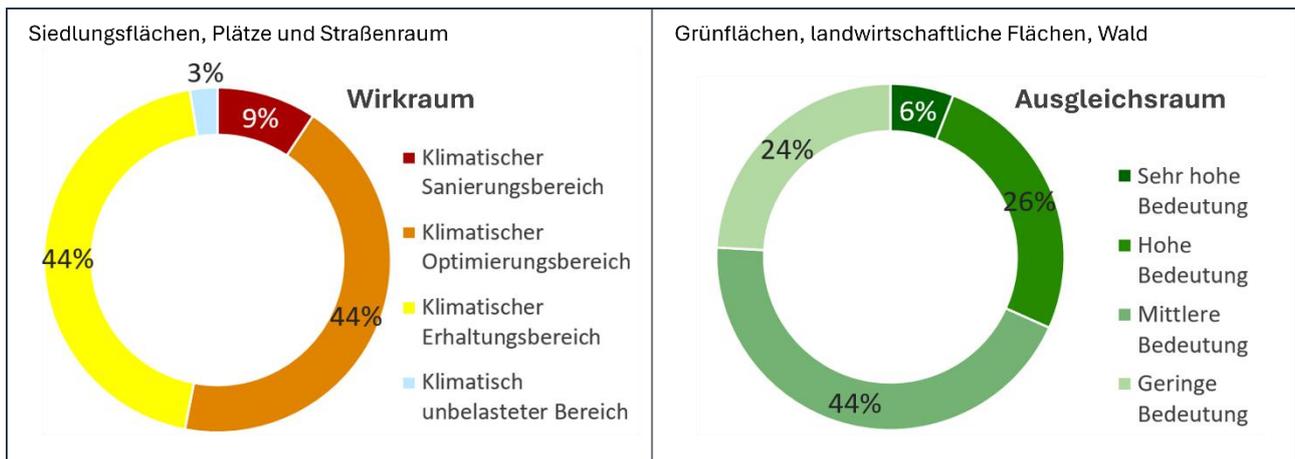


Abbildung 30: Statistik zur Planungshinweiskarte für den Wirk- und Ausgleichsraum.

Im Ergebnis sind 9 % der Wirkraumflächen als „Klimatischer Sanierungsbereich“ gekennzeichnet. Diese Flächen befinden sich insbesondere im innerstädtischen Bereich Bremens sowie in Gewerbeflächen. Aber auch Ortsteile in Stadtrandlage wie bspw. Lüssum-Bockkhorn oder Blumenthal zeigen Flächen mit dem höchsten Handlungsbedarf.

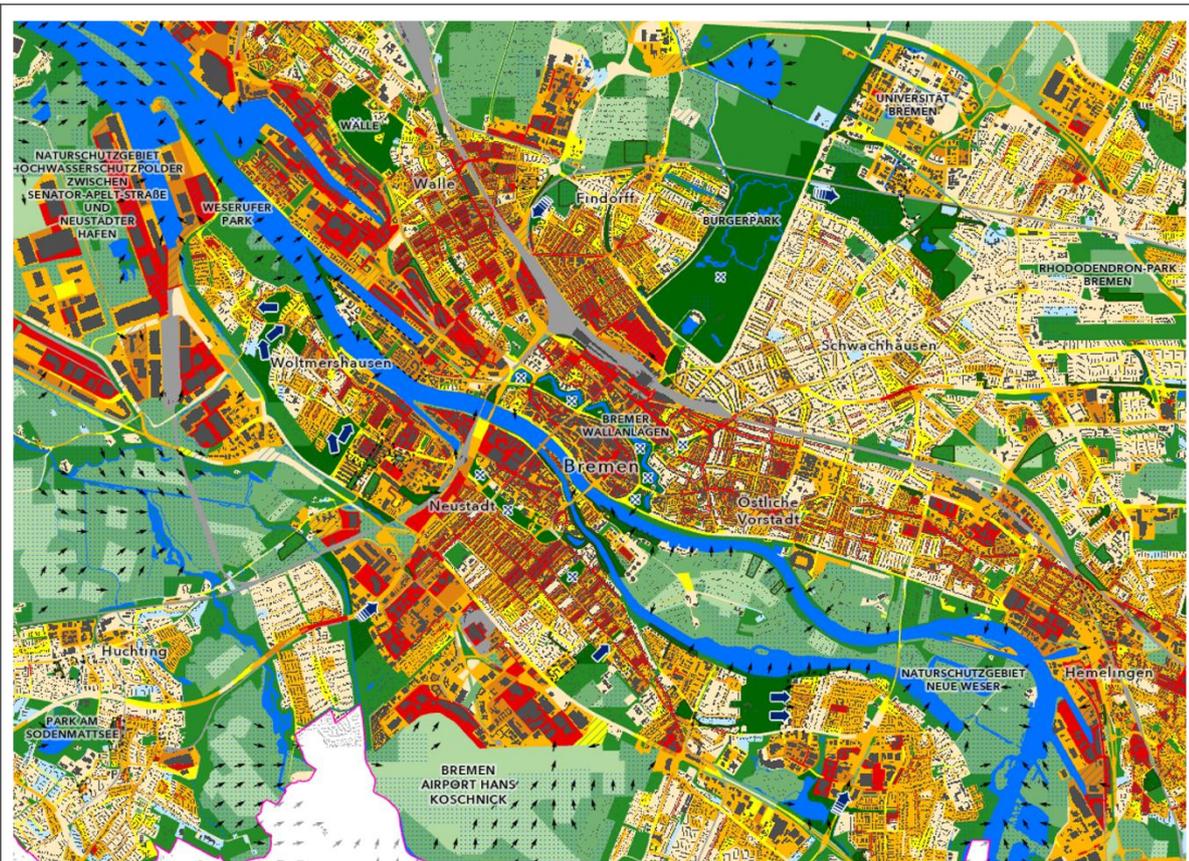
Etwa 44 % der Wirkraumflächen fallen in die Kategorie „Klimatischer Optimierungsbereich“. Diese Flächen finden sich im gesamten Stadtgebiet wieder und beinhalten alle Nutzungen. Der „Klimatische Erhaltungsbereich“ macht mit ebenfalls 44 % einen weiteren großen Teil des Wirkraums aus. Diese Kategorie kennzeichnet insbesondere die locker bebauten Stadtteile wie Schwachhausen, Huchting und Burglesum. Aber auch in anderen Bereichen tritt diese Klasse auf, in der Regel am Rand der Siedlungsflächen an der Grenze zum Ausgleichsraum.

Als „Klimatisch unbelasteter Bereich“ wurden 3 % der Wirkraumflächen ermittelt. Diese Flächen sind vor allem an den Ortsrändern sowie vereinzelt in locker bebauten Siedlungen (z.B. Obervieland, Schwachhausen, Oberneuland, Huchting) zu finden.

Im Ausgleichsraum weisen 6 % der Flächen eine „sehr hohe Bedeutung“ für die bioklimatische Situation auf, 26 % der Flächen sind mit einer „hohen Bedeutung“ belegt. Somit wurden insgesamt 32 % aller Grün- und Waldflächen sowie der landwirtschaftlichen Flächen den obersten zwei Bewertungskategorien zugeordnet. In diese beiden Klassen fallen Grünflächen, die im Einzugsgebiet einer Kaltluftleitbahn liegen, bzw. einen flächenhaften Kaltluftabfluss mit Bezug zum Siedlungsraum speisen. Aber auch innerstädtische Park- und Grünanlagen (z.B. Bürgerpark, Wallanlagen, Friedhof Walle) sind diesen Kategorien zugeordnet.



Eine „mittlere Bedeutung“ für die bioklimatische Situation haben 44 % der Ausgleichsraumflächen. Dazu zählen insbesondere die Landschaftsschutzgebiete Bremens, aber auch innerstädtische Bereiche, die jedoch keinen Bezug zu thermisch belastetem Wohnraum haben oder aufgrund ihrer Gestaltung keine Funktion als Rückzugsort an heißen Tagen haben. 24 % der Flächen im Ausgleichsraum unterliegen einer „geringen Bedeutung“ für die bioklimatische Situation. Diese haben aufgrund ihrer Lage weder eine direkte Funktion für thermisch belastetem Wohnraum noch bieten sie Abkühlung am Tage.



**Planungshinweiskarte**

**WIRKRAUM:  
SIEDLUNGSFLÄCHEN, PLÄTZE UND STRASSENRAUM**

**1 - Klimatischer Sanierungsbereich**

- 1.1 Die Fläche ist bereits aktuell sehr stark wärmebelastet.
- 1.2 Die Fläche ist aktuell noch nicht stark wärmebelastet, wird jedoch in der Zukunft (2050) sehr stark wärmebelastet sein.

**2 - Klimatischer Optimierungsbereich**

- 2.1 Die Fläche ist bereits aktuell und auch in der Zukunft (2050) stark wärmebelastet.
- 2.2 Die Fläche ist aktuell noch nicht stark wärmebelastet, wird jedoch in der Zukunft (2050) stark wärmebelastet sein.

**3 - Klimatischer Erhaltungsbereich**

- 3.1 Die Fläche ist bereits aktuell und auch in der Zukunft (2050) mäßig wärmebelastet.
- 3.2 Die Fläche ist aktuell noch nicht mäßig wärmebelastet, wird jedoch in der Zukunft (2050) mäßig wärmebelastet sein.

**4 - Klimatisch unbelasteter Bereich**

- Die Fläche unterliegt aktuell und im Zukunftsszenario (2050) nur einer schwachen Wärmebelastung.

**AUSGLEICHSPAUM:  
GRÜNFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE  
FLÄCHEN, WALD**

**Bedeutung der Fläche für die bioklimatische Situation**

- Sehr hohe Bedeutung
- Hohe Bedeutung
- Mittlere Bedeutung
- Geringe Bedeutung

□ Erhöhung der Bedeutung der Grünfläche; die Bedeutung dieser Flächen erhöht sich im Zuge des Klimawandels (bis 2050)

**Nächtliche Kaltluftprozesse**

- ↑ Linienhafte Kaltluftleitbahn
- ↑ Flächenhafter Kaltluftabfluss
- ⊠ Parkwind
- ⋯ Kaltluftentstehungsgebiet
- /// Kaltlufteinwirkungsbereich
- ↑ Windfeld in 2 m ü. Gr. in m/s

**Sonstiges**

- Stadtgrenze
- Gewässer
- Gleisflächen
- Gebäude
- ⋯ zukünftige Stadtentwicklungsflächen

Abbildung 31: Ausschnitt der Planungshinweiskarte.



### 5.3 MAßNAHMENKATALOG STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren.

Die Auswahl bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z. B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltfluthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stichpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 6 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

|                      |   |
|----------------------|---|
| MAßNAHMENCLUSTER I   | Thermisches Wohlbefinden im Außenraum     |
| MAßNAHMENCLUSTER II  | Verbesserung der Durchlüftung             |
| MAßNAHMENCLUSTER III | Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum |

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab.

So hängt beispielsweise ...

- ... die Beschattungsintensität von Stadtbäumen von der Pflanzdichte und dem Kronendurchmesser ab.
- ... der konkrete Nutzen einer Maßnahme von ihrer Verortung in thermisch belasteten und bewohnten Gebieten ab.
- ... die kühlende Wirkung eines Gründaches auf die bodennahe Atmosphäre von der Gebäudehöhe (vertikale Entfernung) ab.
- ... die lokal spürbare, kühlende Wirkung von Springbrunnen oder Bäumen von deren horizontalen Entfernung zum Aufenthaltsbereich des Menschen ab.

Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Bremer Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Der Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab



und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die siedlungsnahen Wald- und Grünflächen stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ *M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen*). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage, nachts auch als „Trittsteine“<sup>6</sup> für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ *M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen*).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.) übernehmen Bäume (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ *M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben*). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (→ *M12: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung*). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume den Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz<sup>7</sup> geachtet werden.

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ *M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien*). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ *M18: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen*).

Die in der Hansestadt Bremen vorhandenen größeren Gewässer wie die Weser wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes

---

<sup>6</sup> „Trittstein für Kaltluft“: Gemeint sind im Stadtgebiet verteilte, kleine Grün- oder Freiflächen, über denen sich nächtliche Kaltluft bildet und herantransportierte Luft reibungsarm abfließen kann und somit im Siedlungsgebiet zu einer thermischen Entlastung beiträgt.

<sup>7</sup> Straßenbaumliste mit Standortangaben zur Hitze- und Trockenheitsverträglichkeit: <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenuebersicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>



Wasser einen stärkeren Kühleffekt als stehendes Gewässer, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen<sup>8</sup> Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauster Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ *M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen*). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ *M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme*), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ *M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes*). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → *M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch*). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z. B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo<sup>9</sup> kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ *M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten*). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ *M16: Dachbegrünung*, → *M17: Fassadenbegrünung*, → *M19: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen*, → *M20: Technische Gebäudekühlung*).

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist

<sup>8</sup> "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)

<sup>9</sup> Albedo bezeichnet das Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung)



die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M14). Neue Versiegelung von Flächen für weiteren Parkraum ist zukünftig zu vermeiden. Alternativ sollten unterirdische Parkräume (Tiefgaragen mit Dachbegrünung) oder Parkhäuser mit Dach- und Fassadenbegrünungen etabliert werden.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der Planungshinweiskarte weiter zu priorisieren.

In dicht bebauten Siedlungsgebieten lassen sich Erholungsräume über sogenannte „Pocket Parks“ auch auf kleinem Raum einrichten. Schattenspendende Bäume, Sitzgelegenheiten und ansprechende Pflanzungen schaffen einen Raum zum Verweilen und Entspannen, insbesondere für Menschen, die keinen eigenen Garten oder Balkon besitzen. Beispiele finden sich mittlerweile in zahlreichen Städten, wie Bochum<sup>10</sup>, Nürnberg<sup>11</sup> Bonn<sup>12</sup> oder Düsseldorf<sup>13</sup>.

---

<sup>10</sup> <https://www.bochum.de/Pressemeldungen/30-Mai-2023/Eine-kleine-grosse-Erfolgsgeschichte-3.-Pocket-Park-eroeffnet>

<sup>11</sup> [https://www.nuernberg.de/internet/soer\\_nbg/pocketpark\\_pestadel.html](https://www.nuernberg.de/internet/soer_nbg/pocketpark_pestadel.html)

<sup>12</sup> <https://www.bonn.de/pressemitteilungen/mai-2022/klimaanpassung-im-kleinformat-pocket-park-in-duisdorf-neugestaltet.php>

<sup>13</sup> <https://www.duesseldorf.de/aktuelles/news/detailansicht/newsdetail/pocketpark-stadt-macht-aus-schotter-parkplatz-ein-quartierswaeldchen>



Tabelle 6: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Bremen.

| MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM   |  |
|--|--|
| <b>01 Innen-/Hinterhofbegrünung</b>  | <b>Kurzerläuterung</b>   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhung des Vegetationsanteils und der Versickerungsfähigkeit des Bodens</li> </ul>                              |
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>Erhöhung der Aufenthaltsqualität</li> <li>Regenwasserversickerung und Schaffung von Lebensräumen für Flora und Fauna. (Synergien zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und zur Biodiversität)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Innen- und Hinterhöfe</li> </ul>  |
|  |   |
|  | <p>Bild: Grüner Innenhof (Quelle: © Elke Kruse / Lübeck)</p>   |
| <b>02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</b>  | <b>Kurzerläuterung</b>   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten</li> </ul> |
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz</li> <li>Regenwasserversickerung (Synergien zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und zur Biodiversität)</li> </ul>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)</li> </ul>                             |
|  |    |
|  | <p>Bild: Sheridan Park (Quelle: © Pascal Cormont)</p>  |



**MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

|           |  |   |
|-----------|--|---|
| <b>03</b> | <b>Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten</b> | <b>Kurzerläuterung</b>  |
|           |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand)</li> <li>▪ ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul> |



Bild: Helle Fassade (Quelle: © Jens-Robert Schulz, pixelio)

|           |  |   |
|-----------|--|---|
| <b>04</b> | <b>Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren</b> | <b>Kurzerläuterung</b>  |
|           |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rasen- oder Pflanzflächen oder Teilentsiegelung (Rasengittersteine etc.)</li> <li>▪ niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen</li> </ul> |

|  |  |
|--|--|
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe</li> </ul> |



Bild: Wasserdurchlässiger Oberflächenbelag für Stellplätze (Quelle: Stadt Jena)



**MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

05

**Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben**

**Kurzerläuterung**

- Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum
- Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.)
- Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen)
- Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren
- s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“



**Wirkung**

- Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsigelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Regenwasserversickerung und -rückhalt. Dadurch Synergien zu dezentralen Regenwasserbewirtschaftung und zur Überflutungsvorsorge (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität

**Räumliche Umsetzung**

- Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Sankt Kjelds Square in Kopenhagen (Quelle: © Mikkel Eye, SLA)



**MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

|  |  |
|--|--|
| <p><b>06 Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</b></p> | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten)</li> <li>▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen</li> </ul> |
|--|--|

|  |   |
|--|---|
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld</li> </ul> |
|--|---|



Bild: Verschattete Aufenthaltsbereiche (Quelle: SUKW, Stadt Bremen)

|  |   |
|--|---|
| <p><b>07 Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</b></p> | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)</li> </ul> |
|--|---|

|   |  |
|---|--|
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>▪ Regenwasserversickerung und Schaffung von Lebensräumen für Flora und Fauna. Dadurch Synergien zur Biodiversität</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul> |
|---|--|



Bild: Bremer Wallanlagen (Quelle: WBF / Stadt Bremen)



**MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

|    |  |  |
|----|--|--|
| 08 | <b>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</b> | <b>Kurzerläuterung</b>   |
|    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)</li> </ul> |

|   |  |
|---|--|
| <b>Wirkung</b>  | <b>Räumliche Umsetzung</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird</li> <li>▪ Regenwasserversickerung und -rückhalt. Synergien zu dezentralen Regenwasserbewirtschaftung, Überflutungsvorsorge, Erholung und Biodiversität.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)</li> </ul> |



Bild: Bürgerpark (Quelle: WFB / Stadt Bremen)

|    |  |   |
|----|--|---|
| 09 | <b>Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</b> | <b>Kurzerläuterung</b>  |
|    |  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen</li> <li>▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -&gt; Hohe Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewässer</li> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> </ul> |



Bild: Blick über die Weser (Quelle: WFB / Stadt Bremen)



**MAßNAHMENCLUSTER I: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

|  |  |   |
|--|--|---|
| <p><b>10</b></p> <p><b>Regenwasserversickerung, -speicherung und Bewässerungssysteme</b></p>   | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen</li> </ul>  |   |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung</li> <li>▪ Regenwasserversickerung und -rückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün sowie zur Überflutungsvorsorge bei Starkregen</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze</li> </ul>   | <p>Bild: Versickerungsmulden in einem Hamburger Neubauquartier (Quelle: © Markus Parac)</p> |
| <p><b>11</b></p> <p><b>(Temporäre) Saisonale klimangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume</b></p>  | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen</li> <li>▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)</li> </ul> |   |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung</li> <li>▪ Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern</li> </ul>                         | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)</li> </ul>   | <p>Bild: „Pop-Up Grün“ am Bürgermeister-Ehlers-Platz (Quelle: Stadt Bremen)</p>             |



## MAßNAHMENCLUSTER II: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

|   |   |   |
|---|---|---|
| <p><b>12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung</b></p>   | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)</li> <li>Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen</li> </ul> |   |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung</li> <li>Reduktion des Wärmestaus</li> </ul>  | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Neubau, Gebäudekomplexe</li> <li>Grün- und Freiflächen</li> <li>Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>   | <p>Bild: Gut durchströmbare Gebäude am Hang. (Quelle: Klimafibel Stuttgart (<a href="https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=73&amp;p2=6.2.4">https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=73&amp;p2=6.2.4</a>))</p> |
| <p><b>13 Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch</b></p>   | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen.</li> <li>Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht</li> </ul>  |   |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme</li> <li>Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks</li> </ul>   | <p>Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)</p>   |



## MAßNAHMENCLUSTER II: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

|   |  |  |
|---|--|--|
| <p><b>14 Entdichtung (Rückbau)</b></p>  | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen</li> </ul>   |   |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts</li> <li>▪ Verbesserung der Durchlüftung</li> <li>▪ Synergien zum Niederschlagswassermanagement</li> </ul>   | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen</li> <li>▪ Nebengebäude</li> <li>▪ Garagen</li> <li>▪ Lagerhallen</li> <li>▪ ggf. Industrie- und Gewerbebrachen</li> <li>▪ Bahnanlagen</li> </ul>  |  |
| <p>Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)</p>   |  |  |
| <p><b>15 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</b></p>  | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben</li> <li>▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft</li> </ul> |  |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung</li> <li>▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung</li> <li>▪ Synergien zur Biodiversität und zur Aufenthaltsqualität am Tage</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> </ul>  |  |
| <p>Bild: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: © Dominika Leßmann, GEO-NET)</p>   |  |  |



## MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

|  |  |
|--|--|
| <p><b>16 Dachbegrünung</b></p>   | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)</li> </ul> |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verdunstungskühlung</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas: Thermische Regulierung durch Gründächer (wärmedämmend im Winter, geringere Aufheizung im Sommer)</li> <li>▪ Synergien zum Klimaschutz, da Gründachaufbau isolierend, ähnlich einer Dämmung, wirkt, somit Einsparung technischer Gebäudekühlung /-heizung</li> <li>▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich</li> <li>▪ Schaffung von Ersatzlebensraum und damit Synergien zur Biodiversität</li> <li>▪ Regenwasserrückhalt und damit Synergien zur dezentralen Regenwasserbewirtschaftung</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flachdächer,</li> <li>▪ ggf. flach geneigte Dächer</li> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen), siehe Lübecker Gründachpotentialkataster</li> </ul>                    |



Bild: Dachbegrünung (Quelle: Stadt Bremen)



**MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>17 Fassadenbegrünung</b> | <b>Kurzerläuterung</b>  |
|                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -&gt; Steigerung der Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)</li> </ul> |



Bild: Fassadenbegrünung (Quelle: © Elke Kruse / Lübeck)

|  |  |
|--|--|
| <b>18 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen</b> | <b>Kurzerläuterung</b>   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie</li> </ul> |

|  |  |
|--|--|
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -&gt; Erhöhung der Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>▪ Synergien zum Klimaschutz</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand)</li> </ul> |



Bild: Paul-Gossen-Str. in Erlangen (Quelle: © Janko Löbzig, GEO-NET)



**MAßNAHMENCLUSTER III: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

|           |   |  |
|-----------|---|--|
| <b>19</b> | <b>Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen</b> | <b>Kurzerläuterung</b>   |
|           |   | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedo-Wertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme</li> </ul> |

|   |   |
|---|---|
| <b>Wirkung</b>  | <b>Räumliche Umsetzung</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude (Bestand)</li> </ul> |

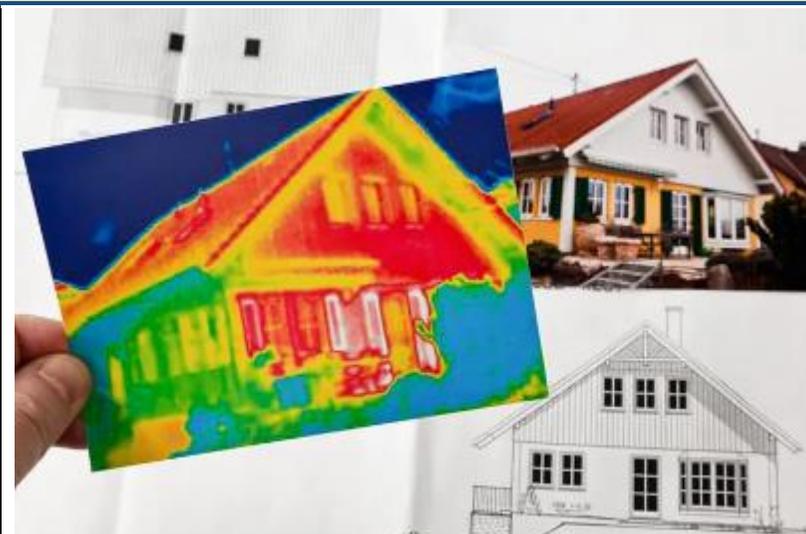


Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)

|           |                                  |   |
|-----------|----------------------------------|---|
| <b>20</b> | <b>Technische Gebäudekühlung</b> | <b>Kurzerläuterung</b>  |
|           |                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung</li> <li>▪ Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird</li> <li>▪ Erdkältenutzung</li> <li>▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden</li> </ul> |

|  |   |
|--|---|
| <b>Wirkung</b>   | <b>Räumliche Umsetzung</b>  |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen zur Klimatisierung nicht ausreichend angewendet werden können (siehe Maßnahmencluster Nr. 21)</li> </ul> |

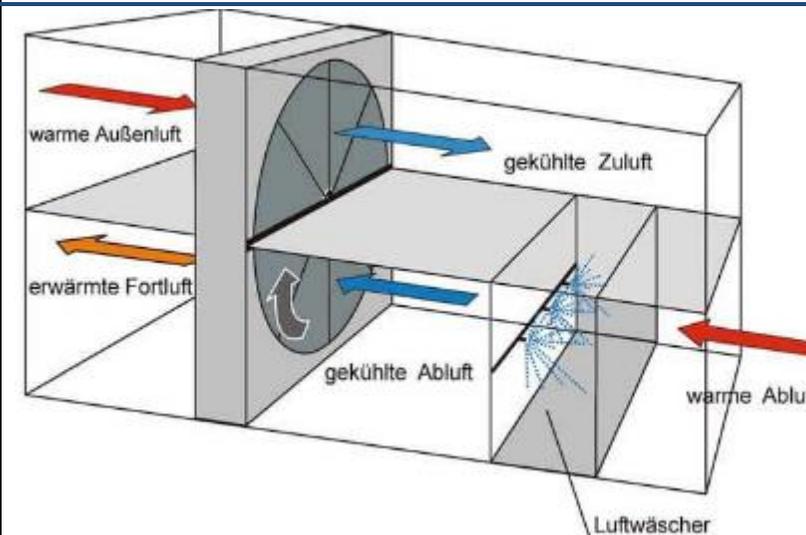


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



**MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

|  |  |
|--|--|
| <p><b>21 Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</b></p>   | <p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Orientierung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf- und Arbeitsräume oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. in Pflegeeinrichtungen)</li> </ul> |
| <p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)</li> </ul> | <p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege)</li> <li>vorwiegend im Neubau umsetzbar</li> </ul>   |



Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums.  
(Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)



## 6. Stadtklimamanagementsystem

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta-)Daten und steht der Verwaltung in Form von layouteten GIS-Projekten (esri ArcGIS Pro 3.2 und höher, Abbildung 32) zur Verfügung.

Das Stadtklimamanagementsystem bietet gegenüber den reinen Kartendarstellungen (als Plot, PDF oder Bild-datei) einige Vorteile:

- Die komplexen flächenbezogenen Informationen können über einige Mausklicks direkt abgerufen werden
- Die Informationen können mit weiteren Daten (z.B. neuen Entwicklungsvorhaben) überlagert und über Geodatenverarbeitungsprozesse miteinander verknüpft werden
- Einige Informationen können bei Verfügbarkeit von Aktualisierungen direkt ersetzt werden

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf der sogenannten Basisgeometrie, in der alle relevanten Informationen zu jeder der rund 26.400 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Basisgeometrie-Shape mehr als 70 Einzelinformationen zur Flächennutzung, die Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten, die Bewertungstufen aus den Bewertungskarten, die Handlungsbedarfe und Bedeutungen der Planungshinweiskarte sowie sonstige Sachdaten, wie z.B. die Flächengröße der Teilflächen.

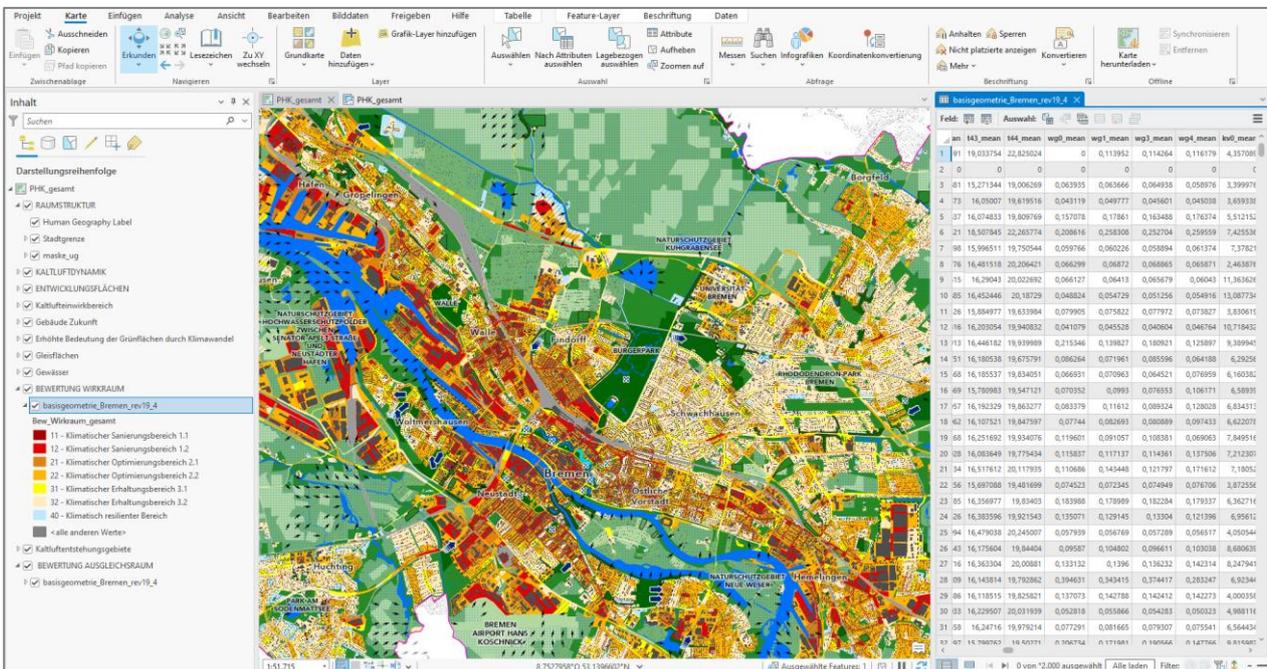


Abbildung 32: GIS-Projekt aus der digitalen Planungshinweiskarte mit Auszug aus der Basisgeometrie (rechts).



## Quellenverzeichnis

- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- Kuttler, W. (2013): Klimatologie. Paderborn: UTB, 2. Auflage.
- Matzarakis, Andreas; Mayer, H.; Iziomon, M. G. (1999): Applications of a universal thermal index: physiological equivalent temperature. In: *International Journal of Biometeorology* 43 (2), S. 76–84. DOI: 10.1007/s004840050119.
- Moore, G. E. (1903): Principia Ethica. Ditzingen: REKLAM.
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.
- VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008a) VDI-Richtlinie 3785, Bl.2: Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.
- VDI (2015): VDI-Richtlinie 3787, Bl.1: Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI (2017): VDI-richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.
- VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4: Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.
- VDI (2020a): VDI-Richtlinie 3787, Bl.8: Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel.
- VDI (03/2024): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5 (Entwurf): Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.



## Glossar

**Adiabatische Luftschichtung:** Liegt vor, wenn die Temperaturabnahme aufsteigender Luft in wolkenloser Atmosphäre 1 °C und in bewölkter Atmosphäre 0,65 °C pro 100 m Höhenunterschied beträgt.

**Advektion:** Horizontale Heranführung von Luftmassen.

**Albedo:** Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

**Allochthone Wetterlage:** Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur → *autochthonen Wetterlage*.

**Anthropogene Abwärme:** Durch den Menschen verursachte Wärmequellen wie Heizung, Industrie und Verkehr.

**Anthropogener Strahlungsantrieb:** Durch Aktivitäten des Menschen erwärmende Einflüsse auf das Klima, wie z. B. die Emission von Treibhausgasen, die Vermehrung von Aerosolen oder die Veränderung der Erdoberfläche.

**Aridität:** Bezeichnet den Grad der Trockenheit und ergibt sich aus dem Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung. Aridität liegt vor, wenn der gefallene Niederschlag vollständig verdunstet. Semiaridität bezeichnet den Wechsel von ariden und humiden (feuchten) Verhältnissen.

**Ausgleichsraum:** Grüengeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Wärmebelastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

**Austauscharme Wetterlage:** → *Autochthone Wetterlage*

**Autochthone Wetterlage:** Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagernde Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.

**Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

**Box-Whisker Plot:** Diagrammtyp mit Kennzeichnung von Minimum, Maximum, 1. Quartil, Median und 3. Quartil.



**Delta:** Steht für die Änderung von Größen, wie hier das Klimadelta als Änderungssignal der Temperatur.

**Dezentrale Regenwasserbewirtschaftung:** Zwischenspeicherung und Verdunstung von Regenwasser durch Grünflächen, Teiche, Straßenbäume, Fassaden- und Dachbegrünung sowie Nutzung des Regenwassers zur Verdunstungskühle.

**Flurwind:** Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

**Grünfläche:** Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

**GRZ:** Die Grundflächenzahl (GRZ) bezeichnet die maximal zulässige Gebäudegrundfläche pro Grundstücksfläche und wird als Dezimalzahl bis höchstens 1 (= vollständig überbaute Grundstücksfläche) angegeben.

**Hitzetag:** Ein Hitzetag (auch heißer Tag genannt) liegt vor, wenn die Tageshöchsttemperatur 30 °C oder mehr beträgt.

**Humanbioklimatische Indizes:** Gemeint ist hier die PET (→ *PET*), als thermischer Index zur Kennzeichnung von Wärmebelastung. Dieser beruht auf der Transferierung der aktuellen Klimawerte der Umgebung in ein vergleichbares Raumklima, das durch die gleiche thermophysiologische Belastung charakterisiert ist.

**Inversion:** Eine Inversionswetterlage ist eine atmosphärische Schichtung, bei der die Temperatur mit der Höhe zunimmt und somit entgegengesetzt zur üblichen Abnahme des vertikalen Temperaturgradienten ist.

**IPCC:** Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bezeichnet den zwischenstaatlichen Sachverständigenrat für Klimaänderungen („Weltklimarat“). Dieses wissenschaftliche Gremium sammelt und bewertet aktuelle Informationen der weltweiten Klimaforschung und präsentiert regelmäßige Stellungnahmen und Einschätzungen zu den Folgen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft, Wirtschaft sowie Lösungsansätze und Strategien als Reaktion. Unter der Federführung des IPCC wurden etwa die RCP-Szenarien entwickelt (→ *RCP-Szenarien*).

**Kaltluft:** Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

**Kaltluftabflüsse:** Kaltluftabflüsse treten flächenhaft über unbebauten Hangbereichen auf und spielen im hügeligen Stadtgebiet eine wichtige Rolle. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese Beschleunigung weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als → *Flurwinde*, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen.



**Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungsflächen (Wohn- und Gewerbeflächen), die von einem überdurchschnittlich hohen  $\rightarrow$  *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.

**Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete ( $\rightarrow$  *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche ( $\rightarrow$  *Wirkräume*) miteinander und sind mit ihren hohen  $\rightarrow$  *Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.

**Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der  $\rightarrow$  *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an  $\rightarrow$  *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer  $\rightarrow$  *Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das  $\rightarrow$  *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

**Kelvin:** SI-Basiseinheit der Temperatur (Einheitszeichen: K). Die Kelvin-Skala ist gegenüber der Grad Celcius Skala um 273,15 K verschoben ( $0^\circ\text{C} = 273,15 \text{ K}$ ). Wird zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet, wobei 1 K =  $1^\circ\text{C}$  entspricht.

**Klimaanalysekarte:** Analytische Darstellung der Klimaauswirkungen und Effekte in der Nacht sowie am Tag im Stadtgebiet und dem näheren Umland (Kaltluftprozessgeschehen, Überwärmung der Siedlungsgebiete).

**Klimafolgenanpassung:** Umsetzung gezielter Maßnahmen zur Klimaanpassung umsetzen, um den Auswirkungen des Klimawandels (extreme Wetterereignisse wie Starkregen, Hitze- und Dürreperioden) entgegenzuwirken.

**Median:** Statistisches Maß, das den in einer der Größe nach sortierten Datenreihe in der Mitte stehenden Wert beschreibt.

**Mesoskalig (mikro / makro):** Die mesoskalige Meteorologie betrachtet Räume mit einer horizontalen Ausdehnung von etwa 5 km bis hin zu mehreren hundert Kilometern. Die Mikrometeorologie betrachtet Prozesse und Phänomene mit einer Längenausdehnungen von einigen Metern. Das Makroklima, auch Großklima genannt, umfasst Gebiete aber einer Größe von 500 km bis hin zum Weltklima.

**Perzentil:** Beschreibt den Anteil einer Verteilung. Beim 95. Perzentil einer Messreihe sind 95 % der Messwerte kleiner als oder gleich groß wie der Messwert des 95. Perzentils.

**PET (Physiological Equivalent Temperature / Physiologisch äquivalente Temperatur):** Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

**Planungshinweiskarte:** Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen im Stadtgebiet ( $\rightarrow$  *Wirkräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als  $\rightarrow$  *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.



**RCP-Szenarien** (Representative Concentration Pathway): *Im Folgenden auch Klimaszenarien genannt.* Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 („Stabilisierungsszenario“) bzw. RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in  $W/m^2$  bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

**Siedlungsagglomeration:** Zusammenhängende Ortsteile des Wohnsiedlungsraums (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

**Städtische Wärmeinsel** (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, un bebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

**Starkregen:** Regenereignisse ab einer Niederschlagsmenge von 30 mm pro Tag.

**Sommertag:** Ein Sommertag liegt vor, wenn die Tageshöchsttemperatur  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht oder überschreitet.

**Strahlungsantrieb** (engl. "radiative forcing"): Die Änderung der Nettostrahlung (Differenz aus Ein- und Ausstrahlung in der Einheit  $W/m^2$ ) an der Oberseite der Atmosphäre aufgrund der Änderungen eines Klimawandeltreibers (z.B. Änderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration oder der von der Sonne abgegebenen Energie).

**Strahlungstemperatur:** Die Temperatur, die indirekt aus der elektromagnetischen Strahlung eines Körpers ermittelt wird. Diese ergibt sich aus der Wärmestrahlung der Oberfläche und dem spezifischen Emissionsvermögen (Rückstrahlung) der Oberfläche.

**Strahlungswetterlage** → *Autochthone Wetterlage*

**Strömungsfeld:** Für den Analysezeitpunkt 04:00 Uhr morgens simulierte flächendeckende Angabe zur Geschwindigkeit und Richtung der Winde in 2 m über Grund während einer → *autochthonen Wetterlage*.

**Thermischer Komfort:** Gemütszustand, der die Zufriedenheit mit der thermischen Umgebung ausdrückt, wobei thermische Behaglichkeit angestrebt wird. Dabei wirken Parameter wie die Temperatur, Wärmestrahlung, Luftbewegung, Licht und Luftfeuchte.

**Tropennacht:** Bei einer Tropennacht fällt die Lufttemperatur nicht unter  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Umweltgerechtigkeit:** Beschreibt das Phänomen, dass Menschen mit geringem Einkommen und niedriger Bildung oft höheren Umweltbelastungen ausgesetzt sind als sozial besser gestellte Menschen.

**Versiegelungsgrad:** Prozentualer Anteil an versiegelter Bodenoberfläche (bspw. durch Beton, Asphalt).

**Wet Bulb Globe Temperature:** Sog. Kühlgrenztemperatur. Sie bezeichnet die niedrigste Temperatur, die sich durch direkte Verdunstungskühlung in einer Umgebung erreichen lässt, wobei die Wasserabgabe einer feuchten Oberfläche mit der Wasseraufnahme der Umgebungsluft im Gleichgewicht steht.



**Wirkraum:** Bebauter oder zur Bebauung vorgesehener Raum (Wohn- und Gewerbeflächen), in dem eine bioklimatische Belastung auftreten kann.

**Zukunftsperiode:** Im Rahmen der Klimaanalyse betrachtete zukünftige Zeitspannen, von der Länge einer Klimaperiode á 30 Jahren. Die Auswertung der langjährigen Klimaänderungen umfassen die nahe Zukunft 2036-2065 und ferne Zukunft 2071-2100.

**Zukunftsszenarien:** Im Rahmen der Klimaanalyse entwickelte Szenarien, welche eine Temperaturzunahme um 1,6 °C (RCP4.5\_2050 und trRCP4.5\_2050), 0,8 °C (RCP2.6\_2085) bzw. 4,6 °C (RCP8.5\_2085) addiert zum Status quo (21,2 °C), sowie eine gemeinsame städtebauliche Entwicklung annehmen. Das Szenario trRCP4.5\_2050 nimmt zusätzlich eine verminderte Bodenfeuchte an. Die Szenarien RCP4.5\_2050 und trRCP4.5\_2050 beziehen sich auf den Zeitraum 2036-2065, die Szenarien RCP2.6\_2085 und RCP8.5\_2085 beziehen sich auf den Zeitraum 2071-2100.

**z-Transformation:** Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.