

Stadtklimaanalyse Bremen

Teil B – Fachliche Grundlagen und Analysemethodik



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





Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	V
0. INHALT UND AUFBAU	0
1. HINTERGRUND UND ANLASS	1
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN	2
2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT	2
2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE	6
2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK	8
3. BEARBEITUNGS- UND BETEILIGUNGSPROZESS	14
4. KLIMA UND KLIMAWANDEL IM RAUM BREMEN	16
4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN	16
4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA	20
4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN	23
4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN	23
5. ANALYSEMETHODEN	28
5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D	28
5.2 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR STATUS QUO UND SZENARIENENTWICKLUNG	32
5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN	35
5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN	40
5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN	42
5.6 QUALITÄTSSICHERUNG	44
5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN	44
QUELLENVERZEICHNIS	48
GLOSSAR	54



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 2020). 2

ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018)..... 3

ABBILDUNG 3: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ UND SETT 2019). 5

ABBILDUNG 4: GESCHÄTZTE ANZAHL HITZEBEDINGTER STERBEFÄLLE IM ZEITRAUM 2016 BIS 2024 IN DEUTSCHLAND (AN DER HEIDEN ET AL. 2024). 5

ABBILDUNG 5: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE. (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)). 7

ABBILDUNG 6: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015). 9

ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER PLANUNGSHINWEISKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015). 10

ABBILDUNG 8: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (VERÄNDERT NACH HLUNG 2022). 12

ABBILDUNG 9: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE. 14

ABBILDUNG 10: STRAHLUNGSANTRIEB (RF = RADIATIVE FORCING) DER VERSCHIEDENEN REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCP) UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100 (IPCC 2014). 18

ABBILDUNG 11: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS. 20

ABBILDUNG 12: KLIMADIAGRAMM DER STADT BREMEN FÜR DEN ZEITRAUM 1990 - 2020. DARGESTELLT IST AUF DER LINKEN ACHSE MIT DER ROTEN KURVE DIE MITTLERE MONATSTEMPERATUR IN BREMEN. AUF DER RECHTEN ACHSE LÄSST SICH DIE DURCHSCHNITTLICHE NIEDERSCHLAGSHÖHE (BLAU) ABLESEN. DER TEMPERATURWERT IN HÖHE VON 23,6 °C AN DER LINKEN ACHSENSEITE STELLT DEN HÖCHSTEN WERT DER MITTLEREN MAXIMALTEMPERATUR, DIE -0,5 STELLT DEN GERINGSTEN WERT DER MITTLEREN MINIMUMTEMPERATUR DAR. DIE BLAUE UND TÜRKISFARBENEN BALKEN AN DER X-ACHSE GEBEN DIE HUMIDEN MONATE WIEDER (NIEDERSCHLAG LIEGT ÜBER DER VERDUNSTUNG). 21

ABBILDUNG 13: ENTWICKLUNG DER MITTELTEMPERATUR IN BREMEN IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2022 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B). 22

ABBILDUNG 14: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN BREMEN FÜR DEN ZEITRAUM 1982 – 2021, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION 691 BREMEN. 22

ABBILDUNG 15: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN BREMEN (36 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1981 - 2022, BASIEREND AUF DER DWD-STATION 691 BREMEN (DWD 2022A). 23

ABBILDUNG 16: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN BREMEN (ALLE RCP-SZENARIEN) BASIEREND AUF DEN EURO-CORDEX DATEN. 24

ABBILDUNG 17: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN BREMEN (RCP 8.5) BASIEREND AUF DEN EURO-CORDEX DATEN. 26

ABBILDUNG 18: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN BREMEN (RCP 8.5). 27

ABBILDUNG 19: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN (TSURF = „SURFACE TEMPERATURE“) FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITANH-3D. 31

ABBILDUNG 20: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR ÜBER ASPHALT SOWIE ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN



GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES. TSURF =
 OBERFLÄCHENTEMPERATUR, T2M = LUFTTEMPERATUR IN 2 M Ü. GR. 32

ABBILDUNG 21. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE). 34

ABBILDUNG 22: MODELLGEBIET. ROT: STADTGRENZE BREMEN, VIOLETT: MODELLGEBIETSGRENZE. 37

ABBILDUNG 23: DIGITALES GELÄNDEMOMELL FÜR DAS MODELLGEBIET. SCHWARZE LINIE: STADTGRENZE BREMEN. 37

ABBILDUNG 24: VERTEILUNG DER LANDNUTZUNGSKLASSEN IM MODELLGEBIET. 38

ABBILDUNG 25: BEISPIELHAFTE STADTENTWICKLUNGSFLÄCHE MIT ZUORDNUNG DER LANDNUTZUNGSKLASSEN. LINKS:
 REFERENZSITUATION, RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO. 39

ABBILDUNG 26: ANWENDUNG DES MISCHPIXEL-ANSATZES FÜR EINE BEISPIELHAFTE STADTENTWICKLUNGSFLÄCHE.
 LINKS: REFERENZSITUATION, RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO. 39

ABBILDUNG 27: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND
 VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN
 (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROSS 1992). 40



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN. ...	13
TABELLE 2: BEWERTUNG DER STATISTISCHEN SIGNIFIKANZ ANHAND DES TREND-/RAUSCHVERHÄLTNISES.....	19
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN BREMEN IN °C (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). QUELLE: EIGENE AUSWERTUNGEN AUFGRUND DER GRUNDLAGE DER EUROCORDEX-DATEN.....	24
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN BREMEN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).....	26
TABELLE 5: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5 M.....	30
TABELLE 6: IM PROJEKT ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	35
TABELLE 7: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DER MODELLEINGANGSDATEN IN BREMEN ALS BASIS FÜR DIE REFERENZSITUATION.....	36
TABELLE 8: ZUSAMMENFASSUNG DER MODELLRANDBEDINGUNGEN FÜR DIE REFERENZSITUATION UND DIE ZUKUNFTSSZENARIEN.....	42
TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.....	42
TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT.....	43



0. Inhalt und Aufbau

Der Bericht zur Stadtklimaanalyse Bremen stellt den Abschluss des Projektes dar, welches zwischen 2022 und 2024 erarbeitet wurde. Der Bericht liefert Informationen zur aktuellen und zukünftigen mikroklimatischen Situation Bremens und bietet Anregungen zur klimaangepassten Stadtgestaltung.

Der Bericht setzt sich aus zwei Teilen zusammen:

Der vorliegende **Teil B** liefert Hintergrundinformationen zur Einordnung des Projektes und beschreibt den Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess. Weiterhin werden fachliche Grundlagen, die in der vorliegenden Analyse Anwendung finden und die die Rahmenbedingungen der Modellsimulationen bestimmen, erläutert. Dazu zählen unter anderem allgemeine Informationen zum thermischen Komfort und zu mikroklimatischen Prozessen innerhalb einer Stadt. Die derzeitige klimatische Situation im Raum Bremen wird dargestellt, sowie zukünftigen Klimawandelszenarien gegenübergestellt. Weiterhin wird die im Projekt angewandte Analysemethodik allgemein beschrieben und eingeordnet und anschließend die konkrete Umsetzung für die Stadtklimaanalyse Bremen hergeleitet.

Teil A fokussiert sich auf die Ergebnisse der Modellanalyse. Die verschiedenen Klimaparameter werden erläutert und in Karten dargestellt. Darauf aufbauende Kartenprodukte, die eine Bewertung der Analyseergebnisse sowie Planungshinweise beinhalten, finden ebenfalls einen zentralen Platz in diesem Teil. Ein tabellarischer Katalog bietet einen Überblick über Möglichkeiten der konkreten Ausgestaltung von Maßnahmen.



1. Hintergrund und Anlass

Das Schutzgut „Klima“ ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung. Vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Verhältnisse ableiten.

Vor diesem Hintergrund wurde bereits im Jahr 2013 im Rahmen der Neuaufstellung des Landschaftsprogramms eine Analyse für das Stadtgebiet Bremen zur gesamtstädtischen mikroklimatischen Situation erstellt (Freie Hansestadt Bremen, 2013). Die Erstellung der Daten erfolgte in einer horizontalen Auflösung von 50 m, der Fokus lag auf den wesentlichen mikroklimatischen Prozessen, die sich innerhalb der nächtlichen „Städtischen Wärmeinsel“ ausbilden.

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte Analyse stellt die Aktualisierung der Stadtklimaanalyse nach heutigem Stand der Technik dar. Hier werden technische und wissenschaftliche Weiterentwicklungen sowie fortschreitende Stadtplanungsprozesse angewendet bzw. berücksichtigt.

Mit einer horizontalen Modellauflösung von 5 m kann das Stadtbild nun realitätsnaher abgebildet und Belastungsräume in einem deutlich höheren Detaillierungsgrad identifiziert werden. Gebäude und Vegetation fließen konkret in die Modellanalyse ein. Im Unterschied zur bereits bestehenden Stadtklimaanalyse wird nicht nur die derzeitige Situation analysiert, sondern auch der fortschreitende Klimawandel berücksichtigt. Dazu werden verschiedene szenenbasierte Ansätze untersucht und bewertet. Zum einen wird die nahe Zukunft mit einem mittleren Klimawandelszenario (RCP 4.5) betrachtet. Weitere Analysen berücksichtigen die ferne Zukunft unter einem schwachen (RCP 2.6) und einem starken (RCP 8.5) Klimawandelszenario. Ziel ist es, die Belange der Klimaanpassung und das Schutzgut „Klima“ direkt in planerische Prozesse einbinden zu können. Weiterhin beschreibt die vorliegende Analyse nicht ausschließlich die mikroklimatischen Prozesse während der Nacht, sondern auch die thermische Belastungssituation am Tage. Somit erlaubt sie eine umfassende Betrachtung des lokalen Mikroklimas in Bremen.

Die Aktualisierung der Stadtklimaanalyse Bremen geschieht parallel zur Erarbeitung des Hitzeaktionsplans in Kombination mit der Fortschreibung der Klimaanpassungsstrategie für Bremen und Bremerhaven. Der Hitzeaktionsplan bündelt bestehende und neue Maßnahmen, die der steigenden Hitzebelastung im Zuge des Klimawandels entgegenwirken. Dabei bezieht er ausgewählte Analyseergebnisse der vorliegenden Stadtklimaanalyse mit ein. Unter anderem werden die Daten genutzt, um eine Sensitivitätsanalyse zur Hitzebelastung vulnerabler Bevölkerungsgruppen durchzuführen. Die Ergebnisse der Analyse können in der Veröffentlichung des Hitzeaktionsplans nachgeschlagen werden (Freie Hansestadt Bremen, 2024).



2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und ihrer Produkte ist - seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend - ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem thermischen Komfort und der menschlichen Gesundheit im Kontext des lokalen Klimawandels über stadtklimatisch relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

Die bodennahe atmosphärische Umgebung hat vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsummieren:

- Wohlbefinden
- Leistungsfähigkeit
- Morbidität (Krankheitsrate) und Mortalität (Sterberate)

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang gilt, dass sowohl ein „zu hoch“ als auch ein „zu niedrig“ in den Ausprägungen der jeweiligen Werte zu negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit führen kann. Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1).

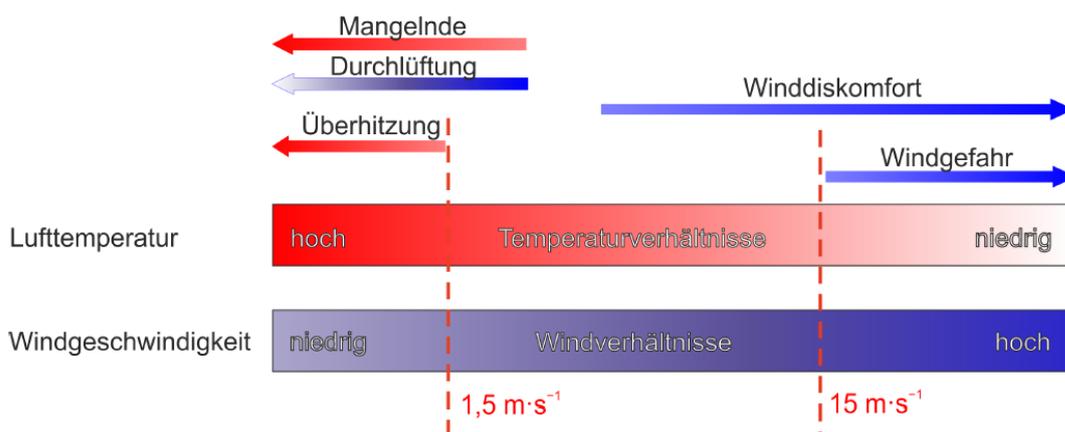


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 2020).

Als quantitativ arbeitende Fachdisziplin haben sich in der Stadt- und Regionalklimatologie in den letzten Jahrzehnten verschiedene humanbiometeorologische Kenngrößen durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen dieser Belastungen auf das menschliche Wohlbefinden ermitteln lassen. Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen (Höppe und Mayer 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ UTCI (Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Da die Indizes hohe Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerteroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie „Heiße Tage“ (mit $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) oder „Tropennächte“ (mit $T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) eine hohe Praxisrelevanz. Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

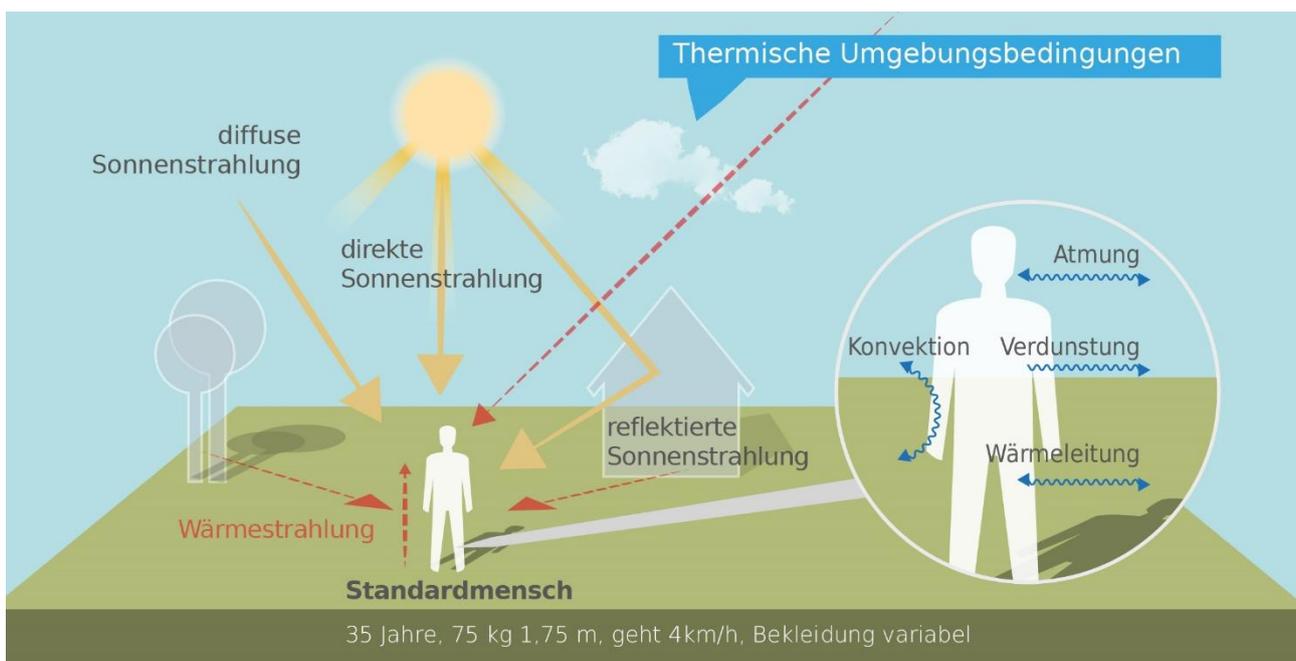


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018).

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (also für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90 % der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird in aller Regel auf die Raumtemperatur als maßgebliche Größe Bezug genommen: „Die Wechselwirkung zwischen dem Außenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschließlich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe ist“ (VDI 2008a, S. 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, Bundesregierung 2004) fordert daher gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal $+26 \text{ °C}$ in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit seiner Angestellten möglichst



zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung aber nicht ableiten.

Während in Arbeitsstätten eher hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: *„Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen.“* (VDI 2008a, S. 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur von etwa 17 °C (UBA 2024). Dass die Einhaltung dieses Wertes in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bundesbürger/innen entsprechen.

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen (z. B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule) ab. Wie stark diese Abnahme ist, ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt bei moderater körperlicher Arbeit die Leistungsfähigkeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z. B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steininger 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10 bis 15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Laurent et al 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst aber nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang zum einen Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie zum anderen ältere Menschen ab 65 Jahren und vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Stadt Bonn zu dem differenzierteren Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorinnen und Senioren angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen, und Single-/Pärchenhaushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 3).

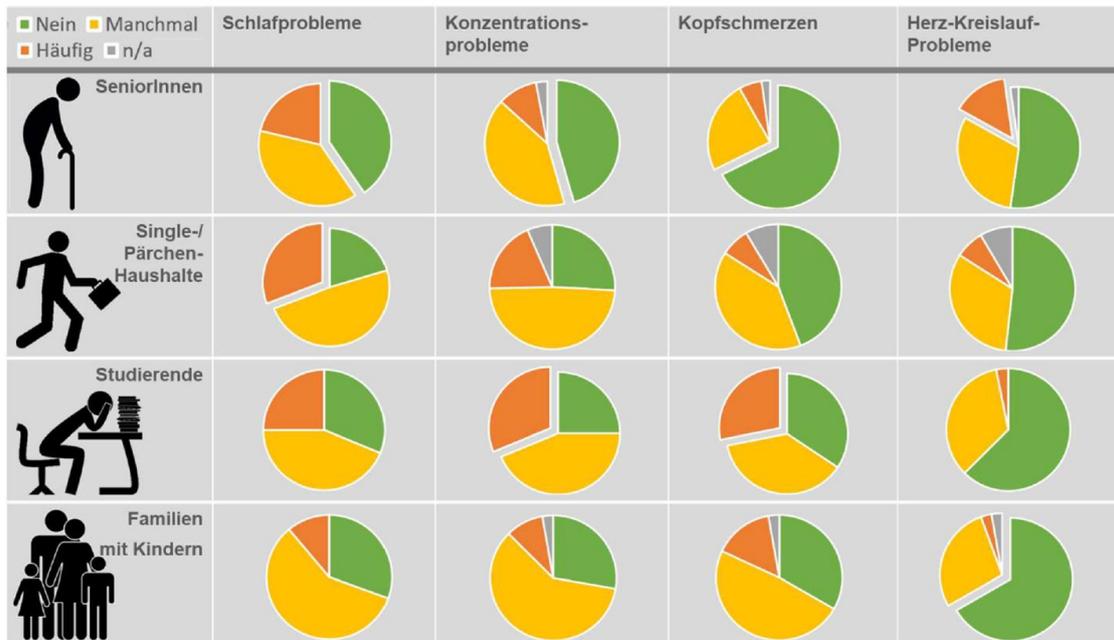


Abbildung 3: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz und Sett 2019).

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75 – 84 und vor allem 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kommt. Als besonders relevant sind dabei Wochenmitteltemperaturen von >20 °C ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet. Die Jahre 2003, 2006 und 2015 zeigten bundesweit mit 6.000 – 7.000 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen die höchsten Übersterblichkeiten (An der Heiden et al. 2019). Neuere Analysen zeigen, dass im Jahr 2018 eine noch höhere Anzahl der hitzebedingten Sterbefälle mit über 8000 erreicht wurde. Die Anzahl der Sterbefälle ist für die Jahre 2016 bis 2024 in Abbildung 4 dargestellt (An der Heiden et al. 2024). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 °C Temperaturanstieg zu rechnen ist, dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen durch Hitze pro Jahr bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2024a).

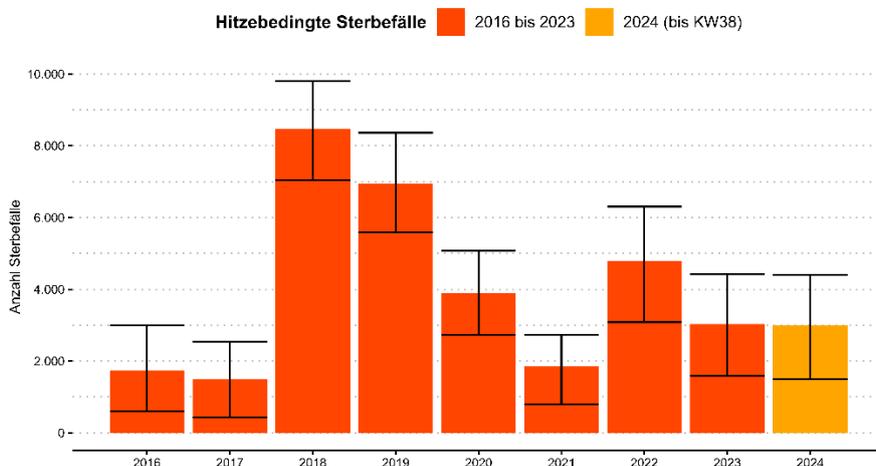


Abbildung 4: Geschätzte Anzahl hitzebedingter Sterbefälle im Zeitraum 2016 bis 2024 in Deutschland (An der Heiden et al. 2024).



2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung der Stadt. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen (Kaltluftprozesse) das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden, was zu einem Abbau der Wärmebelastung des Menschen führen kann. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (vgl. Gross 2021a).

Als wichtige Prämisse für die vorliegende Analyse sollen die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden noch einmal überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet werden.

Grün- und Freiflächen produzieren unterschiedlich viel Kaltluft durch die Wärmeausstrahlung in der Nacht. Sandige/offene Bodenflächen sowie Rasen-/Wiesenflächen erweisen sich in der Nacht als besonders kaltluftproduktiv.

In Abbildung 5 sind die unterschiedlichen Prozesse des Fließens der Kaltluft dargestellt. Hier sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Aufgrund der lokalen Topografie sind in Bremen vor allem die flächenhaften Kaltluftabflüsse (Kaltluftabfluss kann bereits bei einem Grad Hangneigung einsetzen) sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme relevant. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten (den sogenannten autochthonen Wetterlagen). Eine Inversion ist die Umkehr des normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlaufs, der adiabatischen Luftschichtung, in eine mehr oder weniger mächtige, stabile Schichtung der Atmosphäre. Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft oder durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tiefliegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert. Inversionen wirken in der Atmosphäre somit stabilisierend. In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.

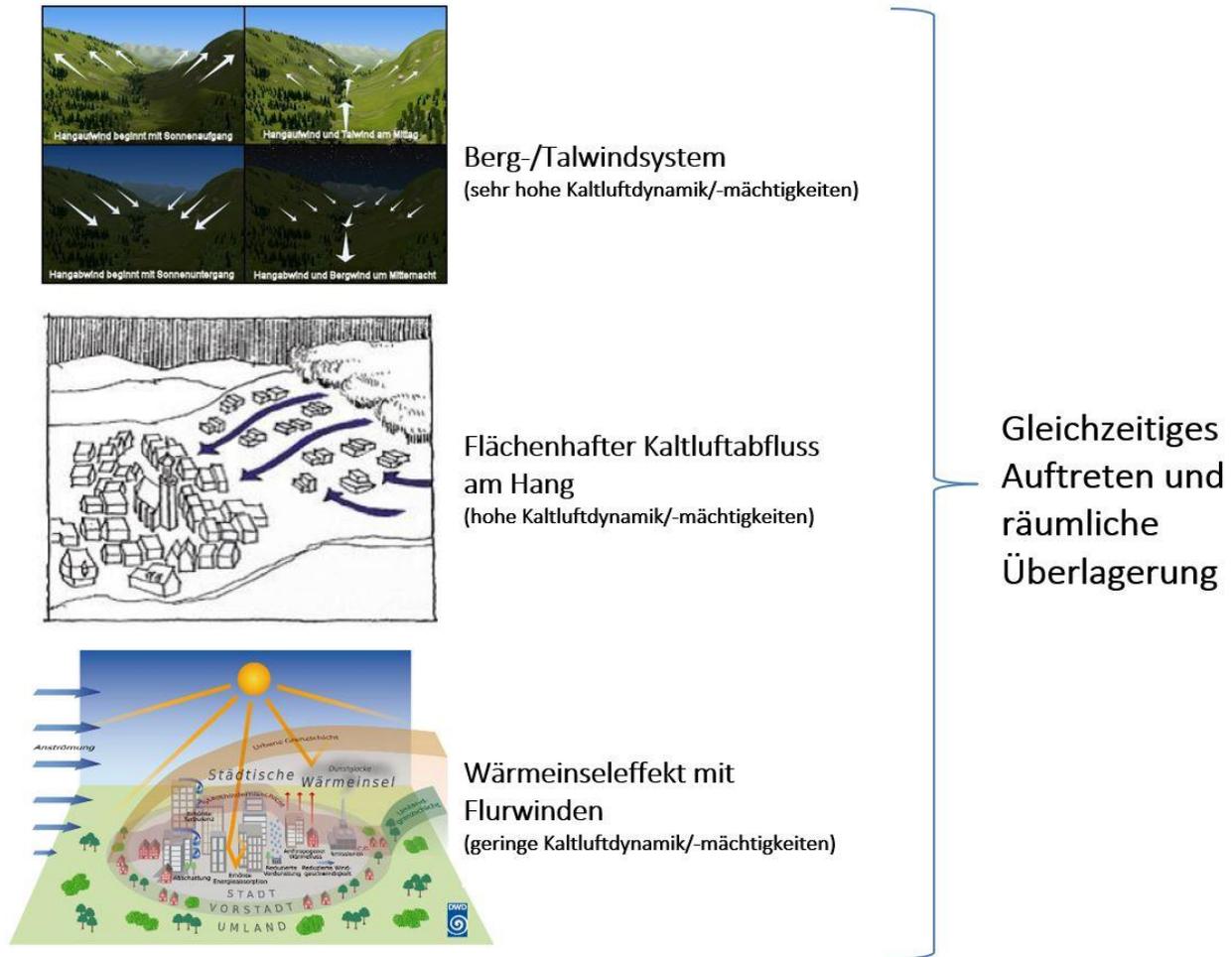


Abbildung 5: Stadtklimatisch relevante Prozesse. (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten)).

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht, die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen in der Stadt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als „Städtische Wärmeinsel“ bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindensystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verringerung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und auch innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser Kaltluft erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.



Diese komplexen Prozesse können in ihrer z. T. räumlichen und zeitlichen Überlagerung ausschließlich mit numerischen Modellen hinreichend gut abgebildet werden. Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden.

Mit Blick auf die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels ist von entscheidender Bedeutung, dass konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, bisher nicht eingeführt sind (VDI 03/2024). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z. B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz auch für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen. Selbstverständlich ist die Kaltluft im Klimawandel aber tendenziell wärmer als gegenwärtig und trägt damit auch weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen bei. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin (u.a. Klimatologie, Meteorologie, Geografie) sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswertungsverfahren Rechnungen zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die zugrundeliegenden Methoden und Instrumente unterlagen seither allerdings einer stetigen Fortentwicklung, die durch die Aktivitäten zur Klimafolgenanpassung insbesondere seit den 2010er Jahren stark an Dynamik und Qualität gewonnen hat. Anders als beispielsweise beim lufthygienischen Wirkungskomplex oder der Lärmbelastung gibt es für die thermische Belastung bisher noch keine normative Regelung zu Richt- oder gar Grenzwerten. Als Konsequenz daraus ist die Definition, welches Belastungs-/Schutzniveau in der betrachteten Kommune erreicht oder vermieden werden soll, das Ergebnis eines planerisch-politischen Abwägungsprozesses, der durch fachgutachterliche Entscheidungsgrundlagen unterstützt wird.

Die etablierten Instrumente für entsprechende Grundlagenuntersuchungen stellen Stadtklimaanalysen sowie ggf. Detailgutachten für kleinräumigere Planungsprozesse (z. B. verbindliche Bebauungsplanung, Stadt-sanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- VDI 3785 Blatt 1 (2008) – Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015) – Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen



- VDI 3787 Blatt 2 (2008a) – Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima
- VDI 3787 Blatt 5 (2024, Entwurf) – Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020) – Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004) – Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z. B. VDI 3787, Bl.5; Veröffentlichung für 2024 angekündigt) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Gemäß VDI 3787 Bl.1 entsteht als erstes wichtiges Zwischenprodukt einer Stadtklimaanalyse die Klimaanalysekarte (KAK). Sie hat 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 Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss (Abbildung 6).

Klimaeigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Klimatope		
Gewässer-, Seenklima		0/127/255 dunkelblau
Freilandklima		190/232/255 hellblau
Waldklima		115/178/115 dunkelgrün
Klima innerstädtischer Grünflächen		174/241/176 hellgrün
Vorstadtklima		255/255/225 hellgelb
Stadttrandklima		254/220/0 hellorange
Stadtklima		255/165/0 orange
Innenstadtklima		255/127/127 hellrot
Gewerbe-, Industrieklima		210/210/210 hellgrau

Klimaeigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Luftaustausch		
Luftleitbahn, unbelastet		43/75/155 blau
Luftleitbahn, klimatisch und/oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Kaltluftabfluss, unbelastet		43/75/155 blau
Kaltluftabfluss, lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Talabwind, unbelastet		18/79/158 blau
Talabwind, klimatisch und/ oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Hindernis für den Kalt- luftabfluss (Barriere)		34/74/126 blau
Kaltlufteinzugsgebiet		43/75/155 hellblau

Abbildung 6: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Klimaanalysekarte gemäß VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015).

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 [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015, S. 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehört demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. 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.

Dies erfolgt im Rahmen der Erstellung einer Planungshinweiskarte (PHK) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse. Gemäß der VDI-Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte (hier auch bei den Bewertungskarten) 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 (vgl. Abbildung 7). Seit der letzten Überarbeitung der Richtlinie sollen bei der Bewertung auch die Themen Klimawandel und Umweltgerechtigkeit Berücksichtigung finden. Auf weitergehende methodische Hinweise verzichtet die Richtlinie jedoch. Somit erfolgt die Erstellung der Planungshinweiskarte auch weiterhin im Spannungsfeld zwischen fachgutachterlichen Empfehlungen, planerischen Zielsetzungen und politischer Willensbildung.

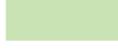
Planungshinweise	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck	Raumspezifische Hinweise		
Grün- und Freiflächen			Begrünung im Stadt- raum und in Wohnge- bieten		15/95/44 dunkelgrün
Ausgleichsraum hoher Bedeutung		115/178/115 dunkelgrün	Hauptverkehrsstraße mit Potenzial für hohe bis extreme Schadstoffbelastun- gen, DTV > 10000		255/0/0 rot
Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung		174/241/176 grün			
Ausgleichsraum geringer Bedeutung		211/255/190 hellgrün			
Siedlungsflächen					
Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klima- relevanter Funktion		255/255/225 gelb			
Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion		246/197/103 orange			
Bebautes Gebiet mit bedeutender klima- relevanter Funktion		255/127/127 rot			
Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygieni- schen Nachteilen		138/43/226 violett			

Abbildung 7: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Planungshinweiskarte gemäß VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015).



Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten neben die VDI-Richtlinien noch weitere Normen, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System, das für Quartiere, Gebäude und Innenräume u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtklima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert. Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z. T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D-GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Abbildung 8). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z. B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt im Übrigen keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltfluthaushalt (um eben dieser Herausforderung zu begegnen).

Darüber hinaus stellen selbstverständlich auch die in der Übersicht des HLNUG gänzlich fehlenden Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als reine messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden auch KI-basierte Lösungen das Methodenset ergänzen, indem sie von Ergebnissen der anderen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen 	<ul style="list-style-type: none"> • Klimaeigenschaften der Fläche • Qualitative Einschätzung der Fläche als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kemptage, Volumenstrom Kaltluft etc.) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	<ul style="list-style-type: none"> • Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/ Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/ Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mittlere/ große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen
Erforderliche Daten	<ul style="list-style-type: none"> • Versiegelungsgrad, z.B. über Luftbildanalyse oder andere • Bebauungsstruktur-/typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z.B. ATKIS, CO-RINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z.B. digitales Höhenmodell) 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z.B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z.B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierungen, Realnutzungskartierung



		<ul style="list-style-type: none"> Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/-höhe, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur Messdaten zu physikalischen Größen z.B. Wind, Temperatur
<p>Welche Informationen liefert die Klimanalyse-methode?</p>	<ul style="list-style-type: none"> Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich 	<ul style="list-style-type: none"> Klimatope Klimaanalysekarte 	<ul style="list-style-type: none"> Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zu Kaltluft Je nach Aufbereitung entsprechende Karten

Abbildung 8: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (verändert nach HLUNG 2022).

Wie aus der Zusammenstellung bzw. dem zugehörigen Leitfaden der HLNUG hervorgeht, weisen alle Analysemethoden individuelle Stärken und Schwächen auf, wobei die numerische Stadtklimamodellierung (M3) als qualitativ hochwertigste Methode gilt. Numerische Modellierungen weisen gegenüber anderen Analyseverfahren (reinen GIS-Modellierungen, Messungen) den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder in ihrer raumfüllenden Struktur und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Diese Felder können im sog. „postprocessing“ verwendet werden, um die stadtklimatisch relevanten Kenngrößen (z. B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes) in ihrer quantitativen Ausprägung abzuleiten. Numerische Modelle bieten darüber hinaus den Vorteil, Planungsvarianten und Maßnahmen in ihrer Wirkung quantitativ analysieren und auf diese Weise einen validen Beitrag zur klimaökologischen Optimierung von (raum)planerischen Abwägungs- und Entscheidungsprozessen auf allen Maßstabsebenen leisten zu können.

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft sind eine ganze Reihe von numerischen Modellen für die Durchführung von Stadtklimaanalysen verfügbar. Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht über solche Modelle, die gegenwärtig vorrangig im Einsatz sind. Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch dem Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

- 1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.
- 2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
- 3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).



Dabei steigt über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung, gleichzeitig aber auch die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Bspw. werden Modelle der Kategorie 3 zurzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet und für ihre Verwendung wird aufgrund ihres hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt.

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das „Nesting“. Dabei wird je nach Umsetzungsart im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet wird mit den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben (Offline-Nesting). Beide Methoden sparen Rechenzeit dadurch ein, dass das Kerngebiet des Interesses ausreichend hochaufgelöst modelliert aber auch kleingehalten werden kann und dennoch die beeinflussenden Prozesse aus dem Umfeld auf das Kerngebiet einwirken. Der Begriff „Online-Nesting“ rührt daher, dass die Berechnung des Kerngebiets und des direkt anschließenden, gröber aufgelösten umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim „Offline-Nesting“ muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden. Für die Stadtklimaanalyse Bremen wurde die Methode des Offline-Nesting verwendet. Dabei wurde das Prozessgeschehen anhand einer bestehenden Modellrechnung, welche Deutschland mit einer Auflösung von 200 Metern abdeckt, berücksichtigt.

Tabelle 1: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	15 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder



3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 9). Die Bearbeitungszeit lag zwischen November 2022 und Dezember 2024. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u. a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen, z. B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten sowie zu speziellen Einzelthemen (Klimaszenarien) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin und dem beteiligten Kernarbeitsteam gelöst.

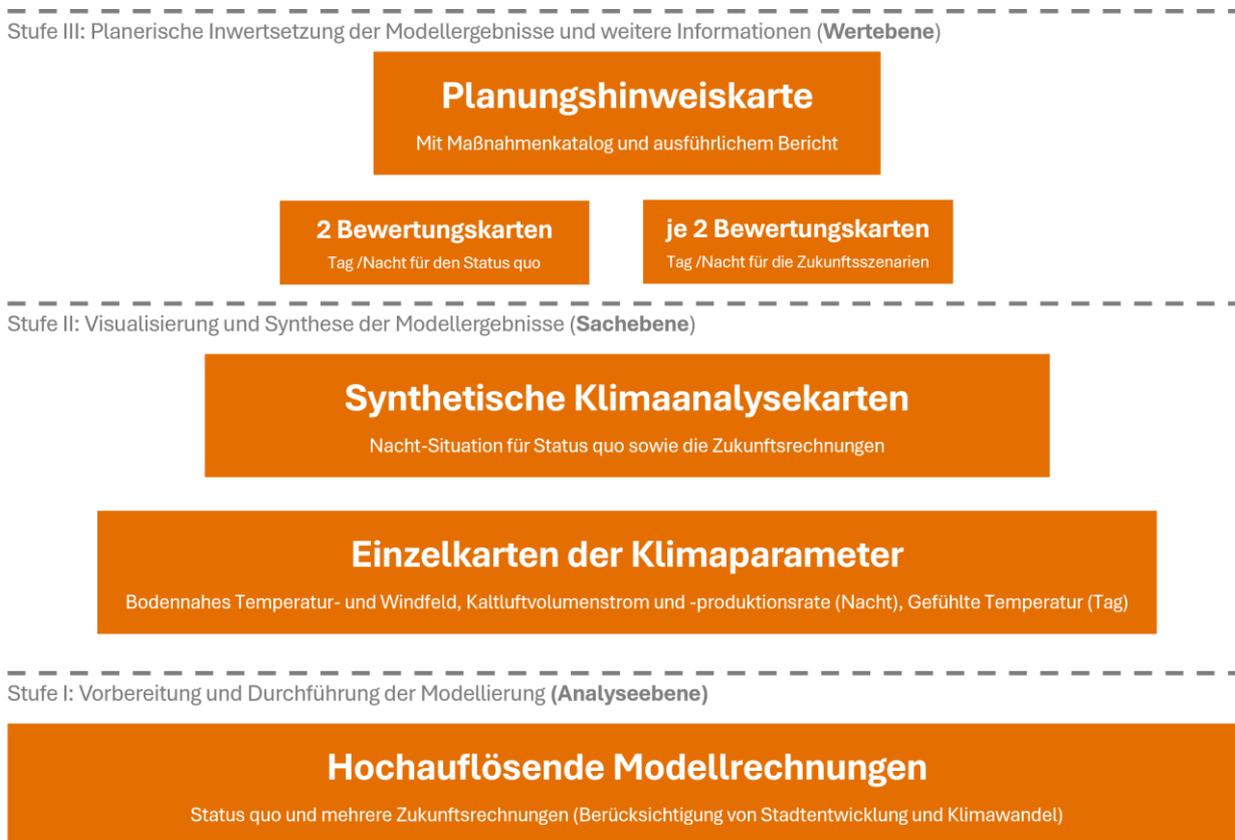


Abbildung 9: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse.

In der Phase der planerischen Bewertung (Stufe III) rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (Gaede & Härtling 2010, S. 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und bei der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Rahmen eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (Fürst und Scholles 2008). Ohne diese Prämissen



hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

Für die beiden zentralen stadtklimatischen Wirkungskomplexe des thermischen Komforts und der Luftqualität ergeben sich in diesem Zusammenhang diametral unterschiedliche Ausgangsbedingungen. So existieren für die Lufthygiene spätestens seit der Luftqualitätsrichtlinie (Richtlinie 2008/50/EG; EU 2008) Ziele in Form von Grenz- oder Richtwerten. Die Vorgaben dieser EU-Richtlinie wurden in Deutschland im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) in nationales Recht umgesetzt und in der 39. Verordnung zur Durchführung des BImSchG, der Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen (39. BImSchV, Bundesregierung 2010), konkretisiert. Dieser Umstand macht die vorzunehmenden Bewertungen im Sinne einer Nominalskala „Grenzwert überschritten – Maßnahmen notwendig“ bzw. „Grenzwert unterschritten – keine Maßnahmen notwendig“ eindeutig und abschließend.

Ein rechtlich vergleichbares Äquivalent zum BImSchG mit seinen konkretisierenden Verordnungen und technischen Anleitungen inklusive den aus ihnen ableitbaren Rechtsfolgen existiert für den thermischen Wirkungskomplex nicht. Auch entsprechende Gesetzesinitiativen sind gegenwärtig nicht ergriffen oder geplant. Allenfalls übergeordnete Leitbilder wie der Schutz der menschlichen Gesundheit nach Art. 2 GG oder das Gebot der gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse (vgl. § 1 Abs. 6 Nr. 1 BauGB, § 34 Abs. 1 Satz 2 BauGB, § 136 Abs. 3 Nr. 1 BauGB) haben als grundsätzliche Begründungszusammenhänge eine gewisse Relevanz. Für den konkreten Einzelfall helfen sie aber aufgrund ihrer nicht oder nur unzureichend vorhandenen Operationalisierung nicht abschließend weiter. Folglich muss die Operationalisierung auf regionaler und kommunaler Ebene in individuellen politisch-planerischen Abwägungs-/Zielfindungsprozessen unter Berücksichtigung fachlicher Expertisen immer wieder aufs Neue erfolgen.

Aus diesen Prämissen wurde für das vorliegende Projekt ein Bearbeitungsprozess abgeleitet, der im Wesentlichen auf einem Gegenstromprinzip zwischen gutachterlichen Vorschlägen auf Basis wissenschaftlich fundierter Erkenntnisse und Verfahren einerseits und deren Modifizierung gemäß den Ansprüchen und Wertmaßstäben der projektbegleitenden Arbeitsgruppe (PAG) andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandene Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungs- und Aushandlungsprozesses, der die fehlenden normativen Regelungen weitgehend ersetzt und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.



4. Klima und Klimawandel im Raum Bremen

4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN

Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, der im Allgemeinen 30 Jahre beträgt. Das Klima gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder Gebiet im Jahresverlauf wieder und lässt langfristige Veränderungen erkennbar werden.

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Bremen basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD Climate Data Center (CDC); Kaspar et al. 2017). Diese flächendeckenden Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück.

Anhand der Stadtgrenze Bremens wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km-Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Aus den zusammengestellten Zeitreihen werden die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung der Vergangenheit bis heute treffen zu können.

Die aus Stationsdaten erzeugten Gitterdaten weisen gewisse Unsicherheiten auf, die aus einer über die Zeit veränderten Stationsdichte und der Lage der für die Interpolation verwendeten Stationen resultieren können. Ferner hat sich die Messtechnik im betrachteten Zeithorizont weiterentwickelt, sodass bei älteren Zeitreihen höhere Messungsgenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen eines jüngeren Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009, Jacob et al. 2014). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt.

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien projiziert und analysiert werden. Wie alle Modelle sind Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht perfekt. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik und der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble.

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Bremen ein Modellensemble bestehend aus 21 Mitgliedern verwendet (DWD-Referenzensemble v2018), d. h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (DWD 2024). Da EURO-CORDEX ein fortlaufendes Projekt ist und die Datenbanken mit den



Modellergebnissen permanent aktualisiert werden, können bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen sein, die in der Auswertung nicht enthalten sind.

Die Mitglieder des Ensembles werden als gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke et al. 2024).

RÄUMLICHE UND ZEITLICHE AUFLÖSUNG

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von ca. 5 km verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Deutschland flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl passender Gitterpunkte entsprechend der Stadtgrenze. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (ein Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten.

RCP-SZENARIEN

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene regionalisierte Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m², der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abbildung 10).

- Das RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2045 auf ca. 3 W/m². Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem vorindustriellen Zustand bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher“-Szenario bezeichnet.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO₂-Emissionen auf dem

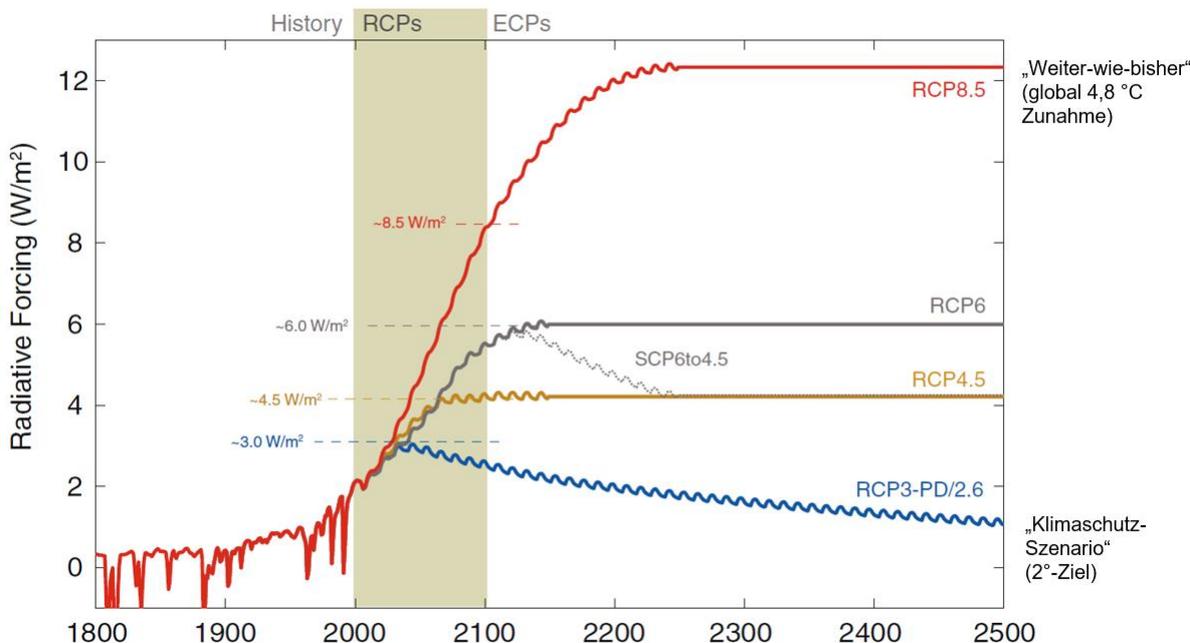


Abbildung 10: Strahlungsantrieb (RF = Radiative Forcing) der verschiedenen Representative Concentration Pathways (RCP) und ihre Entwicklung bis 2100 (IPCC 2014).

„Pfad“ des RCP 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP 8.5 platziert.

METEOROLOGISCHE KENNTAGE

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von Kenntagen. Dies sind z. B. die Anzahl von Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (oftmals jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ für Sommertage (schwellenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; siehe ReKliEs-De 2017). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in Bremen wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

Die verwendeten Daten wurden im Zuge der Regionalisierung einer Biasadjustierung unterzogen. Trotzdem kann ein gewisses Maß an Unsicherheiten immer noch in den Daten enthalten sein. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Unsicherheiten für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben diese Unsicherheiten, also deren Differenz, daher keinen Einfluss und man erhält eine robustere Aussage.

STATISTISCHE AUSWERTUNG

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (Tabelle 2).



Tabelle 2: Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses.

Trend- / Rauschverhältnis	Bewertung
$\geq 2,0$	sehr stark zunehmend
$\geq 1,5$ und $< 2,0$	stark zunehmend
$\geq 1,0$ und $< 1,5$	schwach zunehmend
$< 1,0$ und $> -1,0$	kein Trend
$\leq -1,0$ und $> -1,5$	schwach abnehmend
$\leq -1,5$ und $> -2,0$	stark abnehmend
$\leq -2,0$	sehr stark abnehmend

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 – 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt und der Zeitraum bereits mehrere Jahrzehnte zurückliegt, wurde hier der Zeitraum von 1971 – 2000 als Referenzperiode festgelegt.

Im zweiten Ansatz wurden für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 – 2000
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2036 – 2065
- 2. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. Linke et al. 2024). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraums nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (vgl. Abbildung 11).

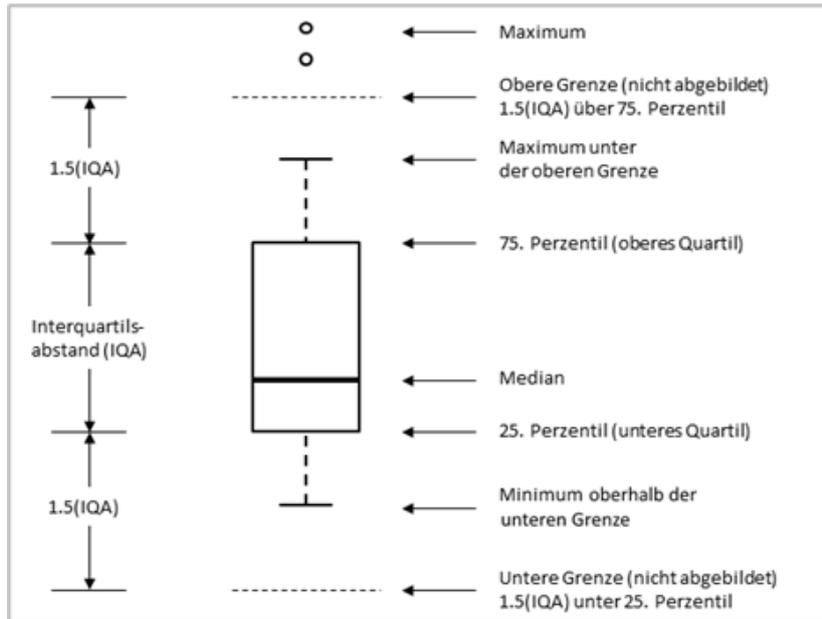


Abbildung 11: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Die Abbildung 12 zeigt ein Klimadiagramm der Stadt Bremen für den Zeitraum 1991 – 2020. Bremen weist eine langjährige Mitteltemperatur von 9,8 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von 670 mm/Jahr auf. Damit ist die Stadt um 0,5 °C wärmer als der deutschlandweite Durchschnitt von 9,3 °C (UBA 2022a). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt deutlich unter dem gesamtdeutschen Mittelwert von 790 mm/Jahr (UBA 2022b).

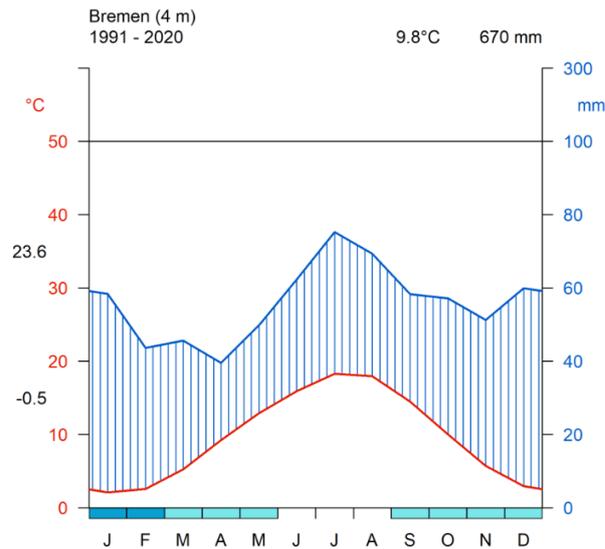


Abbildung 12: Klimadiagramm der Stadt Bremen für den Zeitraum 1990 - 2020. Dargestellt ist auf der linken Achse mit der roten Kurve die mittlere Monatstemperatur in Bremen. Auf der rechten Achse lässt sich die durchschnittliche Niederschlagshöhe (blau) ablesen. Der Temperaturwert in Höhe von 23,6 °C an der linken Achsenseite stellt den höchsten Wert der mittleren Maximaltemperatur, die -0,5 stellt den geringsten Wert der mittleren Minimumtemperatur dar. Die blauen und türkisfarbenen Balken an der x-Achse geben die humiden Monate wieder (Niederschlag liegt über der Verdunstung).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Bremen – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. Abbildung 13 zeigt diese Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur auf der rechten y-Achse in absoluten Zahlen und die Veränderung gegenüber der Referenzperiode (1971 bis 2000) auf der linken y-Achse. Es ist ein deutlicher und signifikanter Trend (rot gestrichelte Linie) auszumachen.

Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991 – 2020 traten in Bremen 30 Sommertage und 6 Heiße Tage pro Jahr auf, was unter dem deutschlandweiten Durchschnitt liegt (39 Sommertage bzw. 9 Heiße Tage pro Jahr).

Die Windrichtungsverteilung (Abbildung 14) zeigt tagsüber wie nachts eine überwiegende Anströmung aus Südwest. Auf das im Rahmen der Stadtklimaanalyse modellierte kleinräumige Windfeld übt die übergeordnete Windrichtung hingegen nur einen geringen Einfluss aus, stattdessen werden die örtlich entwickelten, landschaftsgesteuerten Luftaustauschprozesse während einer windschwachen, sommerlichen, autochthonen Wetterlage aufgezeigt.



Entwicklung der Mitteltemperatur im Kalenderjahr (Jan-Dez)
in Bremen im Zeitraum 1881 bis 2022

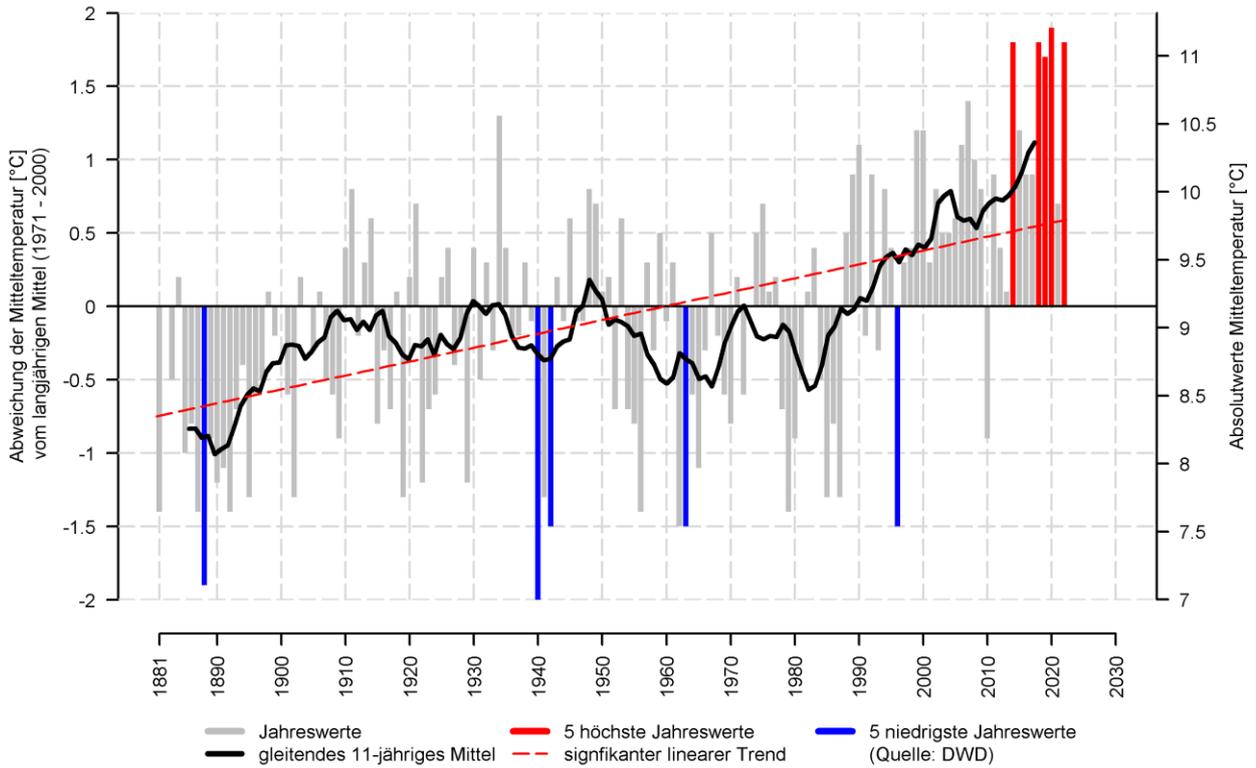


Abbildung 13: Entwicklung der Mitteltemperatur in Bremen im Zeitraum von 1881 bis 2022 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).

Windrichtungsverteilung 1/1982 - 12/2021
Station: 691 Bremen

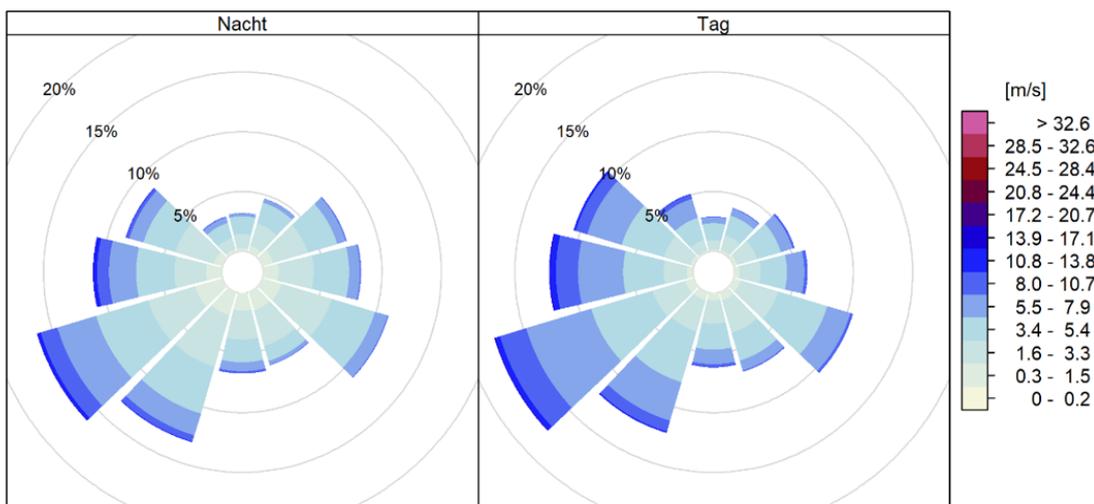


Abbildung 14: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Bremen für den Zeitraum 1982 – 2021, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station 691 Bremen.

4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen nach VDI 3787, Blatt 9 (VDI 2004) einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Stadtgebiet erzeugt. Diese Situation bringt die höchsten thermischen Belastungen innerhalb der Stadt mit sich und die lokal-klimatischen Besonderheiten in Bremen prägen sich besonders gut aus. Das sind zum einen der Wärmeinseleffekt und die sich aus sich selbst entwickelnde Kaltluftdynamik, die durch keine überlagerte Strömung beeinflusst wird. Somit sind bei einer autochthonen Wetterlage die Kaltluftleitbahnen identifizierbar.

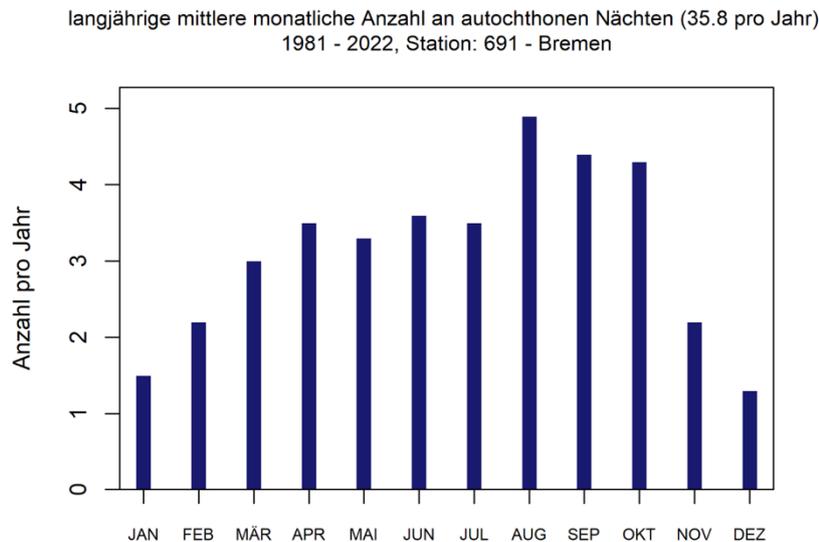


Abbildung 15: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Bremen (36 pro Jahr) für den Zeitraum 1981 - 2022, basierend auf der DWD-Station 691 Bremen (DWD 2022a).

In Bremen traten im langjährigen Mittel der letzten 40 Jahre rund 36 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 15). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel etwa 12 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von einem Drittel im Jahr oder 13 % pro Sommermonat entspricht – etwa jede siebte bis achte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der Jahresmitteltemperatur in Bremen bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 16 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen (Tabelle 3).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in beiden Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP 2.6 wird ein moderater Temperaturanstieg und ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts eine Stagnation erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 2.6 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen



bemerkbar machen. Das RCP 4.5 beschreibt einen mittelstarken Klimawandel und bewegt sich zwischen 2.6 und 8.5.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Bremen in °C (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median). Quelle: Eigene Auswertungen aufgrund der Grundlage der EUROCORDEX-Daten.

Parameter	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971-2000					
		2036 bis 2065			2071 bis 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,7	1,2	1,4	0,8	1,1	1,4
	RCP 4.5	0,8	1,4	2	1,3	2,1	2,5
	RCP 8.5	1,4	2	2,3	2,6	3,5	4,2
Minimumtemperatur [°C]	RCP 2.6	0,6	2	3,3	1,6	2,6	3,9
	RCP 4.5	1,2	3,7	5,2	3,3	4,2	6,1
	RCP 8.5	2,5	3,8	5,2	5,2	6	8,2
Maximumtemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1,7	2,1	0,7	1,8	2,6
	RCP 4.5	0,9	1,9	2,9	1,5	2,4	2,9
	RCP 8.5	1,3	2,5	3	3,5	4,6	6,2

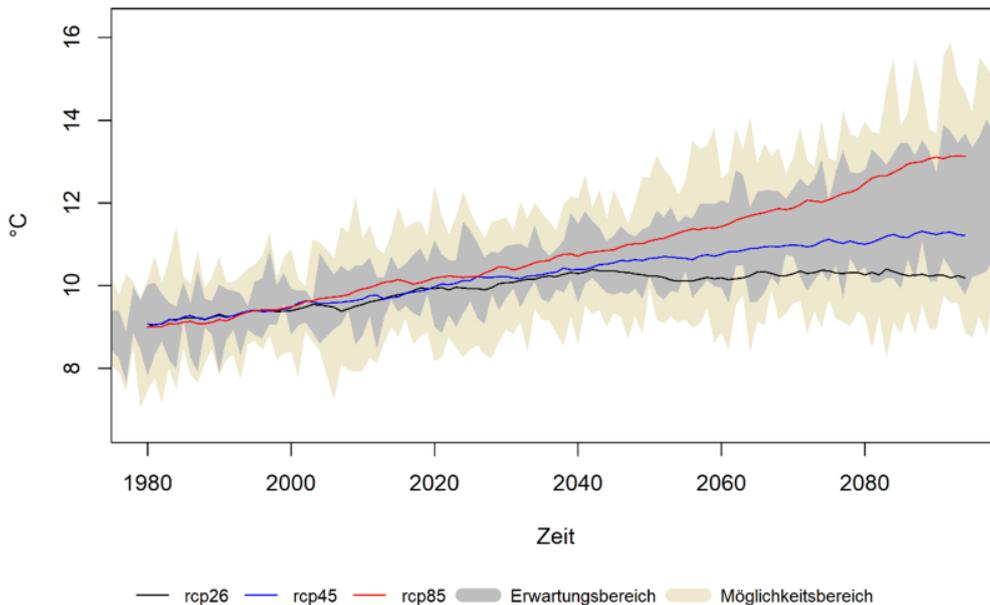


Abbildung 16: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Bremen (alle RCP-Szenarien) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen in Abbildung 16). Der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85.



Perzentil des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 16 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1971 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen als im Frühjahr und Herbst auf (Abbildung 17). Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien, wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Balken).

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine weitere Perspektive auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen zukünftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts im Mittel mit etwa 14 Heißen Tagen mehr pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1971 – 2000) nur 4-mal jährlich auftraten.

Tropennächte treten in Bremen derzeit so gut wie nie auf (im Mittel 0 Tropennächte pro Jahr). In der nahen Zukunft (2036 – 2065) werden die Tropennächte kaum zunehmen, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts zeichnet sich ein ähnliches Bild ab. In der fernen Zukunft (2071 bis 2100) werden v. a. für das RCP 8.5 „Weiter wie bisher“ ca. 4 Tropennächte pro Jahr in Bremen prognostiziert. Es ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinselseffekt nicht erfassen, d. h. in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Bremen zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um bis 1 bis ca. 3 Tage Dauer.

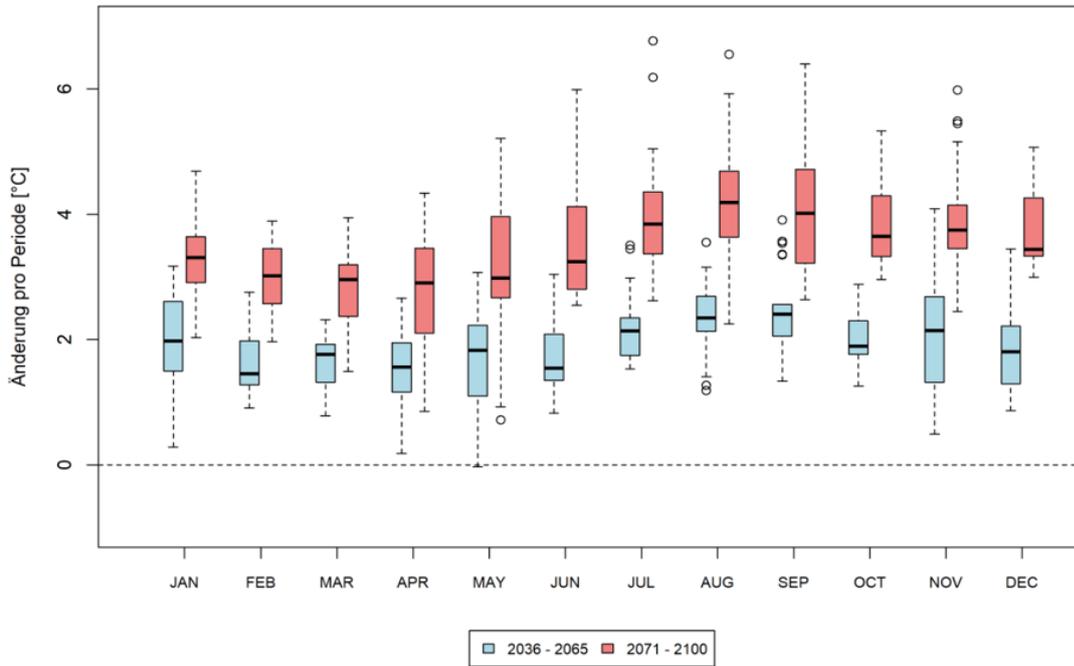


Abbildung 17: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Bremen (RCP 8.5) basierend auf den EURO-CORDEX Daten.

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Bremen (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Referenzperiode 1971 bis 2000	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971-2000					
			2036 bis 2065			2071 bis 2100		
			P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Tropennächte [n/Jahr] (Tmin ≥ 20 °C)	0	RCP 2.6	0	0,1	0,1	0	0,1	0,5
		RCP 4.5	0,1	0,2	0,5	0,2	0,5	1,6
		RCP 8.5	0,4	0,7	1,9	2,2	4	8,6
Heiße Tage [n/Jahr] (Tmax ≥ 30 °C)	4	RCP 2.6	2,4	3,6	6,1	2,6	4	6,8
		RCP 4.5	3,9	5	8	5,3	6,8	9,3
		RCP 8.5	5,2	7,1	9,7	10,7	14,4	19,4
Sommertage [n/Jahr] (Tmax ≥ 25 °C)	22,5	RCP 2.6	7,6	11,4	15,2	7,7	9,2	11,9
		RCP 4.5	8,4	14,7	17,9	12,1	15,8	20,1
		RCP 8.5	12	17,6	26,4	22,7	32,2	45,6
Hitzewelle [n/Jahr] (min. 3 aufeinanderfolgende Tage)	0	RCP 2.6	0	0,2	0,7	0,1	0,4	0,6
		RCP 4.5	0,2	0,3	0,5	0,3	0,4	0,9



mit Tmax > lang-jähriger mittlerer Tmax Sommer)		RCP 8.5	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,7
Hitzeperiode [Länge/Jahr] (aufeinanderfolgende Tage mit Tmax ≥ 30 °C)	2	RCP 2.6	0,3	0,9	2	0,6	1,3	1,9
		RCP 4.5	0,6	1,5	2,1	1,4	2	3,2
		RCP 8.5	1,1	1,8	2,7	2,5	3,4	5,2

In Bezug auf die zukünftige Entwicklung von Trockenperioden sind nur bedingt Aussagen aus den EURO-CORDEX-Daten möglich, da der Parameter Bodenfeuchte nicht im Datensatz enthalten ist. Zudem wird zwar die Auftrittshäufigkeit von kurzen, mittleren, langen oder extremen Trockenperioden untersucht (8-14, 15-21, 22-28 oder mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag), doch treten diese zukünftig so selten auf, dass die Änderungen sehr gering ausfallen und statistisch nicht signifikant sind.

Als geeigneter Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Verdunstung herangezogen werden. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend feuchter sind (leichte positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz), sind im RCP 8.5 in den Monaten Juni bis August leichte Abnahmen prognostiziert (Abbildung 18). Die saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz gilt für beide Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten (rote Balken). Aufgrund der großen Spannweite der prognostizierten Ergebnisse ist die Entwicklung jedoch nicht eindeutig.

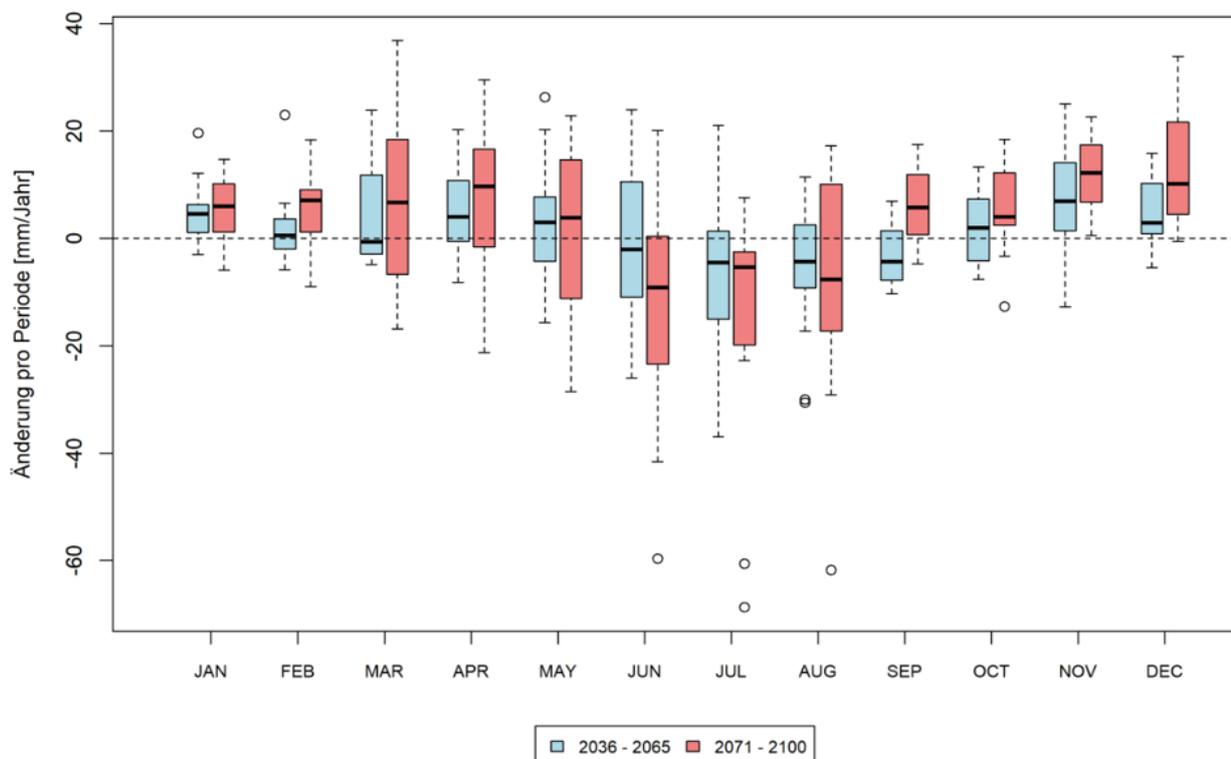


Abbildung 18: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Bremen (RCP 8.5).



5. Analysemethoden

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Modellrechnungen für das vorliegende Projekt wurden mit dem etablierten hochaufgelösten Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Gross 2012b). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEO-NET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerteroutinen weiterentwickelt (u.a. Gross 2017, Gross 2013, Gross 2012a, Gross 2002, Gross et al. 2002, Gross 2021a, Gross 2021b).

Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird.

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen in realem Gelände müssen neben der Geländeform (Orographie) insbesondere auch der Einfluss von Wäldern und urbanen Strukturen auf die Verteilung der meteorologischen Größen realitätsnah berücksichtigt werden. Hierzu sind in FITNAH besondere Parametrisierungen vorgesehen.

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Windgeschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- und Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (Gross 1989).

Das gesamte Gleichungssystem, einschließlich der Parametrisierungen, wird in ein, dem Gelände folgendem, Koordinatensystem transformiert. Damit gelingt es insbesondere, die Randbedingungen der verschiedenen meteorologischen Größen am unteren Rand, dem Erdboden, problemspezifisch zu formulieren. Die Berechnung der Erdoberflächentemperatur erfolgt über eine Energiestrombilanz, bei der fühlbarer und latenter Wärmestrom, der Bodenwärmestrom, kurz- und langwellige Strahlungskomponenten sowie der anthropogene Wärmestrom Berücksichtigung finden.

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2017)



definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40 und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH-3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind auch die Modellergebnisse. Den limitierenden Faktor stellt dabei nicht die Größe des zu untersuchenden Modellgebietes, sondern einzig die Rechenzeit dar. Die Wahl der „richtigen“ Modellauflösung muss also stets über eine Abwägung zwischen der zu erfüllenden Analyseaufgabe, den bereitgestellten zeitlichen und sonstigen Ressourcen sowie den zur Verfügung stehenden Eingangsdaten erfolgen.

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 25 m² (5 x 5 m) großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 5 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u. a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.



Tabelle 5: In FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5 m.

Beschreibung	Strukturhöhe [m]
Gebäude	individuell
unbebaut versiegelt	0
Gewässer	0
Gleis	0
landwirtschaftliche Flächen / Rasen	0
Naturferner Boden*	0
Baum über Versiegelung	individuell
Baum über Rasen	individuell
Baum über naturfernem Boden	individuell
Sand / Geröll	0

* Naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen

Abbildung 19 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Alle drei ausgewählten Nutzungsklassen zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen wie Asphalt, Beton oder Pflasterfläche auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04 Uhr morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter einem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, so dass die Temperatur mehrere Kelvin über derjenigen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin unter derjenigen der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (ganz) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

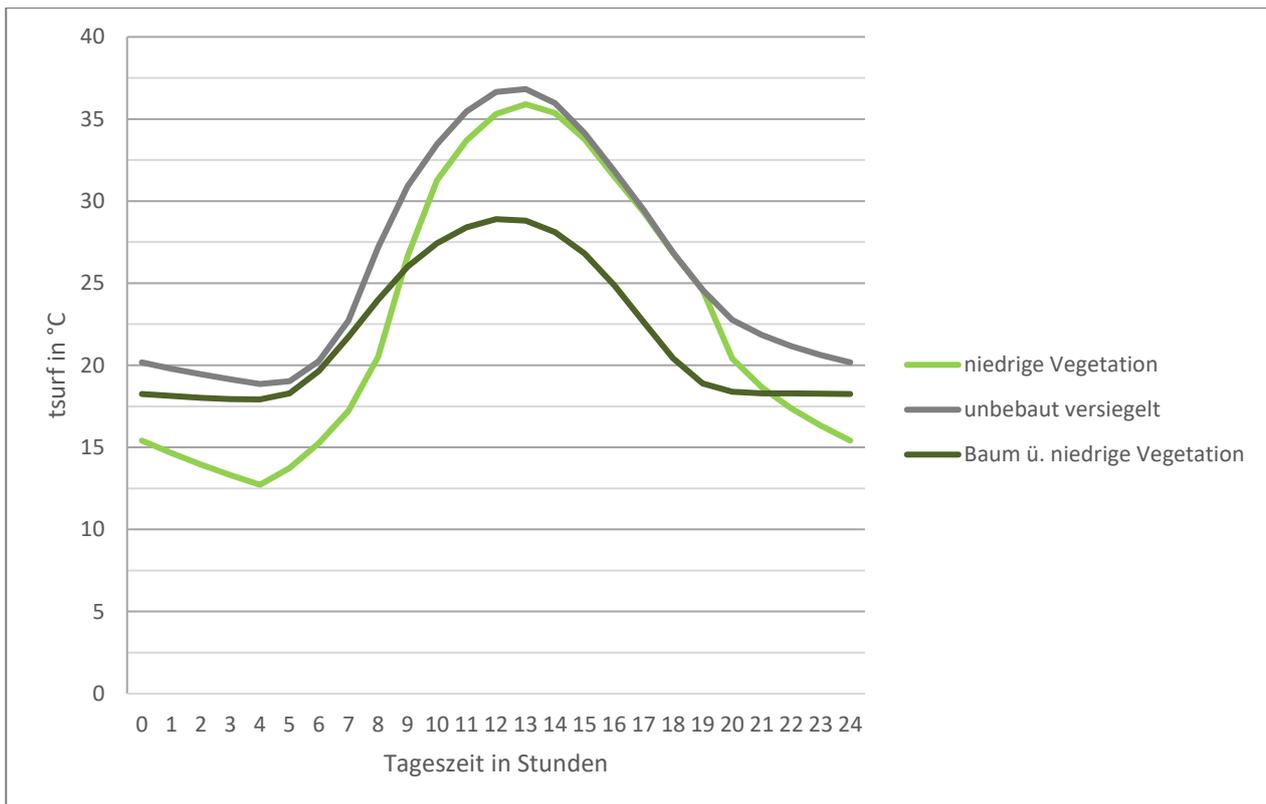


Abbildung 19: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen (tsurf = „surface temperature“) für ausgewählte Nutzungsklassen von FITANH-3D.

Analog gilt dies auch mit Blick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten. Diese stellen sich in der Realität über längere Zeiträume ein, reagieren also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen als dies für die Lufttemperatur gilt. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt, so dass den Pflanzen ausreichend Wasser zur Verfügung steht. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 20 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u. a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 °C gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 °C) wärmer. Die Abbildung macht aber auch deutlich, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum 6-7 °C. Die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der grasbewachsenen Flächen.

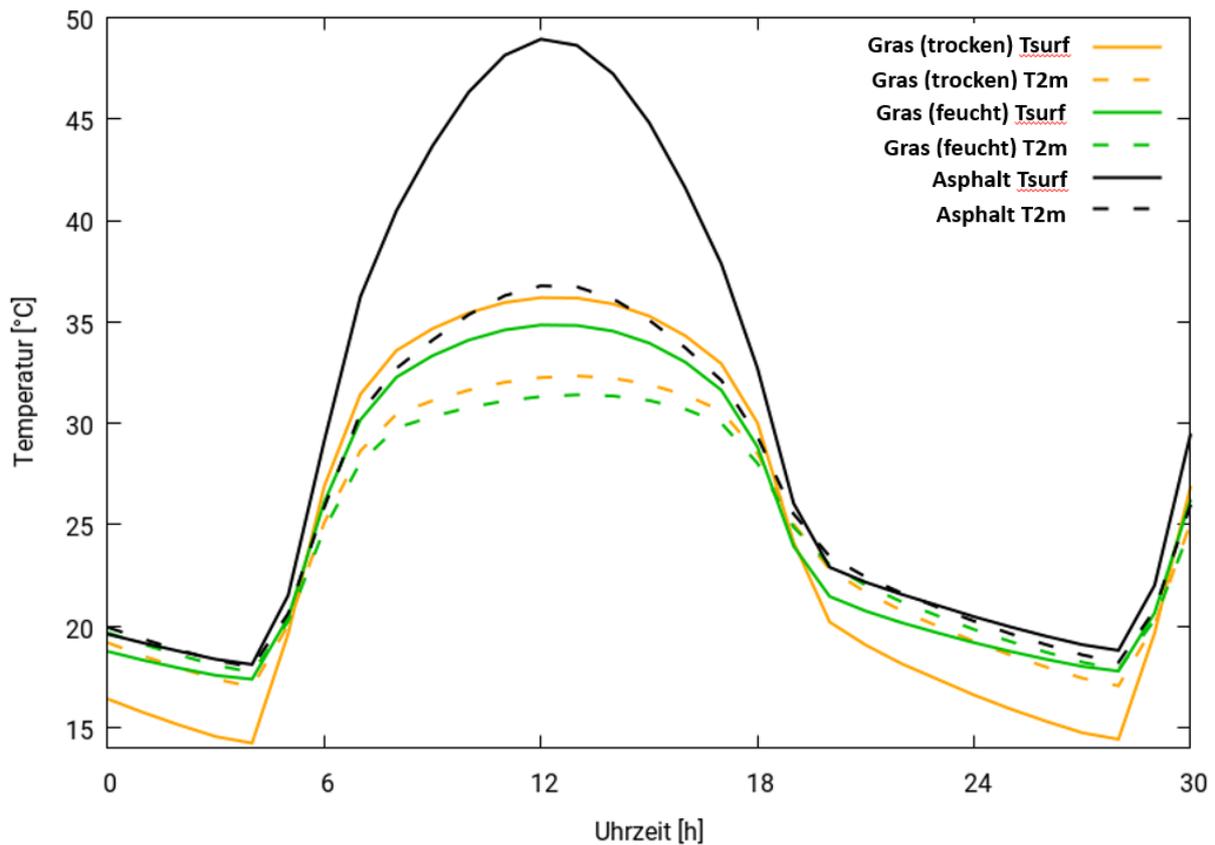


Abbildung 20: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur über Asphalt sowie über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages. Tsurf = Oberflächentemperatur, T2m = Lufttemperatur in 2 m ü. Gr.

In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z. B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt auch für das vertikale Stadtgrün, dass deren Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte hier zudem lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellen. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarienbetrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll. Eine solche variable Parametrisierung des vertikalen Bestandsgrüns wurde für Bremen im Rahmen des modellierten Trockenszenarios nicht umgesetzt, es wurde hier von unveränderter Vegetation ausgegangen.

5.2 RAHMENBEDINGUNGEN FÜR STATUS QUO UND SZENARIENENTWICKLUNG

Da im Rahmen der Stadtklimaanalyse für die Stadt Bremen nicht nur die gegenwärtige Situation abgebildet ist, sind für die Zukunftsszenarien klimatische sowie die Stadtstruktur betreffende Rahmenbedingungen erarbeitet worden.



Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Berücksichtigung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen mit dem numerischen Modell FITNAH-3D. Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung im Handlungsfeld urbane Hitzevorsorge/urbanem Kaltlufthaushalt auf Landes-/Regionalebene sowie auf gesamt- und teilstädtischer Ebene.

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Dabei stehen vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum und die Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum im Fokus. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z. B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (vgl. LfU Bayern 2020 oder Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (vgl. Stadt Karlsruhe 2015, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen - Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode auch bereits in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (Fürst und Scholles 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind (z.B. VDI 2008, VDI 2015).

Gegenwärtig können mithilfe des Methodenpakets folgende für die urbane Hitzevorsorge zentrale Themenkomplexe ebenen-/maßstabsunabhängig modelltechnisch abgebildet werden:

- Modul 1: Auswirkungen des Klimawandels (allmähliche Temperaturzunahme sowie reduzierte Bodenfeuchten aufgrund zunehmender Trockenheit)
- Modul 2: Auswirkungen von Flächennutzungsänderungen (Stadtentwicklung, Stadtsanierung, Verkehrs-/Grünflächenplanung, Waldumbau)
- Modul 3: Auswirkungen von gebäude- und boden-/flächenbezogenen Anpassungsmaßnahmen

Die Module können je nach spezifischer Fragestellung und zur Verfügung stehenden Grundlagen für die Modellierungen individuell zusammengestellt werden. Für die vorliegende Analyse wurden die Module 1 und 2 angewendet. Die konkrete Ausgestaltung im vorliegenden Projekt ist in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarientwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu projizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Zukunft aufmerksam zu machen, ohne dabei davon auszugehen, dass diese Szenarien tatsächlich real werden. Eine Hauptfunktion von Szenarien ist es, auf Alternativen und Varianten von Entwicklungen aufmerksam zu machen, um ggf. gegensteuern zu können (Wilms 2006; Kosow und Gaßner 2008). Es gibt unterschiedliche Ansätze der Szenarientwicklung, im Projekt kommt die vorausschauende (forecasting) Szenariomethodik zum Tragen.

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente - eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmaßnahmen in einem gemeinsamen Szenariotrichter mit vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten (Abbildung 21). In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen - hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

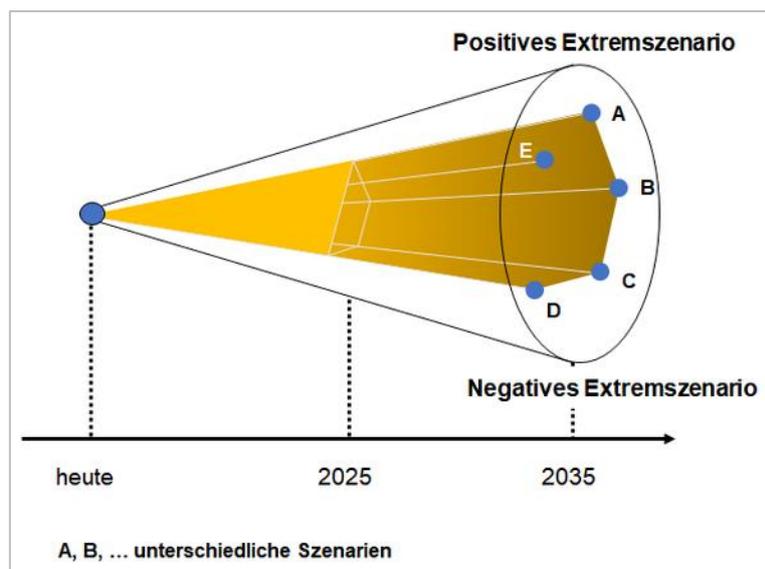


Abbildung 21. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de).

UMSETZUNG FÜR BREMEN

In der Stadtklimaanalyse für Bremen wurden neben der Referenzsituation (Ist-Situation) vier weitere Zukunftsszenarien erarbeitet und modelliert. Tabelle 6 fasst die wichtigsten Merkmale der einzelnen Szenarien zusammen.

Die Referenzsituation (Synonyme: Ist-Situation, Referenzszenario, Status Quo) spiegelt die gegenwärtige Situation in Bremen wider (Stand 2023 als Zeitpunkt der Datenerfassung). Sie wurde anhand der vorhandenen verfügbaren Geodaten erarbeitet. Mit dem Ziel einer möglichst hohen Aktualität wurden darüber hinaus rechtsverbindliche Bebauungspläne sowie in der Umsetzung befindliche bzw. zeitnah umzusetzende Bauprojekte in das Rechenmodell der Ist-Situation integriert. Da sich diese städtebaulichen Planungen und Bauvorhaben jedoch noch nicht in den Geodaten wiederfinden, wurden sie individuell – basierend auf dem jeweils vorhandenen Planstand im August 2023 – ergänzt.

Die Zukunftsszenarien berücksichtigen die mögliche klimatische Entwicklung. Hintergrund für die Auswahl der vier verschiedenen Szenarien war zum einen der Bedarf den für die Stadtplanung relevanten Planungshorizont in der nahen Zukunft zu betrachten. Um der möglichen Entwicklung von fortschreitender Trockenheit Rechnung zu tragen, wurde dieses Szenario einmal mit Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt (RCP4.5_2050) und einmal mit verminderter Bodenfeuchte (trRCP4.5_2050) modelliert. Zum anderen wurde



im Rahmen von zwei weiteren Zukunftsszenarien der Blick auf die ferne Zukunft gerichtet (Szenarien RCP2.6_2085 und RCP8.5_2085). Da diese langfristigen Projektionen großen Unsicherheiten unterliegen wurde hier ein „Möglichkeitentrichter“ aufgespannt, mit dem Ziel, das „best-case“ sowie das „worst-case-Szenario“ abzubilden. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlich auftretenden Klimaänderungen sich innerhalb dieser beiden Szenarien bewegen.

Tabelle 6: Im Projekt entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	betrachteter Zeitraum	Stadtstruktur
Referenzsituation (Ist-Situation)	Heutiges Klima	Heutige Stadtstruktur (Inhalte verbindlicher Bauleitplanungen und aktuell laufende Entwicklungsvorhaben wurden integriert, Stand August 2023)
Nahe Zukunft mit moderatem Klimaschutz (RCP4.5_2050)	RCP 4.5 für die nahe Zukunft (Mitte: 2050)	Berücksichtigung der Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen (Stand August 2023)
Nahe Zukunft mit moderatem Klimaschutz und zunehmender Trockenheit (tr.RCP4.5_2050)	RCP 4.5 für die nahe Zukunft (Mitte: 2050)	Berücksichtigung der Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen (Stand August 2023)
Ferne Zukunft mit starkem Klimaschutz (RCP2.6_2085)	RCP 2.6 für die ferne Zukunft (Mitte: 2085)	Berücksichtigung der Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen (Stand August 2023)
Ferne Zukunft mit hohen Emissionen (RCP8.5_2085)	RCP 8.5 für die ferne Zukunft (Mitte: 2085)	Berücksichtigung der Stadtentwicklung mit Stadtentwicklungsflächen (Stand August 2023)

5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen, gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Wie in Kap. 5.1 beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe



Tabelle 7 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Erstellung der Nutzungsklassen in der Referenzsituation zusammen. Diese Daten wurden genutzt, um die FITNAH-Modelleingangsdaten: Landnutzung, Geländehöhe und Strukturhöhe für Bäume sowie Gebäude zu erzeugen.

Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert und dabei auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen der Referenzsituation und den Zukunftsszenarien eingegangen.

Tabelle 7: Datenquellen zur Erstellung der Modelleingangsdaten in Bremen als Basis für die Referenzsituation.

Datenquelle	Datensatz	Erfassungsjahr	Datentyp	Auflösung
Geländehöhe	Digitales Geländemodell	2017	Rasterdaten	1 m
Gebäude/-höhen	3D-LOD	2022	Vektordaten	
	ALKIS	2022	Vektordaten	
	Digitales Oberflächenmodell	2021	Rasterdaten	1 m
Vegetation/-höhen	Baumkataster	2023	Punktinformation	
	CiR-Luftbild	2021	Rasterdaten	0,5 m
	Digitales Oberflächenmodell	2021	Rasterdaten	1 m
	Digitales Geländemodell	2017	Rasterdaten	1 m
Landnutzung	ALKIS	2022	Vektordaten	
	OpenStreetMap	2022	Vektordaten	
	CiR-Luftbild	2021	Rasterdaten	0,5 m

MODELLGEBIET

Das Modellgebiet ist dabei für alle durchgeführten Modellläufe identisch. Es beinhaltet das gesamte Stadtgebiet sowie das angrenzende Umland (Abbildung 22). Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 936 km² und ist damit deutlich größer als das Stadtgebiet selbst.



Abbildung 22: Modellgebiet. Rot: Stadtgrenze Bremen, violett: Modellgebietsgrenze.

GELÄNDEHÖHE

Diese Daten stammen aus dem Digitalen Geländemodell der Stadt Bremen aus dem Jahr 2017 (Abbildung 23). Das Modellgebiet ist zum Großteil durch eine relativ flache Landschaft geprägt. Eine Ausnahme bildet mit 45 m Höhe der Müllberg nahe der RAB Recyclinganlage Bremen sowie Geländeunterschiede von bis zu 60 m im Nordwesten des Modellgebiets. Da sich relevante Hebungen und Senkungen der Landmassen in geologischen Zeitskalen und nicht in Jahrzehnten abspielen, konnte für alle Modellrechnungen dasselbe Geländemodell zugrunde gelegt werden.

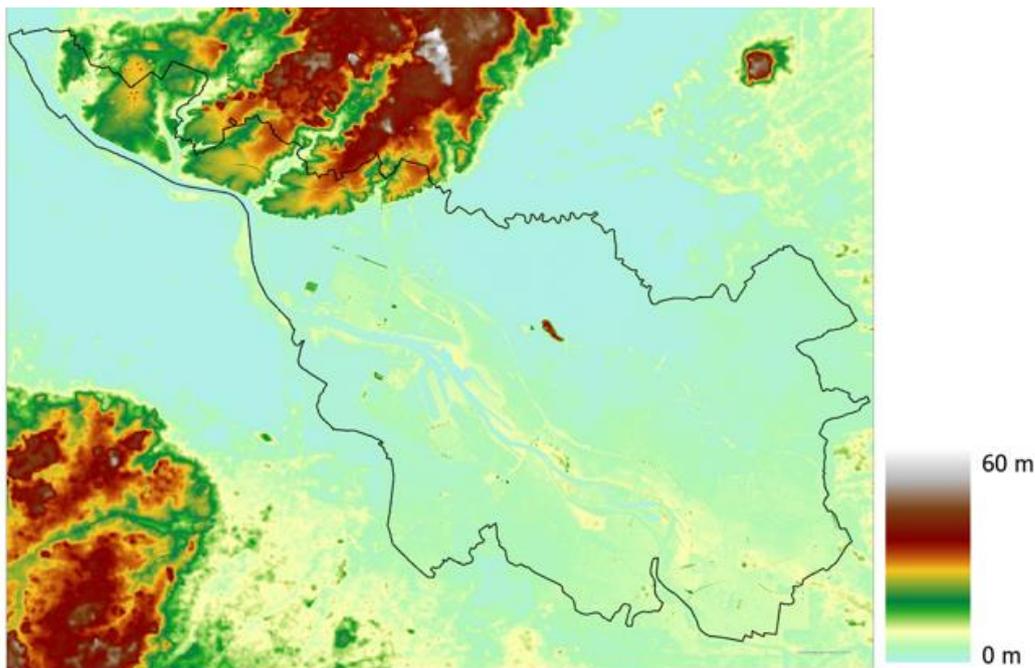


Abbildung 23: Digitales Geländemodell für das Modellgebiet. Schwarze Linie: Stadtgrenze Bremen.

LANDNUTZUNG

Die Stadtstruktur wird über verschiedene Landnutzungs- oder Modellnutzungsklassen definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Für die Erzeugung der Modellnutzungsklassen wurden die in Tabelle 7 aufgelisteten Datensätze miteinander verschnitten und weiterhin unterschiedliche Ansätze genutzt, um die Modelleingangsdaten zu verfeinern. Bei der vorliegenden Rasterzellengröße von 5 x 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Klassifizierung aufzulösen.

Die Berechnung des Normalisierten differenzierten Vegetationsindex (NDVI) aus den RGBI-Luftbildern brachte einen Mehrwert für die Ableitung von Vegetation. Der NDVI ist einer der am häufigsten verwendeten Indizes zur Vegetationsbewertung, der meist auf Basis von Satellitendaten errechnet wird. Er ermöglicht die Unterscheidung zwischen vegetationsbestandenen und versiegelten Flächen. Da das Baumkataster nur öffentliche Bäume enthält, konnten in der Kombination von NDVI und dem Oberflächenmodell Bäume für die gesamte Stadt erfasst werden, auch in Gärten und Hinterhöfen. Des Weiteren ermöglicht der NDVI die Unterscheidung von versiegelten Flächen abseits der Straßen. So konnten bspw. Parkplätze in Hinterhöfen bzw. Innenhöfen, die nicht in den ALKIS-Daten enthalten sind, dem Modell als versiegelte Flächen übergeben werden.

Daraus ergeben sich zehn verschiedene Landnutzungsklassen, die in die Modellrechnung eingegangen und in Abbildung 24 für die Referenzsituation dargestellt sind.

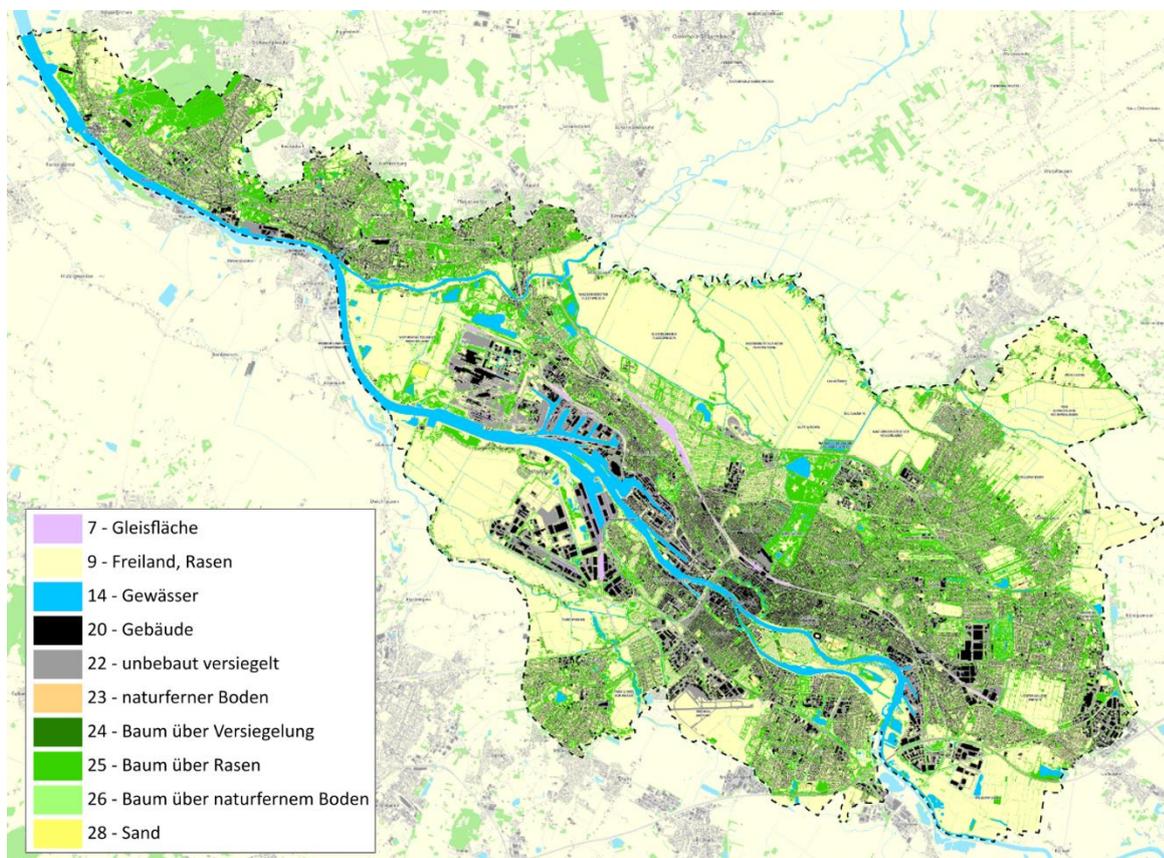


Abbildung 24: Verteilung der Landnutzungsklassen im Modellgebiet.



Die Modellnutzungsdaten wurden durch die Auftraggeberin geprüft, bevor die Modellrechnungen gestartet wurden.

Im Unterschied zu den Geländehöhen unterscheidet sich der Eingangsdatensatz zur Stadtstruktur in den verschiedenen Modellrechnungen voneinander. Da für die vier Modellrechnungen der Zukunftsszenarien die Stadtentwicklung berücksichtigt wurde, kommt es hier zu Verschiebungen in den Anteilen der Nutzungsklassen im Vergleich zur Referenzsituation. Ein Beispiel für eine solche Stadtentwicklung zeigt Abbildung 25. Für alle Zukunftsszenarien wurde die gleiche Stadtentwicklungskulisse angenommen. Es wurde hier keine weitere Unterscheidung zwischen der nahen und der fernen Zukunft vorgenommen.

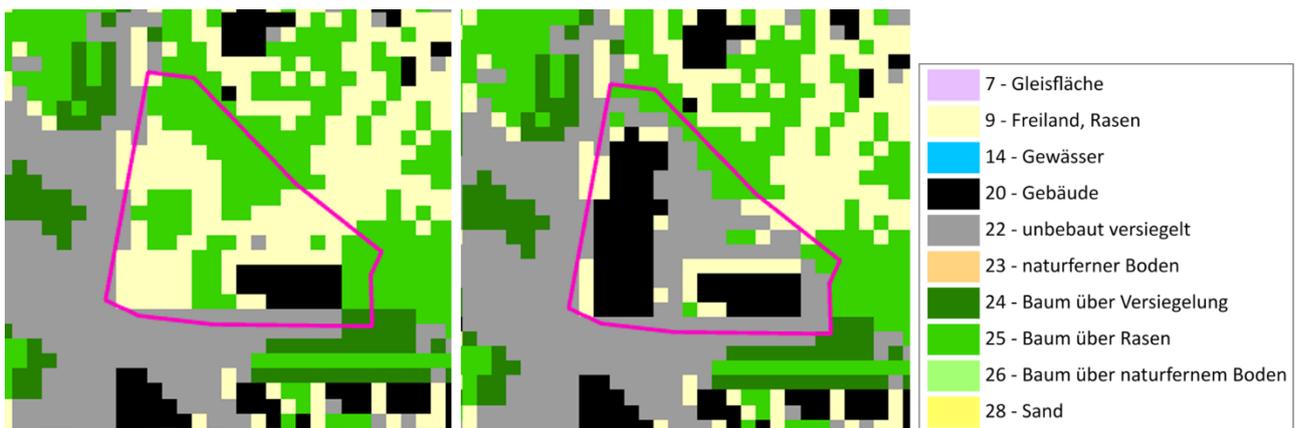


Abbildung 25: Beispielhafte Stadtentwicklungsfläche mit Zuordnung der Landnutzungsklassen. Links: Referenzsituation, rechts: Zukunftsszenario.

MISCHPIXELANSATZ

Für eine Vielzahl der Stadtentwicklungsflächen lagen zum Zeitpunkt der Modellierung noch keine konkreten städtebaulichen Entwürfe vor. Um diese Flächen in die Modellstruktur zu überführen, erfolgte daher die Anwendung des sogenannten „Mischpixel-Ansatzes“. Dabei wurden für die zukünftig zu entwickelnden Gebiete eine zufällige Verteilung der relevanten Nutzungsklassen vorgenommen (als Pixel im 5 m-Raster, Abbildung 26). Diese zufällige Verteilung entspricht in der Regel nicht einer realen Bebauungsstruktur, sondern ist viel-

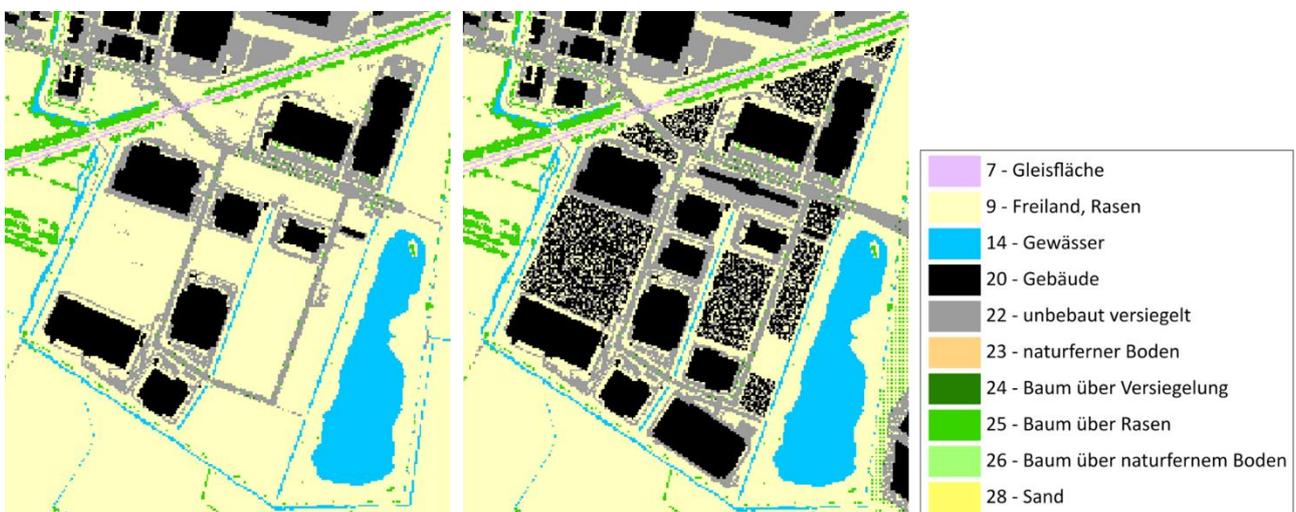


Abbildung 26: Anwendung des Mischpixel-Ansatzes für eine beispielhafte Stadtentwicklungsfläche. Links: Referenzsituation, rechts: Zukunftsszenario.

mehr eine abstrakte Annäherung an die zukünftige Gestaltung. Aus diesem Grund wurden die Modellergebnisse für die Mischpixelflächen als jeweiliger flächenbezogener Mittelwert dargestellt, um der Abstrahierung Rechnung zu tragen. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen.

5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sog. autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage in Bremen regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (s. Kapitel 4.3).

Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21 bis um 14 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes. Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Bremen besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 27 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

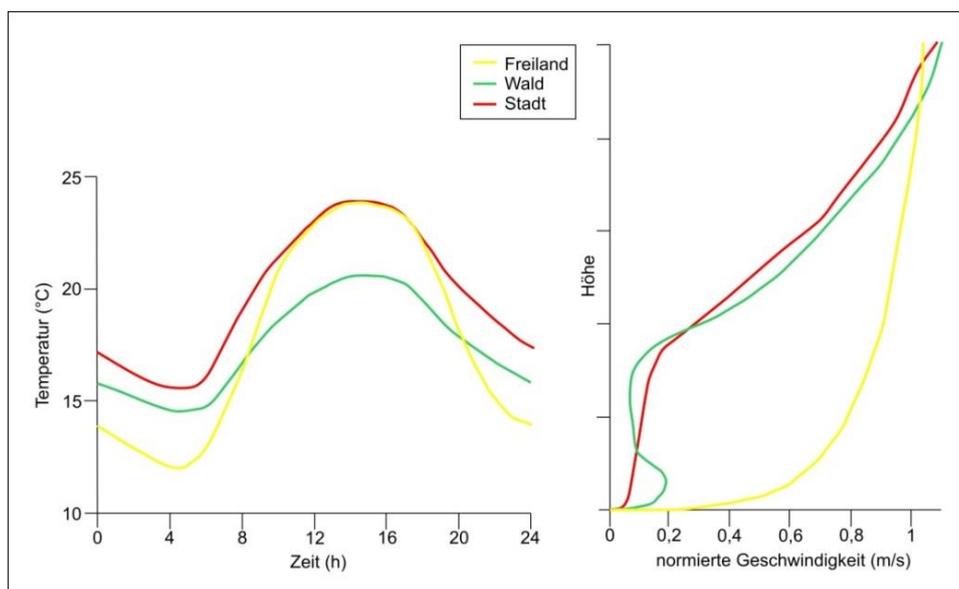


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross 1992).



Als weitere Bedingung muss dem Modell eine Starttemperatur für die Modellrechnung vorgegeben werden. Die Modellstarttemperatur für die Referenzsituation wurde anhand der Auswertung einer Zeitreihe von 1991-2022 der DWD-Messstelle Bremen herausgearbeitet. Für einen mittleren Sommertag (Tagesmaximumtemperatur > 25 °C) in den Sommermonaten Juni, Juli und August wurde um 21 Uhr abends eine Temperatur von 21,2 °C in 0 m ü. Gr. ermittelt. Für die Wasserflächen wurde aus mehrjährigen Messreihen eine Modelltemperatur von 20,7 °C abgeleitet.

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen (siehe Tabelle 8). Die Aufprägung des Temperatursignals für die Modellrechnungen erfolgte auf der Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ (stellvertretende Szenarien zur Untersuchung des Klimawandels) beschriebenen Ansatzes (Schär et al. 1996). Demnach wurden die Modellsimulationen der Zukunftsszenarien mit einem jeweils zugewiesenen Temperaturdelta beaufschlagt. Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhengniveaus addiert. Die Delta-Werte wurden aus den Modellensembles der EURO-CORDEX-Daten für das jeweilige RCP-Szenario abgelesen. Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 °C/100m mit der Höhe ab. Zusätzlich zur Veränderung der Temperatur wird im Szenario trRCP4.5_2050 eine erhöhte Austrocknung der Bodenschicht simuliert. Dafür wurde die Bodenfeuchte in diesem Szenario unter den Welkepunkt gesenkt. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, so dass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt. Demgegenüber liegt die Bodenfeuchte in der Referenzsituation und in den übrigen Zukunftssimulationen mit 60 % deutlich über dem Welkepunkt. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein größeres Volumen verteilt werden, so dass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (CAISSIE 2006; IPCC 2014). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von 50 % des Deltas berücksichtigt.

Die Delta-Werte für die verschiedenen Modellsimulationen sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Um regionale Strömungen zu erfassen, die nicht innerhalb des Modellgebietes liegen, ist es erforderlich das sich aus den autochthonen Vorgaben entwickelnde Windfeld mittels einer „übergeordneten“ Strömung anzutreiben. Die Notwendigkeit ergibt sich aus dem Umstand, dass regionale Gegebenheiten, die die Kaltluftströmung beeinflussen, jedoch außerhalb des Modellgebietes liegen, nicht abgebildet werden können.

Um dieses Prozessgeschehen von außen zu berücksichtigen, wurde ein Nesting-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus der Deutschlandrechnung in einer Auflösung von 200 Metern (erstellt durch GEO-NET). Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungsgeschehen an das kleinere Untersuchungsgebiet der Bremer Klimaanalyse weitergegeben.

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren bewusst eine zumindest für Teile der Stadt thermisch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind (noch) selten und zu intensiv.



Tabelle 8: Zusammenfassung der Modellrandbedingungen für die Referenzsituation und die Zukunftsszenarien.

Szenario	Starttemperatur des Modells (Lufttemperatur)	Wassertemperatur	Bodenfeuchte
Ist-Situation	21,2 °C (Abgeleitet aus der DWD-Station 691 in Bremen)	20,7 °C	60 %
RCP4.5_2050	22,8 °C (Abgeleitet aus dem mittleren Klimasignal des RCP 4.5 mit einer Temperaturerhöhung von 1.6 °C. Dies entspricht dem 50. Perzentil des Ensembles)	21,5 °C (Abgeleitet aus der Hälfte des mittleren Klimasignal des RCP 4.5 und entspricht einer Temperaturerhöhung von 0,8 °C)	60 %
trRCP4.5_2050	22,8 °C (Abgeleitet aus dem mittleren Klimasignal des RCP 4.5 mit einer Temperaturerhöhung von 1.6 °C. Dies entspricht dem 50. Perzentil des Ensembles)	21,5 °C (Abgeleitet aus der Hälfte des mittleren Klimasignal des RCP 4.5 und entspricht einer Temperaturerhöhung von 0,8 °C)	30 % (Reduzierte Bodenfeuchte als Annahme zunehmender Trockenheit)
RCP2.6_2085	22,0 °C (Abgeleitet aus dem schwachen Klimasignal des RCP 2.6 mit einer Temperaturerhöhung von 0,8 °C. Dies entspricht dem 15. Perzentil des Ensembles)	21,1 °C (Abgeleitet aus der Hälfte des mittleren Klimasignal des RCP 2.6 und entspricht einer Temperaturerhöhung von 0,4)	60 %
RCP8.5_2085	25,8 °C (Abgeleitet aus dem starken Klimasignal des RCP 8.5 mit einer Temperaturerhöhung von 4,6 °C. Dies entspricht dem 85. Perzentil des Ensembles)	23,0 °C (Abgeleitet aus der Hälfte des mittleren Klimasignal des RCP 8.5 und entspricht einer Temperaturerhöhung von 2,3 °C)	60 %

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche Zeitschnitte aus (Tabelle 9). Insgesamt ergibt sich somit eine große Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte. Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W Komponenten des Windes) sowie die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 9: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter.

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten



V-Komponente des Windes	[m/s]	
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	
Potentielle Lufttemperatur	[K]	
Diffusionskoeffizient-Momentum	[m ² /s ²]	
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	

Um die der Analyse zugrundeliegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten meteorologischen Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sog. post-processing Schritt werden aus den o. g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH-Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus verschiedenen abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertzeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (siehe Tabelle 10).

Bei dieser ausgewählten Variante handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau in bis zu 2 m, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertzeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für den Index der Tagsituation um 14 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Im vorliegenden Projekt lag der Schwerpunkt auf den thermischen Parametern für die Tag- und Nachtsituation als Grundlage für die Bewertung der gesunden Aufenthaltsverhältnisse.

Tabelle 10: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt.

Parameter	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04 Uhr
Windrichtung [als geographische Rotation]	[°]	2 m ü. Gr.	04 Uhr
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04 Uhr
Kaltluftproduktionsrate	[m ³ /m ² h]	2 m ü. Gr.	04 Uhr
Kaltluftvolumenstromdichte	[m ³ /(s*m)]	Integral bis 50 m ü. Gr.	04 Uhr
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14 Uhr



5.6 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschließenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, das bei GEO-NET für komplexere Modellanwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identifizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten dann als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für die Auftraggeberin zu bereinigen. Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung für alle Modellläufe

5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres physikalischen, flächendeckenden und das Kaltluftprozessgeschehen berücksichtigenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modellanwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyseansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften einordnen:

- Unsicherheiten im Modell („interne Unsicherheiten“)
- Unsicherheiten in den Eingangsdaten („externe Unsicherheiten“)

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses lediglich hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2017) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von Vorhaben der Forschung und Entwicklung (F&E) ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sog. „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarienrechnungen enthält – also z. B. die



Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmenzenarien abzubilden hat. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 - 0,2 °C pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei der geostatistischen Aggregation auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 - 2 % bezogen auf eine Fläche der Basisgeometrie, bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

Insbesondere kleinräumig stellen die zur Verfügung stehenden bzw. mit vertretbarem Aufwand erzeugbaren Modelleingangsdaten die relevantere Unsicherheitsquelle dar. Die Unsicherheiten können sich dabei ergeben aus

- der Art ihrer Weiterverarbeitung zur Verwendbarkeit im Rahmen der Analyse
- der Aktualität der Daten (bzw. ihrer Obsoleszenz),
- ihrer Genauigkeit (bzw. Ungenauigkeit) bzw. ihres Informationsgehaltes.

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Städte modelliert werden kann. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z. B. besonders sehr kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, so dass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrundeliegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich u.a. auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu beispielsweise Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.



Vergleichbares gilt auch für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer flächendeckenden Stadtbodenkartierung abgeleitet werden und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Im Modell wird mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 °C und in den Nachtstunden von 1,1 °C betragen kann, was wiederum auch zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen in ausreichend guter Qualität. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z. B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und dann auch modelltechnisch abgebildet werden können.

Mit Blick auf die Zukunftsszenarien in Verbindung mit den dort integrierten Entwicklungsflächen kommt die Unsicherheitsquelle des sog. „Mischpixel-Ansatzes“ hinzu. Dieser repräsentiert aufgrund der noch nicht abgeschlossenen Planungen auf den entsprechenden Flächen notwendigerweise einen vereinfachten Ansatz, der zwar realistische Nutzungsanteile innerhalb der Fläche repräsentiert, diese aber zufällig auf der Fläche verteilt. Das in der Realität - also nach Vorhabenrealisierung – entstehende Nutzungsmosaik (Gebäude, ebenerdige Versiegelungen, ebenerdiges Grün, Bäume) wird damit nur (oder auch: immerhin) näherungsweise getroffen. Die Unsicherheiten nehmen dabei mit abnehmendem Verhältnis überbauter Grundstücksfläche zu unbebautem Freiraum zu. Das bedeutet, dass die Unsicherheiten bei Vorhaben wie beispielsweise bei einem einzelstehenden Hochhaus auf einem großen Grundstück mit viel Freiraum am größten ausfallen (weil es innerhalb der Fläche eine vergleichsweise große Variationsmöglichkeit gibt), während sie bei Vorhaben wie beispielsweise einem Gewerbegebiet mit einer GRZ von 0,8 sehr gering ausfallen (weil es innerhalb der Fläche vergleichsweise geringe Variationsmöglichkeiten gibt). In aller Regel ähneln die Mischpixelflächen eher dem letzteren Typ mit eher kleinerem Variationspotential, sodass zwar kleinräumige Unsicherheiten bestehen, diese im gesamtstädtischen Kontext aber valide Ergebnisse liefern.

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und den Zukunftsszenarien differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.3 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und -erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation kann eine überwiegend aktuelle Datengrundlage aus den Jahren 2021 bis 2023 und folglich eine geringe Unsicherheit attestiert werden.

Darüber hinaus existiert keine groß- oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die hätten Berücksichtigung finden können. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. Diese Ausführungen lassen sich



grundsätzlich auch auf die Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung übertragen. Die Zukunftsszenarien enthalten zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten 10 bis 20 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen auch Informationen zu Art und Maß der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher.

Zusammenfassend kann also festgehalten werden, dass numerische Modellrechnungen – ebenso wie alle anderen Analysemethoden in der Umweltanalytik im Allgemeinen und der Angewandten Stadtklimatologie im Speziellen – mit gewissen Unsicherheiten verbunden sind. Es ist aber auch deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.



Quellenverzeichnis

- An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62, Heft 5, S. 571-579.
- An der Heiden, M.; Zacher, B.; RKI-Geschäftsstelle für Klimawandel und Gesundheit, Dierke, M.; Bremer, V. (2024): Wochenbericht zur hitzebedingten Mortalität KW38/2024 vom 03.10.2024. Robert Koch-Institut. DOI: 10.25646/12861.
- Augter, G. (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analy-sing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. Climate Risk Management, Volume 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- BfN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BfN-Skripten 444.
- BMVI (2016): Handlungshilfe Klimawandelgerechter Regionalplan. Ergebnisse des Forschungsprojektes KlimREG für die Praxis: Schriftenreihe: MORO-Praxis. BMVI.
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Re-gional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge Nation-al Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Bayerische Staatsregierung (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS).
- Cannon A.J.; Sobie S.R.; Murdock T.Q. (2015): Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? J. Climate, 28, 6938–6959.
- Chen, Yen-Chang; Tan, Chih-Hung; Wei, Chiang; Su, Zi-Wen (2014): Cooling effect of rivers on metropolitan Taipei using remote sensing. In: International journal of environmental research and public health 11 (2), S. 1195–1210. DOI: 10.3390/ijerph110201195.
- CLC (2017): Corine Landcover 2018. Technical Guidelines. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc2018technicalguidelines_final.pdf
- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges bauen.



- Donat M. G., Leckebusch G. C., Pinto J. G., Ulbrich U. (2010): European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research* 42:27–43.
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD (2022a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. Freier Online-Zugang zu Klimadaten: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2022b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD (2023): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2024): Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien. Online: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-datensatz_node.html
- Fanger, P.O. (1972): *Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering*. New York: McGraw Hill.
- Fink A. H., Pohle S., Pinto J. G., Knippertz P. (2012): Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophysical Research Letters* 39:L07803.
- Freie Hansestadt Bremen (2013): Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen. https://www.lapro-bremen.de/assets/Lapro-Plan/FB_Stadtklima_2013/2_12_013_Bremen_Klimaanalyse_rev02_Aug2013.pdf
- Freie Hansestadt Bremen (2024): Hitzeaktionsplan. Die Senatorin für Umwelt, Klima und Wissenschaft und Umweltschutzamt Bremerhaven (Hrsg.).
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung*. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): *Umweltbewertung und Umweltprüfung*. Braunschweig: Westermann.
- GEO-NET (2021), Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsrahmenplanung. Online verfügbar: https://www.lfu.bayern.de/download/natur/schutzgutkarten/klimaluft_abschlussbericht.pdf
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *WMO Bulletin*, 58(3):175-183.
- Gross, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 38, 315-337.
- Gross, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Gross, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.



- Gross, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002)
DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0295.
- Gross, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Gross, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Gross, G. (2021a): A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime in-door temperatures in an urban area. In: *metz 30* (3), S. 227–236. DOI: 10.1127/metz/2021/1066.
- Gross, G. (2021b): On the importance of a viscous surface layer to describe the lower boundary condition for temperature. In: *metz 30* (3), S. 271–278. DOI: 10.1127/metz/2021/1073.
- Gross, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Gross G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Gross, G. (2017): Some effects of water bodies on the n environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- Gross G. (2021): A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area, *metz 30* (3), S. 227-236. DOI: 10.1127/metz/2021/1066.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landchaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (Hg.) (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Unter Mitarbeit von Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Jacob, Daniela; Petersen, Juliane; Eggert, Bastian; Alias, Antoinette; Christensen, Ole Bøssing; Bouwer, Laurens M. et al. (2014): Erratum to: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In: *Reg Environ Change* 14 (2), S. 579–581. DOI: 10.1007/s10113-014-0587-y.
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.



- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf
- Kaspar, Frank; Mächel, Hermann; Jacob, Daniela; Kottmeier, Christoph (2017): Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In: Susanne Schuck-Zöller, Daniela Jacob und Guy P. Brasseur (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–26. Online verfügbar unter https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_3.
- Kosow, Hannah; Gaßner, Robert (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. Berlin: IZT (Werkstattbericht / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, 103). https://www.izt.de/media/2022/10/IZT_WB103.pdf.
- Krauser et al. (2018): Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker. Krauser, Helena and Feigenwinter, Christian and Wicki, Andreas. (24 August 2018) Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker. bz basel. p. 1. Liestal.
- Kuttler, W. (2013): Klimatologie. Paderborn: UTB, 2. Auflage.
- Linke C. et al. (2024): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- LfU (2020): das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftenreihe: UmweltSpezial.
- Laureant et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: PLOS Medicine.
- Maronga et al. (2020): Review of the PALM model system 6.0, Geosci. Model Dev., 13, 1335-1372.
- Mayer, H.; Beckröge, W.; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- McDonald R. E. (2011): Understanding the impact of climate change on Northern hemisphere extra-tropical cyclones. Climate Dynamics 37:1399-1425.
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2012): Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel.
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2011): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Moore, G. E. (1903): Principia Ethica. Ditzingen: REKLAM.
- Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J.,



- Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. *Nat. Clim. Change* 3, 4–6.
- Pinto J. G., Ryers M. (2017): Winde und Zyklonen. In: Brasseur G., Jacob D., Schuck-Zöllner S. (Hrsg.) (2017): *Klimawandel in Deutschland*.
- Pinto J. G., Zacharias S., Fink A. H., Leckebusch G. C., Ulbrich U. (2009): Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics* 32:711–737
- Oke (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- R Core Team (2019): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- ReKliEs-De (2017): *Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland - Nutzerhandbuch*.
- Sandholz und Sett (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. *UNU Workingpaper*.
- Schädeler, G.; Lohmeyer, A. (1994): Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. *Meteorologische Zeitschrift*. 3, 167-171.
- Schär, Ch., Frei, D., Lüthi, H.C., Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672.
- Schlünzen, K. H. et al. (2018): Stadtklima in Hamburg. In: von Storch H., Meinke I., Claußen M. (eds) *Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. *Berichte des DWD* 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. <https://www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de>
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). *Nature* 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>
- UBA (2024): Richtiges Heizen schützt das Klima und den Geldbeutel. <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/heizen-bauen/heizen-raumtemperatur#so-erreichen-sie-das-ideale-raumklima-in-ihrem-heim> (Abruf: 04.12.2024).



- UBA (2024a): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze> (Abruf: 04.12.2024).
- Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322.
- 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 m^3/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 ($0\text{ °C} = 273,15\text{ K}$). Wird zur Angabe von Temperaturdifferenzen verwendet, wobei $1\text{ K} = 1\text{ °C}$ 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 Wirkungsräume) 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, unbebauten 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 °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 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 °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 die 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