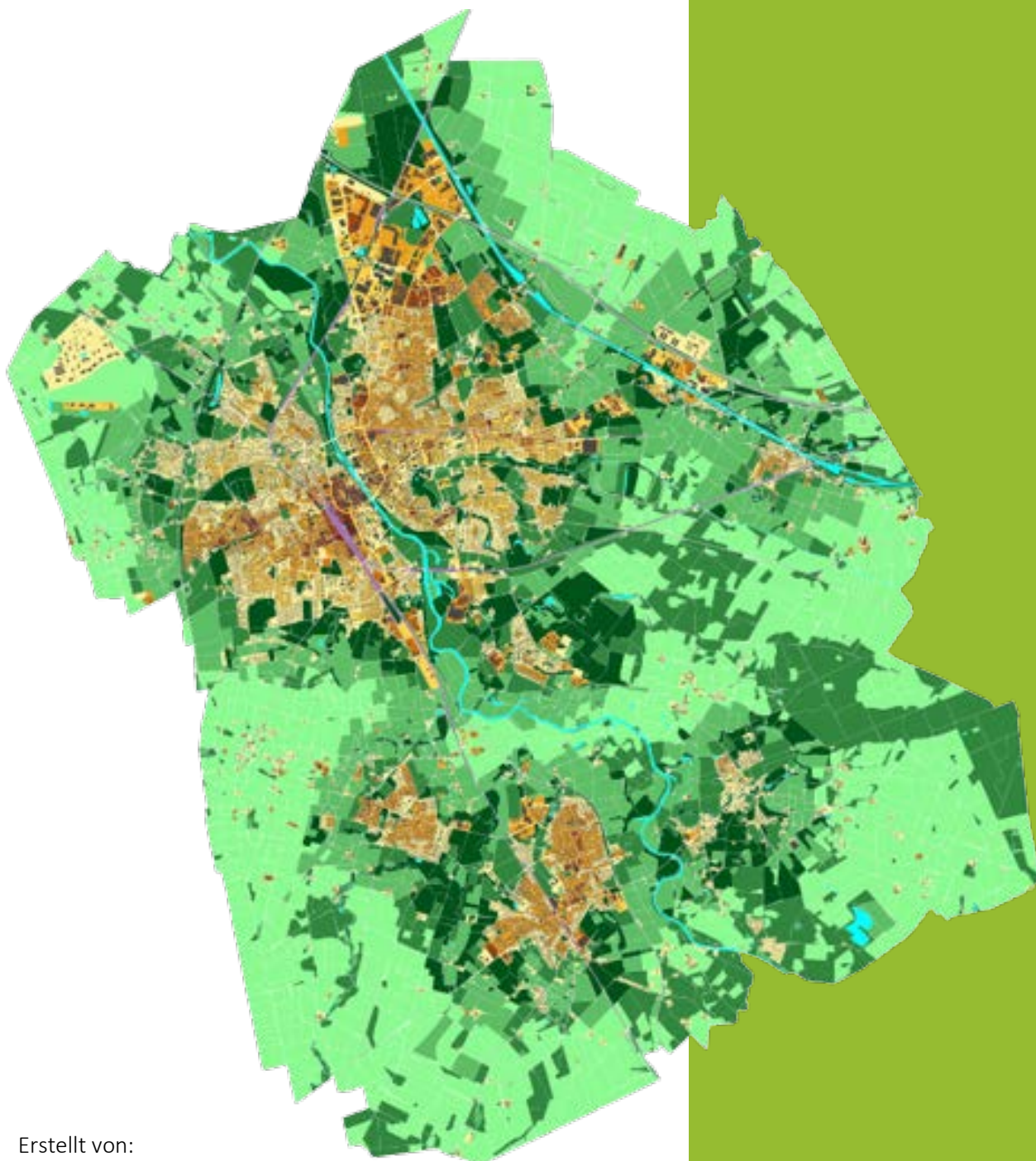


Stadtklimaanalyse für Rheine



Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover



Im Auftrag der
Stadt Rheine
Abt. Planen und Bauen
Klosterstraße 14
48431 Rheine

Oktober 2023



Auftraggeber

Auftragnehmer

Stadt Rheine

Klosterstraße 14
48431 Rheine

Projektbegleitung

Planen und Bauen
Bereich Umwelt, Klimaschutz
und Grünplanung

Oktober 2023

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

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





Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Glossar	1
Zusammenfassung	3
1. Hintergrund und Anlass	9
2. Fachliche Grundlagen	10
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	10
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	14
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	17
3. Klima und Klimawandel im Raum Rheine	21
3.1 Datengrundlage und Methodik	21
3.2 Gegenwärtiges Klima	24
3.3 Autochthone Wetterlagen	27
3.4 Zukünftige Klimaveränderungen	28
4. Analysemethoden	33
4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	33
4.2 Szenarien-entwicklung	37
4.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	39
4.4 Rahmen- und Randbedingungen	44
5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen	51
5.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	51
5.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht	53
5.3 Klimaanalysekarten	55
5.4 Wärmebelastung am Tage	58
6. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte	60
6.1 Grundlagen	60
6.2 Geometrische Basis	61
6.3 Bewertungskarten	62
6.4 Planungshinweiskarte	70
7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima	76
7.1 Stadtklimamanagementsystem	91
Quellenverzeichnis	93
Anhang	98



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	10
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2023A)	11
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN, S., HIETE, M. UND BECK, C. 2021)	12
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	13
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	14
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	15
ABBILDUNG 7: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN RCP-SZENARIEN UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100 (RCP3-PD IST VERGLEICHBAR MIT DEM IM TEXT GENANNTEN RCP-SZENARIO 2.6; QUELLE: IPCC 2013).....	22
ABBILDUNG 8: KLIMADIAGRAMM DER STADT RHEINE FÜR DEN ZEITRAUM 1971 – 2000, BASIEREND AUF DEN GEBIETSMITTELWERTEN DER DWD DATEN (NACH DWD 2022B)	25
ABBILDUNG 9: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN RHEINE IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2021 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B)	26
ABBILDUNG 10: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE ($T_{MAX} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN RHEINE (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B)	26
ABBILDUNG 11: SAISONALE ABWEICHUNGEN VOM MITTELWERT DER BODENFEUCHTE IN RHEINE IM ZEITRAUM 1991 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B).....	27
ABBILDUNG 12: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN RHEINE (65,5 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 2002 - 2013, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION RHEINE-BENTLAGE (DWD 2020)	28
ABBILDUNG 13: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN RHEINE (ALLE RCP-SZENARIEN)	29
ABBILDUNG 14: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN RHEINE (RCP 8.5) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 - 2000 IN FORM VON BOX-WHISKER PLOTS. ZUR ERLÄUTERUNG VON BOX-WHISKER PLOTS SIEHE ABBILDUNG A1 IM ANHANG.	30
ABBILDUNG 15: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN DEN DREI ZUKUNFTSPERIODEN IN RHEINE (RCP 8.5) ZUR ERLÄUTERUNG VON BOX-WHISKER PLOTS SIEHE ABBILDUNG A1 IM ANHANG.	32
ABBILDUNG 16: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN ('TSURF') FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	35
ABBILDUNG 17: IDEALISierter TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR ('TSURF') SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR ('T2M') VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES.....	37
ABBILDUNG 18: DIGITALES GELÄNDEMDELL FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET, MIT GEBÄUDEKULISSE	39
ABBILDUNG 19: ERMITTLUNG VON BAUMSTANDORTEN MITTELS VEGETATIONSINDEX UND STRUKTURHÖHE	41
ABBILDUNG 20: AUSSCHNITT KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG IM 5 M MODELL-RASTER.	41
ABBILDUNG 21: ZWEI BEISPIELE FÜR MIT DEM MISCHPIXELANSATZ GEFÜLLTE ENTWICKLUNGSFLÄCHEN: LINKS WOHNBEBAUUNG, RECHTS GEWERBE GEBIET.....	43
ABBILDUNG 22: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992)	44



ABBILDUNG 23: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN DER KERNSTADT VON RHEINE (VERKÜRZTE LEGENDE, IST-SITUATION). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE) 51

ABBILDUNG 24: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM UMFELD DER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE, IST-SITUATION). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)..... 53

ABBILDUNG 25: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM UMFELD DER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE, IST-SITUATION). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)..... 54

ABBILDUNG 26: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IN EINEM AUSSCHNITT SÜDWESTLICH DES STADTPARKS. KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE) 55

ABBILDUNG 27: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN..... 56

ABBILDUNG 28: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE IST-SITUATION (LEGENDE: SIEHE ABBILDUNG 27) 58

ABBILDUNG 29: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN EINEM AUSSCHNITT VON RHEINE FÜR DIE IST-SITUATION (VERKÜRZTE LEGENDE). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)..... 59

ABBILDUNG 30: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE 61

ABBILDUNG 31: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) 62

ABBILDUNG 32: SCHEMA DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG VON FLÄCHEN IM AUSGLEICHSPUNKT IN DER NACHT 65

ABBILDUNG 33: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION (LINKS IST-SITUATION, RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO), VERKÜRZTE LEGENDE..... 66

ABBILDUNG 34: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION (LINKS IST-SITUATION, RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO). VERKÜRZTE LEGENDE 68

ABBILDUNG 35: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA. VERKÜRZTE LEGENDE 73



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18).....	18
TABELLE 2: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN...	20
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN RHEINE (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	29
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE SOWIE DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN IN RHEINE (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	31
TABELLE 5: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	34
TABELLE 6: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE	38
TABELLE 7: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS	40
TABELLE 8: IN DIE MODELLEINGANGSDATEN EINGEFLOSSENE B-PLÄNE UND AKTUELLE BAUVORHABEN	42
TABELLE 9: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER FITNAH-NUTZUNGSKLASSEN FÜR DIE JEWEILIGEN POTENZIELLEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM ZUKUNFTSSZENARIO.....	43
TABELLE 10: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	46
TABELLE 11: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	47
TABELLE 12: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	57
TABELLE 13: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	63
TABELLE 14: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT	64
TABELLE 15: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	66
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	67
TABELLE 17: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	67
TABELLE 18: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	69
TABELLE 19: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	69
TABELLE 20: KOMBINIERTER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG IN WOHNGBIETEN SOWIE IN UNBEWOHNTE GEBIETEN.....	70
TABELLE 21: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.....	71
TABELLE 22: MIT DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN STADTKLIMA IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	72
TABELLE 23: KOMBINIERTER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEWERTUNG AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG FÜR DIE FLÄCHEN IM AUSGLEICHSSRAUM, UNTERTEILT IN FUßLÄUFIGE (POTENZIELLE) ERHOLUNGSRÄUME UND WEITERE GRÜN- UND FREIFLÄCHEN.....	74
TABELLE 24: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSSRAUMS.	74



TABELLE 25: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE
PLANUNGSHINWEISE. 75

TABELLE 27: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT RHEINE 80



Glossar

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*.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* 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).

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.

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).

Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs- und Verkehrsflächen, die von einem überdurchschnittlich hohen → *Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind mit ihren hohen → *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 → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *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 → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

NEWA (New European Windatlas): Im Neuen Europäischen Windatlas wurden mithilfe eines Wettermodells die Windverhältnisse der zurückliegenden 30 Jahre über ganz Europa mit einer Auflösung von drei Kilometern nachsimuliert. Der Atlas liefert für jeden Punkt in der EU Informationen über das langjährige Windklima. Er stellt unter anderem interaktive Karten, Zeitreihen sowie Statistiken von Windgeschwindigkeit und anderen windenergierelevanten Parametern in verschiedenen Höhen bereit.

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 (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): 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 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.

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.

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*.

Synoptischer Wind: Großräumige, in der Regel über längere Zeiträume anhaltende Winde (z.B. Rheintalwind), die das Klima einer Region prägen. Synoptische Winde entstehen nur bei bestimmten Wetterlagen und grenzen sich von tagesperiodischen Winden ab, welche sich aller 24 Stunden mehr oder weniger intensiv wiederholen (z.B. Flurwinde).

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

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.



Zusammenfassung

Mit voranschreitender Klimaveränderung werden Tage und Nächte mit großer Hitzebelastung in Zukunft immer häufiger und extremer. Insbesondere im Siedlungsraum tragen eine in dichter Bebauung eingeschränkte Windzirkulation sowie die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung durch die vielen versiegelten Flächen in Kombination mit der Abwärme von Industrie, Gebäuden und Verkehr zum Wärmeinsel-Effekt bei. Tagsüber heizen sich Siedlungen stärker auf und nachts kühlen sie deutlich langsamer ab als das Umland.

Die Hitzebelastung im Siedlungsraum ist eine Herausforderung, welche in der Raumplanung miteinbezogen werden muss. Die Raumentwicklung erfordert jedoch genaue Kenntnisse über die lokalen Klimabedingungen. Vor diesem Hintergrund wurde die vorliegende Stadtklimaanalyse flächendeckend und hochaufgelöst für Rheine erstellt. Die Modellergebnisse und die daraus resultierenden Karten (Klimaanalyse-, Bewertungs- und Planungshinweiskarte) geben Aufschluss über die klimatische Situation in der Stadt. Sie sollen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen dienen.

Das Hauptprodukt des ca. 1-jährigen Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte mit angebundenem Maßnahmenkatalog, die in einem verwaltungsinternen, ämterübergreifenden Prozess unter Leitung des Fachbereichs für Planen und Bauen entwickelt worden ist. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) in Rheine sichtbar. Zum anderen weist die Planungshinweiskarte aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) einen Schutzbedarf auf Grundlage der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu.

Der Entwicklung der Planungshinweiskarte vorangestellt sind Bewertungskarten, in denen jeweils die Tag- und die Nachtsituation, für den Status Quo („Ist-Situation“) sowie im Zukunftsszenario für das Jahr 2045 getrennt betrachtet wurden. Siedlungsflächen wurden je nach bioklimatischer Belastung (basierend auf der Lufttemperatur in der Nacht bzw. PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur)) am Tage klassifiziert. Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) wurden am Tage nach ihrer Bedeutung als Erholungsraum (basierend auf der PET), und in der Nacht auf Basis ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen bewertet.

Grundlagen der Modellierung

Um Informationen zum Stadtklima in Rheine zu gewinnen, wurde eine Modellrechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt, welches flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet bereitstellt. Die horizontale Auflösung der Modellierung beträgt 5 m, d.h. das Stadtgebiet von Rheine und Umgebung wird in ein Raster mit einer Gitterweite von 5 m x 5 m zerlegt. Für jede Rasterzelle werden Informationen bspw. zur Geländehöhe und Landnutzung, zu Gebäudeumrissen und -höhen sowie zu Bäumen und dem Versiegelungsanteil bestimmt und als Eingangsdaten für die Modellrechnung verwendet. Innerhalb der Stadtgrenze wurden zudem bereits in der Modellierung des Status Quo Bebauungspläne berücksichtigt und in entsprechende Landnutzungsklassen überführt, für die es bereits städtebauliche Planungen und Vorüberlegungen gibt und zeitnah entwickelt werden sollen. Das gewählte Untersuchungsgebiet geht mit einer Fläche von



ca. 17 km x 19 km über die Stadtgrenze hinaus, damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Stadtklima berücksichtigt werden. Dabei liegt der Modellierung eine sommerliche Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel und einem sehr schwachen überlagerten Wind zugrunde (Tageshöchsttemperatur über 25 °C), die in der Stadtklimatologie typischerweise verwendet wird.

Das zukünftige Stadtklima in Rheine

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen auch die zukünftige Situation im Jahr 2045 mit Berücksichtigung des Klimawandels simuliert. In der Zukunfts-Modellierung wird die Temperatur aller Höhenprofile zu Beginn der Modellrechnung um 1,0 °C erhöht. Diese Temperaturdifferenz entspricht den Differenzen für die Sommerperioden zwischen den meteorologischen Perioden 1991 – 2020 im Vergleich zu 2031 – 2060. Grundlage ist das Klimawandel-Szenario RCP4.5 für den Raum Rheine. Zusätzlich wird dem Modell eine zukünftig geringere Bodenfeuchte infolge zunehmender sommerlicher Dürrephasen vorgegeben. Es gilt darüber hinaus zu beachten, dass im Zuge des Klimawandels nicht nur die absolute Zunahme der Temperaturen ausschlaggebend für die Hitzebelastung sind, sondern vielmehr auch die vermehrte Häufigkeit von Kenntagen wie „Heiße Tage“ (Maximaltemperaturen > 30 °C), „Sommertage“ (Maximaltemperaturen < 25 °C) und „Tropennächten“ (Temperaturen nicht unter 20 °C). So ist für das Stadtgebiet von Rheine eine Steigerung von derzeit durchschnittlich ca. 6 „Heißen Tagen“ auf bis zu 16 für die Referenzperiode 2031 bis 2060 bzw. auf bis zu 31 bis zum Ende des Jahrhunderts prognostiziert – abhängig vom Klimawandelszenario.

Im Zukunftsszenario wurden potenzielle städtebauliche Entwicklungsflächen (sowohl für Gewerbe als auch für Wohnbebauung) mit einer theoretisch angenommenen Verteilung der Flächennutzungen innerhalb der Gebiete modelliert. Somit ist es möglich, in der Ist-Situation ihre derzeitige stadtklimatische Funktion als Ausgleichsräume zu beurteilen, und im Zukunftsszenario die Auswirkungen der potenziellen Bebauung auf die umliegenden Flächen sowie die durchschnittliche bioklimatische Situation im geplanten Quartier selbst zu erkennen. Weitere städtebauliche Entwicklung außerhalb dieser Potenzialflächen (z. B. Innenverdichtung) wurde im Zukunftsszenario bewusst nicht modelliert.

Modellergebnisse

Das Stadtklimamodell liefert für jede Rasterzelle Ergebnisse zur nächtlichen Lufttemperatur, der Kaltluftproduktion und dem Kaltluftströmungsfeld sowie zur Wärmebelastung am Tag. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms (welche die Strömung über die komplette untere Luftschicht repräsentiert) gelten die Ergebnisse für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung).

Mit Hilfe der Modellergebnisse können nachts überwärmte städtische Bereiche identifiziert (sogenannte städtische Wärmeinseln) und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abgeschätzt werden. Für die Tagsituation wird die Hitzebelastung anhand der PET definiert. Als weitere Parameter werden die Kaltluftvolumenstromdichte, sowie die Strömungsrichtung und – Geschwindigkeit sowie die Kaltluftproduktionsrate ausgegeben. Die aufgeführten Absolutwerte der Klimaparameter sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Temperatur-Unterschiede innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.



Die Topographie übt nur stellenweise einen großen Einfluss auf die nächtliche Kaltluftströmung im Stadtgebiet von Rheine aus. Am Fuße des Waldhügel und ebenfalls in geringerem Maße am Thieberg fließen die größten Kaltluftmengen des Stadtgebietes in die Siedlungsbereiche. Auch entlang des Hemelter Baches und der Em-sauen fließen von Osten bzw. von Süden bedeutende Kaltluftströmungen in Richtung Stadtzentrum. In der Innenstadt selbst ist allerdings kaum noch kühle Ausgleichsströmung feststellbar. Die größten Kaltluftmengen werden auf den außerhalb liegenden, ebenen Landwirtschaftsflächen um die Kernstadt herum produziert, da diese Flächen im Verlaufe der Nacht am stärksten auskühlen. Aufgrund des fehlenden Gefälles setzen sich die Luftpaketes dort nur langsam in Bewegung, um die über den erwärmten Siedlungsgebieten aufsteigende Luft auszutauschen.

Die höchsten nächtlichen Wärmebelastungen treten vorwiegend in der Altstadt, in Hauptbahnhofnähe und in den hoch versiegelten Gewerbegebieten am Stadtrand, aber auch im Umfeld einiger dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen auf. Charakteristisch für viele Wohnquartiere ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßenbereich und in den Grünbereichen hinter den Gebäuden. Hier zeigen sich Temperaturdifferenzen von bis zu 4 °C. Innerstädtische Grünflächen und Park kühlen unterschiedlich stark aus, abhängig unter anderem auch vom Baumbestand. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Am Tage liefern Bäume dagegen latente Kühlung durch Verdunstung, sowie Beschattung. Siedlungsgebiete mit hohem Baumanteil sind entsprechend bioklimatisch begünstigt. Am Tage verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet, abhängig von Verschattungsgrad durch Bäume und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad. Die Altstadt und die Gewerbegebiete sind auch am Tag mit am höchsten belastet, mit Ausnahme der Bereiche, die zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr im Schatten von Gebäuden liegen.

Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Dabei gibt es je eine Karte für die Ist-Situation sowohl als auch für das Zukunftsszenario 2045. Für die Situation um 14:00 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter, sodass die Karte der PET als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden kann.

In der Klimaanalysekarte sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen der Wärmeineffekt im Vordergrund (Überwärmung des Siedlungsraums gegenüber dem Umland). Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Das Strömungsfeld wurde für eine bessere Lesbarkeit der A0-Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert, sodass kleinräumige Windsysteme aus der Karte nicht ersichtlich werden (z.B. Kanalisierung von Winden in schmalen Straßenabschnitten). Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Rheine eine wichtige Rolle spielen. So sind beispielsweise am Waldhügel und am Thieberg sowie an vielen Siedlungsrandbereichen bedeutende flächenhafte Kaltluftflüsse hervorgehoben, während am Hemelter Bach Kaltluftleitbahnen identifi-



ziert werden können. Ergänzend sind im Innenstadtbereich innerörtliche Bereiche mit hohen Kaltluftvolumenströmen gekennzeichnet. In der Klimaanalysekarte des Zukunftsszenarios sind diejenigen bedeutenden Kaltluftflüsse, die durch die potenzielle städtebauliche Entwicklung gefährdet wären, hervorgehoben. Des Weiteren sind die Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktionsrate mittels Schraffur dargestellt. Die Klimaanalysekarten geben zudem jeweils eine quantitative Abschätzung für die Ist-Situation und das Zukunftsszenario: Wie hoch ist der Wärmeineffekt? Wie groß ist der Kaltluftvolumenstrom? Welche Strömungsgeschwindigkeit haben die Winde? In der rasterbasierten Karte treten kleinräumige Unterschiede deutlich hervor und Einzelgebäude und Baumgruppen sind gut erkennbar, weshalb sie sich für die Detailplanung eignet.

Bewertungskarten

Aufbauend auf den Modellergebnisse wurden vier „Bewertungskarten“ erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die „Ist“-Situation und das Zukunftsszenario erfolgte. Für die Bewertung von Flächen ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen) zu unterscheiden. In den Bewertungskarten zur Nacht-Situation orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt. Dabei bekommen Grün- und Freiflächen im Umfeld von Wohngebieten eine höhere Wertigkeit als im Umfeld von Gewerbegebieten, da in der Nacht die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht. Siedlungsferne Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind aus stadtklimatischer Sicht von geringerer Bedeutung. Die Bewertung des Siedlungsraums für die Nachtsituation basiert auf der nächtlichen Überwärmung, so dass dicht bebaute (z.B. die Innenstadt) und/oder hochversiegelte Bereiche (z.B. Gewerbegebiete) die ungünstigsten Bedingungen aufweisen.

Die steigenden Temperaturen infolge des Klimawandels wirken sich stark auf die Bewertung des Siedlungsraums im Zukunftsszenario aus. Während in der Ist-Situation ca. 19 % der Flächen als hoch oder sehr hoch (nachts) bioklimatisch belastet klassifiziert sind, ordnen sich im Zukunftsszenario ca. 56 % der Flächen in diesen Klassen ein. In Bezug auf die Kaltluftströmungen spielt der Klimawandel dagegen eine untergeordnete Rolle, da die Antriebe für Kaltluft unverändert (Geländeneigung) bzw. nahezu konstant bleiben (Temperaturunterschied zwischen Siedlungsraum und Umland). Die Austauschprozesse ändern sich dementsprechend unter den gegebenen Modellbedingungen lediglich im Nahbereich der potenziellen städtebaulichen Entwicklungsflächen signifikant.

Die Bewertungskarten zur Tag-Situation betrachten die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung. Zudem rücken der Straßenraum für Wegebeziehungen sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen in den Vordergrund. Die Wärmebelastung hängt wesentlich von der Verschattung ab, sodass sich gerade bei Grün- und Freiflächen teilweise konträre Bewertungen zur Nacht-Situation ergeben. Eine Freifläche kühlt in der Nacht stark aus, weist an Sommertagen (ohne Bewölkung) aber eine hohe Wärmebelastung auf, wenn keine Bäume vorhanden sind. Demgegenüber ist die Aufenthaltsqualität in Wäldern und (baumbestandenen) Parks auch an Sommertagen sehr hoch. Die im Zukunftsszenario ins Modell eingegebene erhöhte Start-Lufttemperatur sowie die reduzierte Bodenfeuchte wirken sich deutlich auf die PET und somit auch die Bewertung der Flächen am Tage aus. Der Flächenanteil



von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen erhöht sich von ca. 27,5 % in der Ist-Situation auf ca. 62 % im Zukunftsszenario.

Die Bewertungskarten geben eine Einschätzung der klimatischen Situation auf einer bestimmten Fläche für den Tag, die Nacht und für den Status Quo und das Zukunftsszenario 2045 und verzweigen dadurch die komprimierte Information der Planungshinweiskarte auf mehrere Karten. So können Handlungsbedarfe im Wirkraum oder Schutzbedarfe im Ausgleichsraum (aus der Planungshinweiskarte) auf die Tageszeit oder den Prognosehorizont festgelegt und zielgerichtete Maßnahmen in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen (Nacht), den Aufenthaltskomfort im Freien (Tag), die heutige oder zukünftige Flächenkulisse entwickelt werden.

Planungshinweiskarte

In der Planungshinweiskarte, als zentralem Produkt, wird die Bewertung der Flächen hinsichtlich der Handlungspriorität für Anpassungsmaßnahmen im Siedlungsraum sowie des stadtklimatischen Schutzbedarfs von Grün- und Freiflächen vorgenommen. Die Bewertungen beruhen auf den stadtklimatischen Funktionen (ablesbar in den Bewertungskarten) der Ist-Situation. Sie berücksichtigen keine Belange weiterer Fachplanungen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

Sämtliche Produkte der Stadtklimaanalyse liegen als Geodaten bereit und stehen der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (QGIS) als **Digitales Stadtklimamanagementsystem** zur Verfügung.

Als Ergänzung der Stadtklimaanalyse wurde das **Screening Tool Klima** entwickelt. Es ist ein Plugin für das frei verfügbare GIS *QGIS*. Auf Basis eines mit den Klimaparametern der Stadtklimaanalyse von Rheine trainierten neuronalen Netzwerks können die Modellergebnisse (Lufttemperatur in der Nacht und PET am Tage sowie Kaltluftströmungen) vorhergesagt werden. Das Screening Tool Klima kann von Benutzern der Planungsverwaltung ohne tiefe Fachkenntnisse in Stadtklimamodellierung angewendet werden. Die Dokumentation und Anleitung erfolgen in einem separaten Dokument.

Dem Werk der Stadtklimaanalyse für Rheine ist ein 21 Maßnahmen umfassender **Maßnahmenkatalog** angehängt, der Empfehlungen für verschiedene Räume und Anwendungsbereiche aufzeigt. Die Maßnahmen reichen vom Themenkomplex „Thermisches Wohlbefinden im Außenraum“ über die „Verbesserung der Durchlüftung“ bis zur „Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum“.

Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarte und des Maßnahmenkatalogs im Speziellen ist die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der vorbereitenden erstmalig auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Damit sind nun auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf eines externen Gutachters möglich.

Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des



öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gesamtstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Stadtklimas in Rheine auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 Jahren anzustreben.



1. Hintergrund und Anlass

Rheine hat bereits im Jahre 2013 mit dem „Masterplan 100 % Klimaschutz“ die Basis für ein integriertes Klimaschutzkonzept gelegt. In Zeiten des Klimawandels lassen sich die Folgen insbesondere in Form von häufigeren Extremwetterereignissen oder Hitzeperioden bereits deutlich erkennen. Das Themenfeld der Klimafolgenanpassung weist besonders in Städten eine wachsende Relevanz auf und rückt zunehmend in den Fokus der Kommunalverwaltung. Mit der Teilnahme der Stadt Rheine am European Climate Award Zertifizierungsverfahren wird nun als zentraler Baustein eine modellgestützte Stadtklimaanalyse erforderlich. Vor allem der Stadtkern ist durch erhöhte Hitzebelastung, geringe natürliche Versickerung und hohe Emissionen besonders betroffen. Gleichzeitig weisen Städte im Vergleich zum peripheren Umland eine höhere Bevölkerungsdichte und damit eine hohe Anzahl vulnerabler Bevölkerungsgruppen auf. Diese gilt es vor belastenden Umwelteinflüssen wie Hitze zu schützen und nach § 1 Absatz 5 Satz 2 BauGB eine „menschenwürdige Umwelt“ zu gewährleisten.

Das Schutzgut *Klima* ist demnach ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung. Vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel, um Planungen sachgerecht zu beurteilen. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab.

Die stadtklimatische Analyse soll sowohl den Ist-Zustand der klimatischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Rheine sowie die prognostizierten Verhältnisse für die Periode 2031 - 2060 darstellen und abschließend bewerten. Die Ergebnisse sollen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen dienen und somit eine gezielte Einordnung der geplanten Bauflächen im Hinblick auf die klimatische Situation ermöglichen. Somit müssen neben der aktuellen Hitze- bzw. Wärmebelastung der Siedlungsflächen am Tage und in der Nacht auch die Ausgleichsleistungen der Grün- und Freiflächen erfasst werden. Letztere können in der Nacht bedeutende Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Luftleitbahnen darstellen. Sie stellen eine Durchlüftung der Siedlungsgebiete sicher und garantieren eine nächtliche Abkühlung, sodass eine Bebauung dieser Korridore zu vermeiden oder anzupassen ist. Zum anderen wird für die Tagsituation das Potenzial der Grün- und Freiflächen als kühler Erholungsraum untersucht.

Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des 5 m x 5 m-Raster erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insbesondere das Strömungsfeld getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Stadtklimas in Rheine.

Neben den Kartenprodukten umfasst das Ergebnis der Stadtklimaanalyse als digitale Version das „Stadtklimamanagementsystem“. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta)Daten und steht der Verwaltung in Form von layouteten GIS-Projekten (QGIS) zur Verfügung.

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 (Kap. 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 3) bis hin zu stadtklimatisch relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2). 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 besitzt vielfältige Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen. Diese lassen sich unter folgenden Oberpunkten subsumieren:

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

Den Parametern Windgeschwindigkeit, Luft- bzw. Strahlungstemperatur sowie Luftfeuchtigkeit kommen 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).

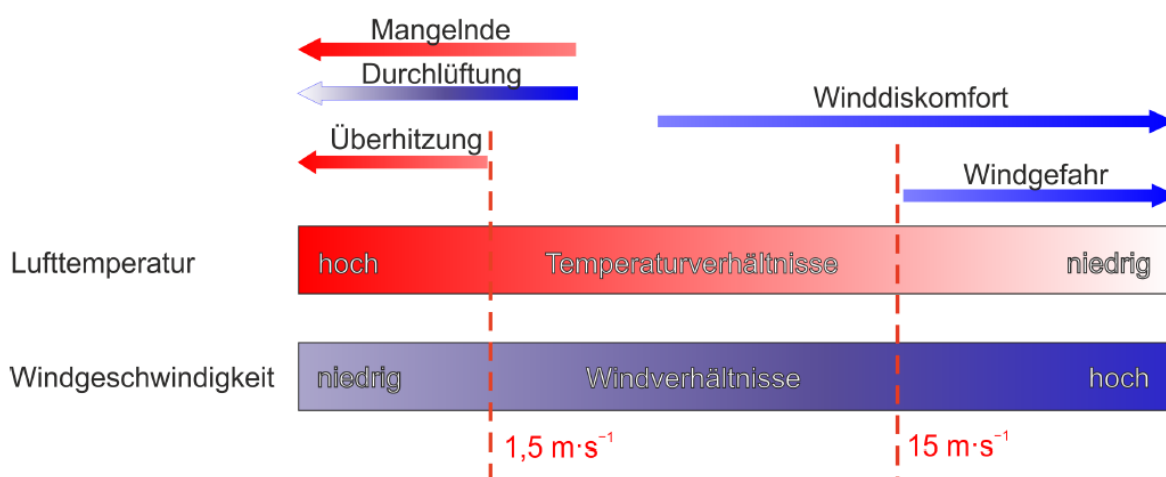


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

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 Auswerterroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). 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.

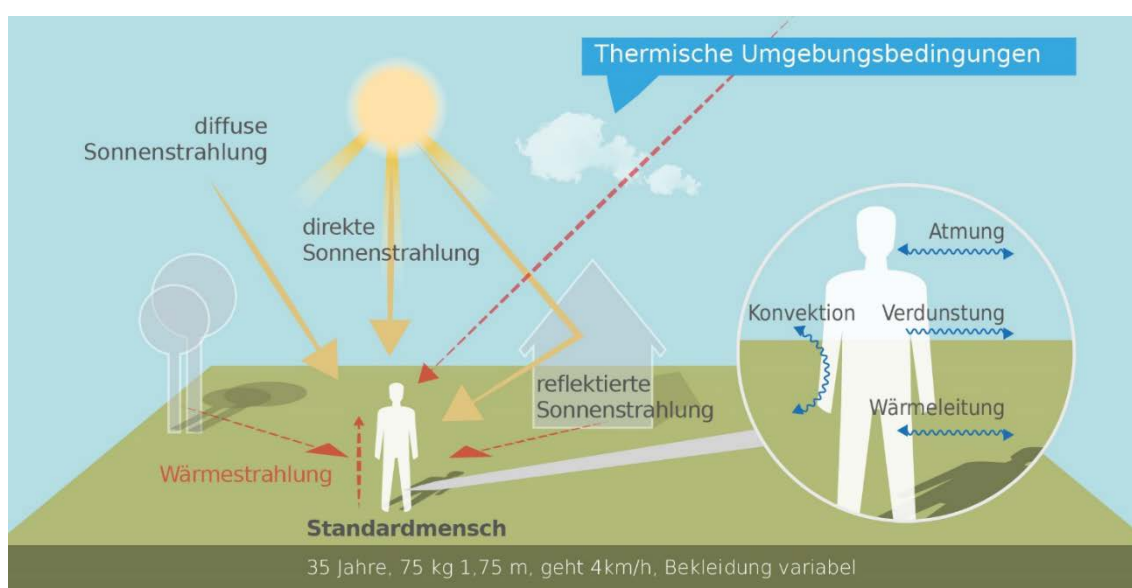


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a)

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, 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, Bundesregierung 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26°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 jedoch nicht ableiten.

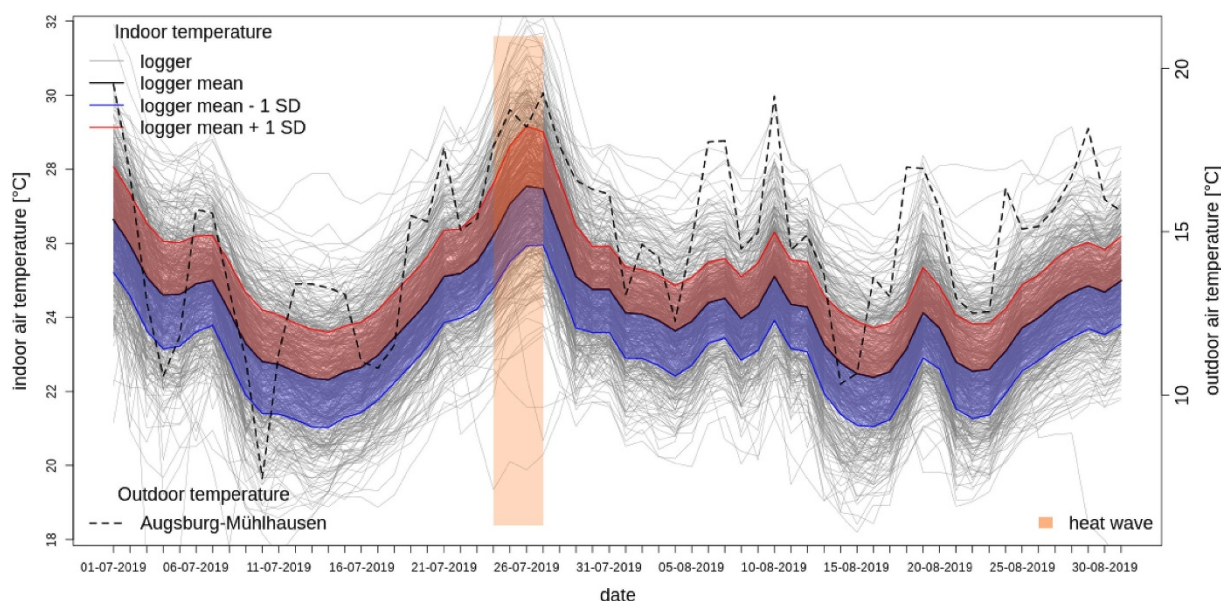


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Während in Arbeitsstätten 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, 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürger:innen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C) (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit 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 - 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 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Laurent et al. 2018).



Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst 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 Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. 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 Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt. Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

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 (Abbildung 5). 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). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

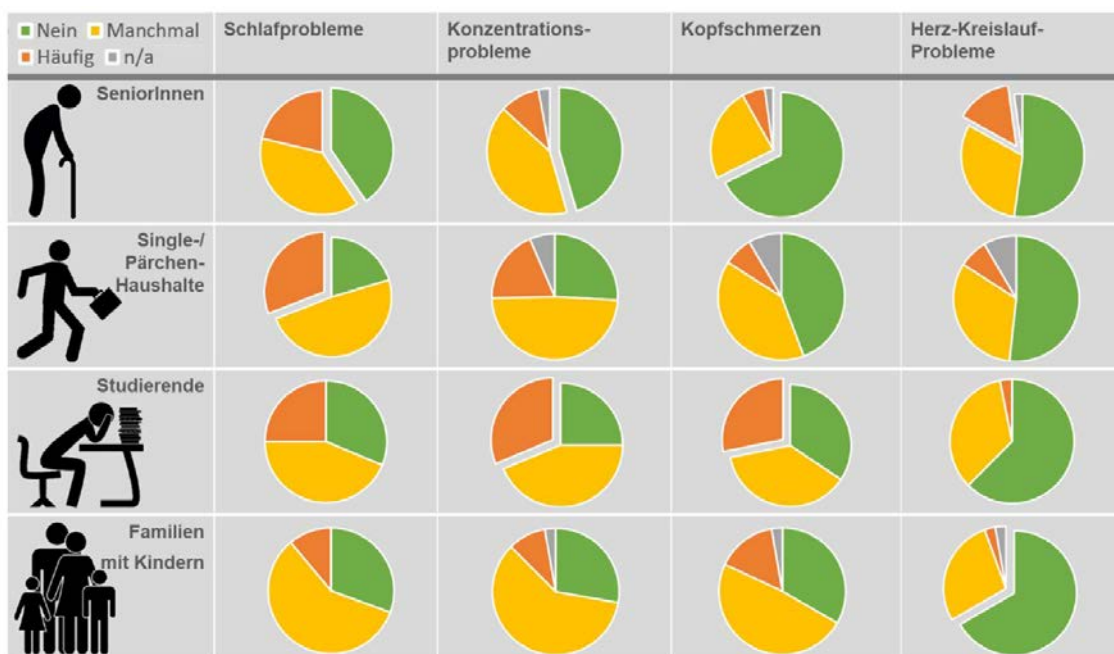


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

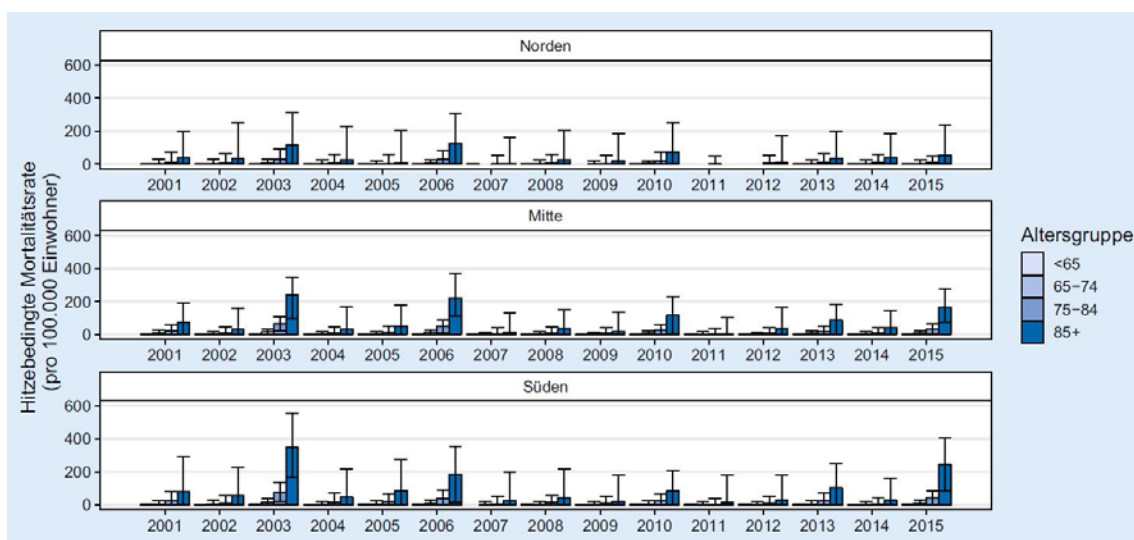


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. 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 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (12/2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmende Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (vgl. DWD 2023a). Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tiefliegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirken in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.



Abbildung 6: 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 et al. 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) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. 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 („Flurwindsystem“). 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 Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und 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.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2 \text{ m/s}$ sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der



Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003). 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 für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung 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 zugrunde liegenden 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, Stadtsanierung, 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 (2008): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): 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 02/2024 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.

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

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“ (Tabelle 1). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).



Tabelle 1: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)

	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 Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, 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 • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotiop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/ -höhe, Bauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	<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 zur Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten



Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten 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 rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

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 den großen Vorteil auf, dass sie umweltmeteorologisch relevante Größen wie Wind- und Temperaturfelder flächenhaft und unter Berücksichtigung der zentralen physikalischen atmosphärischen Prozesse wissenschaftlich fundiert ermitteln können. Aus diesen Ergebnissen können im sogenannten postprocessing stadtklimatisch relevante Kenngrößen in ihrer quantitativen Ausprägung abgeleitet werden (z.B. Kaltluftparameter, humanbioklimatische Indizes). 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.

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 2). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den 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 von Kategorie 1 zu Kategorie 3 der Grad der naturgetreuen Modellierung und gleichzeitig die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Modelle der Kategorie 3 werden derzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet, da für ihre Verwendung aufgrund des hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt wird.

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet 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 aufgelöstem umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

Tabelle 2: 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. Klima und Klimawandel im Raum Rheine

3.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Beobachteter Klimawandel

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Rheine basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2022a, DWD 2022b, Kaspar et al. 2013). Die 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 (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Rheine wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km- Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung 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 Messgenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen jüngerer Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Erwarteter Klimawandel

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). 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) bereitgestellt¹.

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien simuliert 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 Rheine ein Modellensemble bestehend aus 39 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen

¹ Homepage: www.euro-cordex.net

Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tabelle A1 im Anhang). 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. 2016).

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11 °) verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl des dem Mittelpunkt von Rheine am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. 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 (vgl. DWD 2020a).

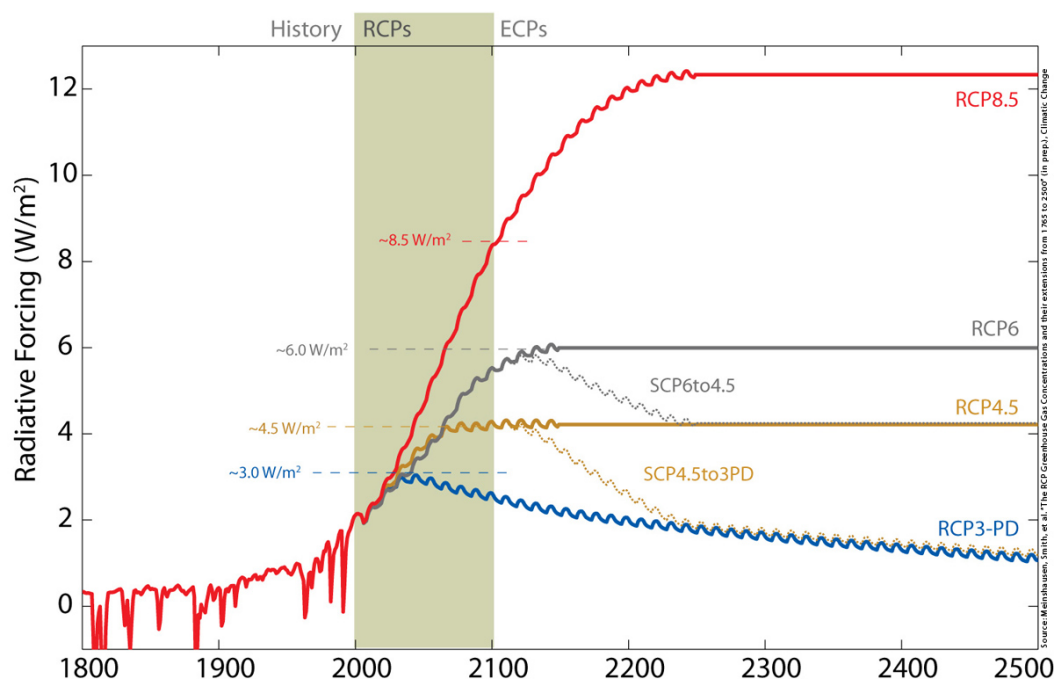


Abbildung 7: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100² (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)

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 Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration*

² ECP = *Extended Concentration Pathways* sind ergänzende Szenarien bis zum Jahr 2300.



Pathways). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst, die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*; DKRZ 2023). Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien³), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten enthalten.

Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m^2 , der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010; Abbildung 7):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. $3 W/m^2$. Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf $2,6 W/m^2$ ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das $2\text{ }^\circ\text{C}$ -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-Szenario 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. $4\text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO_2 -Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. In den letzten Dekaden befanden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO_2 -Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Für die Einschätzung zukünftiger Klimarisiken wird das RCP 8.5 als geeignetes Szenario angesehen (Schwalm et al. 2020). Aus diesem Grund und im Sinne des Vorsorgegedankens werden im vorliegenden Bericht vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert.

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. $T_{\max} \geq 25\text{ }^\circ\text{C}$ 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 Rheine wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

Einige Modellläufe der regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen (Bias) von den realen Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Abweichungen für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben die Abweichungen, also deren Differenz, daher keinen Einfluss auf die Aussage.

Bei der schwellenwertbasierten Berechnung von Kenntagen können die benannten systematischen Abweichungen jedoch zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Schwellenwerte im Vergleich zu den beobachteten Werten führen. „Ist ein Modell z.B. im Mittel etwas zu warm, so werden in diesem Modell möglicherweise

³ CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project 6*) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms (*World Climate Research Programme*)



auch besonders viele warme und/oder besonders wenige kalte Kenntage identifiziert“ (ReKliEs-De 2017). Aus diesem Grund wurden für jede Modellsimulation die Schwellenwerte mit der Methode des Quantile-Mappings adjustiert (Piani et al. 2010, Themeßl et al. 2011). Für jeden Kenntag wurde dementsprechend aus den Beobachtungsdaten das jeweilige Perzentil der statistischen Verteilung berechnet und anhand dieses Perzentilwertes aus dem Referenzlauf jeder Modellsimulation der adjustierte Schwellenwert bestimmt. Die Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.

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 A2 im Anhang).

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, wurde hier der Zeitraum von 1971 – 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt.

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet. Für die „Mitte des Jahrhunderts“ wurden zwei verschiedene Zukunftsperioden ausgewertet, wobei sich die Ergebnisse vorrangig auf die Periode 2031-2060 beziehen, die etwa in den Klimawirkungsanalysen des Umweltbundesamts betrachtet wird (UBA 2021).

- | | |
|--|-------------|
| ■ Referenzperiode: | 1971 – 2000 |
| ■ 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): | 2031 – 2060 |
| ■ 2. Zukunftsperiode (mittelfristige Zukunft): | 2041 – 2070 |
| ■ 3. 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. 2016). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar.

3.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Rheine liegt auf einer Höhe von ca. 40 m über NN (Stadtzentrum) im Westfälischen Tiefland, und damit im Einflussbereich von kühlgemäßem, maritimen Klima. Die langjährige jährliche Mitteltemperatur (1991 –



2020) im Gebiet von Rheine beträgt 10,3 °C (DWD 2022b), mit Durchschnittswerten von 20 °C in den Sommermonaten (Abbildung 8). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt mit ca. 750 mm etwa im Bereich des gesamtdeutschen Mittelwerts von ca. 790 mm/Jahr (1991 – 2020) (UBA 2022a). Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Rheine – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,6 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020: 10,3 °C im Vergleich zu 1881 – 1910: 8,7 °C). Zudem sind vier der fünf wärmsten Jahre seit 1881 in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 9).

Noch stärker als die „schleichende“ Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) und insbesondere Heißen Tagen ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In Rheine zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 28 auf 38 pro Jahr und die Anzahl an Heißen Tagen von 6 auf 9 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 10).

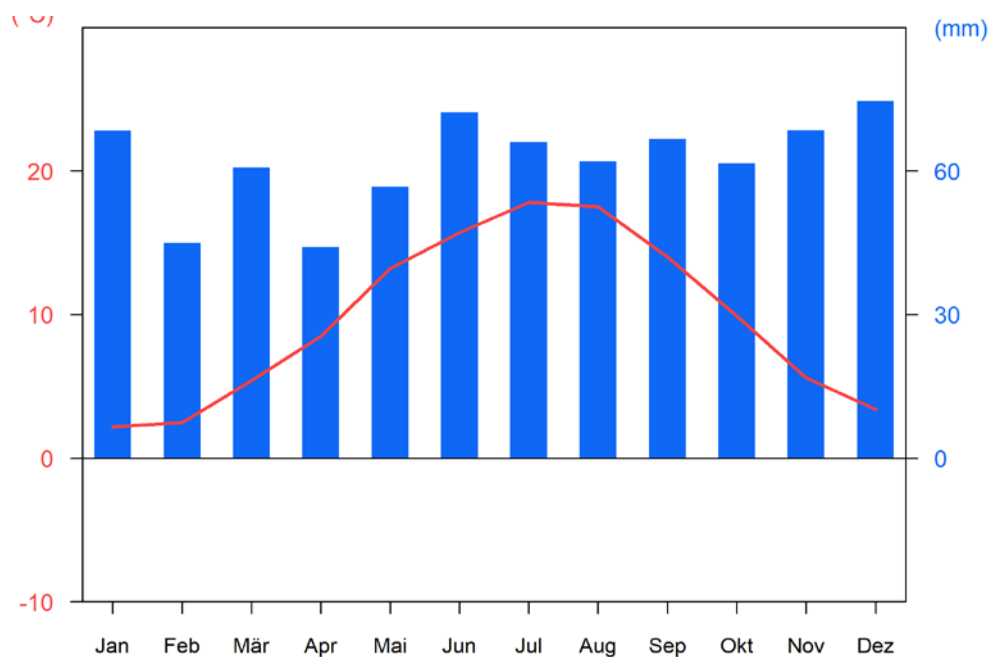


Abbildung 8: Klimadiagramm der Stadt Rheine für den Zeitraum 1971 – 2000, basierend auf den Gebietsmittelwerten der DWD Daten (nach DWD 2022b)

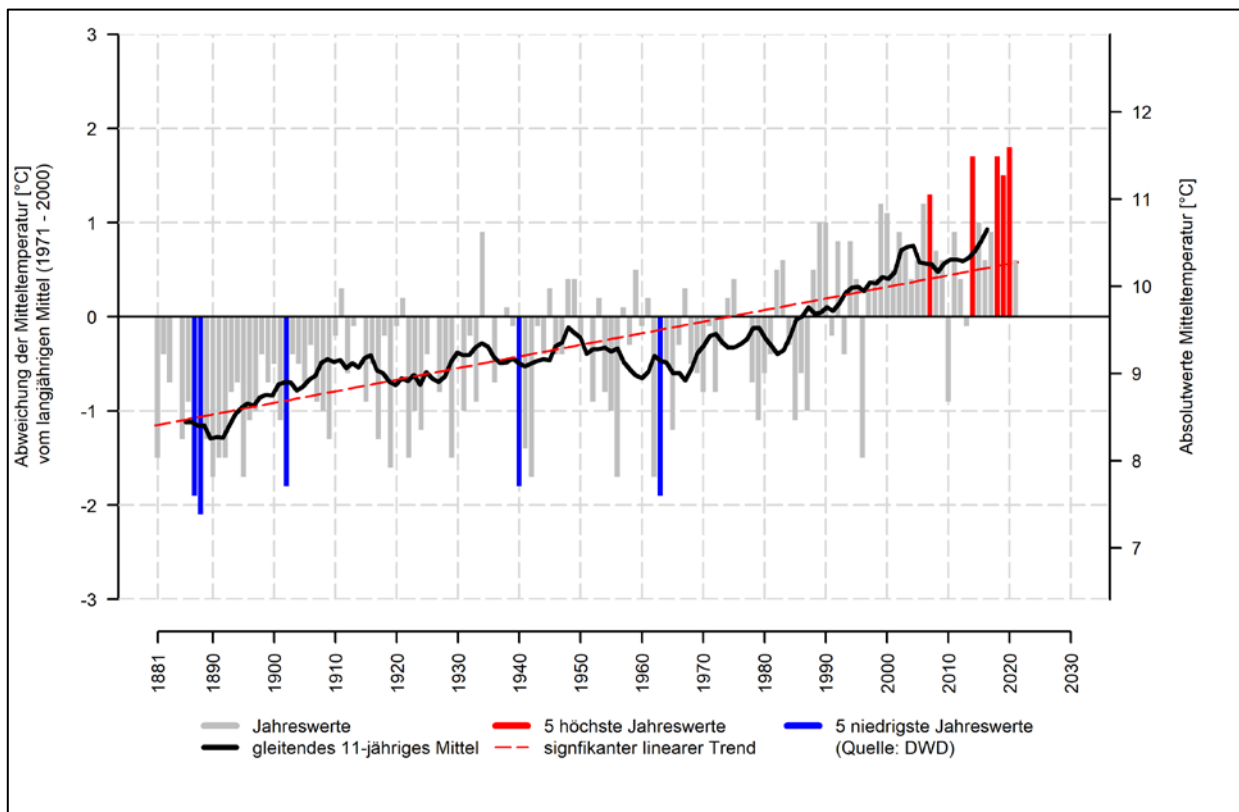


Abbildung 9: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Rheine im Zeitraum von 1881 bis 2021 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2022b)

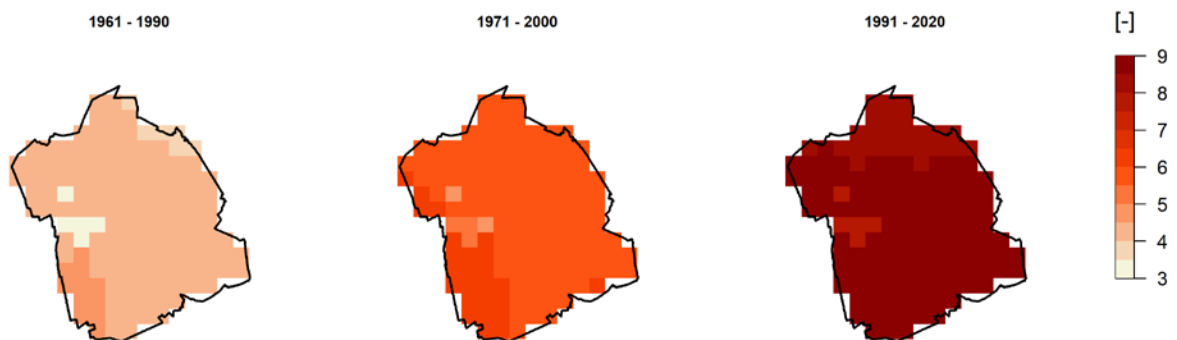


Abbildung 10: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in verschiedenen Perioden in Rheine (eigene Berechnung nach DWD 2022b)

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein Maß für die Bodenfeuchte ist die nutzbare Feldkapazität. Sie unterliegt in Rheine deutlichen Schwankungen, zeigt seit 1991 insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (Abbildung 11). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) wird das pflanzenverfügbare Wasser angezeigt. Im Rückblick auf die Periode 1991 bis 2021 schwankt die Bodenfeuchte um Werte von plus 20 % bis minus 40 % im Vergleich zum Mittelwert desselben Zeitraums, wobei 4 der 5 höchsten negativen Abweichungen in den Jahren 2017 – 2021 auftraten. Die negativen Abweichungen sind meist im Sommer erkennbar

(orange umrandete Balken in der Abbildung). Es ist davon auszugehen, dass es im Stadtgebiet mindestens lokal Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress stehen.

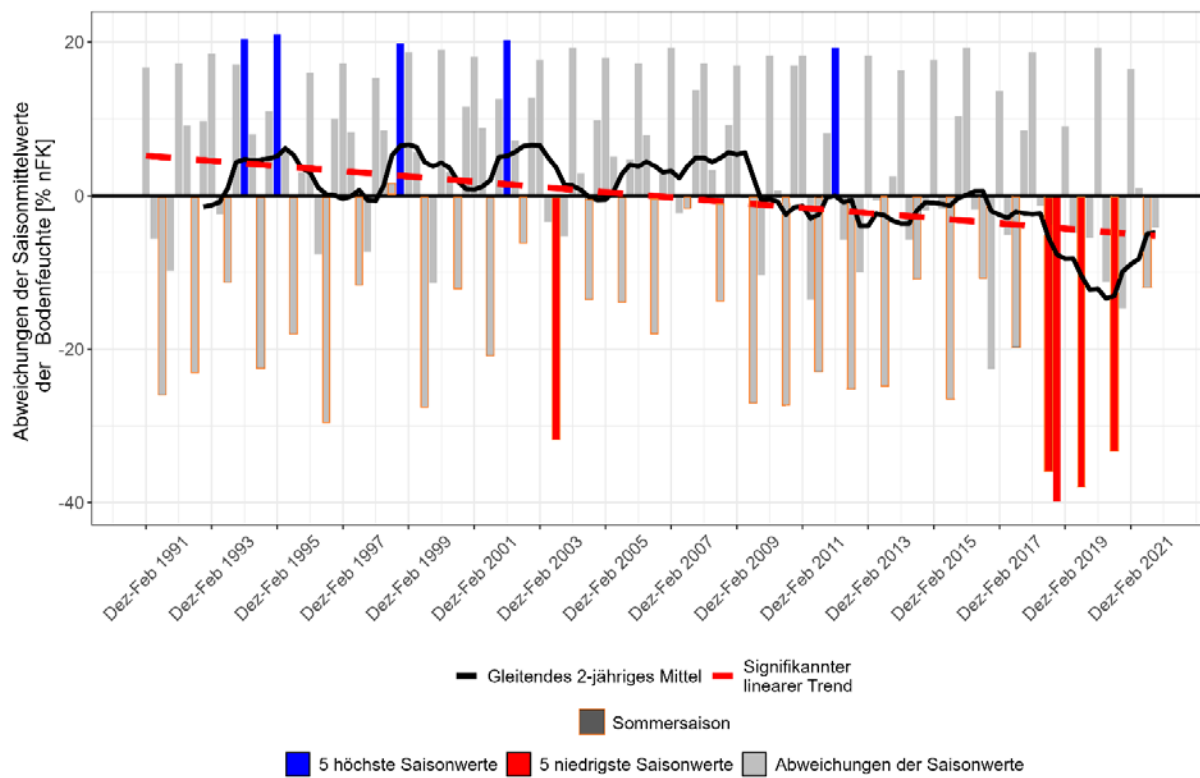


Abbildung 11: Saisonale Abweichungen vom Mittelwert der Bodenfeuchte in Rheine im Zeitraum 1991 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2022b)

3.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen 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 wind-schwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Stadtgebiet erzeugt.

Die DWD Station Rheine-Bentlage liefert für den Zeitraum 2002 bis 2013 eine sehr gute Datenverfügbarkeit. Im Mittel dieses Zeitraums traten rund 65,5 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind. In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel rund 18 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von knapp 20 % entspricht – etwa jede fünfte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen (Abbildung 12).

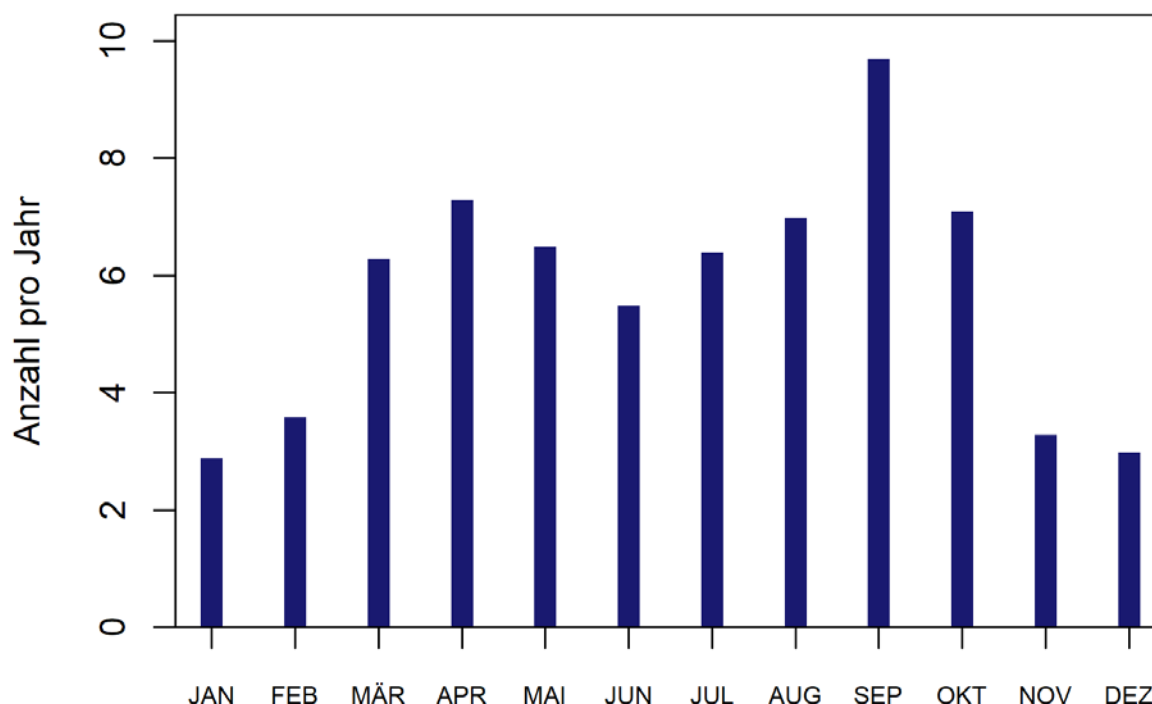


Abbildung 12: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Rheine (65,5 pro Jahr) für den Zeitraum 2002 - 2013, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Rheine-Bentlage (DWD 2020)

3.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Rheine bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 13 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 Minimumtemperaturen⁴ (Tabelle 3).

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen drei Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 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.

⁴ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.



Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Rheine (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1,1	1,4	0,9	1,2	1,5	0,8	1,0	1,5
	RCP 4.5	0,8	1,3	1,8	0,8	1,6	2,2	1,4	2,0	2,6
	RCP 8.5	1,3	1,9	2,3	1,6	2,2	2,8	2,7	3,5	4,5
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,5	2,1	3,3	1,4	2,2	3,1	2,0	2,7	3,7
	RCP 4.5	1,6	3,5	4,3	1,8	4,3	5,5	2,8	3,9	5,6
	RCP 8.5	1,7	3,8	5,5	2,4	4,0	6,0	5,2	6,9	8,4
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,9	1,2	2,7	0,7	1,2	2,6	0,8	1,6	2,5
	RCP 4.5	0,8	1,6	2,6	0,9	2,0	3,0	1,6	2,4	3,8
	RCP 8.5	1,3	2,3	2,9	2,0	3,0	4,6	3,8	4,6	7,6

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). Der in Abbildung 13 enthaltene Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles.

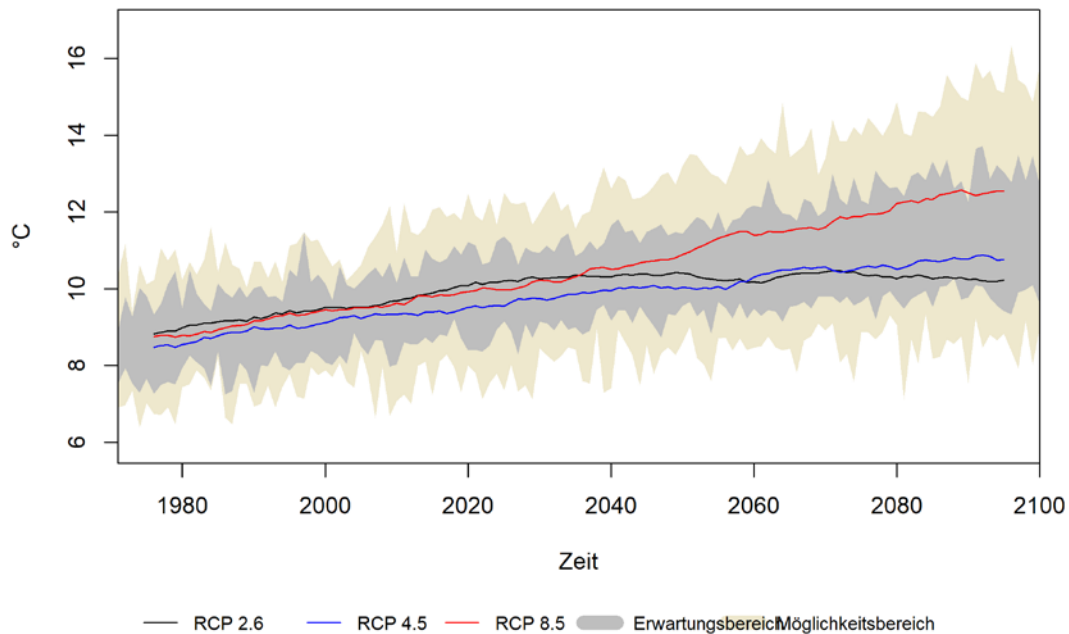


Abbildung 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Rheine (alle RCP-Szenarien)⁵

⁵ Die Werte der einzelnen Kurven beziehen sich jeweils komplett auf modellierte Daten (nicht nur für die Zukunft, sondern auch die den bereits vergangenen Zeitraum ab 1971)

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst (Abbildung 14). 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 Boxen).

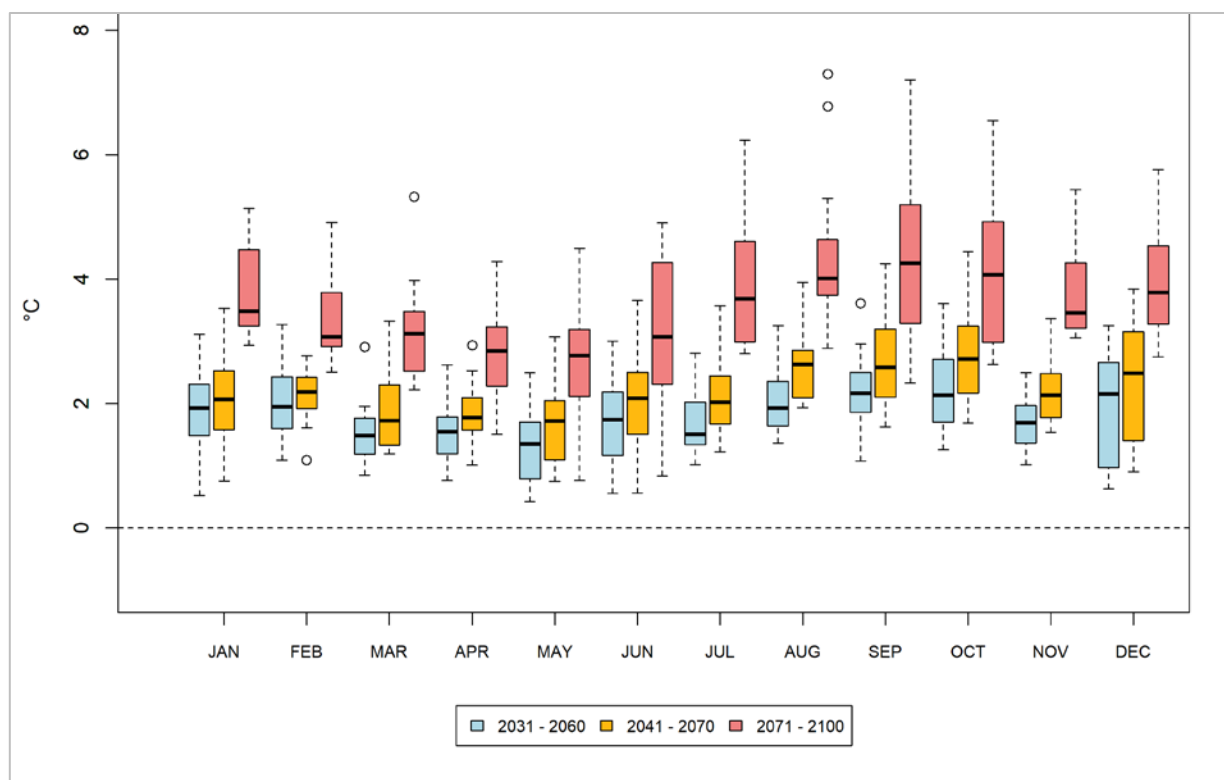


Abbildung 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Rheine (RCP 8.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 in Form von Box-Whisker Plots. Zur Erläuterung von Box-Whisker Plots siehe Abbildung A1 im Anhang.

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine anschaulichere Sicht 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 hin im Mittel mit 25 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1971 – 2000) nur 6-mal jährlich auftraten.

Tropennächte (Nächte mit Temperaturen über 20 °C) treten in Rheine derzeit sehr selten auf (im Mittel < 1 Tropennacht pro Jahr). In der mittelfristigen Zukunft (2031 – 2060) bereits 1 - 3 Tropennächte pro Jahr erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 stagniert bzw. nur leicht steigt, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode bis zu 12 Tropennächte pro Jahr in Rheine möglich. Es ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeineffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen eine deutlich höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. 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 im Raum Rheine zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um 1 - 6 Tage (Tabelle 4).

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Rheine (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage (T _{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	6	10	18	4	10	21	7	10	17
	RCP 4.5	4	9	18	5	15	24	12	16	24
	RCP 8.5	10	15	24	13	20	32	29	41	56
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	1	3	7	1	3	8	3	4	7
	RCP 4.5	2	3	6	4	4	9	5	6	10
	RCP 8.5	4	5	10	6	8	13	12	16	25
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	1	0	1	1	0	1	1
	RCP 4.5	0	1	2	1	1	2	1	2	3
	RCP 8.5	1	1	3	1	2	4	4	7	12
Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Heiße Tage) [n]	RCP 2.6	0	1	3	0	1	2	1	1	2
	RCP 4.5	0	1	2	1	1	2	2	2	3
	RCP 8.5	1	2	3	2	2	4	3	5	6

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 mittleren, langen oder extremen Trockenperioden untersucht (15-21, 22-28 oder mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit weniger als 1 mm Niederschlag), doch treten diese 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 potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Bei einer saisonalen Betrachtung weist die klimatische Wasserbilanz im RCP-Szenario 8.5 einen Rückgang in den Sommermonaten auf, der zum Ende des Jahrhunderts am deutlichsten ausfällt (Abbildung 15). Für den Herbst werden ebenfalls (leichte) Abnahmen der klimatischen Wasserbilanz projiziert, während für den Frühling und Winter Zunahmen erwartet werden, sodass im Jahresmittel kein eindeutiger Trend besteht.

In Bezug auf den Sommer zeichnet sich damit eine verschärfende Trockenheit ab, wobei davon auszugehen ist, dass sie sich auch auf die Bodenfeuchte auswirken wird. Für die RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 gilt dieselbe Tendenz einer zunehmenden sommerlichen Trockenheit, wobei die Änderungssignale (insbesondere zum Ende des Jahrhunderts) weniger deutlich ausfallen.

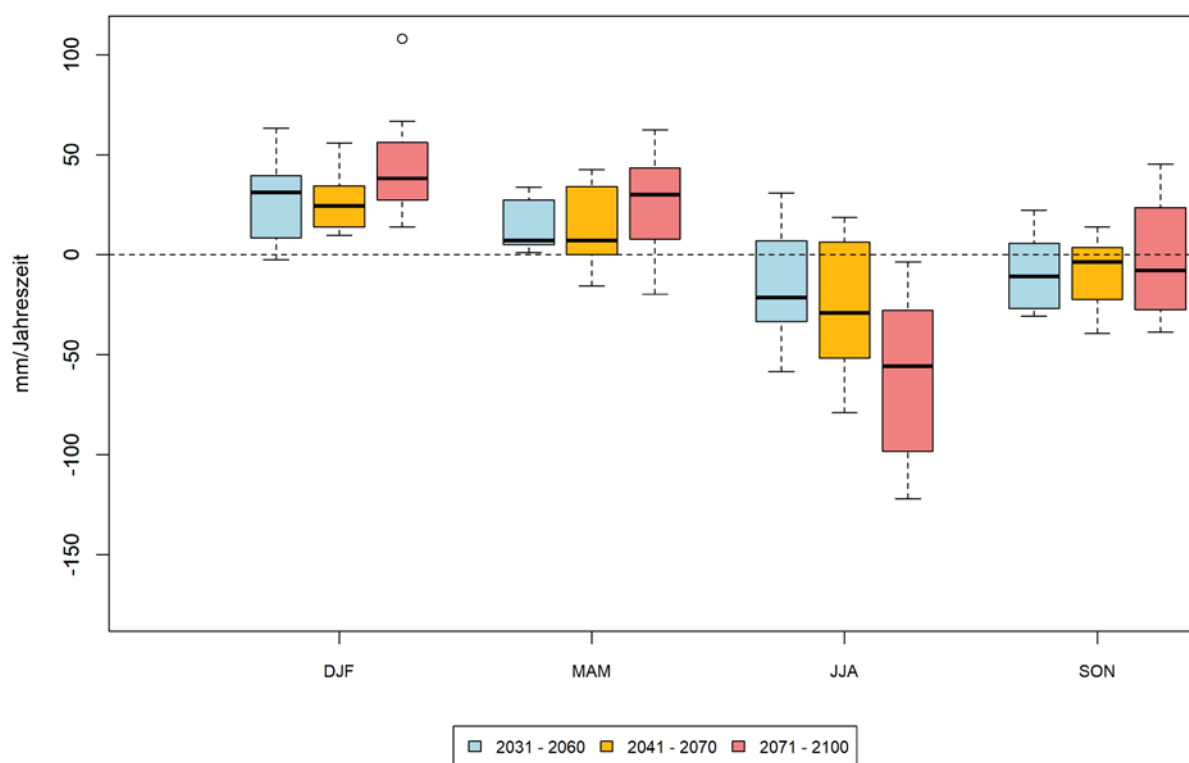


Abbildung 15: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in den drei Zukunftsperioden in Rheine (RCP 8.5) Zur Erläuterung von Box-Whisker Plots siehe Abbildung A1 im Anhang.

4. Analysemethoden

4.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Groß 1992). 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 Auswerterroutinen weiterentwickelt (u.a. Groß 2002, Groß et al. 2002, Groß 2012a, Groß 2012b, Groß 2013, Groß 2017).

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 im realen Gelände müssen neben der Orographie insbesondere 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 Geschwindigkeit 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- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1987).

Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgendes 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 Energiestrom-Bilanz, 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 2015) 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/kantonale 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 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, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Rheine und angrenzendes Umland rd. 12,8 Mio. Rasterzellen. 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.

Tabelle 5: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5-10 m.

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
1	Gebäude	individuell
2	unbebaut versiegelt	0
3	Gewässer	0
4	Gleisfläche	0
5	Freiland, niedrige Vegetation	0,5
6	Sand, Geröll	0
7	Baum über Versiegelung	individuell
8	Baum über Freiland	individuell
9	naturferner Boden*	0,5
10	Baum auf naturfernem Boden	individuell

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



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 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.

Abbildung 16 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. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, un bebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – 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 un bebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 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 dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen.

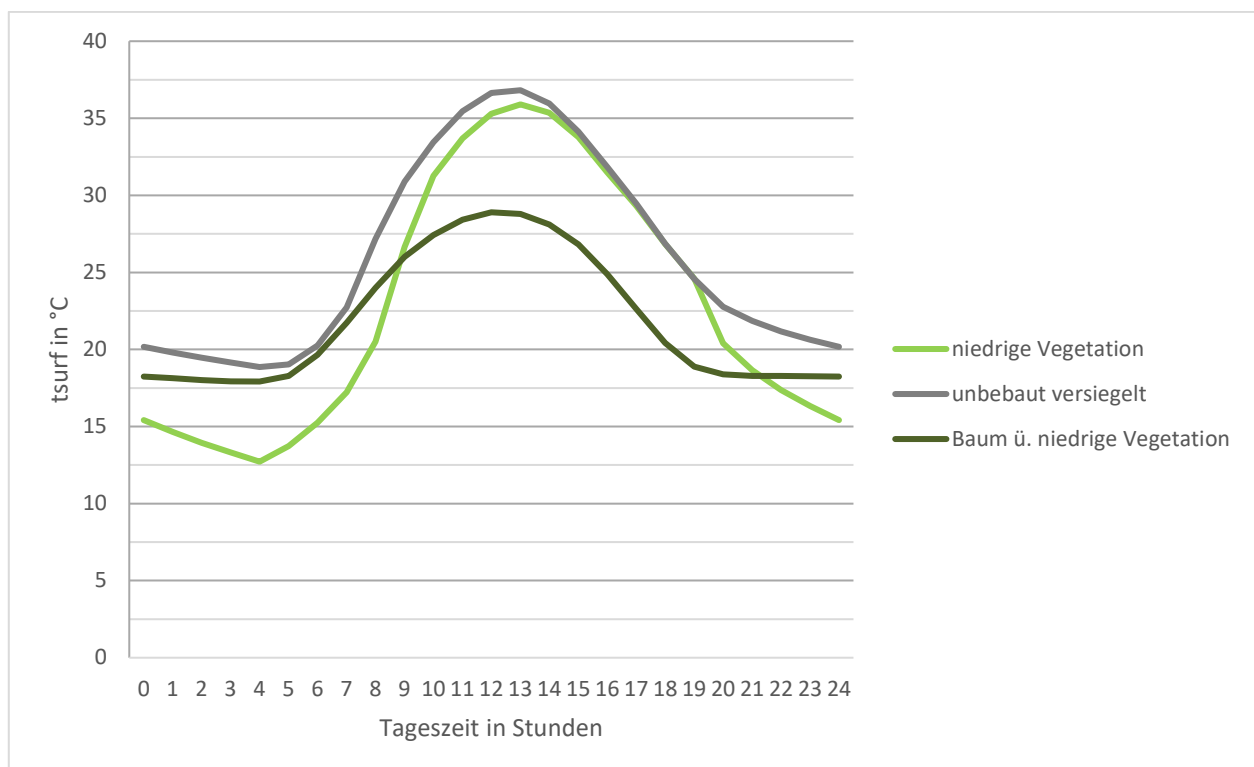


Abbildung 16: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ('Tsurf') für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius (°C) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige °C unter 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 (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher langsamer auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. 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. 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 17 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 K 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 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, 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 Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. 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 kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt für das vertikale Stadtgrün, dass dessen Vitalität sich über längere Zeiträume entwickelt und die klimatisch-meteorologischen Aspekte lediglich einen Teil des Gesamtwirkungskomplexes darstellen. Insofern muss im Modell – zumeist im Rahmen von Szenarien-Betrachtungen oder Sensitivitätsstudien – vorgegeben werden, was mit dem Bestandsgrün im Falle einer Trockenperiode bzw. einer sich klimawandelbedingt verstärkenden Sommertrockenheit passieren soll.

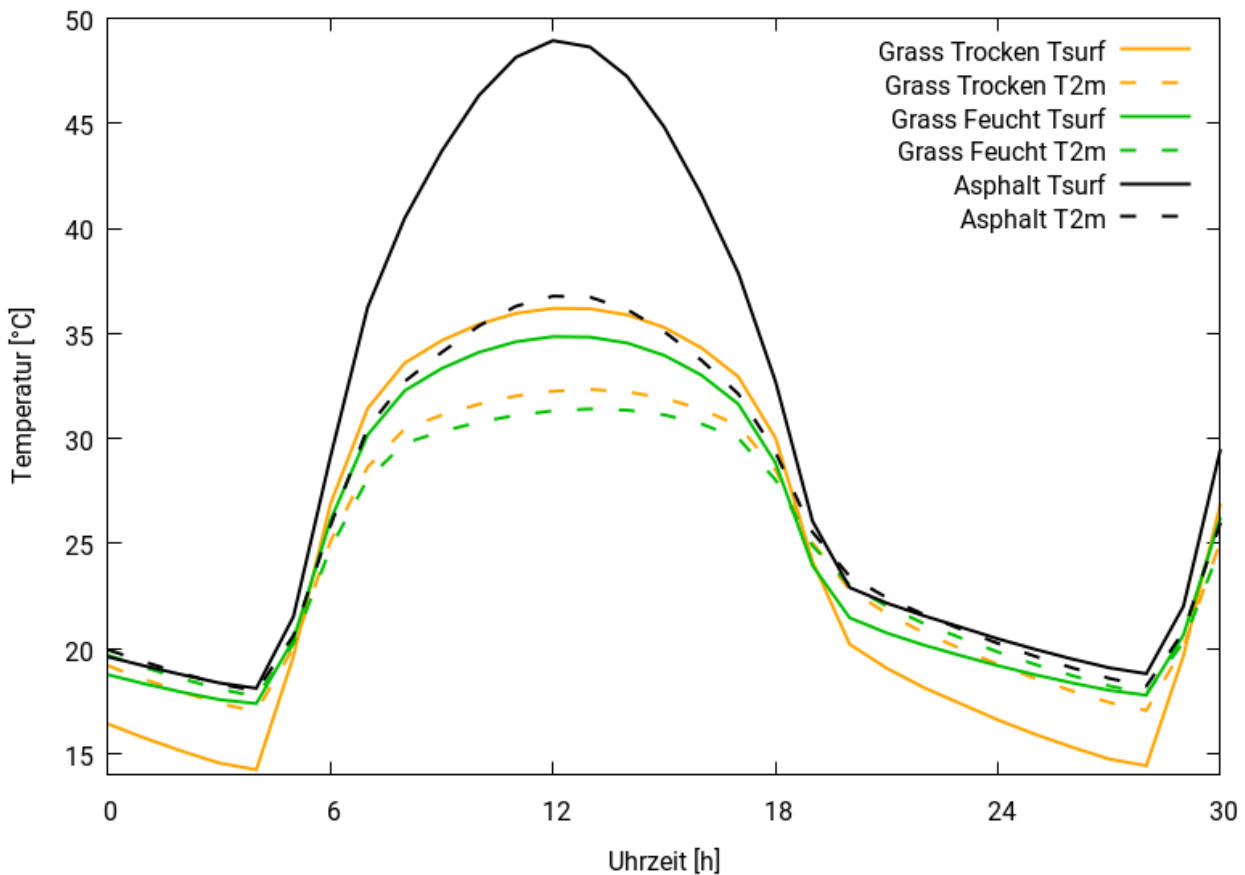


Abbildung 17: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

4.2 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die sogenannte Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes, ebenen-unabhängiges Methodenpaket zur szenarien-basierten Untersuchung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen. Der Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung in den Handlungsfeldern urbane Hitzevorsorge und urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes- und Regionalebene sowie bei gesamt- und teilstädtischer Betrachtung.

Im Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt- bzw. regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte oder eines Masterplans Stadtklimawandel erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes. Im vorliegenden Fall wurden das Zukunftsszenario mit der Periode 2031 – 2060 als Zielhorizont und Fokusjahr 2045 festgelegt. Der Faktor des Klimawandels basiert auf dem Median des RCP-Szenarios 4.5 und entspricht somit einem mittleren Strahlungsantrieb bis zum Ende des Jahrhunderts. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum Referenzzeitraum 1991 – 2020 wurde auf die Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D eingegeben (+1,0 K).



Für das Zukunftsszenario wurde zusätzlich die Auswirkungen einer zunehmenden abnehmenden Bodenfeuchte berücksichtigt (vgl. Kap 3.2). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, und für niedrige Vegetation entsprechend am Tage der kühlende Effekt von Verdunstung ausfällt, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind. Die nFK wurde im Zukunftsszenario auf 30 % gesetzt, im Vergleich zu 60 % nFK im Referenzszenario / Ist-Situation.

Die städtebauliche Entwicklung für das Zukunftsszenario wird auf potenzielle Entwicklungsflächen beschränkt. Es handelt es dabei sich um die Flächen aus dem Vorentwurf der Siedlungspotenzialbereiche mit Stand August 2021, welcher als interne Karte vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt wurde. Eine weitere städtebauliche Entwicklung (z. B. Innenentwicklung) sowie eventuelle Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation in der Zukunft wurden nicht modelliert. Abgesehen davon, dass solche baulichen Entwicklungen für die Zukunft nicht konkret genug (flächenscharf) definierbar wären, ist hier der Ansatz, einzig die Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige bioklimatische Situation zu untersuchen, um entsprechend Maßnahmen zu empfehlen. Die Entwicklung von Vegetation, besonders von Bäumen in der Stadt (Ausfall durch Hitzestress / Schädlinge / Unwetter einerseits, jährliches Wachstum andererseits) kann aus informationstechnischen Gründen bisher ebenfalls nicht abgebildet werden. Tabelle 6 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.

Tabelle 6: entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Referenzsituation, „Ist“	<ul style="list-style-type: none">■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von 2021, zusätzlich wurden 12 B-Pläne und Bauprojekte eingepflegt, die derzeit (ca. 2023) umgesetzt werden (vgl. Tabelle 8).
Zukunftsszenario 2045	<ul style="list-style-type: none">■ Berücksichtigung eines mittleren Temperatursignals von 1,0 K im Vergleich zur Referenzperiode „heute“ 1991-2020 (RCP 4.5)■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte des Modells von 60 % auf 30 % nFK (nutzbare Feldkapazität)■ Potenzielle städtebauliche Entwicklungsflächen per Mischpixel-Ansatz

4.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe (Bäume und Baustruktur)

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadtgebiet sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltluftfeinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 327 km² (Abbildung 18), weist also einen mehr als doppelt so großen Flächeninhalt auf wie das Stadtgebiet selbst (145 km²). Das Geländehöhenmodell liegt in einer Auflösung von 1 m vor. Abbildung 18 zeigt das Gelände relief für die Ausmaße des Untersuchungsgebietes. Deutlich erkennt man die Höhenrücken von Thieberg (knapp 70 m über NN an der Hünenborg) und Waldhügel (ca. 90 m über NN). Der Verlauf der Ems befindet sich auf ca. 30 m über NN und teilt das Stadtgebiet in eine westliche und eine östliche Hälfte auf.

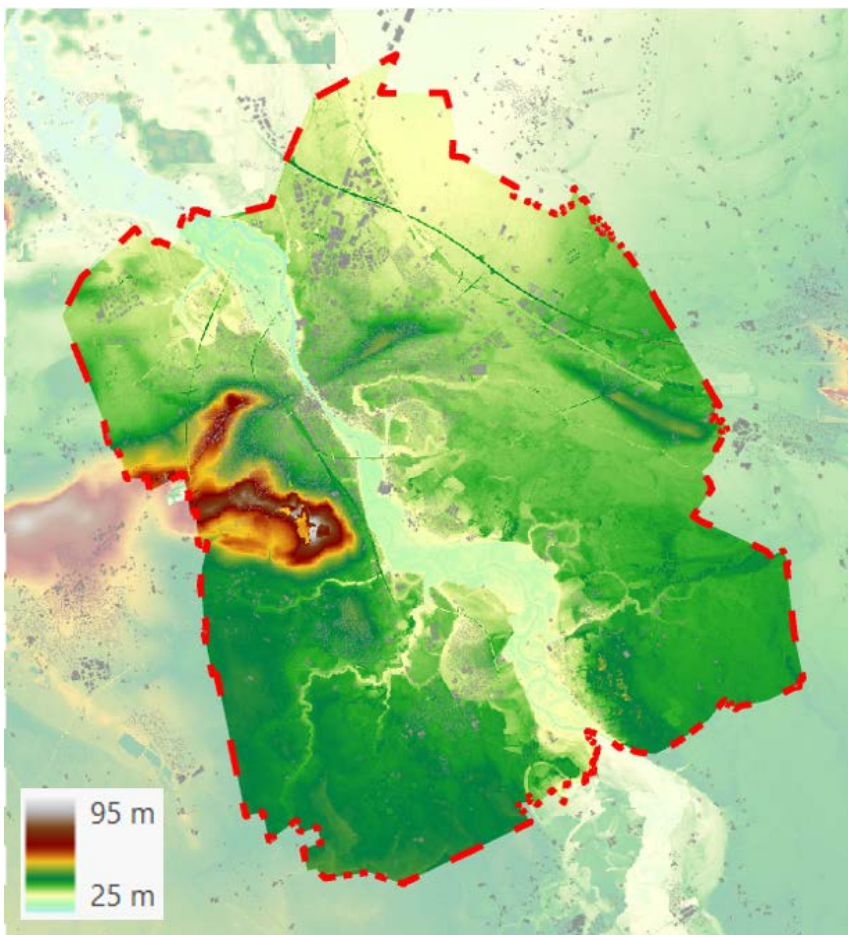


Abbildung 18: Digitales Geländemodell für das Untersuchungsgebiet, mit Gebäudekulisse



Tabelle 6 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Zuweisung der Nutzungsklassen sowie der Geländehöhe und Strukturhöhen zusammen. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue vor. Dennoch kommt es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtischen Modellanwendungen sehr hohen Auflösung zu Generalisierungseffekten. Diese können kleinräumig relevant sein, spielen für gesamtstädtische Fragestellungen aber eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 7: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters

Datenquelle	Aktualität	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhenmodell	2019	ASCII-Punkt- wolke „XYZ“	1 m	direkt Verwendung
normalisiertes Ober- flächenmodell „nDOM“	2019	GeoTIFF	50 cm	Gebäudehöhen und Vegetations- höhen durch Verschneidung mit NDVI
ALKIS-Nutzung	2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungs- klassen
ALKIS-Gebäudeum- risse	2022	ESRI-Shapefile	-	direkte Verwendung, Gebäudehö- hen aus nDOM
RGBI-Luftbild	2019	JP2	10 cm	Berechnung NDVI für Vegetations- maske und versiegelte Flächen
Grünflächenkataster	überge- ben 2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungs- klassen
Straßenkataster	überge- ben 2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungs- klassen
öffentliche Baumbes- tände	überge- ben 2022	ESRI-Shapefile	-	Ergänzung zu den Vegetationshö- hen

Da für die Stadt Rheine lediglich öffentliche Baumbestände als Punktinformationen im Rahmen des Baumkatasters zur Verfügung standen, mussten für die Erzeugung einer flächendeckenden Bauminformation andere Datenquellen hinzugezogen werden. Hierfür lagen hochaufgelöste RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2019 in einer Auflösung von 10 cm x 10 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von „0“ war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe aus dem normalisierten Oberflächenmodell konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (**Abbildung 19**). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisierten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert wurden.

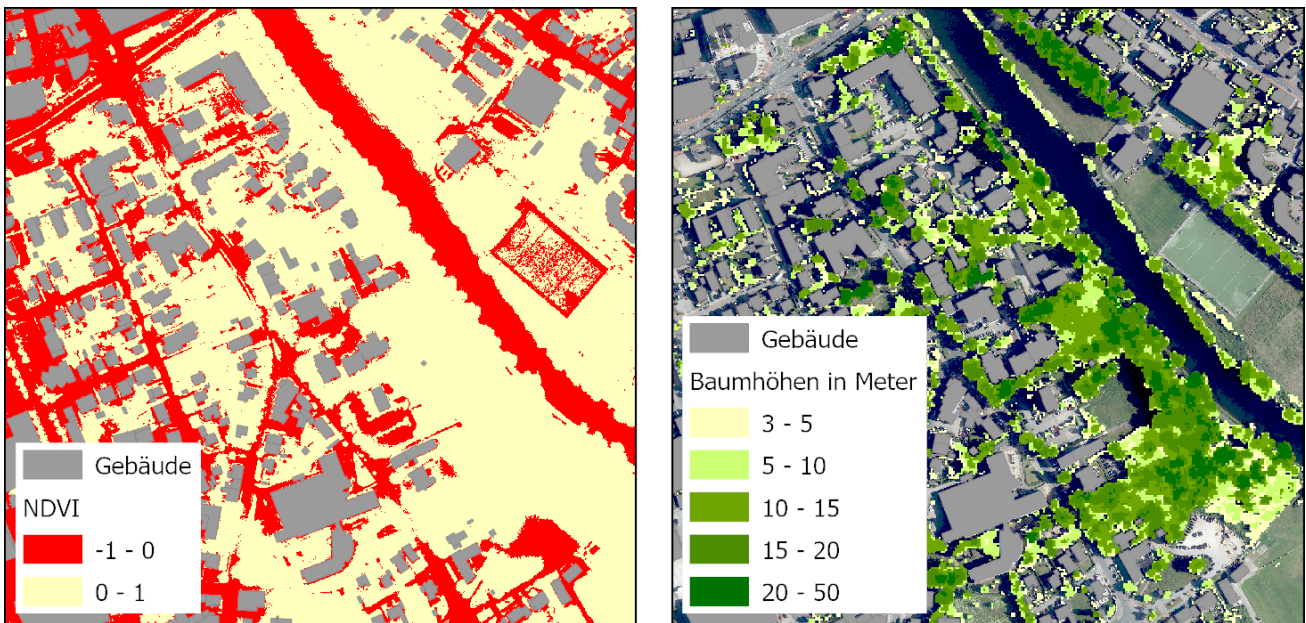


Abbildung 19: Ermittlung von Baumstandorten mittels Vegetationsindex und Strukturhöhe

Die Modelleingangsdaten sollen den aktuellen Sachstand bzw. die Bebauungssituation in Rheine im Jahre 2023 repräsentieren. Bereits beschlossene Bebauungspläne sowie schon im Bau befindliche Baustrukturen wurden in die Modelleingangsdaten eingearbeitet (Tabelle 8). Abbildung 20 zeigt für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes die in das Modell eingeflossenen Nutzungsklassen.

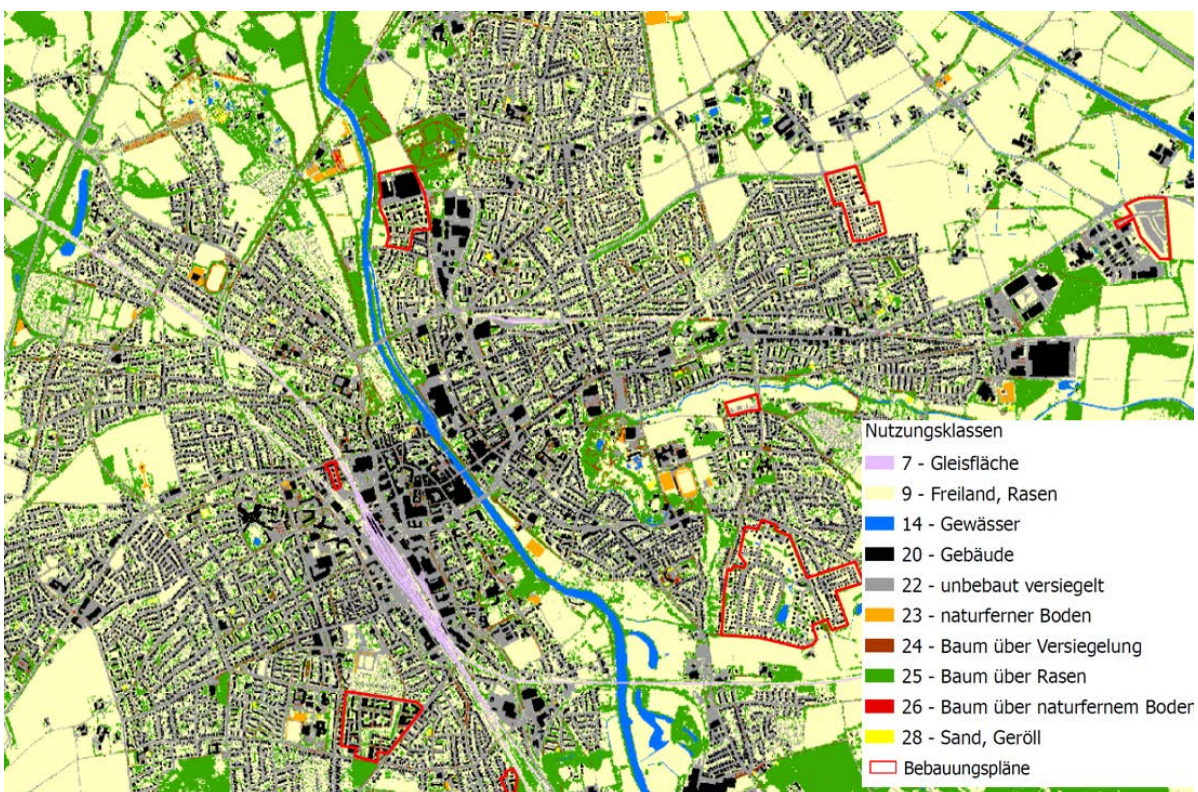


Abbildung 20: Ausschnitt klassifizierte Landnutzung im 5 m Modell-Raster.



Tabelle 8: in die Modelleingangsdaten eingeflossene B-Pläne und aktuelle Bauvorhaben

	B-Plan	Standort
1	BP 339	Eschendorfer Aue West
2	BP 339	Eschendorfer Aue Ost
3	BP 350	Damloup-Kaserne, Europaviertel am Waldhügel
4	BP 352	Emsauenquartier Kämpers
5	BP 348	Osnabrücker Straße – Süd
6	Vorhaben „Oststrasse, Altenreiner Berg“	Oststrasse, Altenreiner Berg
7	BP 281	Zur Heide – Nord
8	BP 346	Anne-Frank-Straße
9	BP 184	Friedhofstr. / Aloysiustr.
10	BP 345	Schoppenkamp
11	BP 342	An den Kleingärten
12	VEP 10	Im Winkel

Der Landnutzung für die **Zukunftssituation** liegt an erster Stelle diejenige der Referenzsituation zugrunde. Hinzu kommt, dass für das angenommene Zukunftsszenario, welches sich auf die nahe Zukunft mit dem Zieljahr 2045 bezieht, in Rheine mit einigen potenziellen Siedlungsentwicklungsflächen gerechnet wird. Die Stadt Rheine hat hierfür die Karte „Siedlungspotentialflächen“ für die zzt. im Verfahren befindliche Änderung des Regionalplans MSL (Stand: 3. August 2022) zur Verfügung gestellt, aus welcher potenzielle Wohn- und Gewerbeflächen in die Eingangsdaten eingearbeitet wurden.

Da für diese Flächen noch keine weitergehenden Konzeptionen, städtebaulichen Entwürfe oder genauere Daten zu Entwicklungsumfang und Intensität existieren, wurden allgemeine Parameter zu Grunde gelegt. Folgende Annahmen wurden für die Entwicklungsflächen getroffen: 10 % Verkehrsflächen, 20 % Grünflächen und 70 % Nutzflächen. Für die Nutzflächen der Wohnsiedlungen gilt eine GRZ von 0.4, bei den gewerblichen Entwicklungsflächen gilt eine GRZ von 0.8. Neben den Siedlungspotentialflächen wurde auch das Konzept „Baarentelgen-Ost“ in die Landnutzung der Zukunftssituation eingearbeitet.

Die Einarbeitung der Siedlungsentwicklungsflächen erfolgte über den Mischpixelansatz. Hierfür werden prozentuale Anteile der FITNAH-Nutzungsklassen für eine Fläche benötigt. Diese wurden aus den Parametern der Siedlungspotentialflächen sowie den Unterlagen zum Konzept „Baarentelgen-Ost“ abgeleitet. Gleichzeitig wurden individuelle Gebäudehöhenangaben angegeben. Bäume werden standardmäßig auf 12 m gesetzt. Eine Aufstellung der prozentualen Anteile der Nutzungsklassen zu den Siedlungsentwicklungsflächen ist in Tabelle 9 abgebildet.



Tabelle 9: prozentuale Flächenanteile der FITNAH-Nutzungsklassen für die jeweiligen potenziellen Entwicklungsflächen im Zukunftsszenario

Entwicklungsflächentyp	Nutzungsklasse in Prozent				Gebäudehöhe in Meter
	Gebäude	unbebaut versiegelt	Rasen	Baum über Rasen	
Wohnsiedlung	17	21	52	10	8
Gewerbe	34	32	24	10	10
Baarentelgen-Ost	50	20	20	10	10

Im Zukunftsmodelllauf füllt das FITNAH-Modul „Randomisator“ die Siedlungsentwicklungsflächen rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften herkömmlichen FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen aus der Tabelle auf. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen. Abbildung 21 zeigt exemplarisch zwei mit dem Randomisator gefüllte Flächen für eine Wohnbebauung und eine Gewerbeentwicklung.



Abbildung 21: Zwei Beispiele für mit dem Mischpixelansatz gefüllte Entwicklungsflächen: links Wohnbebauung, rechts Gewerbegebiet

4.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter 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. Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Rheine und Umgebung 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 22 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.

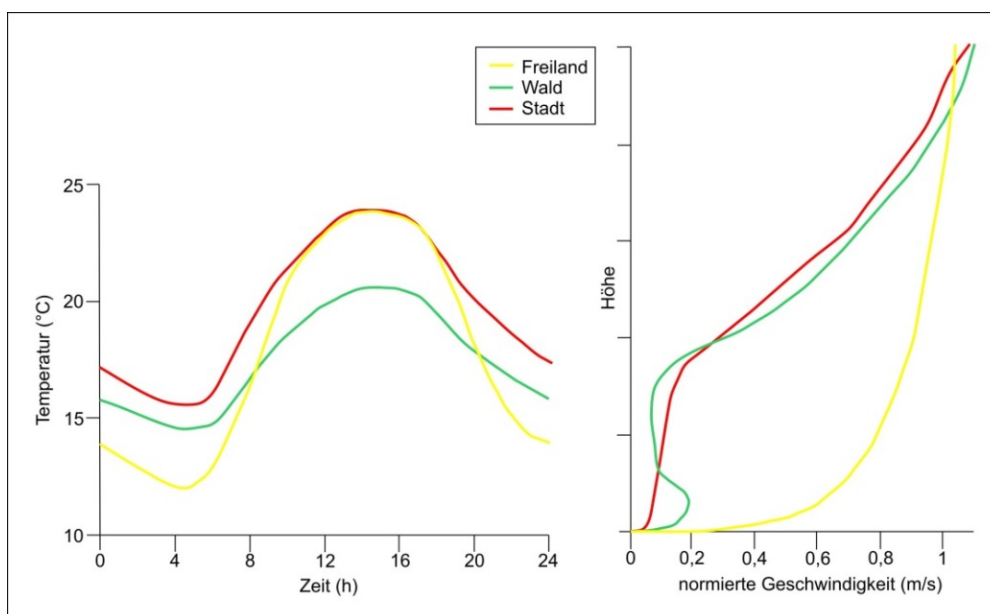


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)



Die Berücksichtigung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels im Modelllauf für das Zukunftsszenario erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die Modellrechnung wird auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes vorgenommen (Schär et al. 1996). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert. Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21,0 °C in der Ist-Situation bzw. 22,0 °C im Zukunftsszenario.

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch im Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, wurde die Bodenfeuchte im Zukunftsszenario entsprechend auf 30 % nFK gesetzt, welches dem Welkepunkt entspricht. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt.

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren 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 noch positiv beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um alleine auf Basis der in klassischen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden zu können.

4.4.1 MODELLAUSGABEGRÖSSEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 10). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige 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 die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.



Tabelle 10: 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]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potenzielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient momentum	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und von 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 zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 11).

In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt – handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesgangs als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.



Tabelle 11: abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s* m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr

4.4.2 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 den Auftraggeber zu bereinigen.

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den zwei Modellläufen, wobei im Zukunftsszenario insbesondere auch die angenommene Änderung durch dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Alle Modellläufe durchliefen erfolgreich die Qualitätssicherung.



4.4.3 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 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 das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern jene Prozesse, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH-3D erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2015) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten ist, aus denen sich jedoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sogenannten 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 im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E-Vorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „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 Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltluftthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. 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), und
- 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. 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 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, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen 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 z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer Stadtbodenkartierung abgeleitet und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Da ein städtischer Geodatensatz nicht verfügbar ist, können diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden. Folglich wird im Modell 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 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2016). 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. 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 modelltechnisch abgebildet werden können.

Kapitel 4.3 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Die ältesten Informationen stammen aus dem Jahre 2019 und betreffen das Geländehöhenmodell und das Oberflächenmodell. Während sich die Geländehöhe seitdem nicht (oder zumindest nicht in relevanter Größenordnung)



verändert hat, bestimmt das Oberflächenmodell die Vegetationshöhen. Die Vegetationshöhen der öffentlichen Baumbestände wurden allerdings mit Informationen aus 2021 ergänzt. Das RGBI-Luftbild, welches (neben der Festlegung der versiegelten Flächen) die Verortung von Vegetation definiert, ist aus 2019 und damit relativ aktuell. Die Datensätze zu Gebäuden, deren Höhen sowie der ALKIS-Nutzung stammen aus 2022 und entsprechen somit dem Maximum an Aktualität.

Zusammenfassend kann 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 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.

5. Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 4.2.1). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Modellergebnisse wurden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten (georeferenzierte Raster (*.tif)) an die Auftraggeber übergeben.

5.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen **Lufttemperatur** ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche (sogenannte städtische Wärmeinseln) zu identifizieren, und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Unterschiede innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

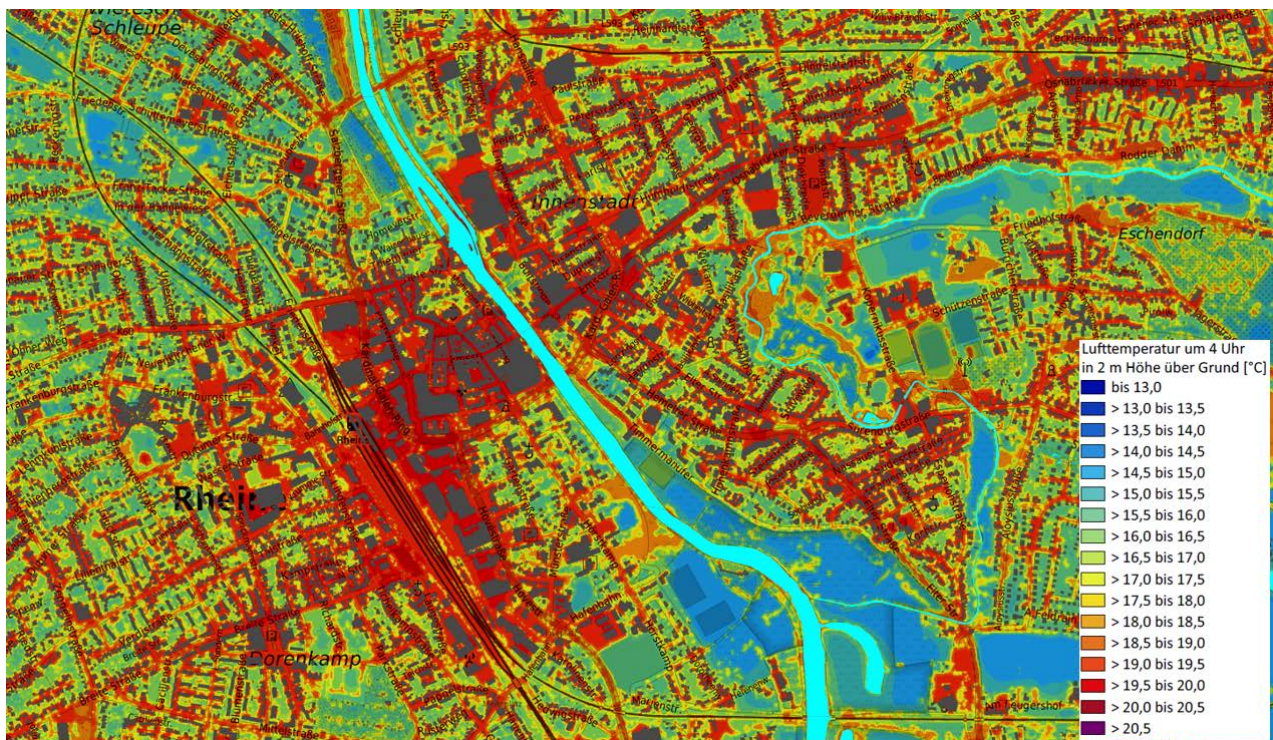


Abbildung 23: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in der Kernstadt von Rheine (verkürzte Legende, Ist-Situation). Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts, kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Modellergebnis in der Ist-Situation von ca. 14 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis knapp über 19,5 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Rheine damit eine Spannweite von mehr als 5 °C (Abbildung 23).



Die höchsten nächtlichen Belastungen (um 19,5 bis 20,0 °C in der Ist-Situation, und bis zu knapp 21 °C im Zukunftsszenario) treten vorwiegend in der Innenstadt östlich vom Hauptbahnhof und in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (z. B. Baarentelgen und an der Kanalstraße), aber auch im Umfeld einiger dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen (z. B. Osnabrücker Straße). Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums dagegen sind in den aufgelockerten Bereichen am Siedlungsrand, welche an landwirtschaftliche Flächen angrenzen zu finden (ca. 14 – 15 °C bzw. 15 bis 16 °C im Zukunftsszenario). Charakteristisch für viele Wohnquartiere ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßebereich und in den Grünbereichen hinter den Gebäuden. Hier zeigen sich Temperaturdifferenzen von bis zu 4 °C.

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Freiflächen im Umland - vor allem die landwirtschaftlichen Flächen um die Stadtteile außerhalb des Stadtkerns – kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 14 - 15 °C (bzw. ca. 15 – 16 °C im Zukunftsszenario) auf. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Die bodennahen Temperaturen in den Waldgebieten (zum Beispiel das „Fichtenvenn“ in Gellendorf, die Waldgebiete in Bentlage, sowie das Naturschutzgebiet Zachhorn) liegen bei etwa 17 – 18,5 °C (bzw. im Zukunftsszenario bis knapp über 19,0 °C) in der Nacht. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrünerten Siedlungsräumen zur Folge hat, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach bilden.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können. Dies trifft sowohl auf den Dortmund-Ems-Kanal und die Ems zu als auch auf den Hemelter Bach und die Stillgewässer im Untersuchungsgebiet, wie z. B. dem Waldhügelsee.

Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die **Kaltluftproduktionsrate** verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht. Die Maßeinheit hier ist m³ pro m² pro Stunde. In Abbildung 24 wird die flächenhafte Verteilung der Kaltluftproduktionsrate zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts für einen Ausschnitt der Kernstadt dargestellt. Über versiegelten Flächen (Straßen und Plätze) findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über den Freiflächen ohne Baumbestand produziert, hier vor allem entlang von Ems und Hemelter Bach, aber vor allem auch (außerhalb der Abbildung) über den landwirtschaftlichen Freiflächen außerhalb der Siedlungsgebiete. Innerhalb der Siedlungsquartiere ist eine Vielzahl an unversiegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion zu erkennen. Mit Bäumen bestandene Flächen zeigen eine deutlich geringere Kaltluftproduktionsrate als baumlose Freiflächen.

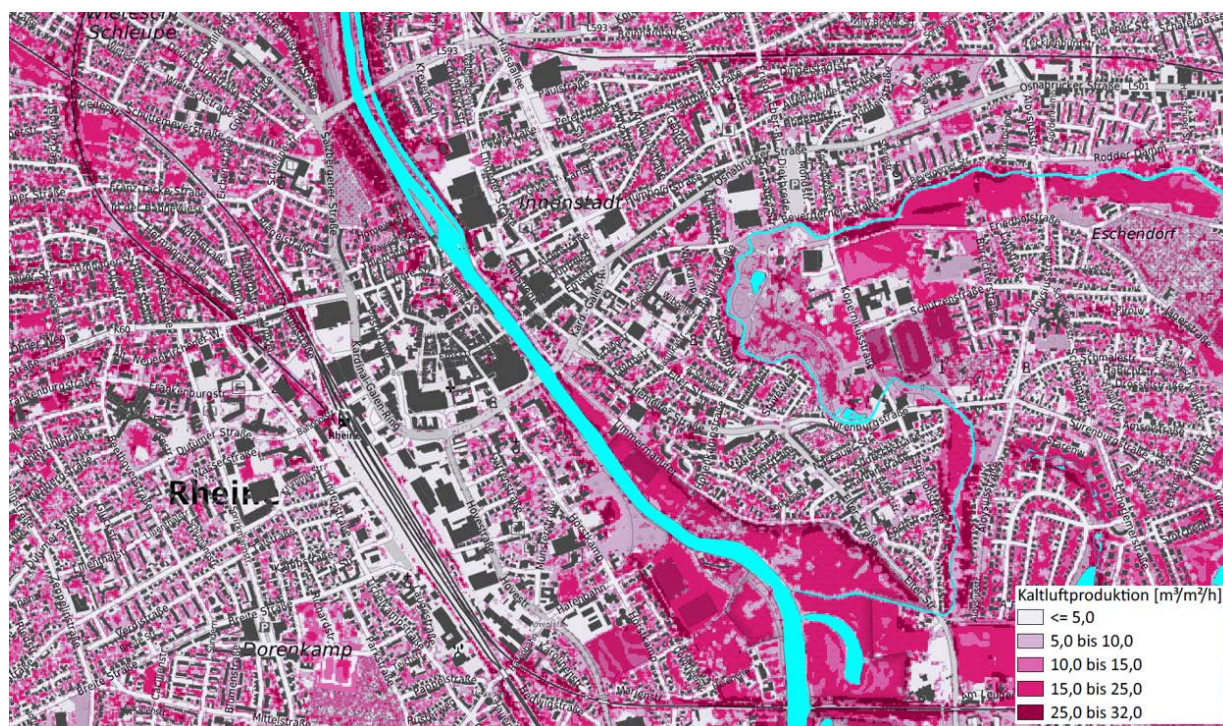


Abbildung 24: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Umfeld der Kernstadt (verkürzte Legende, Ist-Situation). Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

5.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Abbildung 25 zeigt die **Kaltluftvolumenstromdichte** für einen Ausschnitt des Stadtgebiets. Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt. Im Übergang zwischen Siedlungsgebiet und Freiflächen bewirken aber auch die Differenzen in der Lufttemperatur, dass sich Kaltluftmassen in Bewegung setzen. Die größte Kaltluftvolumenstromdichte ist am steilen Relief des Waldhügels festzustellen, wo aufgrund der Höhenunterschiede 20 bis 30 $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ Kaltluft in die nördlich angrenzenden Wohngebiete strömt (unten links in Abbildung 25). Am Fuße des Thiebergs werden Werte von knapp unter 20 bis 30 $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$ erreicht (linker Bildrand, mittig in Abbildung 25). Im Stadtzentrum westlich der Ems kommt die Ausgleichsströmung nahezu zum Erliegen, während beispielsweise das Stadtteil Eschendorf, ausgehend von den Emsauen sowie dem Stadtpark und angrenzenden Freiflächen entlang des Hemelter Baches, größtenteils gut mit nächtlichen Kaltluftströmen versorgt ist. Ausschlaggebend für den Weitertransport der über Freiflächen entstehenden Kaltluftpakete sind bestenfalls Kaltluftkorridore (Grünflächen, breite Straßen), oder zumindest eine geringe Anzahl an (hohen) Strömungshindernissen. Der Emstorplatz beispielsweise weist zwar aufgrund seiner kompletten Oberflächenversiegelung keine Kaltluftproduktion auf, dient aber als hindernisfreie Transportfläche für Ausgleichsströmungen in die angrenzenden Siedlungsbereiche hinein.

Die außen liegenden Ortslagen (z. B. Gellendorf, Elte, Mesum) werden im Allgemeinen von den Ausgleichsströmungen der umliegenden Freiflächen mit Kaltluft versorgt. Strömungsantrieb ist der Temperaturunterschied zwischen kühlem Umland und erwärmtem Siedlungskörper. Die absoluten Mengen der Kaltluftvolumenstromdichte überschreiten hier selten 10 $\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$, jedoch trägt der hohe Anteil an unversiegelter Freifläche dort zusätzlich effektiv zur Abkühlung bei.

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen zeigen in ihrem Umfeld im Zukunftsszenario ein verändertes Strömungsfeld im Vergleich zur Ist-Situation. Im Allgemeinen werden dort, wo auf jetzigen Freiflächen Bebauung geplant ist, die Produktion und der Transport von Kaltluft eingeschränkt und teilweise (abgeschwächt) umgelenkt. Da die genaue Bebauungsstruktur nicht festgelegt ist, wurde mit dem „Mischpixel-Ansatz“ (vgl. Kapitel

4.1.1) modelliert. Somit kann innerhalb der Entwicklungsflächen nur der durchschnittliche Wert für die Klimaparameter verwendet werden. Auch für die benachbarten Flächen ist die dargestellte Auswirkung der Bebauung der Entwicklungsflächen als Richtwert zu verstehen. Kleineräumigere Untersuchungen können erfolgen, sobald Bebauungs- und Nutzungsstruktur feststehen.

Die besonders relevanten Kaltluftprozesse für den Siedlungsraum werden in der Klimaanalysekarte, u.a. über die Darstellung von Kaltflutleitbahnen hervorgehoben (Kapitel 5.3).

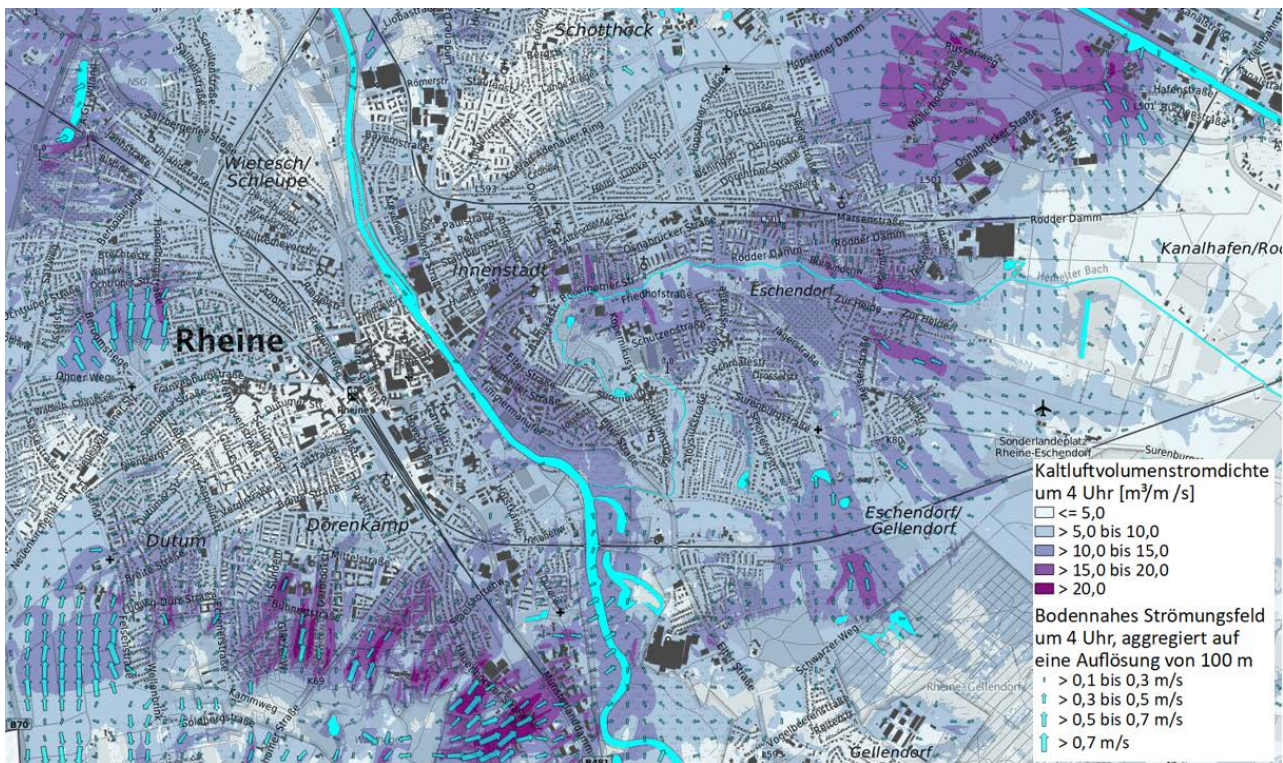


Abbildung 25: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Umfeld der Kernstadt (verkürzte Legende, Ist-Situation). Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen dagegen wird der Parameter **Strömungsgeschwindigkeit** herangezogen. In Abbildung 26 ist für einen Ausschnitt südwestlich des Stadtparks die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit wird flächig ab einem Wert von 0,1 m/s dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass Kaltluft im Stadtpark über jeweils baumlose Flächen strömt und in das angrenzende Wohngebiet transportiert wird. Baustrukturen sind klare Strömungshindernisse. Breite Straßen und Plätze sowie Grünflächen zwischen den Gebäuden dagegen können wertvolle Transportlinien bzw. „Trittsteine“ für Kaltluft sein.

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in Wäldern und unter Baumgruppen sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt.

In Zukunft wird sich zwar durch den modellierten Klimawandel das Temperaturfeld verändern, die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Oberflächenstrukturen werden aber im Allgemeinen keine signifikanten Veränderungen erfahren. Das Strömungsfeld der Austauschprozesse und die Menge der strömenden Kaltluft unterscheidet sich daher im Vergleich zwischen Ausgangssituation und Zukunftsszenario signifikant nur im Bereich der städtebaulichen Entwicklungsflächen.

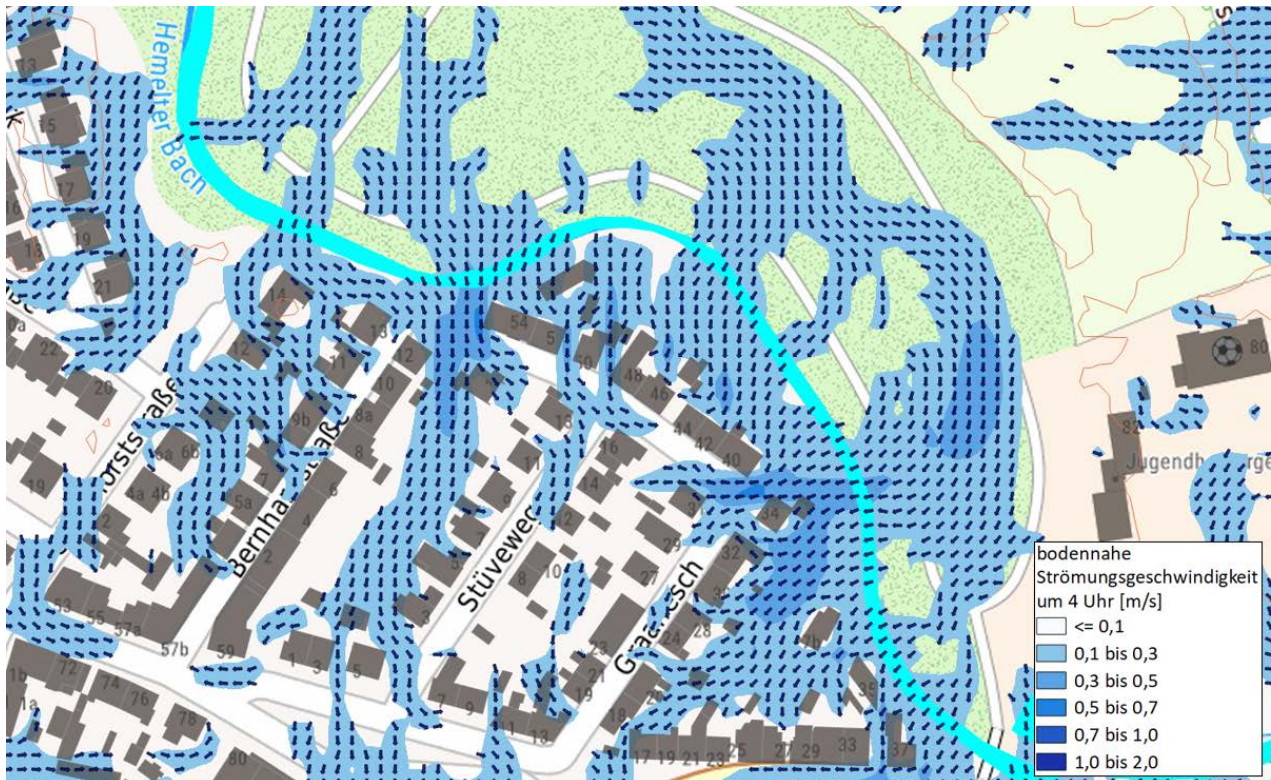


Abbildung 26: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in einem Ausschnitt südwestlich des Stadtparks. Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

5.3 KLIMAANALYSEKARTEN

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt anschließend über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap.6). Mit diesem Verständnis wurden für die Stadt Rheine jeweils eine Klimaanalysekarte für die Bestandssituation sowie für das Zukunftsszenario erstellt.

Die Legende gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen (Abbildung 27). Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁶ (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Die Abgrenzung des Siedlungsraums ist wie in der Planungshinweiskarte vektorbasiert und beruht auf dem ATKIS-Basis DLM.

Wirkraum: Siedlungsflächen

Lufttemperatur um 4 Uhr
in 2 m Höhe über Grund

- bis 13,0
- > 13,0 bis 13,5
- > 13,5 bis 14,0
- > 14,0 bis 14,5
- > 14,5 bis 15,0
- > 15,0 bis 15,5
- > 15,5 bis 16,0
- > 16,0 bis 16,5
- > 16,5 bis 17,0
- > 17,0 bis 17,5
- > 17,5 bis 18,0
- > 18,0 bis 18,5
- > 18,5 bis 19,0
- > 19,0 bis 19,5
- > 19,5 bis 20,0
- > 20,0 bis 20,5
- > 20,5
- /// Kaltluft Einwirkungsbereich
(Siedlungsflächen mit
überdurchschnittlicher
Kaltluftvolumenstromdichte)

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte
um 4 Uhr [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$]

- Kanal 1 (Gray)
- $\leq 5,0$
 - > 5,0 bis 10,0
 - > 10,0 bis 15,0
 - > 15,0 bis 20,0
 - > 20,0

Kaltluftprozesse

Bodennahes Strömungsfeld um 4 Uhr
aggregiert auf eine Auflösung von 100 m

- ↑ > 0,1 bis 0,3 m/s
- ↑ > 0,3 bis 0,5 m/s
- ↑ > 0,5 bis 0,7 m/s
- ↑ > 0,7 m/s

bedeutende Kaltluftflüsse

- ➡ Kaltluftleitbahn
- ⬅ flächenhafter Kaltluftabfluss
- ▶ Kaltluftabfluss innerorts
- ▒ Kaltluftproduktionsgebiete
(Freiflächen mit
überdurchschnittlicher
Kaltluftproduktionsrate)

Weiteres

- Gebäude
- Gewässer
- Stadtgrenze

Abbildung 27: Legende der Klimaanalysekarten

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch sechs Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 12). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den Geo-Datensätzen zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Rheine von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften Kaltluftleitbahnen. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig

⁶ Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier naheliegendsten Eingabezellen nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte.



sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können.

Tabelle 12: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktion im Ausgleichsraum	Freiflächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > > 29,25 m ³ /m ² /h (Ist-Situation) bzw. 29,19 m ³ /m ² /h (Zukunftsszenario)
Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstromdichte im Wirkraum	Siedlungsflächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftvolumenstromdichte von > 6,81 m ³ /m/s (Ist-Situation) bzw. 6,93 m ³ /m/s (Zukunftsszenario)
Kaltluftleitbahn (linear) in Richtung Siedlungsraum	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
flächenhafte Kaltluftabflüsse in Richtung Siedlungsraum	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Bedeutende Kaltluftabflüsse innerorts	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Kaltluftleitbahnen im Stadtgebiet von Rheine sind entlang des Hemelter Baches, sowohl am östlichen Rand von Eschendorf im Übergang zum landwirtschaftlich geprägten Außenraum als auch an der Eschendorfer Aue zu finden. Eine dritte Kaltluftleitbahn kann in Dutum entlang der Grünfläche südlich der Bebauung an der Nienbergstraße identifiziert werden.

Die flächenhaften Kaltluftabflussbereiche an den Hängen des Waldhügels und Thiebergs werden reliefbedingt angetrieben und weisen daher ein relativ großes Kaltluftvolumen auf. Andere flächenhafte Kaltluftabflüsse basieren dagegen auf weniger dynamischen (thermisch angetriebenen) Flurwinden im Übergang zwischen Freiflächen im Umland und Siedlungsbereichen der Stadt. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, nichtsdestotrotz ist die Empfindlichkeit der Flächen gegenüber baulichen Eingriffen ohnehin individuell im Einzelfall zu prüfen.

Als dritten Typ für bedeutende Kaltluftflüsse sind vier wichtige innerörtliche Bereiche gekennzeichnet, die als hindernisarme „Trittsteine“ für Ausgleichsströmungen auf dem Weg in die Siedlungsgebiete dienen. Sie befinden sich im Innenstadtbereich östlich der Ems und weisen jeweils eine für versiegelte Flächen sehr hohe Kaltluftvolumenstromdichte auf, wie zum Beispiel der Emstorplatz, oder der Parkplatz nördlich des Ems Einkaufszentrums.

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere

Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte.

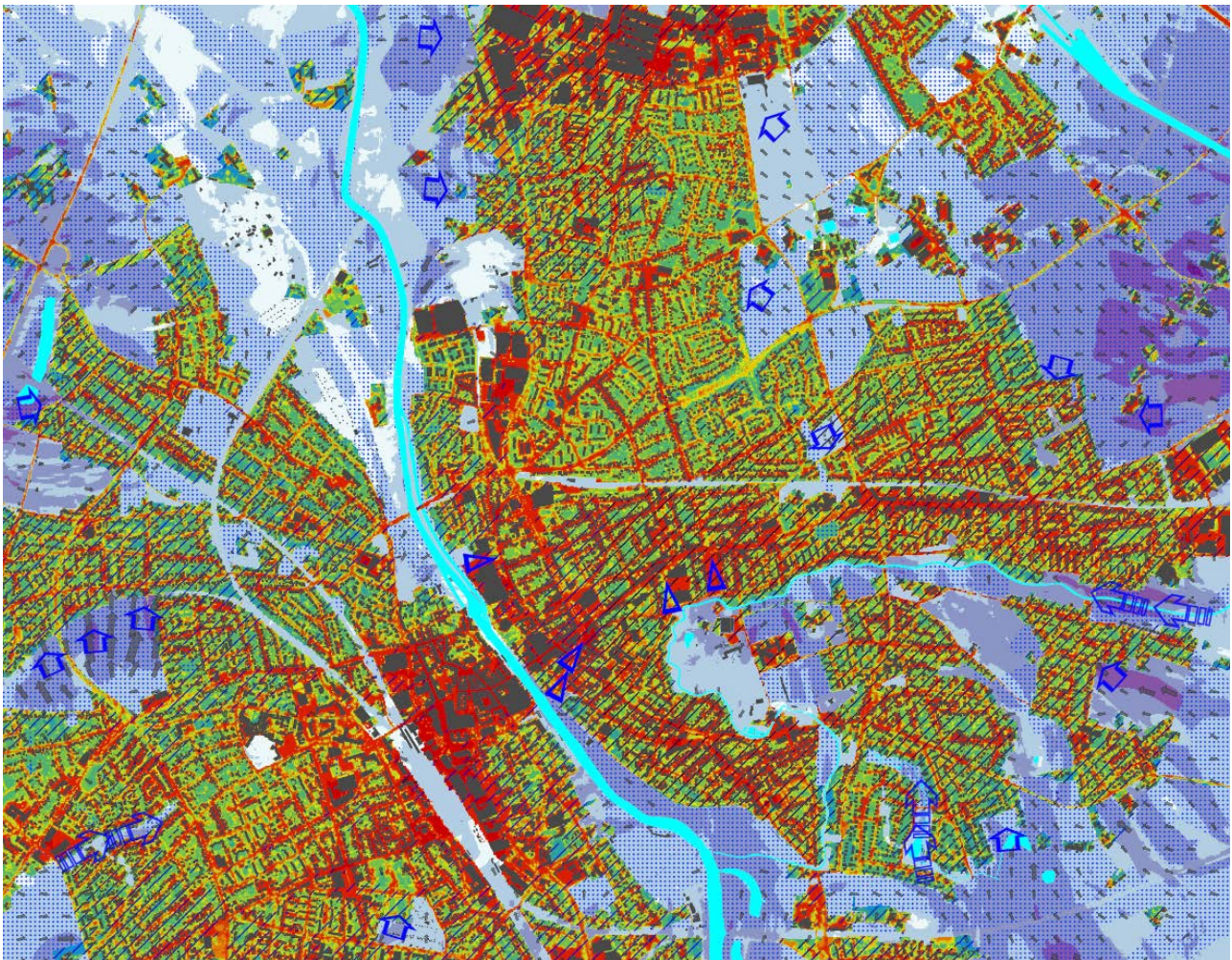


Abbildung 28: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation (Legende: siehe Abbildung 27)

5.4 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Abbildung 29 zeigt die flächenhafte Verteilung der PET-Werte für einen Ausschnitt des Stadtgebietes. Waldflächen bzw. baumbestandene Bereiche wie hier der Alte Friedhof, Teile des Stadtparks sowie die hier abgebildeten Flächen an der Ems heben sich in Dunkelgrüntönen und Werten um 25 °C (26 °C im Zukunftsszenario) als kühle Flächen hervor. Größere Waldgebiete (außerhalb des Kartenausschnitts) sind geringfügig kühler (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Tabelle A 3 im Anhang).

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung, abhängig von Bebauungsdichte, Versiegelung sowie Schatten durch Bäume oder Gebäude. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen und breiten Straßen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt und den Gewerbegebieten zu finden sind (ca. 40 bis 43 °C PET in der Ist-Situation, bzw. ca. 41,5 bis 44,5 °C PET im Zukunftsszenario).



Auf der Nord- bis Nordost-Seite von hohen Gebäuden ist durch den Schattenwurf zum Zeitpunkt 14 Uhr entsprechend der PET Wert deutlich kühler als auf den Flächen, welche sich in der vollen Sonneneinstrahlung befinden. Bäume sorgen – abhängig von ihrer Höhe und Kronenausmaß, für Schatten und zusätzliche Abkühlung durch Verdunstungsleistung und sind somit das effektivste Mittel gegen strahlungsbedingte Hitzebelastung. Beispielsweise ist in der Mitte der Abbildung 29 die Kühlwirkung des Baumbestands der Hansaallee zu erkennen.

In den umliegenden Stadtteilen liegt die Wärmebelastung teilweise vergleichbar hoch wie in der Innenstadt. Die Wohngebiete bieten zwar meist einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten viel unbeschattete Freifläche und teilweise wenige großkronige (und damit schattenspendender) Bäume. Dabei ist zu beachten, dass im Einzelfall ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 5 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen (kleinen) verschatteten Bereich bieten zu können. Im Zukunftsszenario wurde eine reduzierte Bodenfeuchte modelliert (vgl. Kapitel 4.1.1), was für Grün- und Freiflächen die Verdunstungskapazität herabsetzt und dort somit eine vergleichsweise starke Zunahme der Hitzebelastung am Tage zur Folge hat. Baumlose Freiflächen wie vor allem die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Umland zeigen unter voller Sonneneinstrahlung mit PET-Werten von 39 – 41 ° (Ist-Situation) bzw. 42 bis 44 °C (Zukunftsszenario) eine fast vergleichbare extreme Wärmebelastung wie über den versiegelten Flächen im Siedlungsgebiet (vgl. Tabelle A 3 im Anhang). Dies ist ein signifikanter Unterschied zur Nachtsituation, wo die Verteilung der bodennahen Lufttemperatur von kühlen Werten im Umland und wärmeren Bedingungen im Siedlungsgebiet geprägt ist.

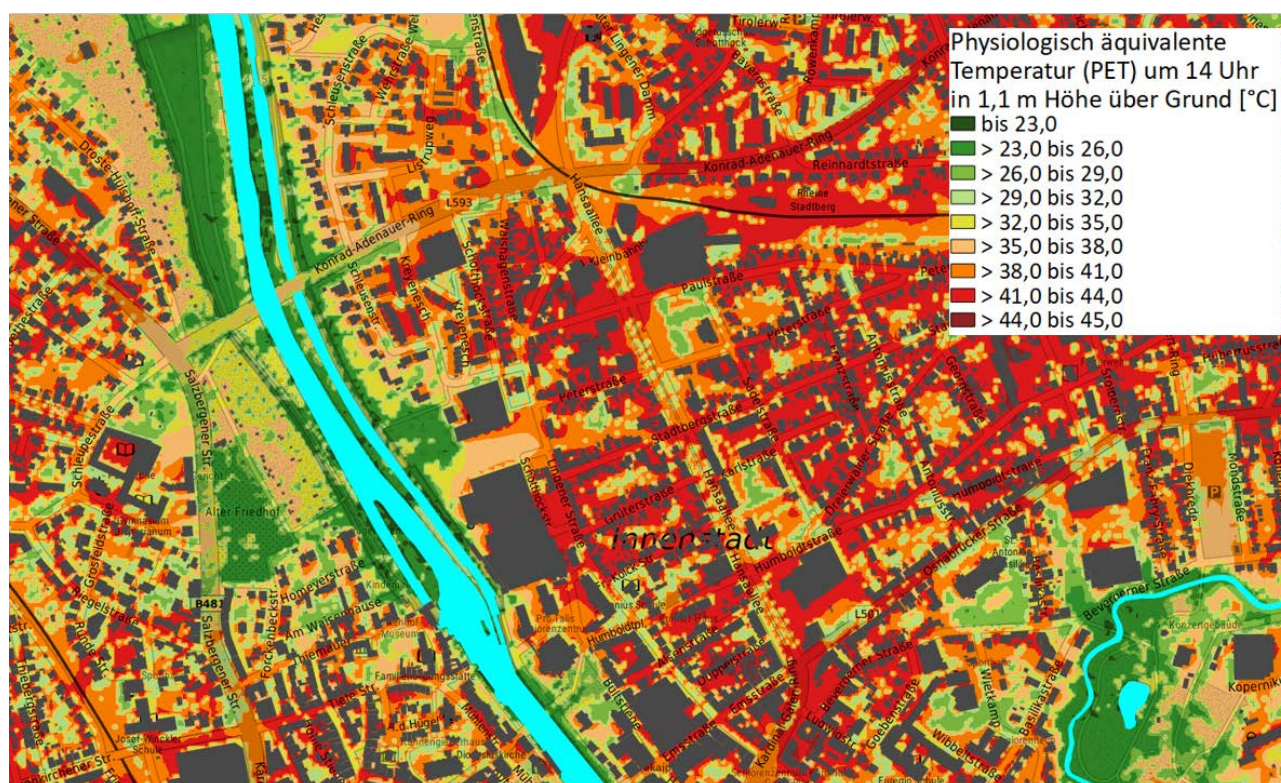


Abbildung 29: Wärmebelastung am Tag (PET) in einem Ausschnitt von Rheine für die Ist-Situation (verkürzte Legende). Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)



6. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

6.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich dabei um eine „*informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält*“ (VDI 2015, 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, 5-6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum (inkl. RGB-Farbcodes für die verschiedenen Klassen) vor und gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

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

Die Erstellung der Planungshinweiskarte erfolgte schrittweise und in enger Abstimmung mit der Abteilung für Umwelt, Klimaschutz und Grünplanung. Zunächst wurden Bewertungskarten getrennt für die Tag- und Nacht-Situation erstellt, die jeweils stadtklimatische Bewertungen für die Ist-Situation sowie das Zukunftsszenario darstellen. Die Planungshinweiskarte kombiniert anschließend die Ergebnisse der Bewertungskarten, basiert aber lediglich auf den Bewertungen der Ist-Situation. So wird auf den ersten Blick ersichtlich, welche Ausgleichsflächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Rheine heute schon Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Die Zukunftsmodellierung und deren Bewertungskarten (Tag / Nacht) bieten somit zusätzliche planerische Bewertungsgrundlagen in Bezug auf die dargestellten potenziellen Entwicklungsflächen sowie mögliche zukünftige klimawandelbedingte erhöhte Belastungen und Bedeutungen der Ausgleichsflächen.



6.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap. 5) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadt- raum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

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

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum, aber auch einzelne Baublöcke im Wirkraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt. Es kann unter Umständen vorkommen, dass kleinere Freiflächen in der Karte nicht als solche ausgewiesen sind, oder Überbauungen mit einem sehr hohen Grünanteil nicht als Siedlungsflächen ausgewiesen sind. Im Falle zusätzlicher Bebauung auf Grün- und Freiflächen kann sich deren Funktion ändern und muss gegebenenfalls neu bewertet werden.

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Bewertungskarten und der Planungshinweis- karte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor; Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel sowohl höhere als auch niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 30).

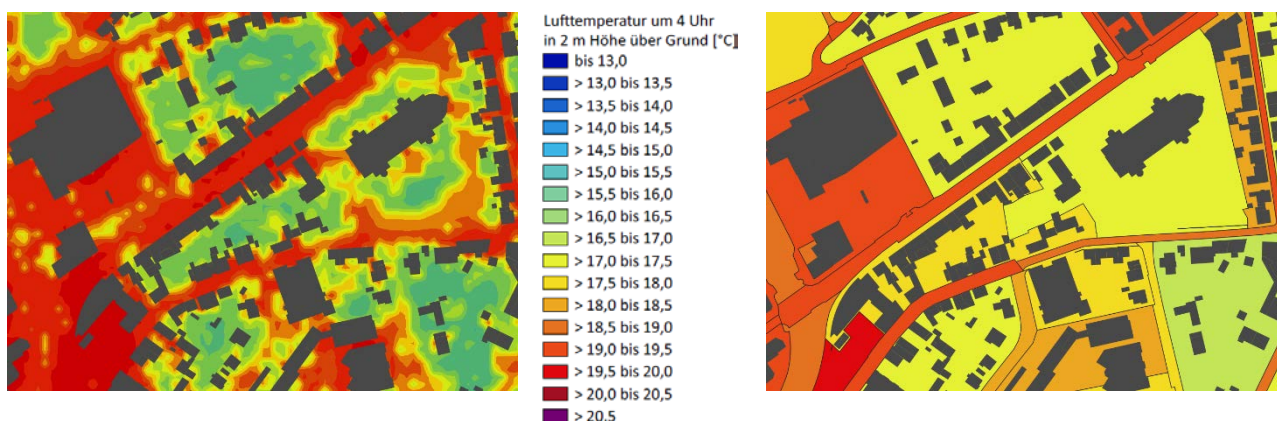


Abbildung 30: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie



6.3 BEWERTUNGSKARTEN

6.3.1 WIRKRAUM

Im Wirkraum wird die thermische Belastungssituation dargestellt. Wertgebend dabei ist in der Nacht die bodennahe Lufttemperatur als starker Indikator für den Schlafkomfort in Gebäuden sowie am Tag die Wärmebelastung im Außenraum (Physiologisch Äquivalente Temperatur, PET). Bei der Temperatur und der PET, die auf die Flächen der Basisgeometrie gemittelt wurden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb „sommerliche autochthone Wetterlage“ gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb eines Sommers sowie selbst innerhalb der zu betrachtenden Wetterlage auch deutlich wärmere oder kühlere Situationen. Die Planungshinweiskarte muss den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei der sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 31).

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

Dabei ist

- z standardisierter Wert der Variablen x
- x Ausgangswert der Variablen x
- μ arithmetisches Mittel
- σ Standardabweichung

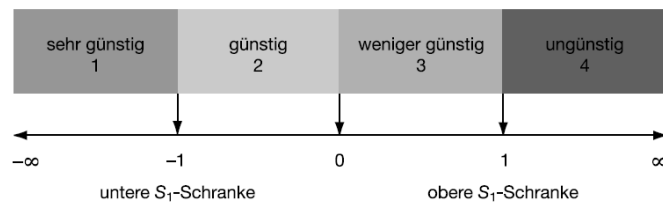


Abbildung 31: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das grundsätzliche Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein. Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Verfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei Modellrechnungen (Status quo und die Szenarien Schwacher sowie Starker Klimawandel) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperatur- bzw. PET-Werten ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken des Status quo (als



kühlste Situation) und des Szenarios Starker Klimawandel (als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters“ miteinander verknüpft. Aus dieser neuen Grundgesamtheit über beide Situationen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation⁷:

- Nächtliche Temperatur, Siedlungsraum:
Mittelwert = 17,82 °C Standardabweichung = 1,469 °C
- Wärmebelastung am Tag Siedlungsraum:
Mittelwert = 38,45 °C PET Standardabweichung = 5,248 °C PET

Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieser Bandbreiten auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen.

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 31) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeren Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr geringe – geringe – mittlere – hohe – sehr hohe* bioklimatische Belastung eingeteilt (Tabelle 13). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert (z = 0) schwankenden Klassen.

Tabelle 13: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Bioklimatische Belastung am Tag	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
Sehr gering	$z \leq -0,75$	$PET \leq 34,5$
Gering	$-0,75 < z \leq -0,25$	$34,5 < PET \leq 37,1$
Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$37,1 < PET \leq 39,8$
Hoch	$0,25 < z \leq 0,75$	$39,8 < PET \leq 42,4$
Sehr hoch	$z > 0,75$	$PET > 42,4$

In der Darstellung der Nachtsituation wird neben der Überwärmung zusätzlich auf den Kaltlufthaushalt eingegangen. Zu einem gewissen Anteil wirkt sich die Kaltluft bereits auf die nächtliche Lufttemperatur in den einzelnen Flächen aus. Sie wird dennoch zusätzlich beleuchtet, da sich die Durchlüftung einer Fläche positiv auf angrenzende Flächen auswirken kann. Dazu wurden zunächst Siedlungsflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstromdichte ($\geq 6,81 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ für die Ist-Situation sowie $\geq 6,93$ für das Zukunftsszenario) als sogenannter Kaltlufteinwirkungsbereich definiert. Liegt eine Fläche mindestens zur Hälfte im Kaltlufteinwirkungsbereich, so wird angenommen, dass die Fläche potenziell eine Gunstwirkung für angrenzenden Flächen haben kann. Diesen Flächen wird eine Klimafunktion zugeschrieben, sie sind über eine Schraffur in der Bewertungskarte (Nacht) sichtbar und fließen als Kriterium für die stadtklimatische Handlungspriorität in die Planungshinweiskarte ein.

⁷ Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte aus den Modellergebnissen verwendet, die innerhalb des Siedlungsraums liegen (Wohn- und Gewerbegebiete sowie Straßenraum), da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt.



Tabelle 14: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht

Bioklimatische Belastung in der Nacht	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C] Siedlungsraum
Sehr gering	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 16,2$
Gering	$-1,0 < z \leq -0,33$	$16,2 < T04 \leq 17,3$
Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$17,3 < T04 \leq 18,3$
Hoch	$0,33 < z \leq 1,0$	$18,3 < T04 \leq 19,3$
Sehr hoch	$z > 1,0$	$T04 > 19,3$

6.3.2 AUSGLEICHSPAUM

Während in den Klimaanalysekarten die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen, landwirtschaftlichen Flächen und Wälder vornehmlich siedlungsunabhängig anhand ihres Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in den Bewertungs- und der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt.

Zur stadtklimatischen Bewertung des Ausgleichsraums in der Nacht rückt dessen Funktion für den Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit den besonderen Kaltluftprozessen (Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse) stehende Fläche eine *sehr hohe Bedeutung*, wenn sie einen unmittelbaren Bezug zu Wohnsiedlung aufweisen (Primärfunktion) und eine *hohe Bedeutung*, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse unmittelbar speisen (Sekundärfunktion, direktes Einzugsgebiet).

Im Hinblick auf planungsrelevante Belange spielt zusätzlich der (Wohn-)Siedlungsbezug der Flächen im Ausgleichsraum eine Rolle. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb des Ausgleichsraums entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Die folgende Abbildung 32 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- *„Hohe Kaltluftfunktion“*: mindestens zwei der drei Werte: Kaltluftvolumenstrom / Kaltluftproduktion / Windgeschwindigkeit sind größer als der jeweilige Mittelwert aller Flächen im Ausgleichsraum
- *„Angrenzend an Wohngebiete“*: Entfernung bis 30 m Luftlinie
- *„Agglomeration“*: geschlossener Siedlungsraum (ohne Splitterflächen, Einzelhöfe etc. im Außenraum; gutachterliche Einteilung)
- *„Siedlungsbezug“*: Entfernung bis 500 m Luftlinie

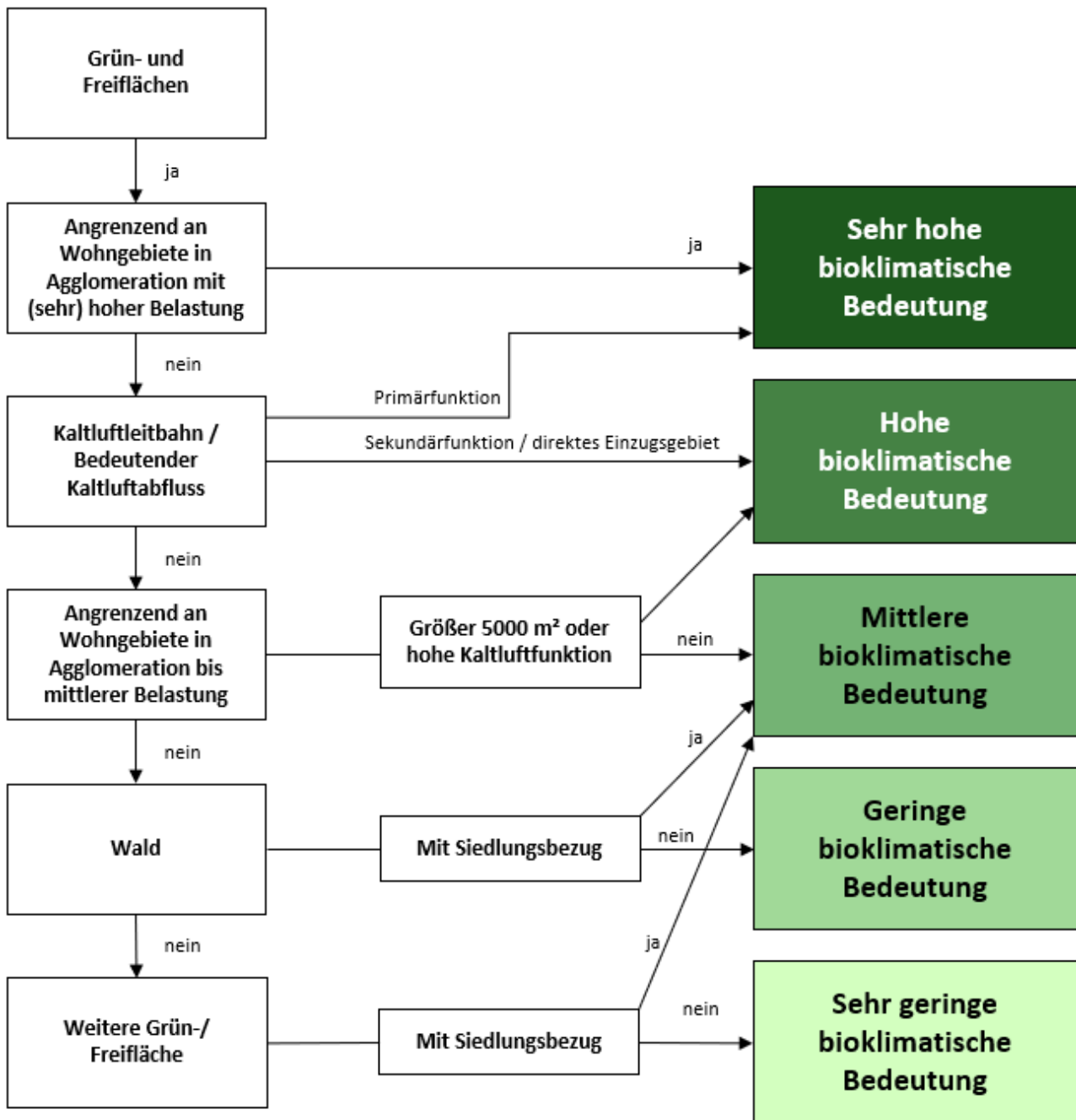


Abbildung 32: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht

Für die Tag-Situation wird die bioklimatische Bedeutung (Aufenthaltsqualität) auf den Flächen im Ausgleichsraum in einer fünfstufigen Skala von *sehr hoch* bis *sehr gering* bewertet (Tabelle 15). Dies geschieht wiederum über die oben beschriebene z-Transformation, der folgende statistische Werte zugrunde lagen (Flächenkultisse: alle Ausgleichsräume im Stadtgebiet von Rheine):

- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 35,08 °C PET Standardabweichung = 6,801 °C PET

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend im Stadtgebiet, sodass die Aufenthaltsqualität auf den Flächen im Ausgleichsraum sinken kann. Damit nimmt die Anzahl ungünstig bewerteter Flächen zu, was jedoch nicht meint, dass deren Bedeutung für das Stadtklima abnimmt. Vielmehr ist es ein Hinweis, dass die Wärmebelastung auf den Flächen ohne Aufwertung und angepasste Pflege zunehmen wird. Sie behalten eine wichtige stadtklimatische Ausgleichsfunktion für den stärker belasteten Siedlungsraum.



Tabelle 15: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
Sehr hoch	$z \leq -0,75$	$PET \leq 30,0$
Hoch	$-0,75 < z \leq -0,25$	$30,0 < PET \leq 33,4$
Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$33,4 < PET \leq 36,8$
Gering	$0,25 < z \leq 0,75$	$36,8 < PET \leq 40,2$
Sehr gering	$z > 0,75$	$PET > 40,2$

6.3.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

Abbildung 33 zeigt Ausschnitte aus den Bewertungskarten für die Nacht. Während in der Ist-Situation die Flächen mit sehr hoher Wärmebelastung fast ausnahmslos im hoch verdichteten Innenstadtbereich zu lokalisieren sind, erreichen im Zukunftsszenario ca. 18 % der Flächen diese Kategorie. Gewerbegebiete in allen Stadtteilen, aber auch einige kleinere Wohnsiedlungsgebiete vor allem in Eschendorf und Dorenkamp sind im Zukunftsszenario nachts sehr hoch bioklimatisch belastet (Tabelle 16).

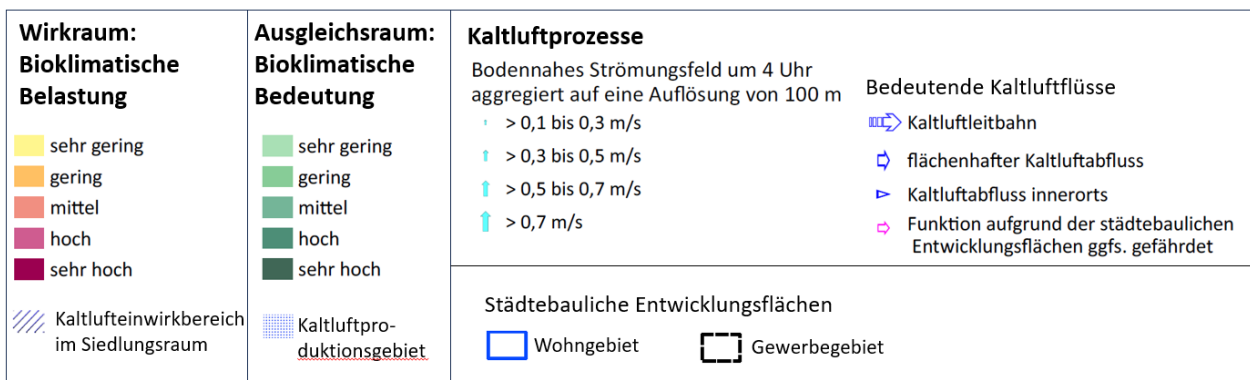


Abbildung 33: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (links Ist-Situation, rechts Zukunftsszenario), Verkürzte Legende



Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Zukunftsszenario
Sehr gering	10,7 %	1,1 %
Gering	33,3 %	14,1 %
Mittel	37,2 %	29,3 %
Hoch	17,9 %	37,7 %
Sehr hoch	1,0 %	17,9 %

Ca. 44 % der Siedlungsflächen sind dagegen in der Ist-Situation nachts lediglich gering oder sehr gering wärmebelastet (Tabelle 16). Dies sind vorrangig Wohnsiedlungsflächen im Kaltluftereinwirkungsbereich außerhalb des Stadtzentrums, aber auch entsprechend gering versiegelte, innenstadtnahe Quartiere in Schotthock und Dorrenkamp. Im Zukunftsszenario sind ca. 15 % Flächenanteile gering oder sehr gering wärmebelastet, hier handelt es sich im Bestand um kleinere Einzelhaussiedlungen am Stadtrand oder in Einzellage außerhalb des Stadtkerns. Die Entwicklungsflächen für Wohnsiedlungsgebiete im Zukunftsszenario sind überwiegend ebenfalls mit geringer, und höchstens mit mittlerer nächtlicher Wärmebelastung bewertet. Die potenziellen Flächen für Gewerbegebiete sind im Zukunftsszenario entweder mit hoher (Altenrheine / Kanalhafen nördlich und südlich der BAB 30, sowie GIB-Nord) oder sehr hoher (Baarentelgen-Ost) Wärmebelastung belegt.

Da die städtebaulichen Entwicklungsflächen nicht mit konkreter Bau- und Nutzungsstruktur modelliert wurden, sondern die Modell-Nutzungskategorien je nach geplantem Flächenanteil zufällig über die jeweilige Fläche verteilt wurden („Mischpixelansatz“, vgl. Kapitel 4.3), ist die Ableitung der zukünftigen stadtklimatischen Situation und vor allem der Kaltluftprozesse als ungefähre Annäherung zu verstehen. Detaillierte Aussagen zu beispielsweise Verortung von Hitzeinseln, Erholungsflächen und Kaltluftversorgung innerhalb der jeweiligen Fläche sind erst nach Feststehen einer Bebauungs- und Nutzungsstruktur möglich. Die Durchlässigkeit der Fläche für die Kaltluftversorgung der umliegenden Siedlungsflächen ist ebenfalls im Mischpixelansatz nur annäherungsweise darstellbar, da evtl. Kaltluftkorridore sowie Kaltluftentstehungsgebiete innerhalb der Entwicklungsfläche nicht abgebildet werden können. Für eine detailliertere Beurteilung der geplanten städtebaulichen Entwicklung und ihrer Wirkung auf die umliegenden Flächen ist somit eine gesonderte fachliche Untersuchung erforderlich.

Tabelle 17: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Bedeutung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Zukunftsszenario
Sehr gering	43,3 %	43,6 %
Gering	15,0 %	15,3 %
Mittel	28,1 %	27,7 %
Hoch	10,4 %	5,5 %
Sehr hoch	3,2 %	7,9 %



Im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) hängt die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung unter anderem von der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden hoch oder sehr hoch belasteten Wohnsiedlungsflächen ab (vgl. Abbildung 32). Als Folge davon, dass im Zukunftsszenario der Anteil der Wohnsiedlungsflächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Belastung zunimmt, gewinnen die angrenzenden Ausgleichsräume ebenfalls an Bedeutung in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen.

Viele der städtebaulichen Entwicklungsflächen sind in der Ist-Situation Ausgleichsräume mit hoher, oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung belegt. Da diese Flächen im Zukunftsszenario dem Wirkraum zugeordnet werden, sinkt der entsprechende Anteil an Ausgleichsräumen nicht nur absolut, sondern auch prozentual (Tabelle 17). Bei den Freiflächen mit geringer oder sehr geringer bioklimatischer Bedeutung für das Stadtklima in den Wohnsiedlungen handelt es sich um die (meist) großflächigen landwirtschaftlichen Flächen im Umland, mit Abstand zur Siedlungsfläche (ausgenommen Einzelhöfe als Siedlungssplitterflächen) von mindestens einigen Hundertmetern.

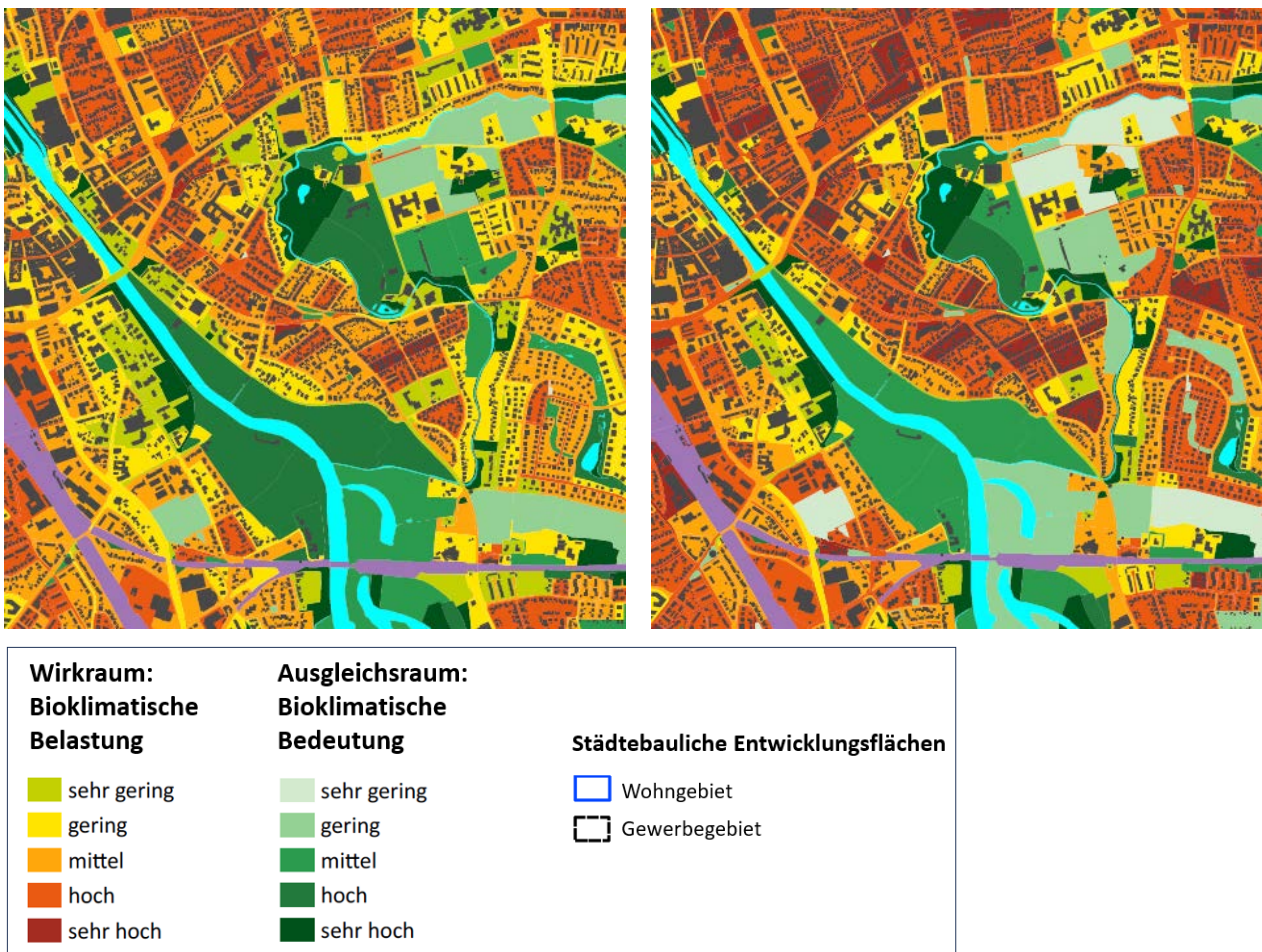


Abbildung 34: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (links Ist-Situation, rechts Zukunftsszenario). Verkürzte Legende

Die Bewertungskarten für die Tagsituation werden in Ausschnitten in Abbildung 34 dargestellt. Im Gegensatz zur Wärmebelastung in der Nacht, die vorrangig in dicht bebauten Gebieten der Stadt stärker ausgeprägt ist, verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet. Die Hitzebelastung am Tage ist vorrangig abhängig von Verschattungsgrad durch Bäume und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Die Innenstadt zwischen Hauptbahnhof, Kardinal-Galen-Ring, Tiefe Straße und Ems weist in der Ist-Situation eine geringe bis mittlere bioklimatische Belastung auf,



lediglich der Marktplatz, die Emsstraße und Matthiasstraße / Busbahnhof fallen aufgrund fehlender Beschattung und voller Versiegelung in die Kategorie der hoch belasteten Flächen. Im Zukunftsszenario unterliegt dieser Innenstadtbereich flächendeckend mittlerer bis hoher Hitzebelastung. Die Flächen höchster bioklimatischer Belastung sind in der Ist-Situation kaum vorhanden (0,7 % Flächenanteil, Tabelle 18). Im Zukunftsszenario fallen bereits über 11 % in diese Kategorie. Hierbei handelt es sich fast ausnahmslos um locker bebaute Wohngebiete, in denen wenig Verschattung geboten wird. Gut die Hälfte der Siedlungsflächen werden im Zukunftsszenario als am Tage hoch belastet eingestuft (Tabelle 18); darunter sämtliche Gewerbeflächen. Die potenziellen städtebaulichen Erweiterungsflächen sind durchgehend mit mittlerer oder hoher Hitzebelastung belegt, wobei auch hier der Hinweis gilt, dass die Ableitung der zukünftigen stadtklimatischen Situation in diesen Flächen nur als ungefähre Annäherung zu verstehen ist (siehe oben).

Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte im Zukunftsszenario an bioklimatischer Ausgleichsfunktion für den Menschen am Tage. Vor allem die großen Freiflächen außerhalb des Stadtgebietes weisen aufgrund der modellierten reduzierten Bodenfeuchte einen deutlich höheren PET-Wert auf, so dass ein Großteil nun in die Kategorie „sehr geringe bioklimatische Bedeutung“ fällt. Die Flächen mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung sind größtenteils Wald oder zumindest Flächen mit hohem Baumanteil. Diese sind weniger anfällig für die reduzierte Bodenfeuchte im Zukunftsszenario, und die PET erfährt eine geringere Zunahme als über offenen Freiflächen. Folglich ändern nur wenige dieser Flächen die Bewertungskategorie (Tabelle 19). Als wichtige Ausgleichsflächen und siedlungsnahe kühle Erholungsräume sind vor allem der Stadtpark, der Waldhügel, der Walshagenpark, der Friedhof Königsesch sowie die Kulturlandschaft um das Schloss Bentlage klar zu identifizieren. Zusätzlich dazu wirken aber auch kleine Grünflächen wie zum Beispiel Spielplätze und Grünanlagen zwischen der Bebauung, sofern sie durch Bäume Schatten bieten, als sogenannte Klima-Oasen bzw. kühle Aufenthaltsräume.

Tabelle 18: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung am Tage	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Zukunftsszenario
Sehr gering	8,9 %	3,2 %
Gering	21,5 %	11,1 %
Mittel	42,1 %	24,4 %
Hoch	26,8 %	50,0 %
Sehr hoch	0,7 %	11,4 %

Tabelle 19: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung am Tage, nach Modellierungsszenario

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Zukunftsszenario
Sehr gering	2,4 %	32,8 %
Gering	45,0 %	30,7 %
Mittel	20,8 %	7,1 %
Hoch	4,7 %	2,6 %
Sehr hoch	27,0 %	26,7 %



6.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima fasst die Ergebnisse der Bewertungskarten für die Ist-Situation zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen in Rheine einen hohen Schutzbedarf haben, und wo Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Die modellierte Zukunftssituation fließt nicht in die Planungshinweiskarte ein, da abgesehen von der Unsicherheit des Klimawandelszenarios die städtebauliche Entwicklung nicht konkret genug vorhersehbar ist, und die potenziellen Entwicklungsflächen lediglich exemplarische städtebauliche Möglichkeitsfelder repräsentieren. Somit liegt der Fokus der Planungshinweiskarte auf der heutigen Situation, mit dem Ziel auch zukünftige bioklimatische Belastungen zu mindern bzw. wichtige Ausgleichsfunktionen von Grün- und Freiflächen zu stärken. Die Ergebnisse stellen eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar.

6.4.1 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSPRIORITÄT IM WIRKRAUM

In den Wohn- und Gewerbeflächen sowie im öffentlichen Raum wird die stadtklimatische Handlungspriorität dargestellt. Für die Einteilung der Handlungsprioritäten wurde die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität) und in unbewohnten Gebieten sowie im Straßenraum und auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum; Tabelle 20).

Tabelle 20: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Situation aus den Bewertungskarten Nacht und Tag in Wohngebieten sowie in unbewohnten Gebieten.

Wohngebiete						Unbewohnte Gebiete, Straßen und Plätze								
Bewertung Nacht						Bewertung Nacht								
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5			
Bewertung Tag	1	1	2	3	3	4	Bewertung Tag	1	1	1	2	2	3	
	2	1	2	3	4	4		2	2	2	2	3	3	
	3	2	2	3	4	5		3	3	3	3	3	4	
	4	2	3	3	4	5		4	3	4	4	4	4	5
	5	3	3	4	5	5		5	4	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe Wärmebelastung, ..., 5 = sehr hohe Wärmebelastung

Beispielsweise wird einem Wohngebiet, welches in der Nacht sehr hoch belastet ist (5), in Kombination mit mittlerer Belastung (3) am Tage eine Gesamt-Wärmebelastung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 20, linke Seite). Ein Gewerbegebiet mit sehr geringer Belastung (1) in der Nacht und sehr hoher Belastung (5) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Wärmebelastung bewertet (vgl. Tabelle 20, rechte Seite).

Im zweiten Schritt wird die Klimafunktion der Siedlungsflächen, also die Reichweite des nächtlichen Kaltluftwirkbereichs hinzugezogen. Siedlungsflächen, die auf mindestens der Hälfte der Fläche mit überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstromdichte durchströmt werden, wird eine Klimafunktion zugesprochen. Die Handlungsprioritäten werden abgestuft, je nach bioklimatischer Belastung und Klimafunktion zugeteilt, wie in Tabelle 21 skizziert.



Tabelle 21: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Handlungspriorität 1	Flächen, die eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (mit sowie ohne Klimafunktion)	1,0 %
Handlungspriorität 2	Flächen ohne Klimafunktion, die eine hohe Wärmebelastung aufweisen	4,9 %
Handlungspriorität 3	Flächen mit Klimafunktion, die eine hohe Wärmebelastung aufweisen	3,8 %
Handlungspriorität 4	Flächen ohne Klimafunktion, die eine mittlere Wärmebelastung aufweisen	25,8 %
Handlungspriorität 5	Flächen mit Klimafunktion, die eine mittlere Wärmebelastung aufweisen	20,9 %
Keine vorrangige Handlungspriorität	Übrige Flächen	43,5 %

„Klimafunktion“ = mindestens Hälfte der Fläche mit überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstromdichte

Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tabelle 20

Siedlungsflächen der ersten Handlungspriorität belegen nur 1,0 % der Flächenanteil und sind fast ausschließlich im Stadtzentrum, angrenzend an den Hauptbahnhof sowie an den Marktplatz zu finden (Abbildung 35). Siedlungsflächen, welche mit den obersten drei stadtklimatischen Handlungsprioritäten belegt sind, verteilen sich über eine Vielzahl an Stadtstrukturtypen und auf das gesamte Stadtgebiet, allerdings vorrangig in zentraleren Bereichen und weniger am Siedlungsrand. Ein Zusammenhang mit der Einwohnerdichte ist nicht direkt feststellbar: sowohl in dicht besiedelten Bereichen (z. B. entlang der Breiten Straße in Dorenkamp) als auch in Einfamilienhaussiedlungen, z. B. in Hauenhorst und Mesum sind aufgrund der bioklimatischen Situation Maßnahmen zur Verbesserung notwendig. Flächen mit einer hohen Einwohnerdichte von rechnerisch > 100 Einwohner pro Hektar sind mit einer Schraffur dargestellt. Maßnahmen in diesen Bereichen kommen besonders vielen Bewohnern zugute, und sollten vorrangig in Betracht gezogen werden.

Die Handlungsprioritäten sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird⁸. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 22 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen. In Flächen der fünf höchsten Handlungsprioritäten, die in Rheine ca. 56 % (vgl. Tabelle 21) des Siedlungsraums ausmachen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen notwendig bzw. zu prüfen. Darunter ist in den Flächen der höchsten drei Handlungsprioritäten (ca. 10 % Flächenanteil) zusätzlich zu prüfen, ob proaktiv Anpassungsmaßnahmen im Bestand um-

⁸ Es können (und sollen im Falle von Gelegenheitsfenstern) also auch stadtklimatischen Anpassungsmaßnahmen bspw. in Flächen der Handlungspriorität 3 umgesetzt werden, wenn noch nicht alle Flächen in den höheren Handlungsprioritäten angepasst wurden.



gesetzt werden können. In ca. 43,5 % des Siedlungsraums besteht eine geringe oder keine vorrangige stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung gewisser klimaökologischer Standards bei Entwicklungen empfohlen wird.

Tabelle 22: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
Handlungspriorität 1 – 3	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind notwendig und je nach ihrer Wirksamkeit zu priorisieren. Im Bestand sollte die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen geprüft werden. Es sollte keine weitere Verdichtung (insbesondere zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Handlungspriorität 4 – 5	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen. Je nach Tag- bzw. Nachtsituation ggfs. zusätzliche Begrünung und Verschattung sowie Entsiegelung oder Verbesserung der Durchlüftung notwendig. Freiflächen sollten erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
keine vorrangige Handlungspriorität	Die günstige bioklimatische Situation ist auch bei allen baulichen Entwicklungen möglichst zu erhalten oder zu verbessern.



**Wirkraum:
Siedlungsflächen und
öffentlicher Raum**

Stadtklimatische
Handlungspriorität

- Handlungspriorität 1
- Handlungspriorität 2
- Handlungspriorität 3
- Handlungspriorität 4
- Handlungspriorität 5
- Keine vorrangige Handlungspriorität
- Wohngebiet mit hoher Einwohnerdichte

**Ausgleichsraum: Grün-
und Freiflächen**

Stadtklimatischer
Schutzbedarf

- Sehr hoher
- hoher
- erhöhter
- Kein besonderer

Strömungsfeld nachts

- Strömungsfeld
- Kaltluftleitbahn
- Flächenhafter Kaltluftabfluss
- Kaltluftabfluss innerorts

Abbildung 35: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima. Verkürzte Legende

6.4.2 STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRaum

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltfluthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert (Tabelle 23). Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass eine Fläche, die am Tag oder in der Nacht die höchste Bedeutung aufweist, auch den höchsten Schutzbedarf zugeschrieben bekommt. Bei der



weiteren Abstufung wurde für Grün- und Freiflächen, die potenziell als Erholungsräume dienen können (allgemeine öffentliche Grünflächen, Friedhöfe, Parkanlagen, Spielplätze und Wald) im siedlungsnahen Umkreis von 300 m die Bewertung der Tagsituation stärker gewichtet. Diese Flächen können ggfs. der Bevölkerung als Rückzugsorte an heißen Tagen dienen. In den übrigen Flächen wiegt die Bewertung der Nachtsituation schwerer (Fokus auf den Kaltlufthaushalt).

Tabelle 23: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Bewertung aus den Bewertungskarten Nacht und Tag für die Flächen im Ausgleichsraum, unterteilt in fußläufige (potenzielle) Erholungsräume und weitere Grün- und Freiflächen.

Ausgleichsraum (fußläufiger Erholungsraum)						Ausgleichsraum (Landwirtschaftliche Flächen und siedlungsferne Grün- und Freiflächen)							
		Bewertung Nacht							Bewertung Nacht				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
Bewertung Tag	1	1	1	2	3	4	Bewertung Tag	1	1	2	3	4	5
	2	2	2	2	3	4		2	1	2	3	4	5
	3	3	3	4	4	5		3	2	2	3	4	5
	4	4	4	4	5	5		4	3	3	4	4	5
	5	5	5	5	5	5		5	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe, ..., 5 = sehr hohe bioklimatische Bedeutung

Beispielsweise wird einer Grünfläche, welche sich in fußläufiger Entfernung zum Siedlungsraum befindet und am Tage eine sehr hohe Bedeutung (5) aufweist, in Kombination mit sehr geringer Bedeutung (1) in der Nacht eine Gesamt-Bedeutung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 23, linke Seite). Eine im Umland liegende Freifläche mit hoher Bedeutung (4) in der Nacht und geringer Bedeutung (2) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Bedeutung bewertet (vgl. Tabelle 23, rechte Seite).

Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung (Tabelle 24). 41 % der Flächen weisen – aus bioklimatischer Sicht – keinen besonderen Schutzbedarf auf, denn sie sind erstens zu weit von den Siedlungsflächen entfernt, um einen signifikanten Einfluss auf die nächtliche Kaltluftversorgung der Wohnquartiere innezuhaben, und zweitens bieten sie aufgrund ihrer Charakteristik als (weitgehend) baumlose landwirtschaftliche Fläche am Tage keinen kühlen Erholungsraum für den Menschen. Siedlungsferne Waldflächen sind dagegen überwiegend mit hohem Schutzbedarf ausgestattet.

Tabelle 24: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Flächenanteil
Sehr hoher Schutzbedarf	Sehr hohe stadtklimatische Bedeutung	14,3 %
Hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung	24,8 %
Erhöhter Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung	20,2 %
Kein besonderer Schutzbedarf	Übrige Flächen	40,7 %



Tabelle 25: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
<p>Sehr hoher Schutzbedarf</p>	<p>Der Erhalt der stadtklimatischen Funktion ist notwendig und prioritär. Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) nachzuweisen. Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.</p>
<p>Hoher Schutzbedarf</p>	<p>Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.</p>
<p>Erhöhter Schutzbedarf</p>	<p>Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die stadtklimatische Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.</p>
<p>Kein besonderer Schutzbedarf</p>	<p>Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf. Eingriffe sollten nur unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.</p>

In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen (Tabelle 25). Bei einem *sehr hohen Schutzbedarf* wird eine Entwicklung beispielsweise nur dann als stadtklimaverträglich gewertet, wenn ein Nachweis über die Erhaltung der jeweiligen Funktion erfolgt (z.B. die Funktion als Kaltluftleitbahn oder ihre Wirkung als öffentliche Grünfläche mit hoher Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bei der weiteren Abstufung ist die Funktion der jeweiligen Flächen zu beachten, wobei die Art und Größe des Vorhabens im Einzelfall bestimmen, welche Vorgaben zur stadtklimatischen Prüfung einzuhalten sind (z. B. Detailgutachten oder qualitative Stellungnahme). Dabei kann die klimafachliche Begleitung einer Planung sowohl von städtischer Seite aus als auch durch externe Gutachter:innen erfolgen.



7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Grundlagen für die Maßnahmenentwicklung für eine klimaökologische, hitzeangepasste Stadtentwicklung sind unter anderem in zwei VDI-Richtlinien zu finden (VDI 2015, ab S. 39 und VDI 2020a, ab S. 28). Für Rheine wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert. Die Zuordnung bestimmter Maßnahmenets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 27 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

- Thermisches Wohlbefinden im Außenraum
- Verbesserung der Durchlüftung
- Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Stadtklimas in Rheine beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Am Tage sind viele Siedlungsbereiche in den zentralen Stadtteilen hitzebelastet, was vielerorts an fehlendem Schatten durch (nicht vorhandene oder noch zu niedrige) Bäume sowie relativ niedrige Gebäude liegt. Hier kann mit den Maßnahmen M06 (→Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien), sowie an entsprechenden Stellen Entsiegelung (→ M04: Entsiegelung bzw. Versiegelungsanteil minimieren) langfristig Abkühlung bewirkt werden. In Teilbereichen von vor allem Schotthock, Eschendorf und Dorenkamp sind kaum fußläufige Erholungsräume vorhanden. Hier sollten kühle Erholungsräume geschaffen werden (→ M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Friedhöfe (z. B. Friedhof Königsesch oder Friedhof Eschendorf) bieten in Rheine trotz des hohen Versiegelungsgrades eine mittlere bis hohe Bedeutung als Ausgleichs-/Erholungsraum. Hier besteht Potenzial zur Aufwertung aus bioklimatischer Sicht. Auch die am Stadtrand liegenden Grün- und Freiflächen bieten aus Stadtklimasicht viel Optimierungspotenzial. Wohngebiete mit geringer bioklimatischer Belastung am Tage sind vereinzelt im gesamten Stadtgebiet zu finden. Exemplarisch ist der innenstadtnahe Bereich auf beiden Seiten der Ems (Timmermannufer bzw. Münsterstraße / Elpersstiege). Hier befinden sich ausladende Grünflächen mit zum Teil hoher, Kühle spendender Vegetation zwischen den Gebäuden, dies es beizubehalten gilt.

Die hohe Hitzebelastung im Umfeld des Hauptbahnhofs resultiert aus der großen Baumasse sowie dem hohen Versiegelungsgrad. Im Schatten der hohen Gebäude ist es zu den entsprechenden Tageszeiten trotzdem kühler. Für eine bioklimatische Aufwertung in Verbindung mit Aufenthaltsqualität empfiehlt sich eine Begrünung



der öffentlichen Räume (→ M02 Öffentliche Grünräume schaffen). Im Einzelfall muss geprüft werden, inwiefern Entsiegelung, Dachbegrünung und Fassadenbegrünung möglich ist (→ M04, M17, M18). Als Verkehrsraum sollte die Fußgängerzone im Innenstadtbereich flächendeckend zumindest teilverschattet gestaltet sein. (→ M05 Verkehrsraumgestaltung). In Stadtvierteln mit überwiegender Blockrandbebauung ist die Entsiegelung und Begrünung der Höfe und Stellplatzflächen ein wirksames Mittel zur Schaffung eines angenehmen Bioklimas (→ M01 Innen-/Hinterhofbegrünung).

In der Nacht sind die Wohngebiete am Stadtrand oftmals relativ kühl. Hier muss die Kaltluftversorgung durch das Beibehalten von lockerer Bebauungsdichte und geringem Versiegelungsgrad gesichert werden. Vor allem in den Bereichen der bedeutenden Kaltluftleitbahnen und flächenhaften Kaltluftabflüsse ist es für deren Sicherstellung entscheidend, bauliche Strömungshindernisse zu vermeiden (→ M12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, Strömung und Durchlüftung).

Gewerbegebiete können durch ihre großen versiegelten Flächen am Tage eine hohe Hitzebelastung aufweisen. Besonders in Bereichen mit hohem Besucheraufkommen verringern Maßnahmen zur Verschattung die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Ggfs. kann durch Sonnenschutz an den Gebäuden die thermische Belastung in den Innenräumen reduziert werden (→ M18: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen).

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je grösser die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Die Ems fließt direkt durch das Stadtzentrum von Rheine, und bietet vor allem in Kombination mit den Grünflächen der Emsauen kühle Bedingungen am Tage. Der Dortmund-Ems-Kanal verläuft außerhalb des Stadtkerns, und bewirkt dort für Ausflügler und Anwohner sowie die angrenzenden Gewerbegebiete am Tage in direkter Nähe fühlbar kühlere Temperaturen im Vergleich zu angrenzenden offenen Freiflächen. Unter den weiteren kleineren Fließgewässern hebt sich der Hemelter Bach mit seinen oftmals angrenzenden grünen Erholungsflächen hervor. Der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingeauster Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern ist stets zu berücksichtigen. Auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks bieten eine hohe Aufenthaltsqualität an heißen Tagen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.



Strukturreiche, gut wasserversorgte Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität. Auch auf kleineren Flächen zwischen der Bebauung entsteht durch entsprechende Grün-Gestaltung günstiges Mikroklima (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Parks und Grünflächen können neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen). Ein gutes Beispiel zur Umsetzung ist die zentrale Grünfläche im geplanten Wohngebiet der ehemaligen Dammloup-Kaserne, welche sich nach Süden öffnet und somit die vom Waldhügel heranfließende Kaltluft aufnimmt und ins Quartier verbreitet.

Insbesondere die Waldgebiete stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar. Darüber hinaus sind aber auch Parkanlagen und Grünflächen innerhalb der Stadt, wie zum Beispiel der Stadtpark, der Waldhügel, der Walshagenpark, der Friedhof Königsesch zu bewahren und ggfs. neu zu entwickeln (→ M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen).

Bäume (und Sträucher) übernehmen neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter weniger verschatten und geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben, was zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Treibhausgasemissionen führen kann. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. Stadt Jena 2016).

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern oder auch Arbeitszimmern und Büroräumen der sommerliche Hitzeintrag minimiert wird (→ M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von



Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M16, M17, M19, M20).

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden, insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung. In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei aus stadtklimatischer Sicht eine weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M14: Entdichtung / Rückbau). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepassten Nachverdichtungsvorhaben nicht zwangsläufig entgegenstehen. Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen bzw. -parkhäuser) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Straßenraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren (→ M11: (Temporäre) Saisonale klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume).



Tabelle 26: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Rheine

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
<p>01 Innen-/Hinterhofbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Erhöhung der Aufenthaltsqualität Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Innen- und Hinterhöfe, vorrangig im Altstadtkern 	
<p>02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten) 	

Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: Jan Weber-Ebnet)

Bild: In der Altstadt, Neustadt an der Weinstraße



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>03</p>	<p>Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption ▪ Baumaterialien, die wenig Wärme speichern 	
<p>Wirkung</p>		<p>Räumliche Umsetzung</p>	<p>Bild: Helle Fassade in Ulm</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand) ▪ ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	
<p>04</p>	<p>Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) ▪ Anzahl an oberirdischen Stellplätzen verringern zugunsten von Grünflächen 	
<p>Wirkung</p>		<p>Räumliche Umsetzung</p>	<p>Bild: Rasengittersteine, Parkplatz in Lüneburg</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe 	



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>05</p> <p>Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils entlang von Fuß- und Fahrradwegen (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren 	 <p>Bild: Straßengestaltung in Amsterdam</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsiegelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	
<p>06</p> <p>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten) ▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen 	 <p>Bild: Am Daniel-Meiningers-Platz in Neustadt an der Weinstraße</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld 	



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>07</p>	<p>Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	<p>Bild: Hetzelanlage, Neustadt an der Weinstraße</p>
<p>08</p>	<p>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltfluthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen, Parks (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	<p>Bild: Stadtpark, Rheine</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen ▪ Auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks bieten hohe Aufenthaltsqualität ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend ▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen 	<p>Bild: Wasserspiele vor dem Hauptbahnhof in Hannover</p>
<p>10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze 	<p>Bild: Regenwasserteich, Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: M. Lübbecke)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>11</p> <p>(Temporäre) Saisonale klimaangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen ▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)



Bild: „Wanderbaumallee“ in Hannover

MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>12</p> <p>Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) ▪ Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung ▪ Reduktion des Wärmestaus 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Neubau, Gebäudekomplexe ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

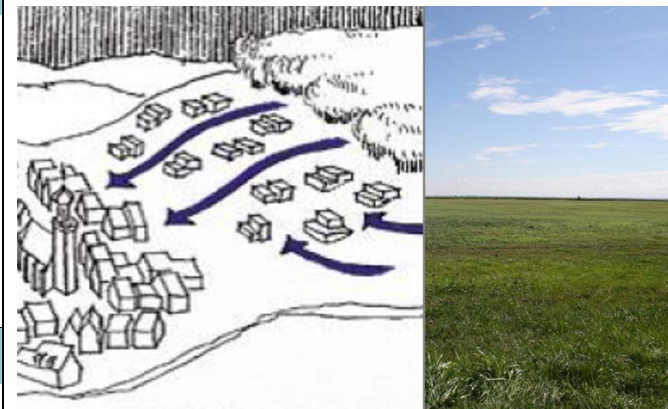


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>13</p>	<p>Optimierung der Gebäudety- pologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen bzw. Freiflächen Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht 	 <p>Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.), Zürich, 2020.)</p>
<p>Wirkung</p>	<ul style="list-style-type: none"> Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks sowie am Stadtrand angrenzend zu Kaltluftliefergebieten 	
<p>14</p>	<p>Entdichtung (Rückbau)</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen 	 <p>Bild: Symbolbild Rückbau</p>
<p>Wirkung</p>	<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Schaffung von grünen Erholungsräumen Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen Garagen Lagerhallen ggf. Industrie- und Gewerbebrachen Bahnanlagen 	



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>15</p> <p>Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Freihaltung großräumiger, möglichst wasserversorgter und durch flache Vegetation geprägter Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Parklandschaften, die Einfluss auf den lokalen Kaltlufthaushalt haben ▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft
	<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung ▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung ▪ Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage
<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen 	



Bild: Timmermannufer an der Ems, Rheine

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>16</p> <p>Dachbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)
	<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und damit Synergien zum Klimaschutz ▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich ▪ Erhalt oder Schaffung von Naturraum und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität
<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Flachdächer, ▪ ggf. flach geneigte Dächer ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; sofern rechtlich zugelassen) 	



Bild: Symbolbild Dachgrün (Quelle: J. Gerstenberg / pixelio)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>17 Fassadenbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen) 	<p>Bild: Fassadenbegrünung in Berlin-Shöneberg</p>
<p>18 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand) 	<p>Bild: Paul-Gossen-Str. in Erlangen</p>



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>19</p>	<p>Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme 	
<p>Wirkung</p>		<p>Räumliche Umsetzung</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs ▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Bestand) 	<p>Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)</p>
<p>20</p>	<p>Technische Gebäudekühlung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung ▪ Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird ▪ Erdkältenutzung ▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden 	
<p>Wirkung</p>		<p>Räumliche Umsetzung</p>	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können 	<p>Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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



Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums.



7.1 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta)Daten und steht der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (QGIS) zur Verfügung.

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

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

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte, welche als QGIS-Projekt vorliegt. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf dem vektorbasierten Datensatz (shapefile), in dem alle relevanten Informationen zu jeder der über 9.000 Teilflächen enthalten sind.

Sämtliche Kartenwerke sind jeweils als QGIS Projekt aufbereitet:

- Rasterbasierte Modellergebnisse
- Klimaanalysekarten
- Bewertungskarten
- Planungshinweiskarte

Folgende Geodaten im Vektorformat (shape) bzw. Rasterformat (tif) gehören zum Gesamt-Datenpaket der Stadtklimaanalyse:

Vektorformat (Shape)

- Basisgeometrie der Bewertungsflächen, flächendeckend für das gesamte Stadtgebiet, für die Ist-Situation sowie das Zukunftsszenario. Für jede Teilfläche Informationen zum Flächenmittelwert der Klimaparameter, die Bewertung Tag / Nacht sowie die Kategorisierung für die Planungshinweiskarte. Die Erläuterung zur Attributtabelle erfolgt in einem separaten Dokument.
- Punkt-Shapes mit nächtlichen Strömungsfeldern (Geschwindigkeit und Richtung) in verschiedenen Auflösungen (5 m, 20 m 50 m, 100 m)
- Gebäude
- Gewässer (als zusätzlicher Kartenlayer für Gewässerflächen die nicht in der Basisgeometrie erfasst sind)
- Höhenlinien
- Kaltluftentstehungsgebiete
- Stadtgrenze
- Bedeutende Kaltluftabflüsse



Rasterformat (*tif, 5 m Auflösung)

- Eingangsdaten: Nutzung
- Eingangsdaten: Strukturhöhe
- Eingangsdaten: Digitales Geländemodell
- Modellergebnisse, jeweils für Ist-Situation und das Zukunftsszenario
 - PET um 14 Uhr in 1,1 m Höhe [°C]
 - Temperatur um 4 Uhr in 2 m Höhe [°C], sowie auch als Ausschnitt für das Siedlungsgebiet, für die Klimaanalysekarten
 - Kaltluftvolumenstromdichte um 4 Uhr [m³/m/s]
 - Kaltluftproduktionsrate [m³/m²/Stunde]
 - Strömungsgeschwindigkeit um 4 Uhr [m/s]



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.
- 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 — Analysing 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.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik> (Abruf Januar 2023).
- Boden T.A., Marland G., Andres R.J. (2017): Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- 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.
- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen.
- DKRZ - Deutsche Klimarechenzentrum (2023): Die SSP-Szenarien. Online: <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien>
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020a): Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut. Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 12.11.2020.
- DWD (2022a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. 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 (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html.
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- Giorgi F., Jones C., Asrar G. R. (2009): Addressing climate information needs at the regionale 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: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- 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. (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 environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- HLNUG (Hg.) (2022): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – In Vorbereitung*.
- 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 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 F., Müller-Westermeier G., Penda E., Mächel H., Zimmermann K., Kaiser-Weiss A., Deutschländer T. (2013): Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre. *ADV. SCI. RES.*, 10, 99–106
- Kuttler, W. (2013): *Klimatologie*. Paderborn: UTB, 2. Auflage.
- Laurent 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*.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- 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., Kai-numa 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 re-search and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- 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.
- Piani C., Haerter J.O., Coppola E. (2010): Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theor Appl Climatol* 99:187–192
- 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*.
- SANTHOLZ 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*.
- Schär, Ch., Ch. Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- S Jena (2016): Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). *Nature* 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>
- Thiemeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31(10):1530–1544.



UBA (2005): Gesünder Wohnen — Aber wie? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.

UBA (2019): Handbuch für Emissionsfaktoren für Straßenverkehr (HBEFA). Umweltbundesamt.

UBA (2019a): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte.

UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>

UBA – Umweltbundesamt (2022a): Trends der Lufttemperatur. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#steigende-durchschnittstemperaturen-weltweit>

UBA – Umweltbundesamt (2022b): Trends der Niederschlagshöhe. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>

UBA – Umweltbundesamt (2022c): Indikator: Heiße Tage. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>

Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Pretenthaler 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.



GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Hannover, den 09.10.2023

Erstellt von:

Elke Hipler (Diplom Geographie)

Ulrike Vogelsberg (Diplom Meteorologie)

Nadja Krause (M.Sc. Geoinformationstechnologien)

Geprüft von:

Dr. Cornelia Burmeister (Diplom Geographie)

Die Erstellung der Klimaexpertise erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Die Klimaexpertise bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei den Auftraggebern.



Anhang

Liste der im Rahmen der Stadtklimaanalyse erstellten PDF-Karten (Format DIN A0)

- **Modellergebnisse**
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Zukunftsszenario
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Zukunftsszenario
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Zukunftsszenario
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Zukunftsszenario

- **Klimaanalysekarten**
 - Klimaanalysekarte Ist-Situation
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario

- **Bewertungskarten**
 - Bewertungskarte Nachtsituation Ist-Situation
 - Bewertungskarte Nachtsituation Zukunftsszenario
 - Bewertungskarte Tagsituation Ist-Situation
 - Bewertungskarte Tagsituation Zukunftsszenario

- **Planungshinweiskarte**



Tabelle A 1: Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (Historical, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM bzw. RCM = Globales bzw. Regionales Klimamodell (Global / Regional Climate Model).

	GCM	RCM	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CCLM	✓	✗	✗	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	✗	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	✗	✗
8	MIROC5	REMO2015	✓	✗	✗	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	✗	✗	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	✗	✗
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	✗	✗
15	MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	✗	✗
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

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

Trend- / Rauschverhältnis	Bewertung
≥ 2,0	sehr stark zunehmend
≥ 1,5 und < 2,0	stark zunehmend
≥ 1,0 und < 1,5	schwach zunehmend
< 1,0 und > -1,0	kein Trend
≤ -1,0 und > -1,5	schwach abnehmend
≤ -1,5 und > -2,0	stark abnehmend
≤ -2,0	sehr stark abnehmend



Tabelle A 3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).

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

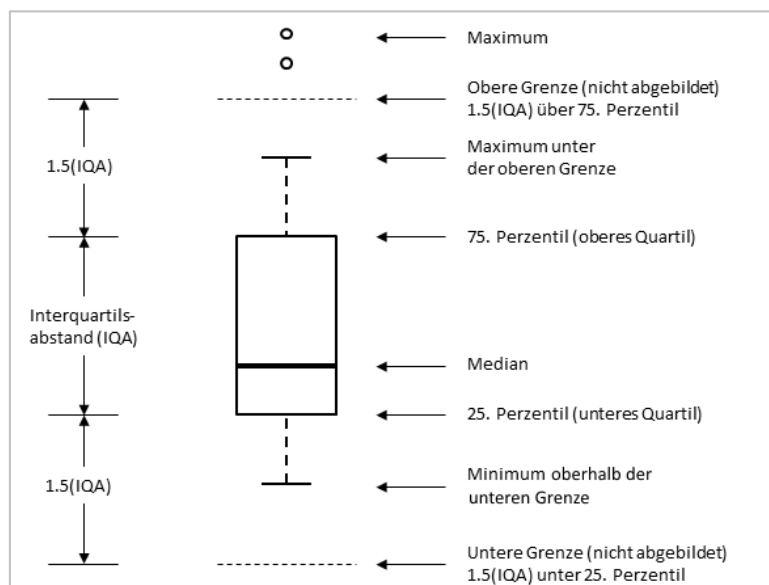


Abbildung A 1: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots