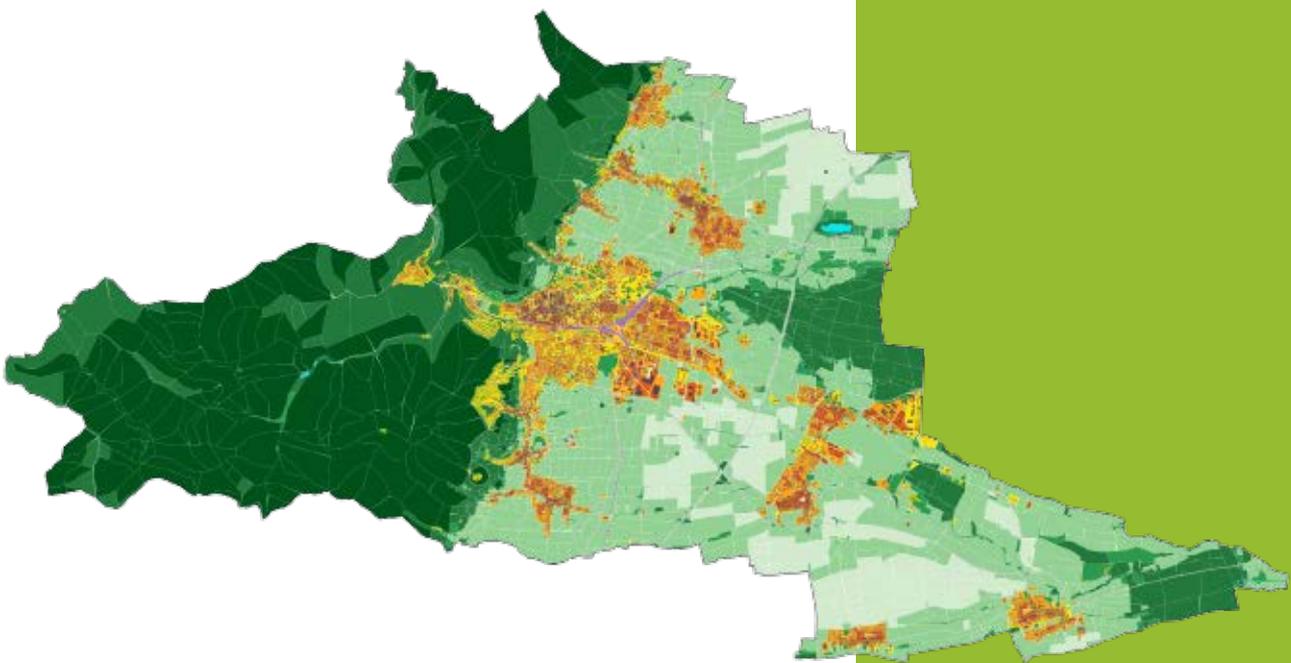


Stadtklimaanalyse für Neustadt an der Weinstraße

Im Rahmen der Neuaufstellung des Flächennutzungsplans 2040



Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover



Im Auftrag der
Stadtverwaltung Neustadt an der Weinstraße
Abt. Stadtplanung
Amalienstr. 6
67434 Neustadt an der Weinstraße

Juli 2023



Auftraggeber

Stadtverwaltung Neustadt an der Weinstraße

Amalienstraße 6

67434 Neustadt an der Weinstraße

Projektbegleitung

Abteilung 220: Stadtplanung

Juli 2023

Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Tel: (0511) 388 72-00

www.geo-net.de





Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Glossar	1
Zusammenfassung	4
1. Hintergrund und Anlass	10
2. Fachliche Grundlagen	11
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	11
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	15
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	18
3. Klima und Klimawandel im Raum Neustadt an der Weinstraße	22
3.1 Datengrundlage und Methodik	22
3.2 Gegenwärtiges Klima	26
3.3 Zukünftige Klimaveränderungen	29
4. Analysemethoden	33
4.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	33
4.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	40
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	61
6.1 Grundlagen	61
6.2 Geometrische Basis	62
6.3 Bewertungskarten	63
6.4 Planungshinweiskarte	71
6.5 Stadtklimamanagementsystem	87
7. Maßnahmenkatalog zur Reduktion von Wärmebelastung im Stadtklima	93
Quellenverzeichnis	108
Anhang	113



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	11
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2023A)	12
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)	13
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	14
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	15
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	16
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).....	23
ABBILDUNG 8: KONVENTIENEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.....	26
ABBILDUNG 9: KLIMADIAGRAMM DER STADT NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DEN GEBIETSMITTELWERTEN DER DWD DATEN (NACH DWD 2022B).....	27
ABBILDUNG 10: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2021 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B).....	27
ABBILDUNG 11: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE ($T_{MAX} \geq 30 \text{ }^\circ\text{C}$) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B).....	28
ABBILDUNG 12: SAISONALE ABWEICHUNGEN VOM MITTELWERT DER BODENFEUCHTE IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE IM ZEITRAUM 1991 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B)	28
ABBILDUNG 13: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (ALLE RCP-SZENARIEN)	30
ABBILDUNG 14: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (RCP 8.5) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 - 2000	30
ABBILDUNG 15: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN DEN DREI ZUKUNFTSPERIODEN IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (RCP 8.5)	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: DER SZENARIO-TRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN 2023)	38
ABBILDUNG 19: DIGITALES GELÄNDEMDELL FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET, MIT GEBÄUDEKULISSE	40
ABBILDUNG 20: ERMITTLUNG VON BAUMSTANDORTEN MITTELS VEGETATIONSINDEX UND STRUKTURHÖHE	42
ABBILDUNG 21: AUSSCHNITT KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG IM 10 M MODELL-RASTER. DIE SCHALLSCHUTZMAUER (ROTE LINE NÖRDLICH DER GLEISFLÄCHE IN DER RECHTEN BILDHÄLFTE) IST ALS ZUSÄTZLICHE INFORMATION IN DIE MODELLIERUNG EINGEGANGEN.	42
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 NEUSTADTER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE).....	51



ABBILDUNG 24: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM UMFELD DER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)	53
ABBILDUNG 25: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM UMFELD DER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)	54
ABBILDUNG 26: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IN DER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)	55
ABBILDUNG 27: EINHEITLICHE 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 DER KERNSTADT VON NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (VERKÜRZTE LEGENDE). KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE).....	60
ABBILDUNG 30: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	62
ABBILDUNG 31: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008)	63
ABBILDUNG 32: SCHEMA DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG VON FLÄCHEN IM AUSGLEICHSPRAUM IN DER NACHT	66
ABBILDUNG 33: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“). VERKÜRZTE LEGENDE	68
ABBILDUNG 34: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO „SCHWACHER KLIMAWANDEL“, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“). VERKÜRZTE LEGENDE	70
ABBILDUNG 35: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA. VERKÜRZTE LEGENDE	75
ABBILDUNG 36: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR EINEN SIEDLUNGSBEREICH ENTLANG DES MANDELINGS (DAS STRÖMUNGSFELD IST HIER AUF 25 M RASTERWEITE AGGREGIERT)	79
ABBILDUNG 37: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION (DAS STRÖMUNGSFELD IST HIER AUF 25 M RASTERWEITE AGGREGIERT). VON LINKS NACH RECHTS: IST-SITUATION, ZUKUNFTSSZENARIO SCHWACHER KLIMAWANDEL, ZUKUNFTSSZENARIO STARKER KLIMAWANDEL.	79
ABBILDUNG 38: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN (TAGSITUATION). VON LINKS NACH RECHTS: IST- SITUATION, ZUKUNFTSSZENARIO SCHWACHER KLIMAWANDEL, ZUKUNFTSSZENARIO STARKER KLIMAWANDEL.	80
ABBILDUNG 39: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR DEN BEREICH UM DEN GRÜNZUG WALLGASSE – BEREICH ZWISCHEN WALDORFSCHULE UND SCHUBERT-SCHULE (SCHWARZ UMRANDET IN DER MITTE DER ABBILDUNG)	81
ABBILDUNG 40: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN (TAGSITUATION). VON LINKS NACH RECHTS: IST- SITUATION, ZUKUNFTSSZENARIO SCHWACHER KLIMAWANDEL, ZUKUNFTSSZENARIO STARKER KLIMAWANDEL.	81
ABBILDUNG 41: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN (NACHTSITUATION). VON LINKS NACH RECHTS: IST- SITUATION, ZUKUNFTSSZENARIO SCHWACHER KLIMAWANDEL, ZUKUNFTSSZENARIO STARKER KLIMAWANDEL.	82
ABBILDUNG 42: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE FÜR EIN GEWERBEGEBIET (VIOLETT GESTRICHELT UMRANDET IN DER MITTE DER ABBILDUNG)	83
ABBILDUNG 43: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM WESTEN VOM ORTSTEIL GEINSHEIM (PINK GESTRICHELT UMRANDET IN DER MITTE DER ABBILDUNG)	84



ABBILDUNG 44: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHE ZWISCHEN DAMMSTRAÙE UND WEINSTRAÙE IM ORTSTEIL HAMBACH (PINK GESTRICHELT UMRANDET) 85

ABBILDUNG 45: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR DEN BEREICH UM DIE ENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM NORDWESTEN DER KERNSTADT (PINK GESTRICHELT UMRANDET)..... 86

ABBILDUNG 46: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE (QGIS PROJEKT) INNERHALB DES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS 87



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18).....	19
TABELLE 2: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN...	21
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).....	29
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE SOWIE DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN IN NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE (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.....	39
TABELLE 7: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS.....	41
TABELLE 8: IN DIE MODELLEINGANGSDATEN EINGEFLOSSENE B-PLÄNE UND AKTUELLE BAUVORHABEN	43
TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	46
TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT.....	47
TABELLE 11: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	57
TABELLE 12: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	64
TABELLE 13: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT.....	65
TABELLE 14: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	67
TABELLE 15: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	68
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	69
TABELLE 17: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	70
TABELLE 18: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	71
TABELLE 19: KOMBINIERT BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG IN WOHNGEBIETEN SOWIE IN UNBEWOHNTEN GEBIETEN.....	72
TABELLE 20: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.....	73
TABELLE 21: MIT DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN STADTKLIMA IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	74
TABELLE 22: KOMBINIERT 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.....	76
TABELLE 23: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSSRAUMS.	77
TABELLE 24: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSSRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	78



TABELLE 25: ATTRIBUTTABELLE UND ERLÄUTERUNG ZUM VEKTORDATENSATZ (STADTKLIMA_BEWERTUNGSFLAECHEN.SHP).....	88
TABELLE 26: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT NEUSTADT AN DER WEINSTRASSE.	97



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 Neustadt an der Weinstraße erstellt. Die Modellergebnisse und die daraus resultierenden Karten (Klimaanalyse-, Bewertungs- und Planungshinweiskarten) geben Aufschluss über die klimatische Situation in der Stadt. Sie sollen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen, im Zuge der Neuaufrstellung des Flächennutzungsplans 2040 dienen.

Das Hauptprodukt des ca. 1-jährigen Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte mit angebundenem Maßnahmenkatalog, die in einem verwaltungsinternen, ämterübergreifenden Prozess unter Leitung der Abteilung für Stadtplanung 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 Neustadt an der Weinstraße 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 beide Zukunftsszenarien 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 Neustadt zu gewinnen, wurde eine Modellrechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt, um flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet bereitzustellen. Die horizontale Auflösung der Modellierung beträgt 10 m, d.h. das Stadtgebiet von Neustadt an der Weinstraße und Umgebung wird in ein Raster mit einer Gitterweite von 10 m x 10 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. 14 km x 25 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 übergelagerten Wind zugrunde (Tageshöchsttemperatur > 25 °C), die in der Stadtklimatologie typischerweise verwendet wird.

Das zukünftige Stadtklima in Neustadt an der Weinstraße

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen auch die zukünftige Situation im Jahr 2045 in zwei weiteren Klimawandel-Szenarien simuliert. In den Zukunfts-Modellierungen wird die Temperatur aller Höhenprofile zu Beginn der Modellrechnung um 1,0 °C (Szenario „schwacher Klimawandel“) bzw. 1,4 °C (Szenario „starker Klimawandel“) erhöht. Die Temperaturdifferenzen entsprechen den Differenzen für die Sommerperioden zwischen den meteorologischen Perioden 1991 – 2020 im Vergleich zu 2031 – 2060. Grundlage sind die Klimawandel-Szenarien RCP4.5 bzw. RCP8.5 für den Raum Neustadt an der Weinstraße. Zudem wird dem Modell für das Szenario „starker Klimawandel“ eine 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), „Sommerstage“ (Maximaltemperaturen > 25 °C) und „Tropennächten“ (Temperaturen nicht unter 20 °C). So sind für Neustadt an der Weinstraße je nach Klimawandel-Szenario für die Referenzperiode 2041 bis 2070 bis zu 14 mehr „Heiße Tage“ prognostiziert.

Eine städtebauliche Entwicklung wurde in den Zukunftsszenarien bewusst nicht modelliert. Die potenziellen städtebaulichen Entwicklungsflächen sind somit mit ihrer aktuellen Nutzung in die Analysen eingeflossen. Ziel ist, ihre derzeitige stadtklimatische Funktion bzw. Situation zu beurteilen, und dies als Bewertungsgrundlage für die zukünftige Planung zu nutzen.

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 Lage am Haardtrand übt einen großen Einfluss auf die nächtliche Kaltluftströmung im Stadtgebiet von Neustadt an der Weinstraße aus. Im Übergang von den Waldgebieten und Weinhängen zur Siedlung fließen



die größten Kaltluftmengen des Stadtgebietes. Die kühle Ausgleichsströmung ist bis ins Stadtzentrum feststellbar. Siedlungsgebiete in Waldnähe unterliegen sowohl in der Nacht als auch am Tage den günstigsten bioklimatischen Bedingungen. Die größten Kaltluftmengen werden allerdings auf den ebenen landwirtschaftlichen Flächen um die außerhalb der Kernstadt liegenden Ortsteile produziert, da die landwirtschaftlichen Flächen außerhalb der Kernstadt am stärksten auskühlen. Aufgrund des fehlenden Gefälles setzen die Luftpaketes sich dort etwas weniger und langsamer in Bewegung, um die über den erwärmten Siedlungsgebieten aufsteigende Luft auszutauschen.

Die höchsten nächtlichen Wärmebelastungen treten vorwiegend in der Altstadt und in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (Weinstraßenzentrum, Roßlauf, Altenschemel), aber auch im Umfeld einiger dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen in den Zentren der umliegenden Ortsbezirke auf. Charakteristisch für viele Wohnquartiere ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßenbereich und in den – in Neustadt oftmals großflächigen – 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. Analog zur Nachtsituation sind die Altstadt und die Gewerbegebiete auch am Tag mit am höchsten belastet, mit Ausnahme der Bereiche, die zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr im Schatten von Gebäuden liegen. Zusätzlich sind Bereiche mit hoher oder sehr hoher Hitzebelastung am Tage kleinräumig in allen Stadtteilen zu lokalisieren.

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 eine Karte für die Ist-Situation sowie je eine Karte für beide Zukunftsszenarien 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 Wärmeinseleffekt 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 Neustadt an der Weinstraße eine wichtige Rolle spielen. So sind am Haardtrand und in den Talausgängen bedeutende flächenhafte Kaltluftabflüsse sowie Kaltluftleitbahnen hervorgehoben. Des Weiteren sind die Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktionsrate mittels Schraffur dargestellt.



Die Klimaanalysekarte gibt zudem eine quantitative Abschätzung für Status Quo und die Zukunftsszenarien: 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 eignen.

Bewertungskarten

Aufbauend auf den Modellergebnisse wurden sechs „Bewertungskarten“ erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien „Ist“ und „Schwacher bzw. Starker Klimawandel“ 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 in den Zukunftsszenarien aus. Während in der Ist-Situation ca. 15 % der Flächen als hoch oder sehr hoch (nachts) bioklimatisch belastet klassifiziert sind, ordnen sich im Szenario „schwacher Klimawandel“ bereits 58 %, und im Szenario „starker Klimawandel“ ca. 67 % 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 nicht 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 für die Zukunftsszenarien erhöhte ins Modell eingegebene Start-Lufttemperatur sowie die reduzierte Bodenfeuchte wirkt 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. 18 % in der Ist-Situation auf ca. 38 % im Szenario „schwacher Klimawandel“ und ca. 60 % im Szenario „starker Klimawandel“.



Die Bewertungskarten geben eine Einschätzung der klimatischen Situation auf einer bestimmten Fläche für den Tag, die Nacht und für den Status Quo und die Zukunftsszenarien 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 eine 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), ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

In der Planungshinweiskarte werden die **potenziellen städtebaulichen Entwicklungsflächen** sowohl für Gewerbe- als auch für Wohnnutzung mit einer Umrandung dargestellt. Sämtliche Flächen sind aktuell dem Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) zuzuordnen. Für eine städtebauliche Entwicklung besteht bei den meisten der Flächen – unter angenommener moderater Art und Weise der Bebauung – kein bis nur geringes Konfliktpotenzial aus bioklimatischer Sicht. Lediglich drei Flächen, welche sich innerhalb von bestehenden Wohngebieten befinden, sind mit mittlerem Konfliktpotenzial zu bewerten (vgl. Kapitel 6.4.4). Für die Tag-Situation lassen sich zumindest auf den derzeit baumlosen Grünflächen mittels geeigneter Maßnahmen (Bäume, geringe Versiegelung etc., Anlegen von kühlen Aufenthaltsräumen im Freien) Verbesserungen herbeiführen.

Eine endgültige Bewertung einzelner Flächen kann jedoch erst erfolgen, wenn flächenkonkrete Planungen vorliegen würden.

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

Dem Werk der Stadtklimaanalyse für Neustadt an der Weinstraße 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 Neustadt an der Weinstraße auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 Jahren anzustreben.



1. Hintergrund und Anlass

In Zeiten des Klimawandels lassen sich die Folgen insbesondere in Form von häufigeren Extremwetterereignissen oder Hitzeperioden bereits deutlich erkennen. Neben dem Klimaschutz durch Treibhausgasreduktion weist besonders die Klimaanpassung in Städten eine hohe Relevanz auf. Vor allem die Kernstadt 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 „menschenswürdige 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 Neustadt an der Weinstraße sowie die prognostizierten Verhältnisse für die Periode 2031 - 2060 darstellen und abschließend bewerten. Die Ergebnisse sollen als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen, im Zuge der Fortschreibung des Flächennutzungsplans 2040 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.

Die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse sollen dazu dienen, das Schutzgut Klima in zukünftigen Planungen ganzheitlich zu berücksichtigen und klimatisch bedeutsame Fläche entsprechend zu berücksichtigen. Ziel ist es dabei nicht, zukünftige, in Diskussion befindliche Baugebiete im Flächennutzungsplan 2040 ganzheitlich auszuschließen, sondern diese möglichst klimaverträglich zu gestalten.

Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 10 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des 10 m x 10 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 Neustadter Stadtklimas.

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 gelayouteten 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).

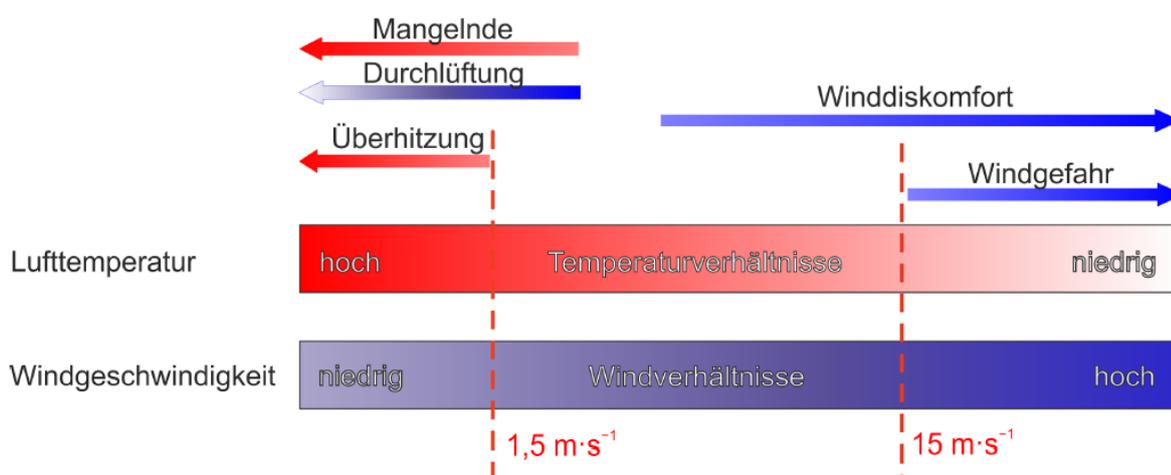


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

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 Auswerteroutinen 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.

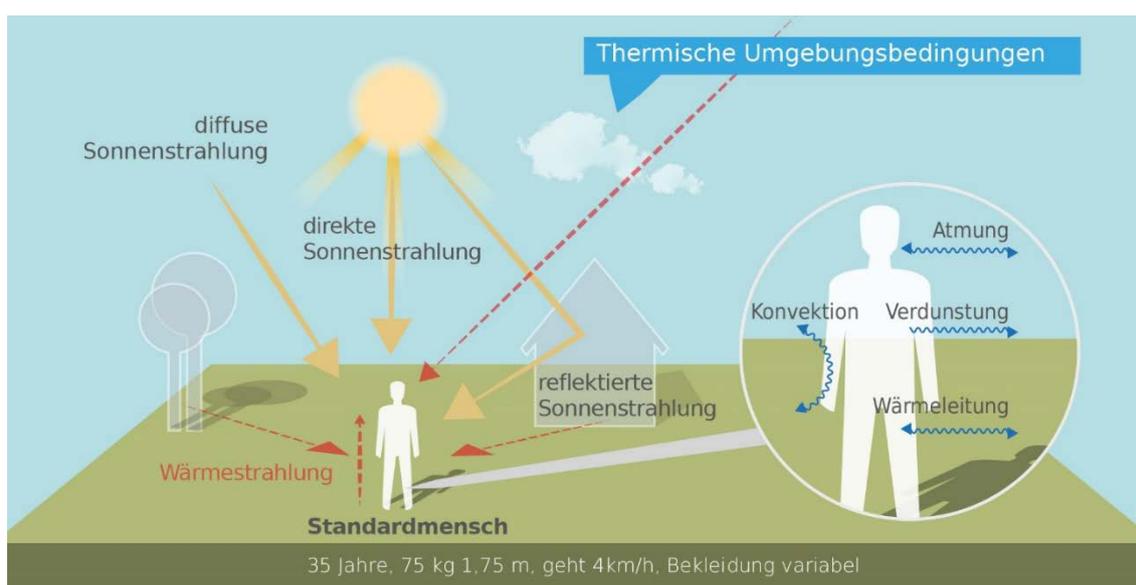


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a)

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.

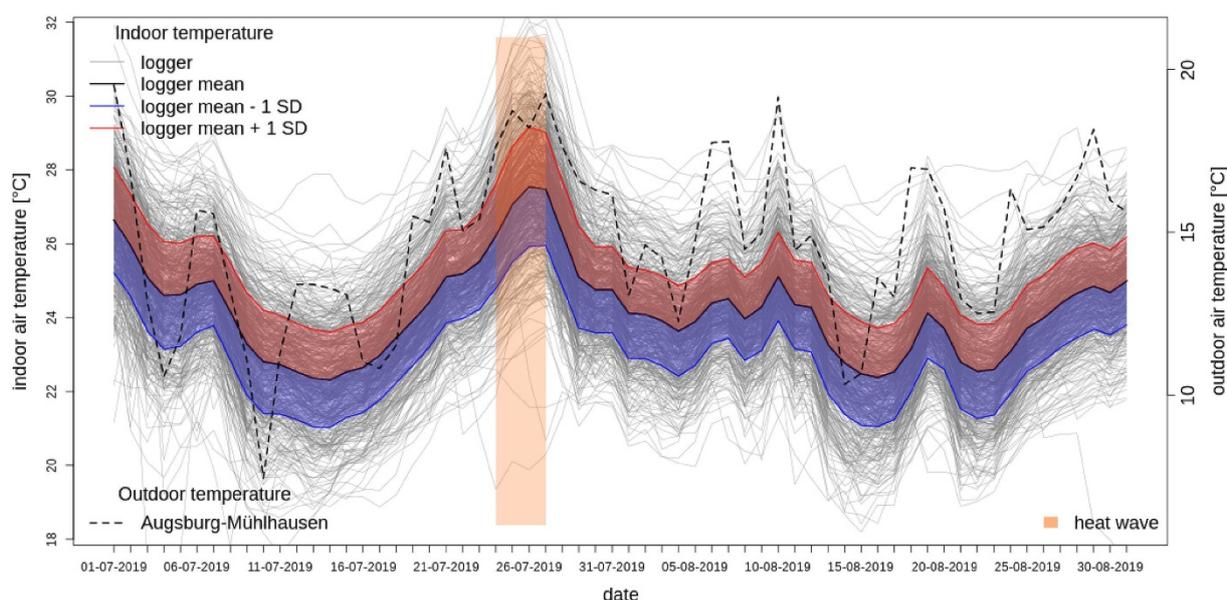


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

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 $> 20\text{ °C}$ 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).

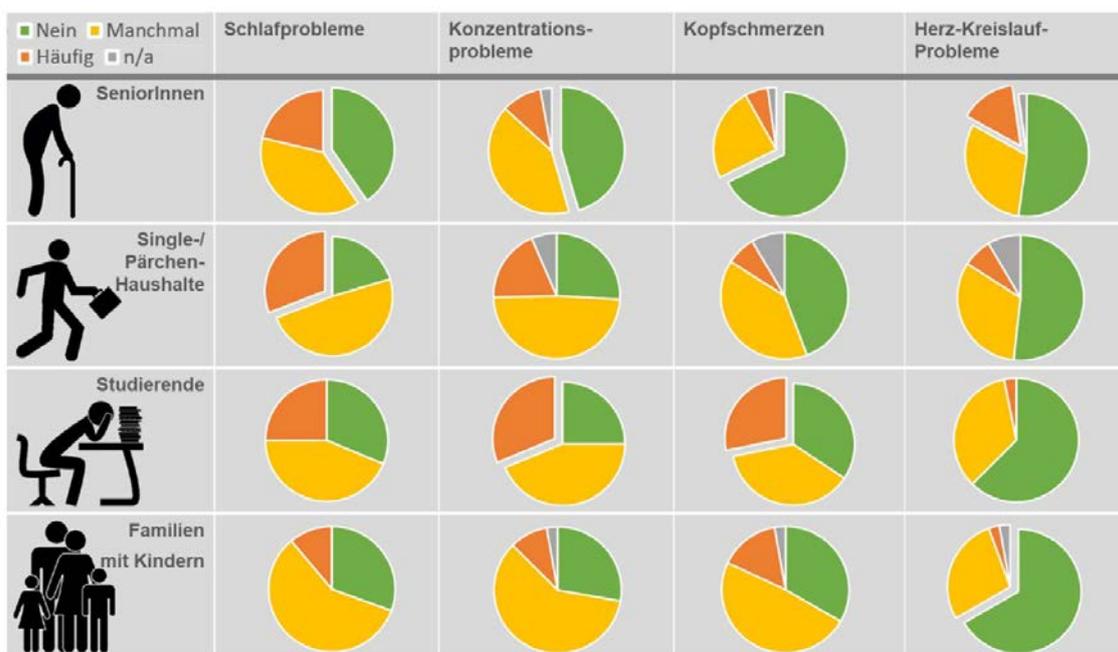


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

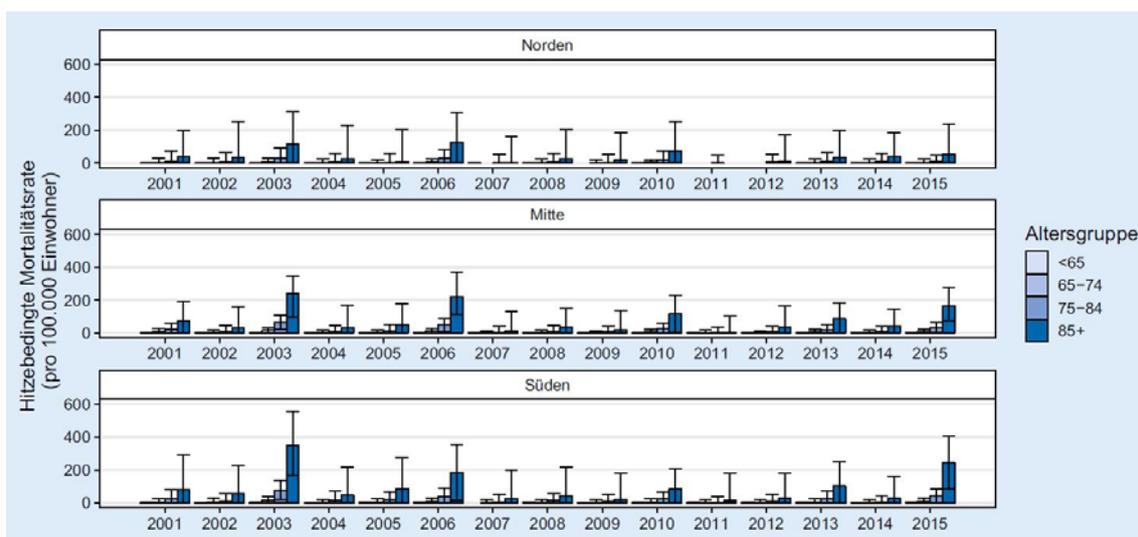


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

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 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 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 Bebauungsart 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/ -höhe, Bebauungsart, 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 Neustadt an der Weinstraße

3.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Beobachteter Klimawandel

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Neustadt an der Weinstraße 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 Neustadts 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 Messungenauigkeiten 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 Neustadt 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 Neustadt 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).

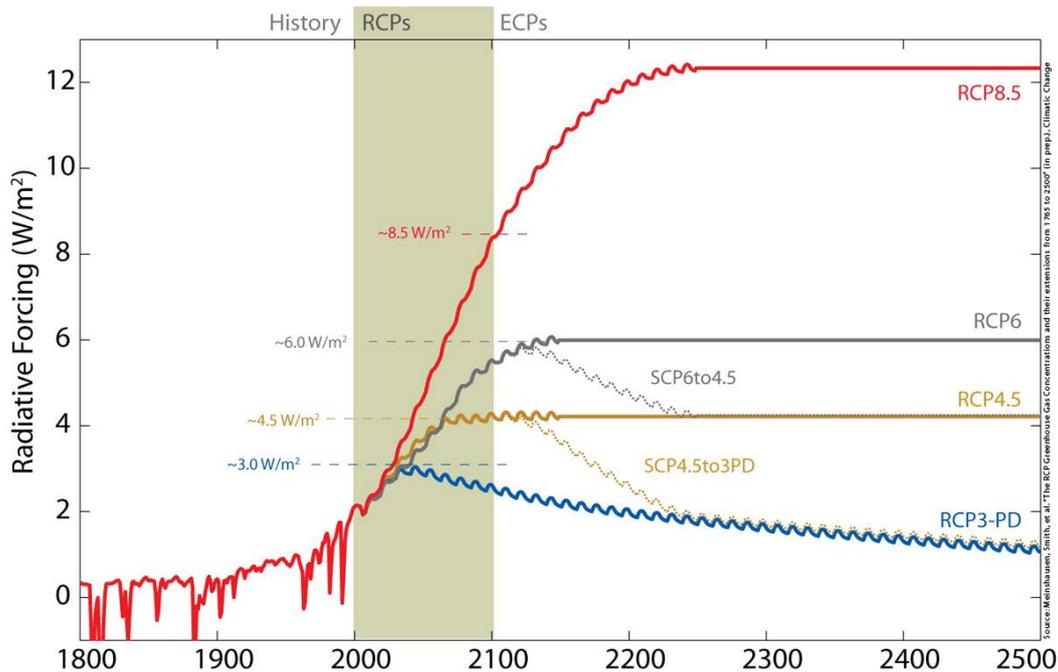


Abbildung 7: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100² (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)

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 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).

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



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 $2,6 \text{ W/m}^2$ ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C -Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-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 °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. $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ für Sommertage (schwollenwertbasiert) 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 Neustadt an der Weinstraße wurden schwollenwertbasierte 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 schwollenwertbasierten 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 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 Be-

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



obachtungsdaten 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. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (Abbildung 8).

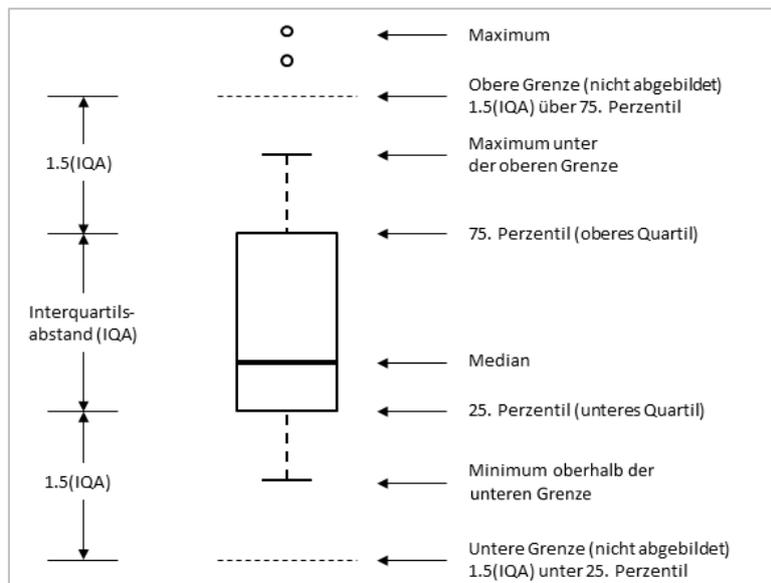


Abbildung 8: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

3.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Neustadt an der Weinstraße liegt im Vorderpfälzer Tiefland, im Übergang zwischen dem pfälzischen Haardt- rand und der nördlichen Rheinniederung. Die Kernstadt liegt am Talausgang des Speyerbachtals, nördlich und südlich schließen sich Gemeindeteile entlang der Hanglagen an. Die relativ niedrige Jahres-Niederschlags- summe von rund 650 mm/Jahr⁴ ist durch die Lage im Lee des Haardtgebirges und die in Mitteleuropa üblichen westlichen Hauptwindrichtungen begründet. Eine weitere Konsequenz dieser geographischen Lage ist der tendenziell geringe Wolkenbedeckungsgrad und eine hohe Anzahl an Sonnenstunden. Die langjährige jährliche Mitteltemperatur im Gebiet von Neustadt an der Weinstraße beträgt 10,7 °C (DWD 2022b), mit Durchschnittswerten von 20 °C in den Sommermonaten (Abbildung 9). Damit ist die Stadt um 1,4 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C (1991 – 2020) (UBA 2022a). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt deutlich unter dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (1991 – 2020) (UBA 2022a).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Neustadt an der Weinstraße – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,8 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 10).

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 Neustadt an der Weinstraße zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 43 auf 55 pro Jahr und die Anzahl an heißen Tagen von 9 auf 14 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 11).

⁴ Die Daten zum aktuellen Klima in Neustadt beziehen sich, soweit nicht anders angegeben, auf die Gebietsmittelwerte der DWD Grids und umfassen den Zeitraum 1990 – 2021

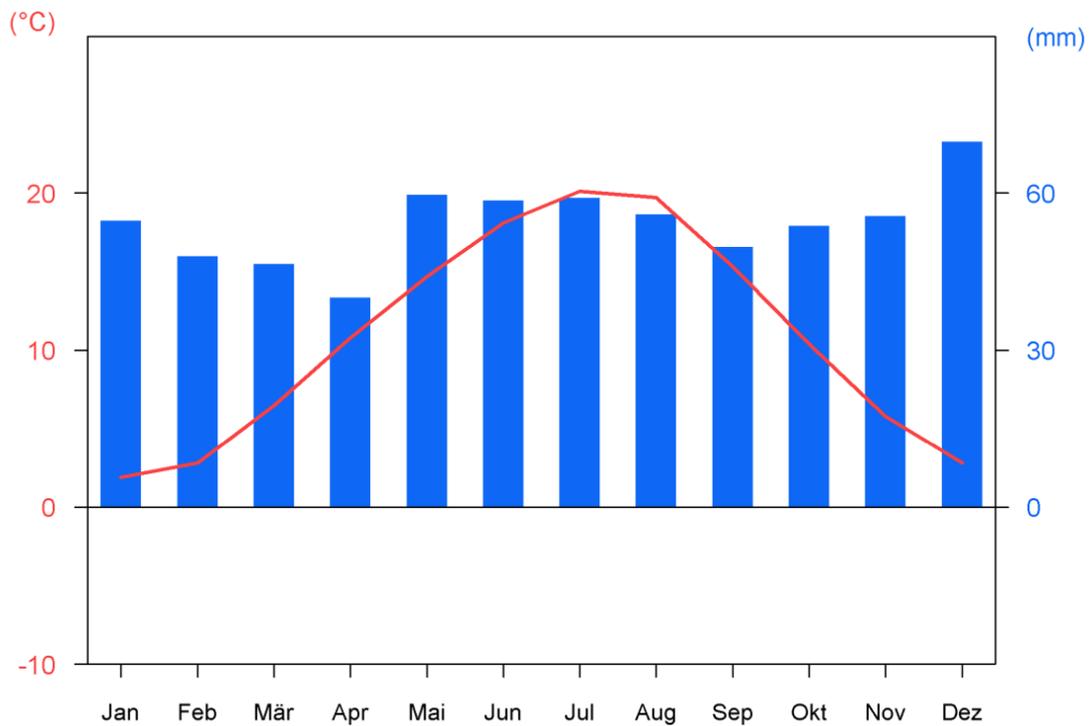


Abbildung 9: Klimadiagramm der Stadt Neustadt an der Weinstraße für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Gebietsmittelwerten der DWD Daten (nach DWD 2022b)

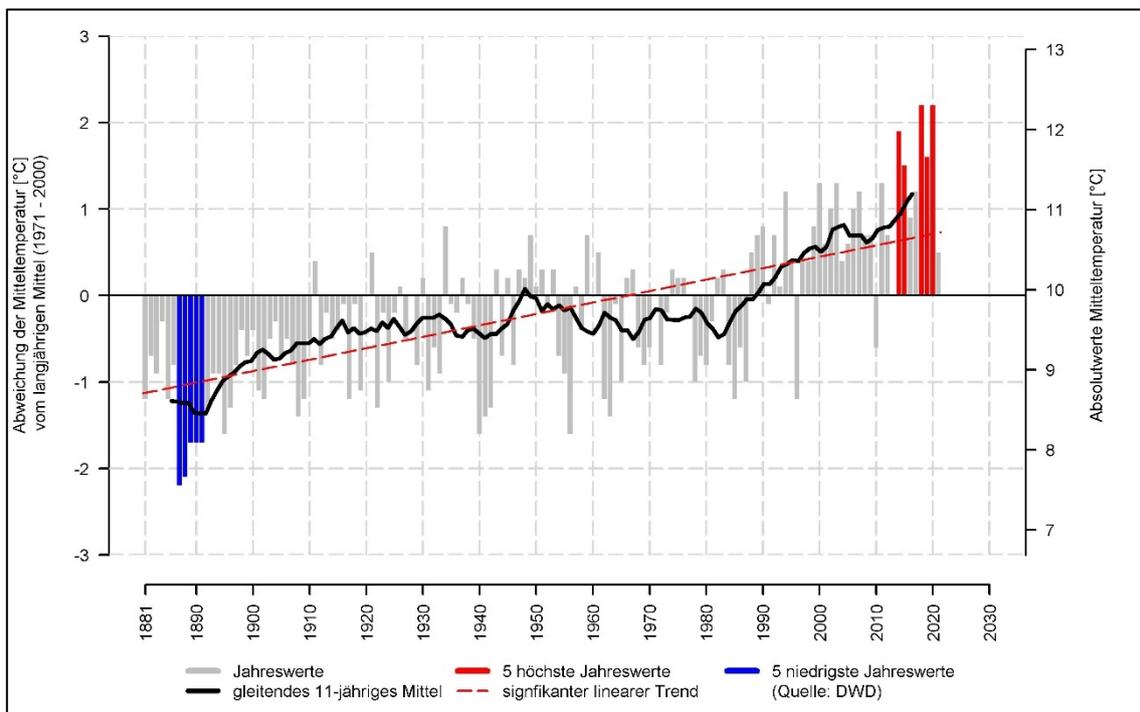


Abbildung 10: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Neustadt an der Weinstraße im Zeitraum von 1881 bis 2021 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2022b)

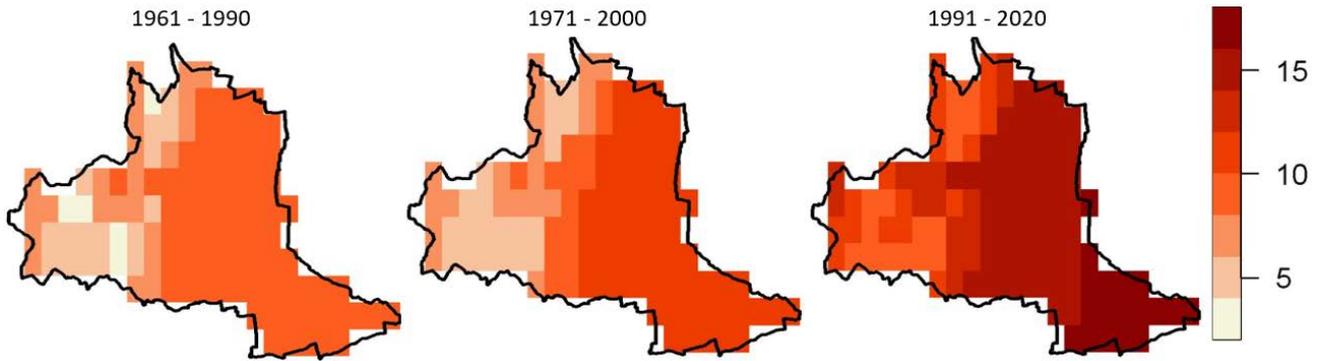


Abbildung 11: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in verschiedenen Perioden in Neustadt an der Weinstraße (eigene Berechnung nach DWD 2022b)

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 Neustadt an der Weinstraße deutlichen Schwankungen, zeigt seit 1991 insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (Abbildung 12). 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 20 % (im Extremfall bis minus 40 %) im Vergleich zum Mittelwert desselben Zeitraums. Im Sommer (orange umrandete Balken in der Abbildung) sind häufigere negative Abweichungen erkennbar als in den anderen Jahreszeiten (graue Balken). 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.

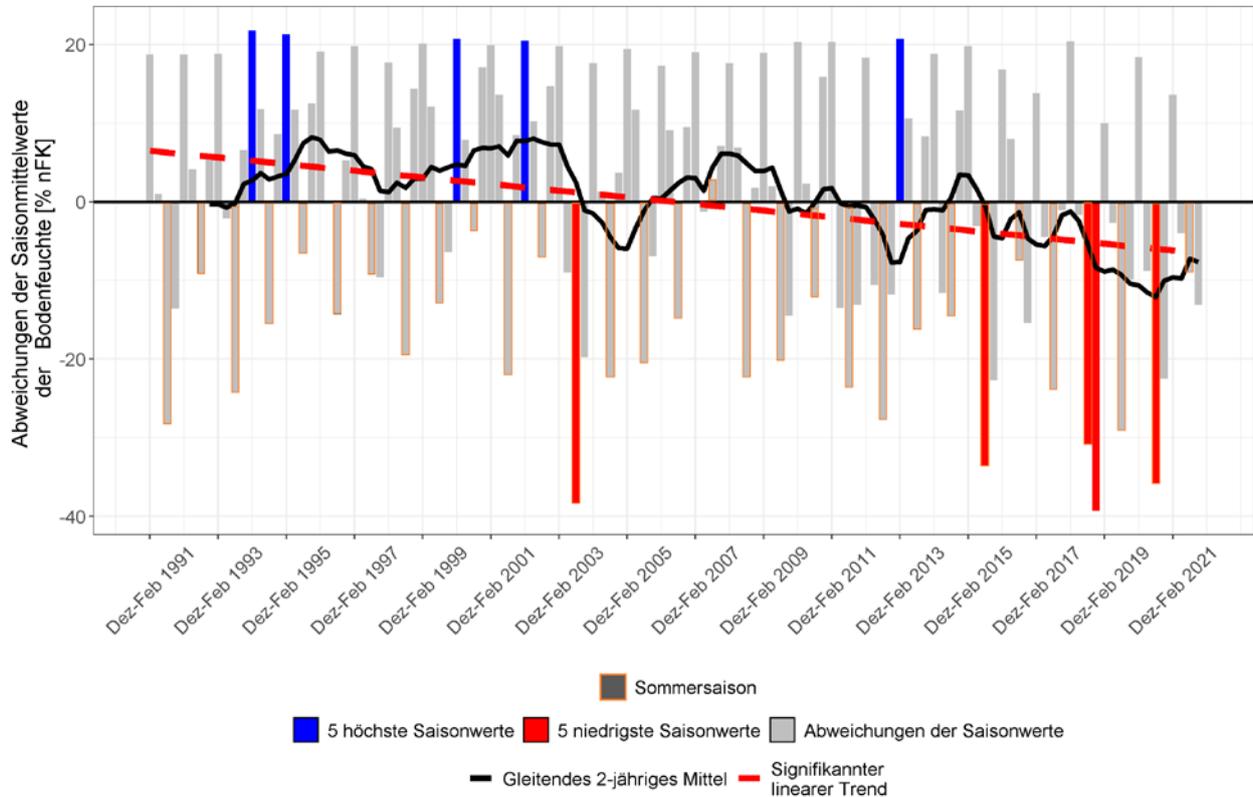


Abbildung 12: Saisonale Abweichungen vom Mittelwert der Bodenfeuchte in Neustadt an der Weinstraße im Zeitraum 1991 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2022b)



3.3 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Neustadt an der Weinstraße 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 Minimumtemperaturen⁵ (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.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Neustadt an der Weinstraße (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	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,1	1,6
	RCP 4.5	0,9	1,4	1,8	1	1,7	2,3	1,5	2,1	2,7
	RCP 8.5	1,5	2,1	2,3	1,8	2,4	2,9	3,0	3,9	4,9
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,1	2,1	2,5	1,2	2,0	2,7	1,5	2,4	3,2
	RCP 4.5	1,8	3,4	4,7	1,7	3,9	6,2	3,6	4,4	6,3
	RCP 8.5	2,7	4,4	5,5	2,4	4,3	6,3	5,3	7,5	9,1
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,0	1,3	2,3	0,7	1,4	2,6	0,8	1,6	2,3
	RCP 4.5	1,0	2,0	2,9	1,1	2,1	3,3	1,7	2,6	3,9
	RCP 8.5	1,7	2,7	3,5	2,5	3,4	4,5	4,3	5,5	8,0

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.

⁵ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

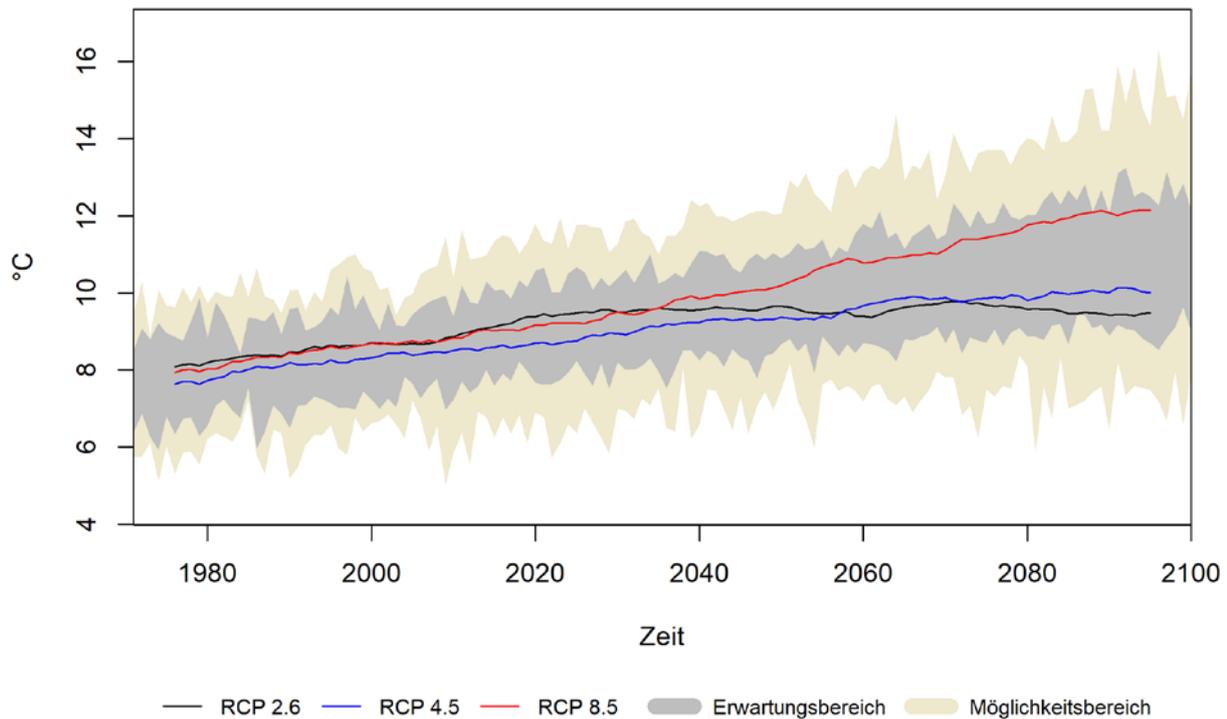


Abbildung 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Neustadt an der Weinstraße (alle RCP-Szenarien)⁶

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).

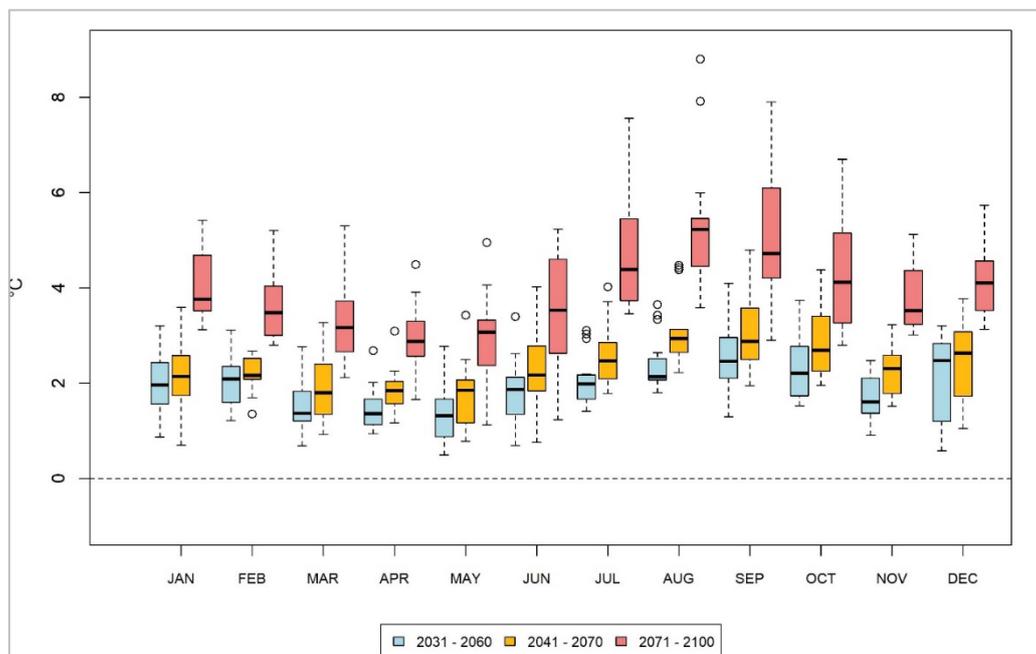


Abbildung 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Neustadt an der Weinstraße (RCP 8.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000

⁶ 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)



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 jähr-liche 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 30 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenz-periode (1971 – 2000) nur 9-mal jährlich auftraten.

Tropennächte (Nächte mit Temperaturen über 20 °C) treten in Neustadt an der Weinstraße derzeit sehr selten auf (im Mittel < 1 Tropennacht pro Jahr). In der mittelfristigen Zukunft (2031 – 2060) bereits 2 - 6 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. Wäh-rend 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 3 - 23 Tropennächte pro Jahr in Neustadt an der Weinstraße möglich. Es ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht er-fassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen eine 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 Tageshöchsttemper-atur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert min-destens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden im Raum Neustadt an der Weinstraße zukünftig länger an-dauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um 1 - 8 Tage (Tabelle 4).

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Neustadt an der Weinstraße (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	10	15	19,9	10,9	12	22	10	12	20
	RCP 4.5	11	16	25	12,5	21	32	17	25	30
	RCP 8.5	18	21	28,5	22,8	32	39	44	49	64
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	3	5	10	4	6	10	5	6	11
	RCP 4.5	6	8	11	7	10	14	9	12	15
	RCP 8.5	9	11	19	11	14	23	23	30	42
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	1	2	4	1	2	4	2	3	4
	RCP 4.5	2	3	4	3	4	6	3	6	9
	RCP 8.5	3	6	7	5	9	10	14	23	30
Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Heiße Tage) [n]	RCP 2.6	1	1	3	1	2	3	1	2	4
	RCP 4.5	1	2	3	2	3	3	2	4	5
	RCP 8.5	2	2	5	3	3	5	4	8	10



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 (ohne Abbildung).

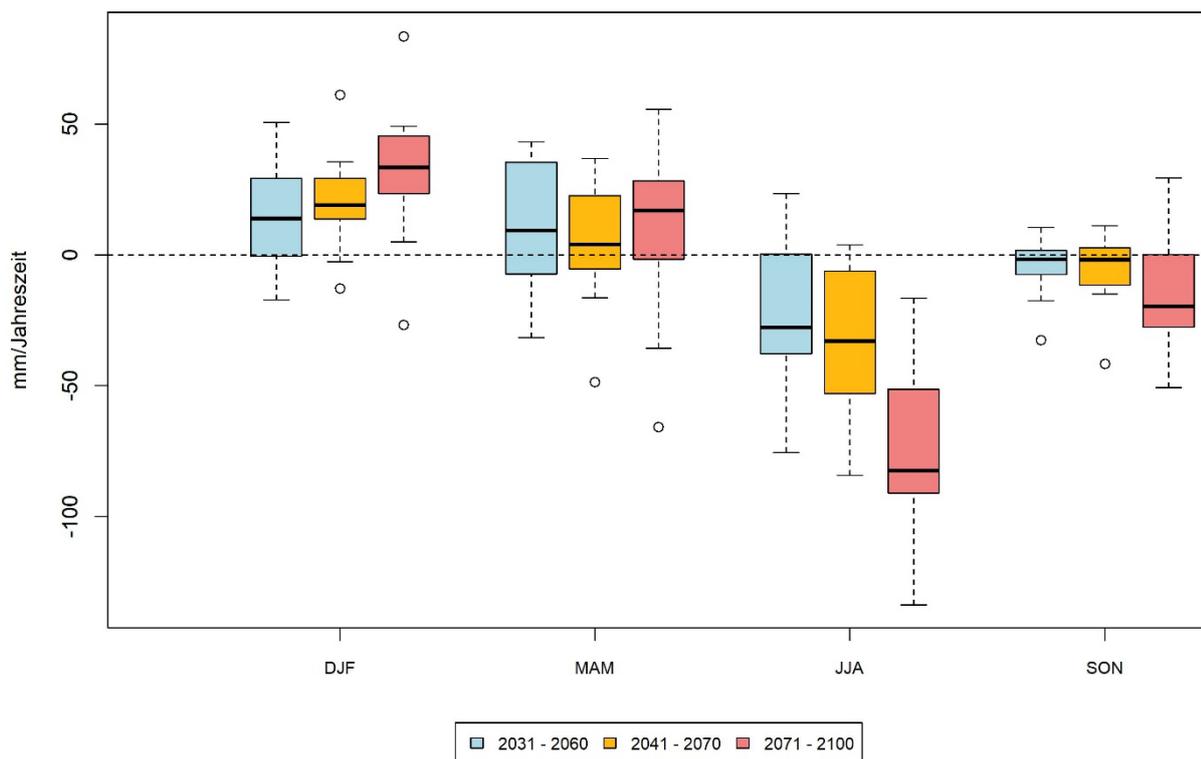


Abbildung 15: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in den drei Zukunftsperioden in Neustadt an der Weinstraße (RCP 8.5)



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 Auswerteroutinen 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 10 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Neustadt an der Weinstraße und angrenzendes Umland rd. 3,3 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	
7	Baum über Versiegelung	individuell
8	Baum über Freiland	individuell
9	naturferner Boden*	0,5
10	Baum auf naturfernem Boden	individuell
11	Solarpanele über niedriger Vegetation	

* 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 100 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, ungebaut 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 ungebaut 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.

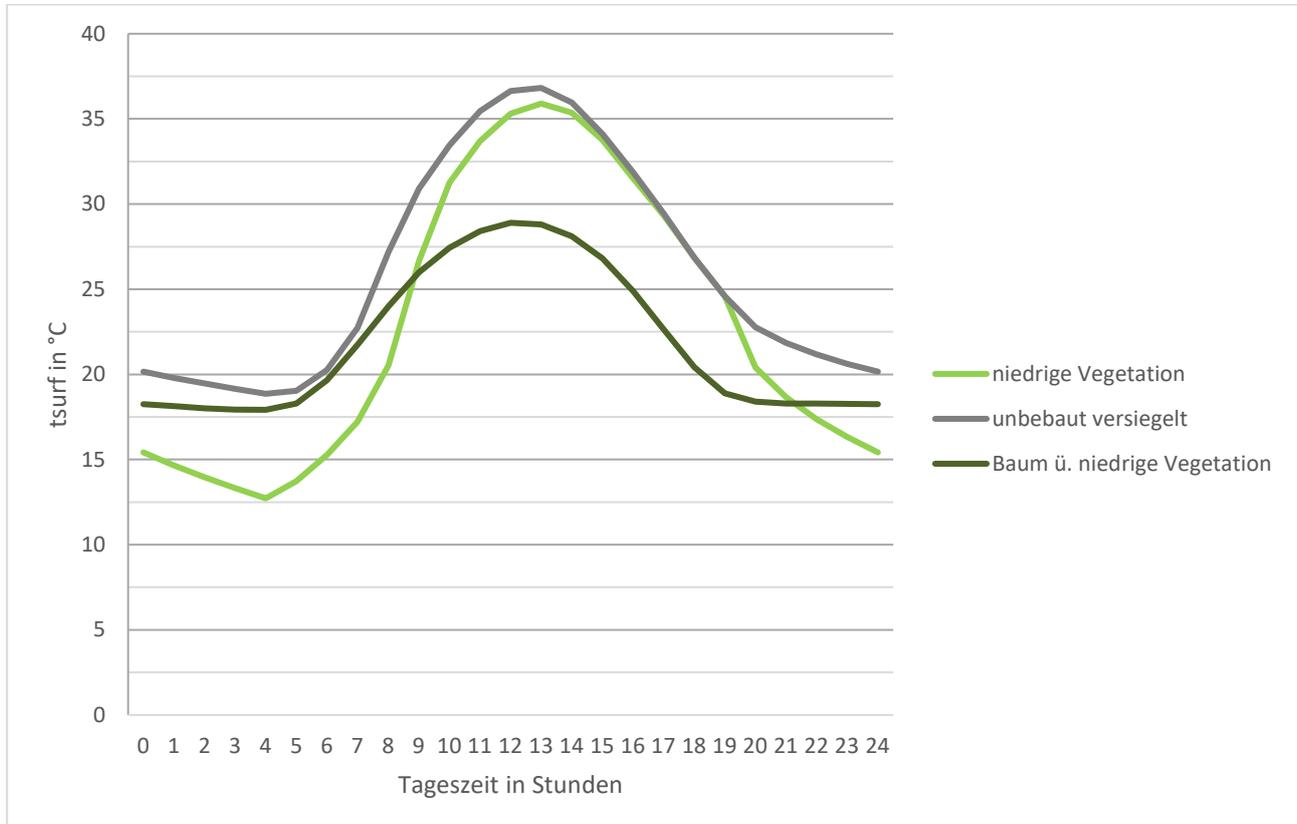


Abbildung 16: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ('Tsurf') für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D



Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige $^{\circ}\text{C}$ 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.

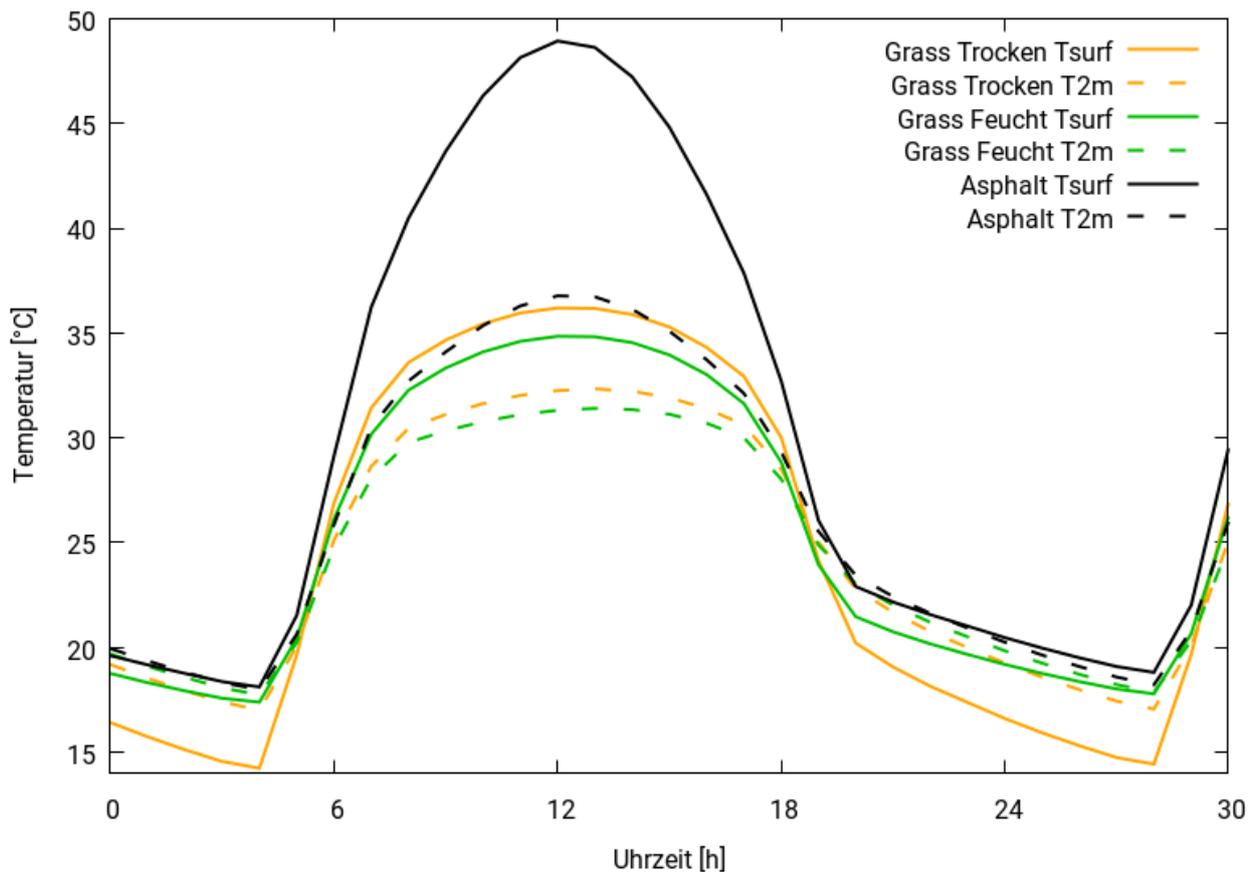


Abbildung 17: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

4.1.1 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die sogenannte Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes, ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten 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.

In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sogenannten Wirkmodellen – hat sich die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

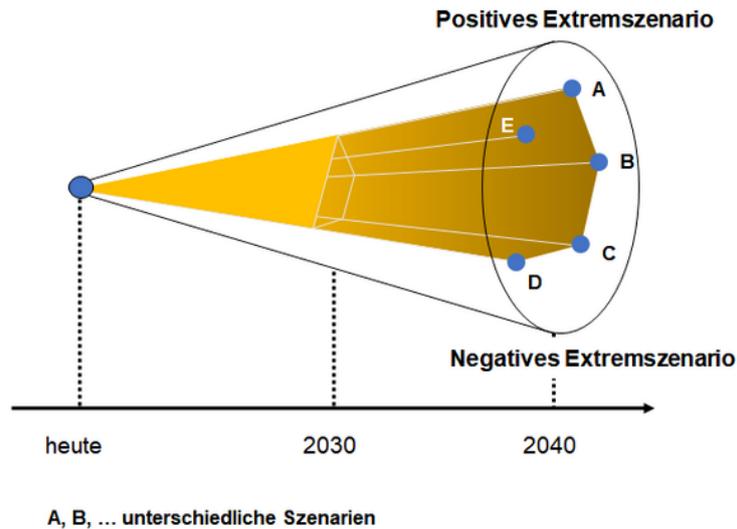


Abbildung 18: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Im vorliegenden Fall wurden zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont ist die Periode 2031 – 2060, mit Fokusjahr 2045. Das Szenario „schwacher Klimawandel“, basiert auf dem Median des RCP-Szenarios 4.5, während das Szenario „starker Klimawandel“ auf Basis des RCP-Szenarios 8.5 (Median) erstellt wurde. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum Referenzzeitraum 1991 – 2020 wurde auf die Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D eingegeben (+1,0 K bzw. +1,4 K).

Für das Szenario „starker Klimawandel“ wurden 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 Szenario „starker Klimawandel“ auf 30 % gesetzt. Im Szenario „schwacher Klimawandel“ wurde die Bodenfeuchte konstant gehalten, entspricht also derjenigen im Referenzszenario / Ist-Situation, von 60 % nFK.

Für die Zukunftsszenarien wurden weder die städtebauliche Entwicklung noch Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation modelliert. Ansatz ist hier, einzig die Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftige bioklimatische Situation zu untersuchen, um entsprechend Maßnahmen zu empfehlen.

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen gingen somit auch in den Zukunftsszenarien mit ihrer aktuellen Landnutzungscharakteristik in die Modellierung ein. Bei der Auswertung der Ergebnisse wird ein besonderer Fokus auf die derzeitige stadtklimatische Funktion dieser Flächen sowie die Untersuchung von Möglichkeiten zur klimagerechten Gestaltung der potenziellen zukünftigen Quartiere gelegt.

Die Entwicklung von Vegetation, besonders von Bäumen in der Stadt (Ausfall durch Hitzestress / Schädlinge / Unwetter einerseits, jährliches Wachstum andererseits) kann aus informationstechnischen Gründen bisher 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 14 B-Pläne und Bauprojekte eingepflegt, die derzeit (ca. 2023) umgesetzt werden (vgl. Tabelle 8).
Szenario 1 „Schwacher Klimawandel“ 2045	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines starken Temperatursignals von 1,0 K im Vergleich zur Referenzperiode „heute“ 1991-2020 (RCP 4.5)
Szenario 2 „Starker Klimawandel“ 2045	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines starken Temperatursignals von 1,4 K im Vergleich zur Referenzperiode „heute“ 1991-2020 (RCP 8.5) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte des Modells von 60 % auf 30 % nFK (nutzbare Feldkapazität)

4.2 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 10 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 Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 336 km² (Abbildung 19), weist also einen fast dreifach so großen Flächeninhalt auf wie das Stadtgebiet selbst (117,09 km²). Das Geländehöhenmodell liegt in einer Auflösung von 1 m vor. Abbildung 19 zeigt im Westen die Ausläufer des Haardtrands bzw. Pfälzerwald, mit Höhenlagen von bis zu 675 m ü. NHN. Das Kaltluftgeschehen im Stadtgebiet von Neustadt an der Weinstraße ist maßgeblich durch die Lage am Haardtrand geprägt, dessen Täler als potenzielle Kaltluftleitbahnen eine wichtige Funktion innehaben. Deutlich ist das Speyerbachtal als Geländeeinkerbung vom Stadtrand in Richtung Westen zu erkennen. An die Weinhänge und – Berge am Rande des Stadtgebietes schließt sich die flache Landschaft der Oberrheinebene an. Die Geländehöhe fällt hier sanft von ca. 200 m ü. NHN am Fuße der Weinhänge bis zu ca. 100 m ü. NHN im Osten des Stadtgebietes.

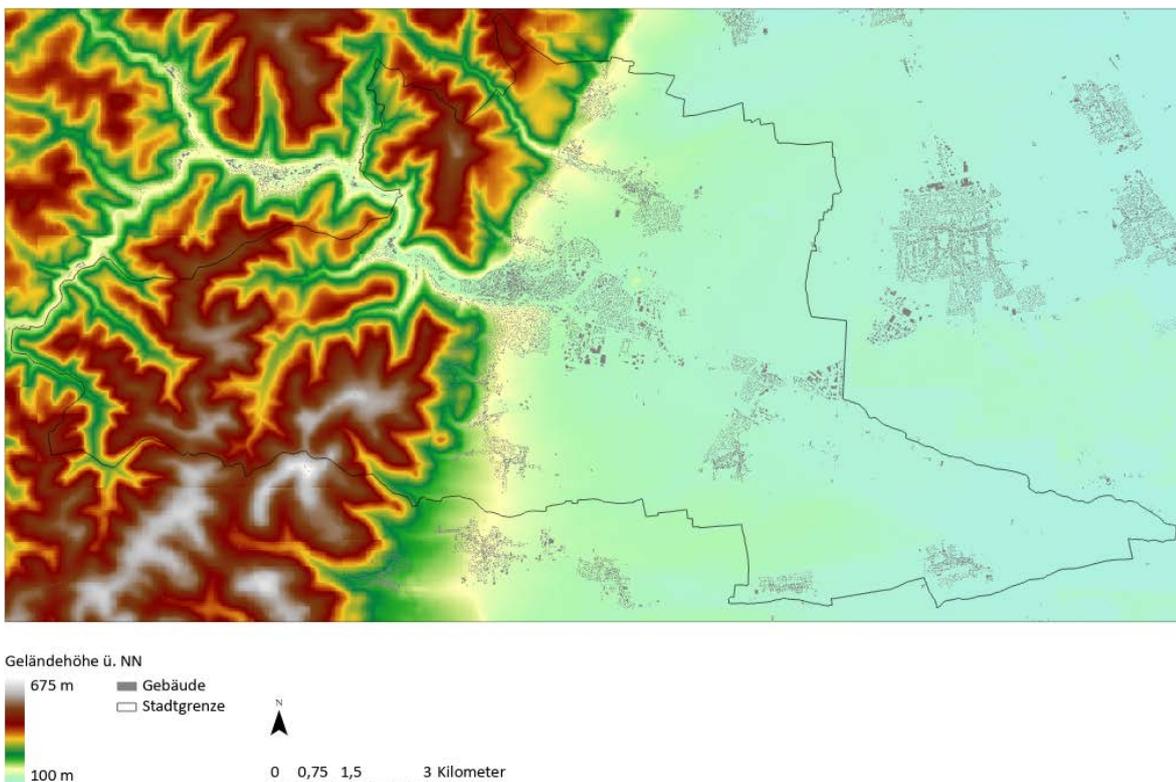


Abbildung 19: Digitales Geländemodell für das Untersuchungsgebiet, mit Gebäudekulisse



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	2016	ASCII-Punkt- wolke „XYZ“	1 m	direkt Verwendung
Gebäudehöhen	2022	City GML	LOD1	direkte Verwendung
ALKIS-Nutzung	2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungs- klassen
RBGI-Luftbild	2020	TIFF	20 cm	Berechnung NDVI für Vegetations- maske und versiegelte Flächen
Oberflächenmodell	2016	ASCII-Punkt- wolke „XYZ“	1 m	Berechnung eines normalisierten Oberflächenmodells (DOM minus DGM), Verschneidung mit NDVI für Vegetationshöhen
öffentliche Baumbestände	2021	ESRI-Shapefile	-	Ergänzung zu den Vegetationshö- hen
Versiegelungskataster	2022	ESRI-Shapefile	nur für aus- gewählte Stadtteile	Ergänzung der versiegelten Flächen
Lärmschutzwände	2015	PDF-Karten	-	Digitalisierung der Lärmschutz- wände + deren Höhe

Da für die Stadt Neustadt an der Weinstraße 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 RBGI-Luftbilder aus dem Jahr 2020 in einer Auflösung von 20 cm x 20 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 20). 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. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 10 m x 10 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 6 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

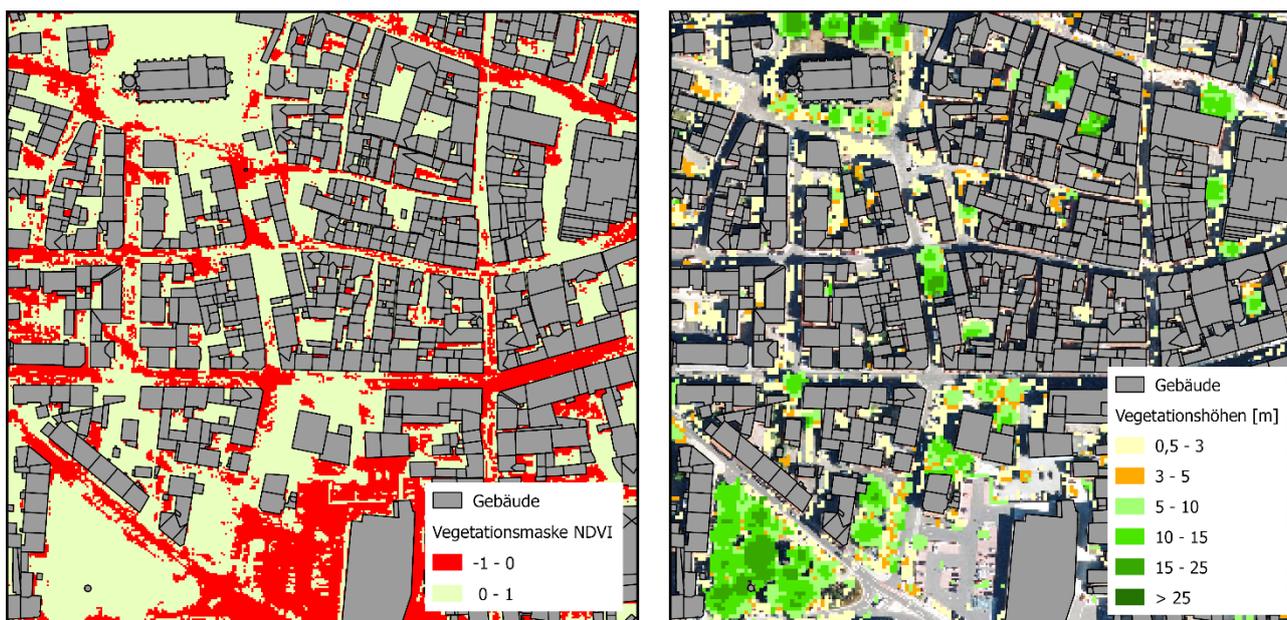


Abbildung 20: Ermittlung von Baumstandorten mittels Vegetationsindex und Strukturhöhe

Die Modelleingangsdaten sollen den aktuellen Sachstand bzw. die Bebauungssituation in Neustadt an der Weinstraße im Jahre 2023 repräsentieren. Bereits beschlossene Bebauungspläne sowie schon im Bau befindliche Baustrukturen wurden in die Modelleingangsdaten eingearbeitet (Tabelle 8). Abbildung 21 zeigt für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes die in das Modell eingeflossenen Nutzungsklassen.

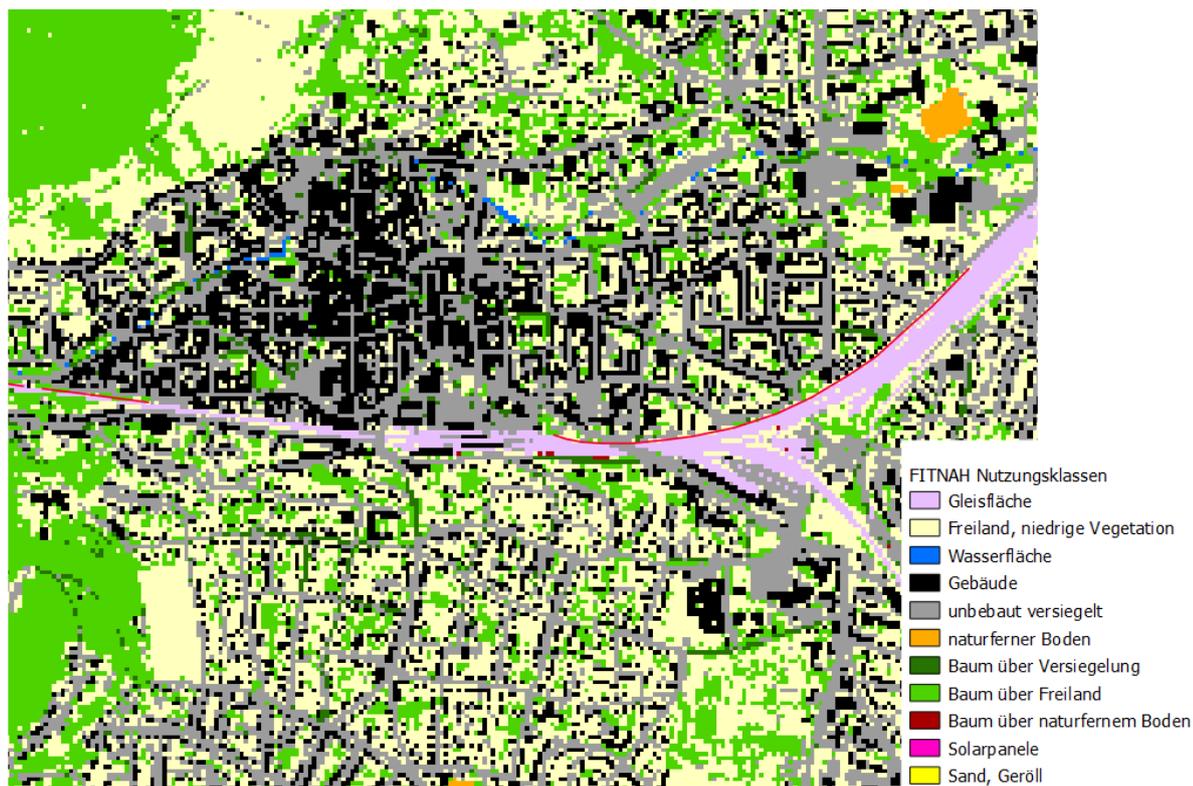


Abbildung 21: Ausschnitt klassifizierte Landnutzung im 10 m Modell-Raster. Die Schallschutzwand (rote Linie nördlich der Gleisfläche in der rechten Bildhälfte) ist als zusätzliche Information in die Modellierung eingegangen.



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

	B-Plan	Standort	Einarbeitung
1	Am Jahnplatz	Ortsbezirk Lachen-Speyerdorf	neues Wohngebiet
2	Schlachthof – Speyerdorfer Straße II. Änderung	im Stadtbezirk Nr. 26, SULO-Gelände	neues Wohn-/Mischgebiet
3	Ausschnitt aus Schlachthof – Speyerdorfer Straße II. Änderung	im Stadtbezirk Nr. 26	Bäckerei Liebenstein
4	Dammstraße III Änderung	Ortsbezirk Hambach	Neubau „EDEKA“
5	Winzinger Spange	Stadtbezirk Nr. 24 und 26	Neubau der Straße, Parkplatz und Bus-Depot
6	-	LGS-Gelände	Erweiterungen LGS-Gelände
7	Mußbach Südost VII. Änderung	Ortsbezirk Mußbach	Anbau Kita Mußbach
8	-	Lachen-Speyerdorf, Pestalozzistraße	Erweiterung Kita Speyerdorf
9	Am Speyerdorfer Weg II. Änderung	Lachen-Speyerdorf, Theodor-Haubach-Straße	Neubau Generalzolldirektion
10	-	Marienhaus-Klinikums Hetzelstift	Neubau Krankenhaus
11	Lange Strahläcker	in den Ortsbezirken Lachen-Speyerdorf, Hambach und im Ortsbezirk Mußbach	neues Gewerbegebiet
12	Westlich des Mußbacher Bahnhofs	Ortsbezirk Mußbach	neues Wohn-/Mischgebiet
13	-	Bahnhofstraße 2 und 4	Neubau Parkhaus und Hotel
14	-	Georg-von-Neumayer Realschule plus	Neubau der Realschule Plus Böbig

4.2.1 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 Neustadt 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.

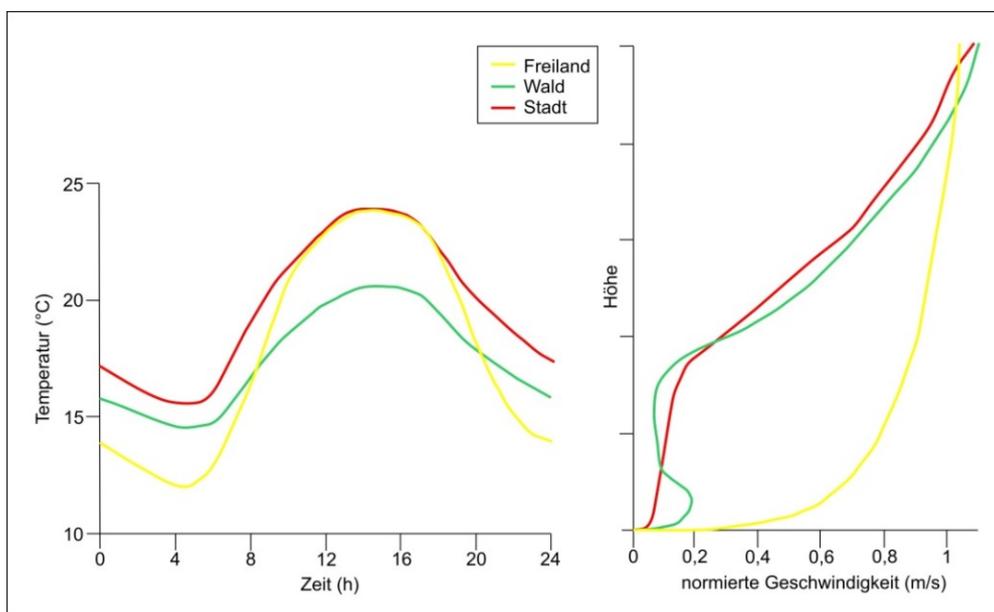


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)



Die Berücksichtigung der in Kapitel 3.3 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen 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 (Szenario „schwacher Klimawandel“) sowie 22,4 °C (Szenario „starker Klimawandel“).

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 Szenario „starker Klimawandel“ 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 der Basis der in klassischen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden zu können.

4.2.2 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 9). 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 9: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter.

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes	[m/s]	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 10).

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 10: 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

4.2.3 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 drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung durch dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Alle Modellläufe durchliefen erfolgreich die Qualitätssicherung.



4.2.4 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 100 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 10 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 4.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Die älteste Information – aus 2015 – ist die Verortung der Lärmschutzwände nördlich der Bahngleise zwischen Hauptbahnhof und Bahnhof Böbig, deren Aktualität aber überprüft werden konnte. Aus dem Jahre 2016 stammen 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 2020 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.



die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Modellergebnis in der Ist-Situation von ca. 13 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis über 19 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Neustadt an der Weinstraße damit eine Spannweite von mehr als 6 °C (Abbildung 23).

Die höchsten nächtlichen Belastungen (um 19 °C in der Ist-Situation, und bis zu knapp 21 °C im Szenario „starker Klimawandel“) treten vorwiegend in der Neustadter Altstadt und in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (Weinstraßenzentrum, Roßlauf, Altenschemel), aber auch im Umfeld einiger dicht bebauter Hauptverkehrsstraßen in den Zentren der umliegenden Gemeindeteile auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums dagegen sind in den aufgelockerten Bereichen am Siedlungsrand, sowohl am Fuße der Waldflächen und Weinhänge im Westen als auch in den dörflichen Gemeindeteilen angrenzend an landwirtschaftliche Flächen (ca. 14 – 15 °C bzw. 15 bis 16 °C im Szenario „starker Klimawandel“) zu finden. Als besonders kühle Siedlungsbereiche sind beispielsweise die Hambacher Höhe und das Afrika-Viertel zu nennen, aufgrund ihrer Lage an bewaldeten Hangbereichen und starker Durchgrünung.

Charakteristisch für viele Wohnquartiere ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßenbereich und in den – in Neustadt oftmals großflächigen – 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 der Kernstadt – kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 13 - 15 °C (bzw. 14,5 – 17 °C im Szenario „starker Klimawandel“) 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 des Haardtrandes liegen bei etwa 14 – 16 °C (bzw. im Szenario „starker Klimawandel“ bis zu 17,5 °C) in der Nacht. Im orographisch tiefer gelegenen Ordenswald östlich von der Kernstadt sind die Werte mit ca. 17 °C (bzw. entsprechend ca. 18,5 °C) etwas höher. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüneten 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 auch auf die wenigen Gewässerflächen im Untersuchungsgebiet, wie z. B. dem Speyerbach und das einzige etwas größere Stillgewässer im Stadtgebiet, dem Mußbacher Baggerweiher, zu.

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 den Großteil der Kernstadt und ihr direktes Umfeld dargestellt. Über versiegelten Flächen (Straßen und Plätze) findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über den landwirtschaftlichen Freiflächen produziert, hier vor allem östlich der Kernstadt, aber auch an den Weinhängen entlang des Haardtrands und über dem Hauptfriedhof. Innerhalb der Siedlungsquartiere ist eine Vielzahl an unversiegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion zu erkennen. Mit Bäumen bestandene Flächen sowie auch die Waldflächen westlich der Kernstadt zeigen eine deutlich geringere Kaltluftproduktionsrate.

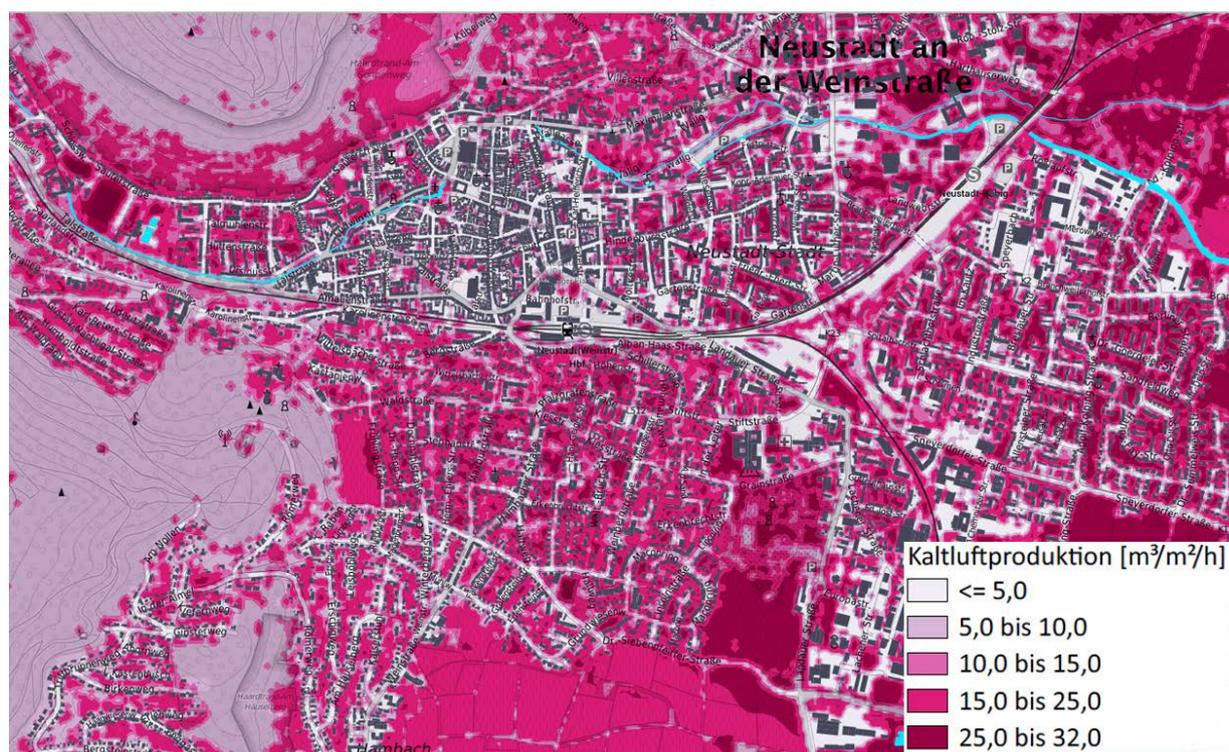


Abbildung 24: Nächtlche Kaltluftproduktionsrate im Umfeld der Kernstadt (verkürzte Legende). Kartenhintergrund: Top-PlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

5.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt im hügeligen Gebiet eine große Variabilität. In den bewaldeten Höhenlagen und über den Kuppen des Haardtrands westlich der Kernstadt ist kaum Kaltluftvolumenstrom feststellbar. An Hängen mit starkem Gefälle werden dagegen trotz des dichten Baumbestands Werte von bis zu ca. 70 m^3 pro Meter und Sekunde erreicht – so zum Beispiel westlich vom Ortsbezirk Haardt. Die höchsten Werte für den Kaltluftvolumenstrom im Untersuchungsgebiet treten am Übergang vom Haardtrand-Relief ins freie (baumlose) Flachland auf. Am Fuße des Schlossbergs bzw. auf den landwirtschaftlichen Flächen westlich und südwestlich von Diedesfeld fließen über $100 \text{ m}^3/\text{m/s}$, während auf den Weinflächen im Umfeld der Dr.-Welsch-Terrassen sowie im nördlichen, stadtnahen Bereich des Meisentals und auf den Weinbauflächen zwischen der Kernstadt und Haardt mit rund $90 \text{ m}^3/\text{m/s}$ fast ähnlich hohe Werte erreicht werden. Treffen die Kaltluftmassen auf Siedlungsgebiete, so tragen sie dort effektiv zur Abkühlung bei. Die Kernstadt von Neustadt an der Weinstraße wird in den westlichen Bereichen sowie den äußeren, locker bebauten Siedlungsgebieten gut mit Kaltluft versorgt. Am Marktplatz fließen ca. $30 \text{ m}^3/\text{m/s}$, was dem Mittelwert im gesamten Untersuchungsgebiet entspricht. Im Innenstadtbereich östlich des Hauptbahnhofs ist der Kaltluftstrom dagegen deutlich abgeschwächt mit Maximalwerten von unter $15 \text{ m}^3/\text{m/s}$.

Im östlichen, topografisch flachen Teil des Untersuchungsgebietes, bleibt grundsätzlich die Strömungsrichtung entsprechend dem (leichten) Gefälle in Richtung Osten erhalten. Im direkten Umfeld der Siedlungsgebiete wird der Kaltluftvolumenstrom dagegen teilweise durch Differenzen in der Lufttemperatur angetrieben. Durch den städtischen Wärmeinseleffekt (erwärmte Luft steigt über den Siedlungskörpern auf und zieht kühle Ausgleichsströmungen aus dem Umland an, vgl. Kapitel 2.2) zeigt dort die Richtung der Ausgleichsströmung zu den erwärmten Siedlungsbereichen. Die Menge des Kaltluftstroms nimmt in Richtung Osten stark ab. Um Geinsheim herum treten die schwächsten Ausgleichsströmungen auf, mit flächendeckend weniger als $10 \text{ m}^3/\text{m/s}$. Abbildung 25 zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte für einen Ausschnitt des Stadtgebiets.

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

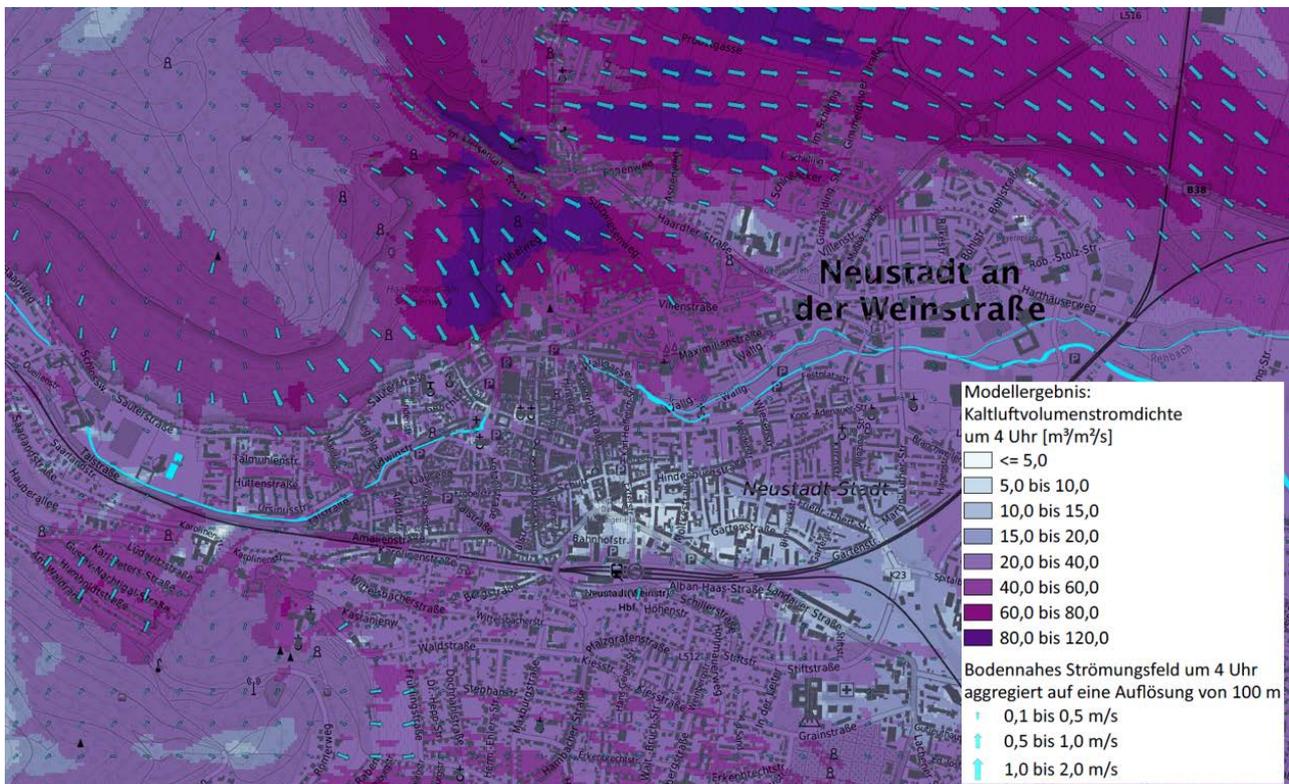


Abbildung 25: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Umfeld der Kernstadt (verkürzte Legende). Kartenhintergrund: Top-PlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen wird der Parameter Strömungsgeschwindigkeit herangezogen. In Abbildung 26 ist für einen Ausschnitt der Kernstadt die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt, in Original-Auflösung von 10 m. Deutlich ist im linken oberen Bereich zu erkennen, dass Kaltluft von den Weinhängen aus über die Straßen und unbebauten Flächen in Richtung Stadtzentrum strömt. Baustrukturen sind klare Strömungshindernisse. Breite Straßen und Plätze sowie Parks dagegen können wertvolle Transportlinien bzw. „Trittsteine“ für Kaltluft sein. Im linken unteren Bereich der Abbildung erkennt man die Kaltluftströmung aus dem Speyerbachtal, welche über die Bahnlinie bis zum Hauptbahnhof gelangt und zusätzlich durch Anströmung aus den südlich und hangaufwärts gelegenen, relativ locker bebauten Wohngebieten gespeist wird.

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können (hier bspw. aus der Hetzel-Anlage, im Zentrum der Abbildung).

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in Wäldern sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt. Auch der Kaltluftvolumenstrom ist im Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, doch ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern.

In Zukunft wird sich zwar 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 Zukunftsszenarien nicht signifikant.

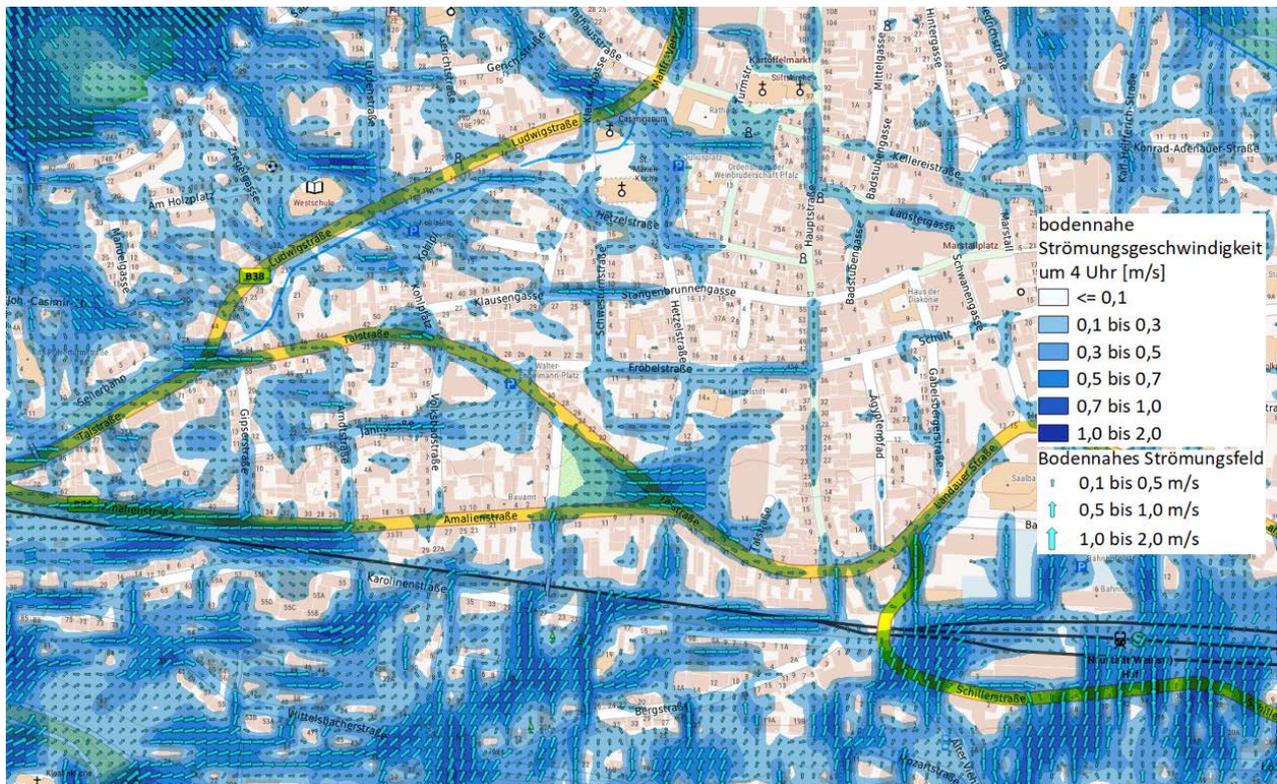


Abbildung 26: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in der Kernstadt (verkürzte Legende). Kartenhintergrund: TopPlus-Open (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

5.3 KLIMAANALYSEKARTEN

Gemäß VDI-Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften 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 Neustadt an der Weinstraße folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario „schwacher Klimawandel (2045)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2045)“

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der drei Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 27). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. 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 Modellausgabe⁷ (10 m x 10 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.

Siedlungsflächen

Lufttemperatur um 4 Uhr
in 2 m Höhe über Grund [°C]

- 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

Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte
um 4 Uhr [m³/m/s]

- <= 5,0
- 5,0 bis 10,0
- 10,0 bis 15,0
- 15,0 bis 20,0
- 20,0 bis 40,0
- 40,0 bis 60,0
- 60,0 bis 80,0
- 80,0 bis 120,0

Strömungsfeld

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

- 0,1 bis 0,5 m/s
- 0,5 bis 1,0 m/s
- 1,0 bis 2,0 m/s
- Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktion
- bedeutende Kaltluftabflüsse
 - auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhafte Kaltluftabflüsse, insbesondere aus Hangbereichen
 - Linienhaft strukturierte Kaltluftflüsse in Richtung Siedlungsraum

Abbildung 27: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 11). 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

⁷ 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.



Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den Geo-Datensätzen zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Die als Kaltluftproduktionsflächen gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 16,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Neustadt an der Weinstraße 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 sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. Mayer et al. 1994) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können. Flächenhafte Kaltluftabflussbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Die für Neustadt an der Weinstraße festgestellten Kaltluftabflüsse treten ausschließlich an Hängen auf und reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z.B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) möglich und zu vermeiden. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. intensiver zu prüfen ist.

Tabelle 11: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Bereiche mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktion	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 16,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
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

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.

Für den Untersuchungsraum Neustadt an der Weinstraße sind fünf Kaltluftleitbahn-Bereiche identifiziert, welche sich ausnahmslos über Taleinschnitte des Haardtrands definieren, welche auf Siedlungsbereiche gerichtet sind. Das Speyerbachtal, Meisental, Gimmeldinger Tal, Kapellenweg, sowie das Tal südlich des Schlossbergs weisen Leitbahnstrukturen auf. Die Kaltluftleitbahnen werden jeweils gespeist von den flächenhaften Abflüssen an den umliegenden Hangflächen. Zusätzlich sind bedeutende flächenhafte Kaltluftabflüsse entlang nahezu des gesamten Reliefübergangs am Haardtrand lokalisiert.

Die Kaltluftversorgung der westlichen Kernstadt erfolgt weitgehend aus den reliefbedingten Zuflüssen der soeben beschriebenen Leitbahnen und flächenhaften Abflüsse. Im Gegensatz dazu befinden sich die Flächen mit überdurchschnittlicher Kaltluftproduktion im Flachland, über landwirtschaftlichen Flächen mit wenig oder keinem Baumbestand (vgl. Abbildung 24). Hier kühlt sich in der Nacht die Oberfläche und somit auch die darüberliegende Luftschicht am deutlichsten ab. Die produzierte Kaltluft setzt sich in flacher Umgebung jedoch kaum in Bewegung, lediglich im Nahbereich von erwärmten Siedlungsflächen ist der Temperaturgradient stark genug, um Ausgleichsströmung in Gang zu setzen.

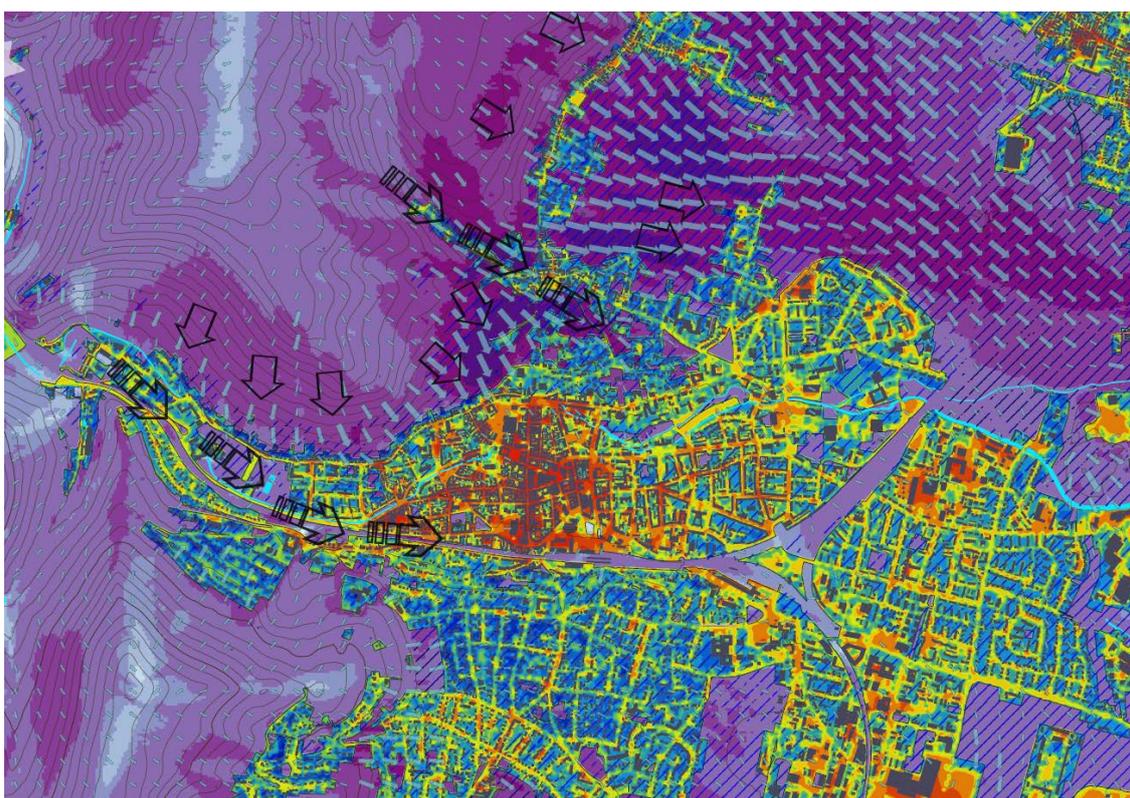


Abbildung 28: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation (Legende: siehe Abbildung 27)

5.4 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von unter 24 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Tabelle A 3 im Anhang). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass die Wälder des Haardtrands aber auch der Ordenswald als Rückzugsorte dienen können (Abbildung 29). Auch Gewässer wirkend am Tag kühlend auf ihre



Umgebung, sodass die angrenzenden Grünflächen entlang von Speyerbach, Rehbach, Floßbach und Mußbach, besonders in Kombination mit Vegetation entsprechender Höhe überwiegend eine schwache bis mäßige Wärmebelastung aufweisen und damit – zumindest vom PET-Wert her – eine gute Aufenthaltsqualität am Tage bieten.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt und den Gewerbegebieten zu finden sind (ca. 43 bis 44 °C PET in der Ist-Situation, bzw. 45 bis 46 °C PET im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). 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. Die Friedrich-Ebert-Straße beispielsweise, mit Gebäudehöhen um 17 Meter, weist ca. 10 °C kühlere PET-Werte auf als benachbarte Straßen ohne Verschattung. Auch in der Altstadt gestaltet sich die Verteilung PET-Wert mosaikartig je nach Baumasse, Versiegelung sowie Schatten durch Bäume oder Gebäude. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Ortsbezirken. Die Wohngebiete bieten zwar meist einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume als in vielen Teilen der Kernstadt, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 10 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Die größtenteils landwirtschaftlich genutzten Freiflächen im Außenraum zeigen zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr PET-Werte um 40 °C (Ist-Situation) bis 44 °C (Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Aufgrund der modellierten reduzierten Bodenfeuchte ist auf Grün- und Freiflächen für die Zukunft die höchste Zunahme der Hitzebelastung am Tage dargestellt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Beurteilung der zukünftigen Hitzebelastung nicht vorrangig die absolute Zunahme der Temperatur, sondern vielmehr die Zunahme der Häufigkeit von heißen Tagen (vgl. Tabelle 4 in Kapitel 3.3) entscheidend ist.

Als Bereiche relativ niedriger PET-Werte (um 26 °C in der Ist-Situation, bzw. rund 2 °C wärmer im Szenario „starker Klimawandel“) stellen sich zum Beispiel der Hauptfriedhof Neustadt, die von Bäumen bestandenen Flächen im Kriegergarten und im Rosengarten, sowie im Stadtzentrum der Platz nördlich der Marienkirche dar. Die Wohngebiete Afrika-Viertel, Hambacher Höhe und der Bereich südlich des Bahnhofs stellen sich ebenfalls als relativ kühl heraus (vgl. Abbildung 29).



Abbildung 29: Wärmebelastung am Tag (PET) in der Kernstadt von Neustadt an der Weinstraße (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 auch fundiert begründet werden kann.

Die Erstellung der Planungshinweiskarte erfolgte schrittweise und in enger Abstimmung mit Abt. 220 – Stadtplanung sowie den Abt. 330 – Landwirtschaft und Umwelt und insbesondere mit der Stabstelle Klimaschutz, Klimaanpassung und nachhaltige Entwicklung. Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zu Ist- und Zukunftsszenarien in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, vorgelagert sog. Bewertungskarten zu erstellen. In den sechs Bewertungskarten wurde getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien Status quo, Schwacher Klimawandel und Starker Klimawandel vorgenommen. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse dieser sechs Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Neustadt an der Weinstraße Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.



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) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum). Es kann unter Umständen vorkommen, dass kleinere Freiflächen in der Karte nicht als solche ausgewiesen sind, oder Überbauungen mit einem 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 Planungshinweiskarte (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 100 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).

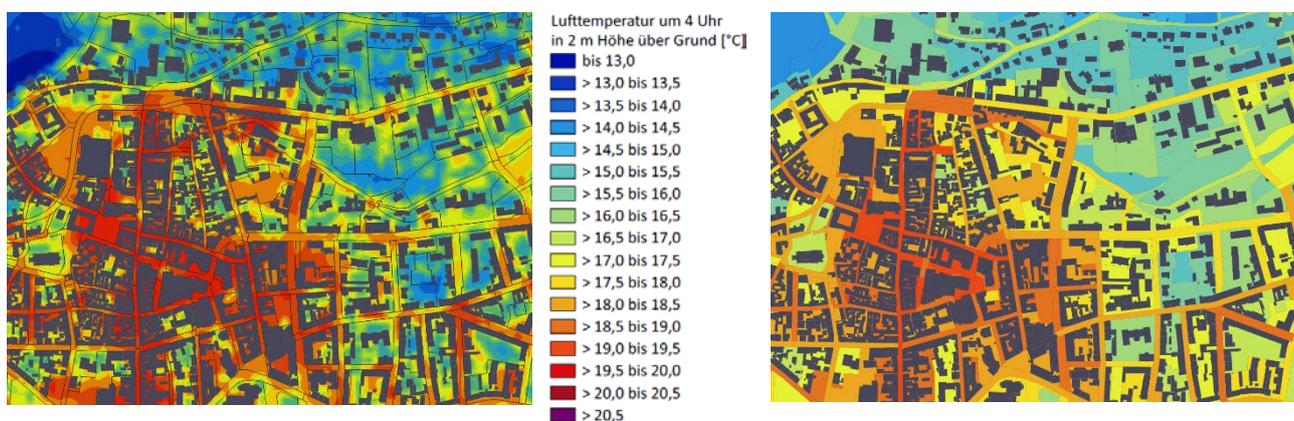


Abbildung 30: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie



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

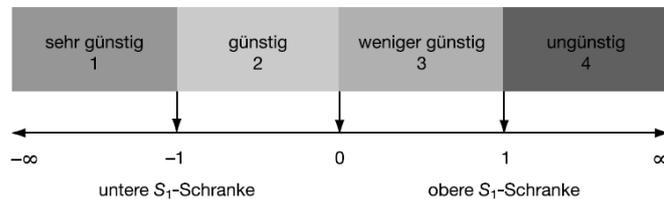


Abbildung 31: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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-Transformation⁸:

- Nächtliche Temperatur, Siedlungsraum:
Mittelwert = 16,67 °C Standardabweichung = 1,532 °C
- Nächtliche Temperatur, Straßen und öffentlicher Raum:
Mittelwert = 17,99 °C Standardabweichung = 1,182 °C
- Wärmebelastung am Tag (alle Flächen):
Mittelwert = 38,98 °C PET Standardabweichung = 4,781 °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 gering* – *gering* – *mittlere* – *hohe* – *sehr hohe* bioklimatische Belastung eingeteilt (Tabelle 12). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert (z = 0) schwankenden Klassen.

Tabelle 12: 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	$z \leq -1,0$	PET $\leq 34,2$
Gering	$-1,0 < z \leq -0,33$	$34,2 < \text{PET} \leq 37,4$
Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$37,4 < \text{PET} \leq 40,6$
Hoch	$0,33 < z \leq 1,0$	$40,6 < \text{PET} \leq 43,8$
Sehr hoch	$z > 1,0$	PET $> 43,8$

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 ($\geq 28,22 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) als sogenannter Kaltlufteinwirkungsbereich definiert. Liegt eine Fläche mindestens zur Hälfte im Kaltlufteinwirkungsbereich, so wird angenommen, dass die Fläche potenziell

⁸ 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.



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.

Tabelle 13: 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	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C] Straßen und Plätze
Sehr gering	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 15,1$	$T04 \leq 16,8$
Gering	$-1,0 < z \leq -0,33$	$15,1 < T04 \leq 16,2$	$16,8 < T04 \leq 17,6$
Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$16,2 < T04 \leq 17,2$	$17,6 < T04 \leq 18,4$
Hoch	$0,33 < z \leq 1,0$	$17,2 < T04 \leq 18,2$	$18,4 < T04 \leq 19,2$
Sehr hoch	$z > 1,0$	$T04 > 18,2$	$T04 > 19,2$

6.3.2 AUSGLEICHSRAUM

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 Siedlungsbezug 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 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 ($29,5 \text{ m}^3/(\text{s m})$ bzw. $\geq 17,0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \text{ h})$ bzw. $\geq 0,39 \text{ m/s}$)
- *„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

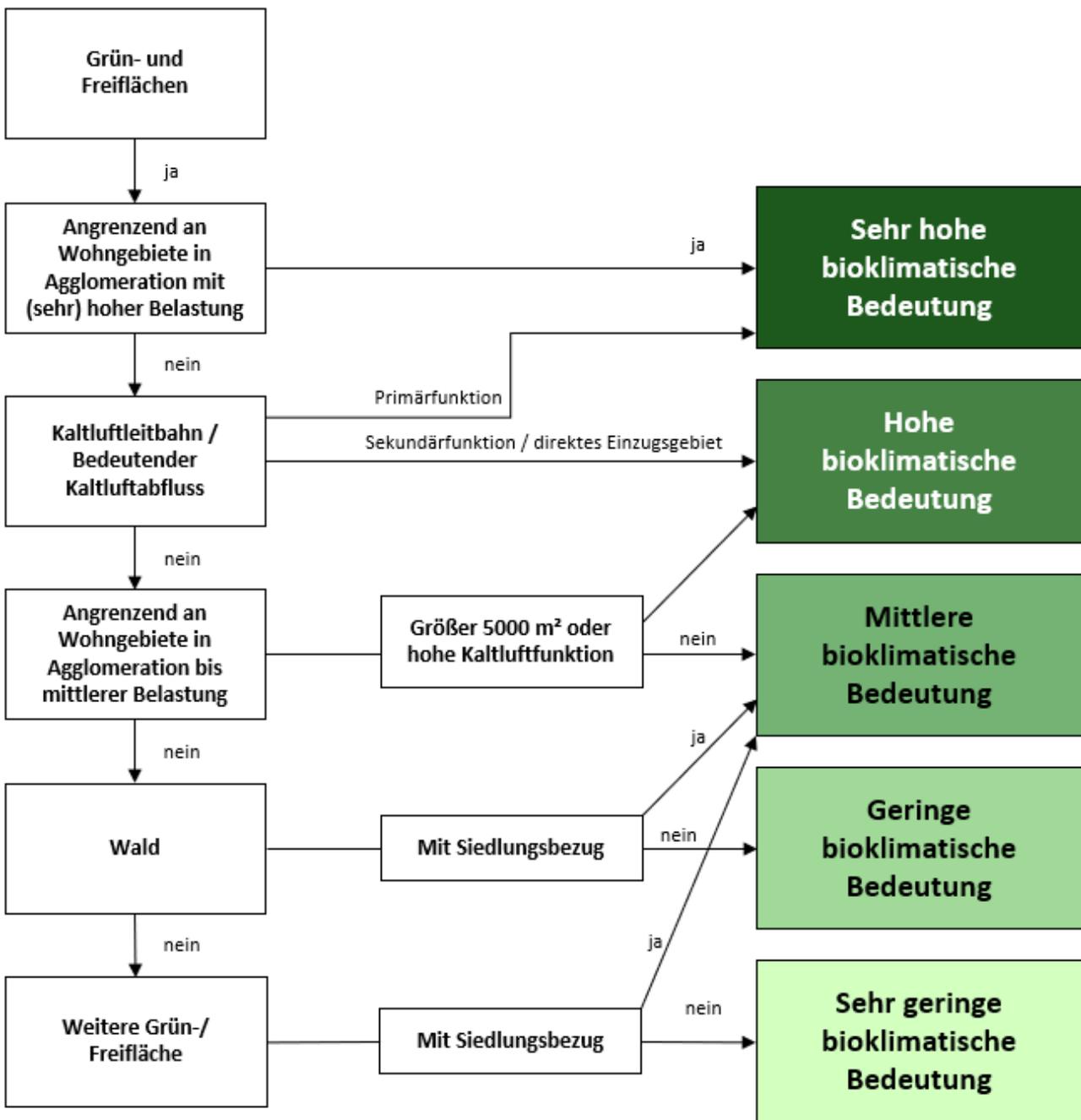


Abbildung 32: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht

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 14). Dies geschieht wiederum über die oben beschriebene z-Transformation, der folgende statistische Werte zugrunde lagen (Flächenkulisse: alle Ausgleichsräume im Stadtgebiet von Neustadt an der Weinstraße):

- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 31,21 °C PET Standardabweichung = 8,718 °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 jedoch eine wichtige stadtklimatische Ausgleichsfunktion für den stärker belasteten Siedlungsraum.

Tabelle 14: 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	$z \leq -1,0$	$PET \leq 22,5$
Hoch	$-1,0 < z \leq -0,33$	$22,5 < PET \leq 28,3$
Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$28,3 < PET \leq 34,1$
Gering	$0,33 < z \leq 1,0$	$34,1 < PET \leq 39,9$
Sehr gering	$z > 1,0$	$PET > 39,9$

6.3.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

Abbildung 33 zeigt Ausschnitte aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation. Während in der Ist-Situation die Flächen mit sehr hoher Belastung vorrangig im hoch verdichteten Innenstadtbereich und nur sehr vereinzelt in den weiteren Stadtteilen und Ortsbezirken zu lokalisieren sind, zeigt sich im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine flächenhafte Verbreitung derselben Kategorie. Im Szenario „starker Klimawandel“ ist ein Viertel der Siedlungsfläche in die Kategorie höchster Belastung eingestuft. Tabelle 15 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Belastungskategorien.

Grundsätzlich unterliegen die Siedlungsgebiete am Fuße der Waldflächen und Weinhänge im Westen in der Nacht den günstigsten bioklimatischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet. Selbst im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ überwiegen am Siedlungsrand vielerorts die Flächen mit höchstens mittlerer Belastung. Auch das Siedlungsgebiet südlich des Hauptbahnhofs von Neustadt an der Weinstraße sowie der Ortsteil Mußbach zeigen durchweg nur geringe oder sehr geringe Wärmebelastung in der Ist-Situation, und ist auch im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ nur in einzelnen Flächen hoch belastet.

Die Grün- und Freiflächen variieren in den drei Szenarien wenig in ihrer Bedeutung in der Nacht. Das Bewertungsschema basiert auf den Kaltluftprozessen, und der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden Wohnsiedlungsflächen (vgl. Abbildung 32). Folglich liegen die Flächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung, in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen, direkt angrenzend an die Wohnsiedlungsflächen.

Da in der Modellierung der Zukunftsszenarien keine Modifikation der städtebaulichen Struktur eingeflossen ist, bleiben das Strömungsfeld und die Kaltluftaustauschprozesse nahezu unverändert. Lediglich der Anteil von Flächen mit hoher bzw. sehr hoher Bedeutung ändert sich aufgrund der Zunahme von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen (Tabelle 16). 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.

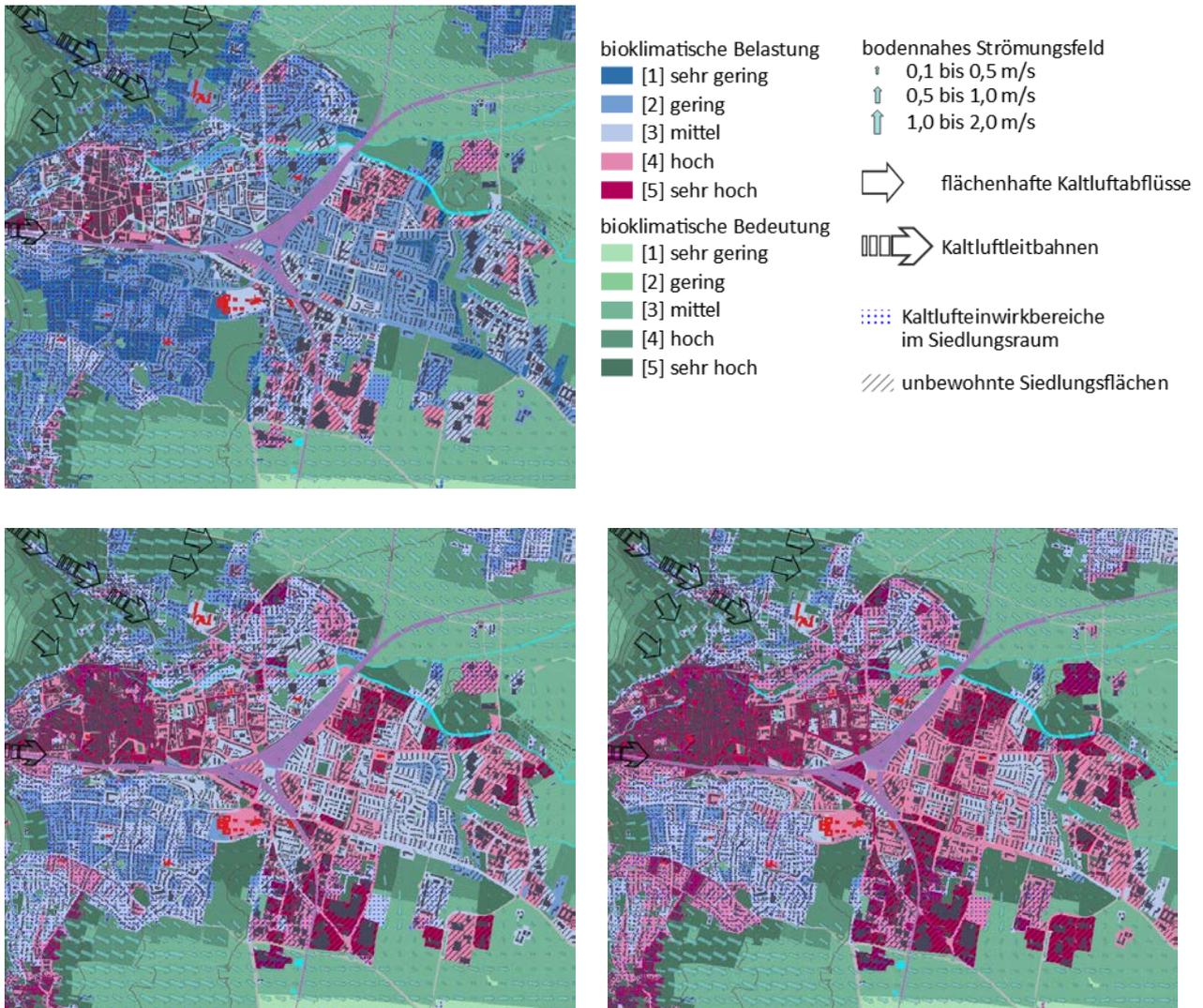


Abbildung 33: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“, unten rechts Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Verkürzte Legende

Tabelle 15: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	14,5 %	0,5 %	0,2 %
Gering	38,5 %	13,8 %	4,6 %
Mittel	32,2 %	37,7 %	28,4 %
Hoch	13,3 %	33,6 %	40,7 %
Sehr hoch	1,5 %	14,4 %	26,1 %



Tabelle 16: 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 Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	20,9 %	20,9 %	20,9 %
Gering	33,6 %	33,6 %	33,6 %
Mittel	27,3 %	27,2 %	27,2 %
Hoch	13,4 %	9,4 %	5,9 %
Sehr hoch	4,9 %	8,9 %	12,4 %

Die Bewertungskarten für die Tagsituation werden in Ausschnitten für die Kernstadt in Abbildung 34 dargestellt. Grundsätzlich verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet, meist abhängig von Verschattungsgrad von Bäumen und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Ebenso wie in der Nacht sind die Wohngebiete Hambacher Höhe und Afrika-Viertel mit der geringsten Hitzebelastung belegt. Andere Ortsteile dagegen, die in der Nacht relativ niedrig belastet sind, unterliegen am Tage aufgrund fehlender Verschattung bereits in der Ist-Situation mittlerer oder hoher Belastung (bspw. Mußbach). Hohe bis sehr hohe Hitzebelastung findet sich in allen Gewerbegebieten, sowie in Teilen der stark versiegelten Altstadt. Tabelle 17 zeigt, dass sich in der Ist-Situation 18 % der Siedlungsflächen in der Belastungsklasse „hoch“ befinden. Im Szenario „schwacher Klimawandel“ sind es bereits 38 %, und im Szenario „starker Klimawandel“ über die Hälfte der Flächen. Die Klasse „sehr hohe bioklimatische Belastung“ wird erst im Szenario „schwacher Klimawandel“ gefüllt, hier aber lediglich von 0,6 % der Flächen. Im Szenario „starker Klimawandel“ gelten 4,4 % der Siedlungsflächen von Neustadt an der Weinstraße als „sehr hoch“ bioklimatisch belastet. Dabei handelt es sich um einzelne Altstadt-Flächen sowie einzelne Flächen in den außen liegenden Ortsbezirken. Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte in den Zukunftsszenarien an Erholungsfunktion für den Menschen am Tage. In der Ist-Situation wird fast ein Drittel mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung eingestuft – hierbei handelt es sich ausnahmslos um Waldflächen. Im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ belegen nur noch < 2 % diese höchste Einstufung. Die baumlosen Freiflächen mit niedriger Vegetation verlieren aufgrund der im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ modellierten reduzierten Bodenfeuchte am deutlichsten an Erholungsfunktion, da sie der stärksten Zunahme von PET-Werten unterliegen. Ca. 36 % der Grün- und Freiflächen wird im Szenario „starker Klimawandel“ nur noch eine sehr geringe bioklimatische Bedeutung zugeordnet (Ist-Situation: 10 %)

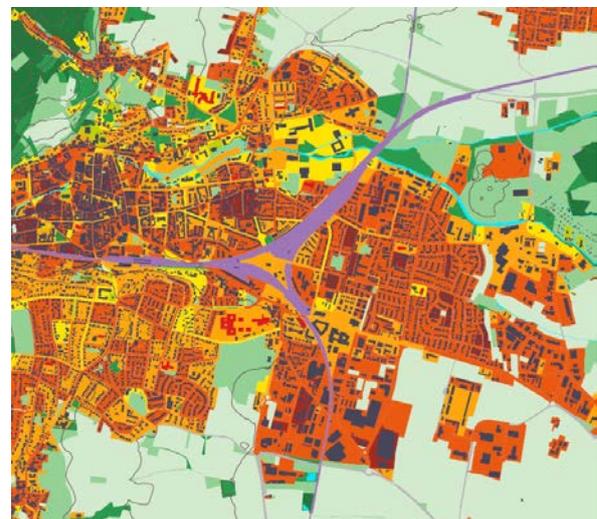
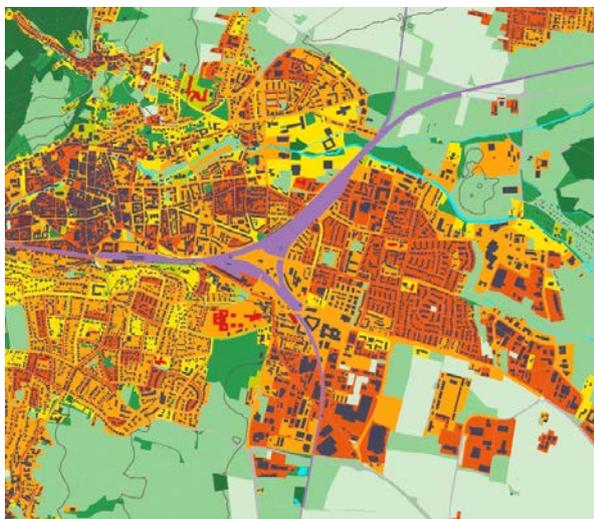
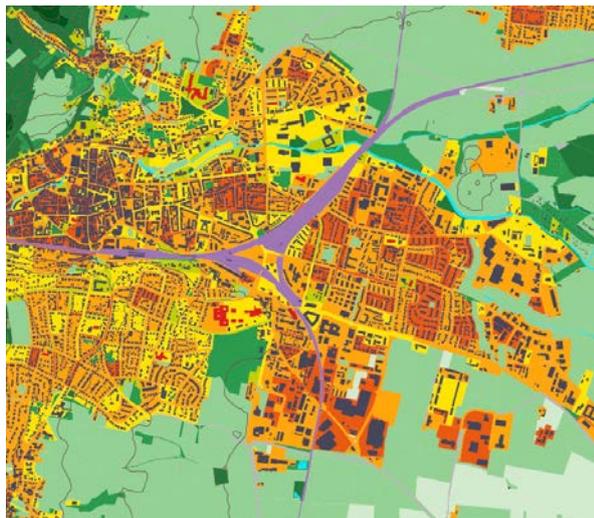


Abbildung 34: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“, unten rechts Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Verkürzte Legende

Tabelle 17: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung am Tage	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	7,7 %	5,0 %	0,3 %
Gering	21,7 %	14,6 %	8,9 %
Mittel	52,3 %	42,2 %	27,1 %
Hoch	18,3 %	37,7 %	56,3 %
Sehr hoch	0,0 %	0,6 %	4,4 %



Tabelle 18: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung am Tage, nach Modellierungsszenario

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „schwacher Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	10,0 %	23,2 %	35,9 %
Gering	32,1 %	19,8 %	7,8 %
Mittel	3,5 %	3,5 %	3,1 %
Hoch	23,3 %	47,4 %	51,5 %
Sehr hoch	31,1 %	6,1 %	1,7 %

6.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima fasst die Ergebnisse der sechs PHK-Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Neustadt an der Weinstraße Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar.

Als Ziele der Planungshinweiskarte wurden definiert:

- Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsgebiete in ihrem Bestand sichern und vor negativen Entwicklungen schützen.
- Durchlüftung dicht bebauter Bereiche sichern und fördern.
- Flächen mit bereits deutlicher klimatischer und/oder lufthygienischer Belastung in zukünftiger baulicher Entwicklung einschränken und zusätzlich auch hinsichtlich einer Klimaanpassung weiterentwickeln

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 in einem ersten Schritt 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 19).



Tabelle 19: 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	5
	5	3	3	4	5	5		5	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe Wärmebelastung, ..., 5 = höchste 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 16, 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 19, rechte Seite).

Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und die Klimafunktion der Siedlungsflächen berücksichtigt. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute (Status quo) oder dem als *best case* anzusehendem Szenario Schwacher Klimawandel die höchste bioklimatische Belastung und keine Klimafunktion (Kaltlufteinwirkungsbereich) aufweisen. Übernehmen die am höchsten belasteten Flächen dagegen eine Klimafunktion, fallen sie in die zweite Handlungspriorität. In der Klasse „Handlungspriorität 2“ liegen die Siedlungsflächen, die unter dem Einfluss des Szenarios Starker Klimawandel die höchste Belastung und keine Klimafunktion verzeichnen. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 20 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist. Das Handlungserfordernis lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird je größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Die Flächen ohne vorrangige Handlungspriorität behalten auch unter der Annahme eines „starken Klimawandels“ ihre (sehr) günstige humanbioklimatische Situation bei. Sie können als sehr robust gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden. Durch diese vorgenommenen Definitionen kann jede auftretende Wertstufenkombination der dreidimensionalen Matrix aus Bestandssituation, „schwacher Klimawandel“ und „starker Klimawandel“ eindeutig einer der Belastungsstufen zugeordnet werden.



Tabelle 20: 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 bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen und keine Klimafunktion innehaben.	9,3 %
Handlungspriorität 2	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	9,9 %
Handlungspriorität 3	Flächen ohne Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen mit Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	16,8 %
Handlungspriorität 4	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	19,2 %
Handlungspriorität 5	Flächen ohne Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen mit Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	18,7 %
Handlungspriorität 6	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen	16,3 %
Keine vorrangige Handlungspriorität	Übrige Flächen	9,8 %

„Klimafunktion“ = mindestens Hälfte der Fläche mit überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstromdichte
 Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tabelle 19

Fast alle Siedlungsflächen in der Altstadt sind mit Handlungspriorität 1 oder 2 belegt, ebenso wie ein Großteil der Gewerbeflächen. Zusätzlich befinden sich Flächen der obersten zwei Handlungsprioritäten in den zentralen Lagen jedes Ortsbezirks von Neustadt an der Weinstraße.

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 wird⁹. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 21 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen. In Flächen der fünf höchsten Handlungsprioritäten, die in Neustadt an der Weinstraße ca. 74 % (vgl. Tabelle 20) des Siedlungsraums ausmachen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen notwendig bzw. zu prüfen. Darunter ist in den Flächen der höch-

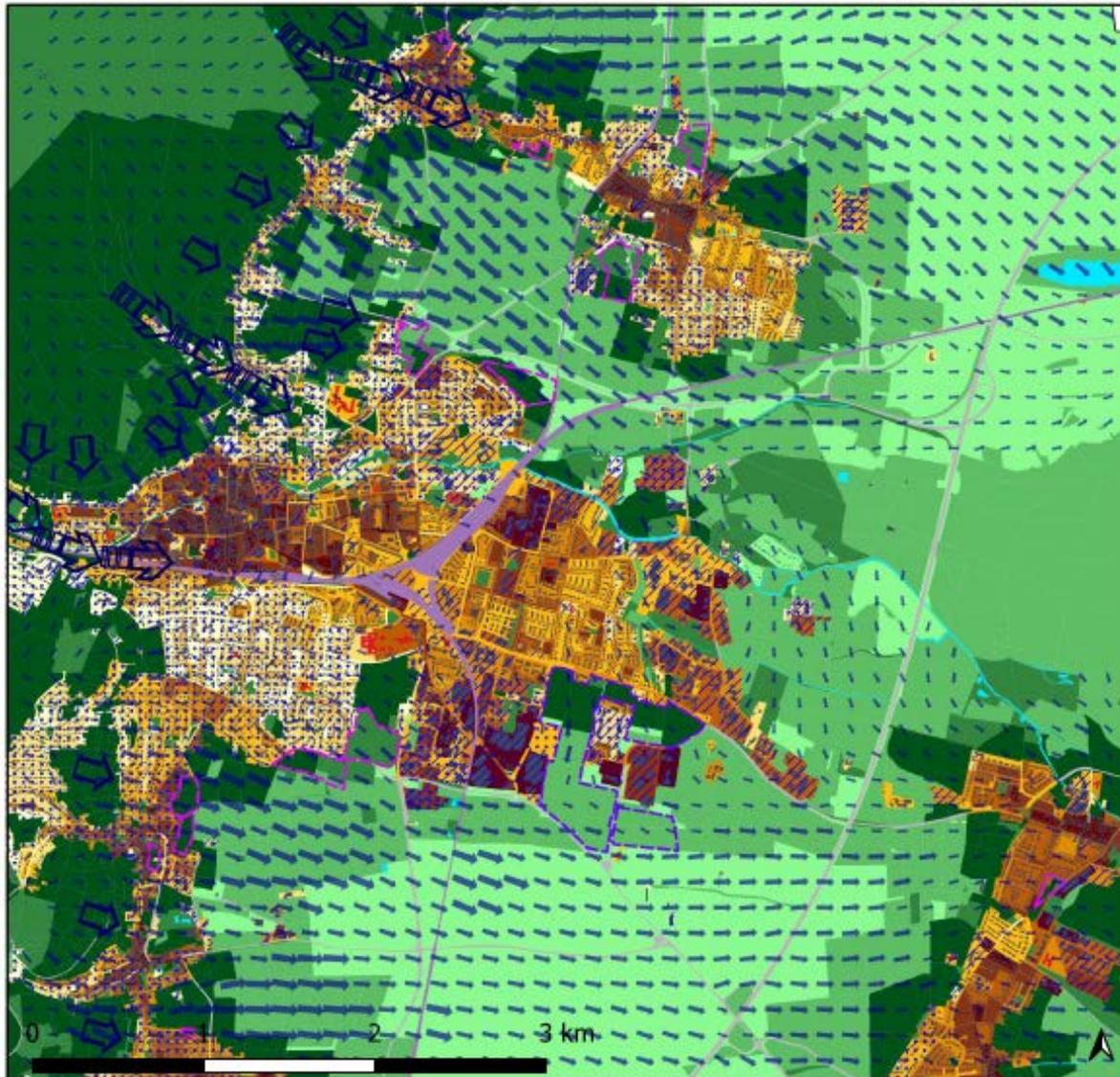
⁹ Es können (und sollen im Falle von Gelegenheitsfenstern) also auch stadtklimatischen Anpassungsmaßnahmen bspw. in Flächen der Handlungspriorität 3 umgesetzt werden, wenn noch nicht alle Flächen in den höheren Handlungsprioritäten angepasst wurden.



ten beiden Handlungsprioritäten (ca. 19 % Flächenanteil) zusätzlich zu prüfen, ob proaktiv Anpassungsmaßnahmen im Bestand umgesetzt werden können. In über einem Viertel (26 %) 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 21: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
Handlungspriorität 1 – 2	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind notwendig und nach ihrer Wirksamkeit zu priorisieren. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen zu prüfen. Bei allen städtischen baulichen Vorhaben und Sanierungen, für die ein Bauantrag oder ein die baurechtliche Prüfung umfassender Antrag gestellt wird, oder eine Vorlage der Genehmigungsfreistellungsunterlagen erfolgt, sind Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation umzusetzen. Bei entsprechenden privaten Vorhaben sind Maßnahmen zur Verbesserung anzustreben.
Handlungspriorität 3 – 5	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind zu prüfen und auf Ihre Wirksamkeit hin zu bewerten. Bei allen Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Sanierungen für die ein Bauantrag oder ein die baurechtliche Prüfung umfassender Antrag gestellt wird, oder eine Vorlage der Genehmigungsfreistellungsunterlagen erfolgt, sollen Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation umgesetzt werden.
Handlungspriorität 6 bzw. 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
- Handlungspriorität 6
- keine vorrangige

Kaltlufteinwirkbereiche im Siedlungsraum

Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen

Stadtklimatischer Schutzbedarf

- sehr hoher Schutzbedarf
- hoher Schutzbedarf
- erhöhter Schutzbedarf
- kein besonderer Schutzbedarf

Strömungsfeld

- Bodennahes Strömungsfeld um 4 Uhr
- flächenhafte Kaltluftabflüsse
- Kaltluftleitbahnen

Städtebauliche Entwicklungsflächen

- Gewerbegebiete
- Wohnbauflächen

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 Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert (Tabelle 22). 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 (ohne landwirtschaftliche Flächen) im siedlungsnahen Umkreis von 500 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 22: 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 siedlungserne 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 = höchste 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 22, 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 22, rechte Seite).



Tabelle 23: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Sehr hoher Schutzbedarf	Höchste stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	20,8 %
Hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	33,1 %
Erhöhter Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	25,1 %
Kein besonderer Schutzbedarf	Übrige Flächen	20,9 %

Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung. Flächen, die in mindestens einer der drei Szenarien (Ist, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) in die Kategorie der höchsten Bedeutung für das Stadtklima fallen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen (Tabelle 23). Der hohe Anteil von Flächen mit hohem oder sehr hohem stadtklimatischen Schutzbedarf (54 % aller Flächen im Ausgleichsraum) geht auf die großen siedlungsnahen Waldflächen in Neustadt an der Weinstraße zurück, die am Tag eine (sehr) hohe Bedeutung aufweisen. Aber auch einige landwirtschaftliche Flächen, die an belastete Wohnsiedlungen angrenzen, fallen aufgrund ihrer Bedeutung für die nächtliche Kaltluftversorgung in die Kategorie mit hohem oder sehr hohem Schutzbedarf.

In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen. Bei einem *sehr hohen Schutzbedarf* wird eine Entwicklung beispielsweise nur dann als stadtklimamaverträglich 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 (Detailgutachten oder qualitative Stellungnahme). Dabei kann die klimafachliche Begleitung einer Planung sowohl von städtischer Seite aus als auch durch externe Gutachter:innen erfolgen.



Tabelle 24: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
<p>Sehr hoher Schutzbedarf</p>	<p>Der Erhalt oder die Verbesserung 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 durch Stabstelle 020 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 durch Stabstelle 020 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 durch Stabstelle 020 anzustreben.</p>
<p>Kein besonderer Schutzbedarf</p>	<p>Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf. Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.</p>

6.4.3 RÄUMLICHE BEISPIELE FÜR DIE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG

Im Folgenden wird anhand von zwei Beispielen die Herleitung der Bewertung in der Planungshinweiskarte dargestellt. Als Beispiel für die Bewertung von Wohnsiedlungen dient ein Bereich der linienhaften Siedlungsstruktur entlang des Mandelrings im Ortsbezirk Haardt. In der Planungshinweiskarte sind die markierten Beispielflächen A und B mit Handlungspriorität 6 bzw. 5 belegt (Abbildung 36). Der gesamte hier betrachtete Bereich befindet sich im Einflussbereich des flächenhaften Kaltluftabflusses vom Haardtrand im Westen. Die angrenzenden Grünflächen sind mit hohem bis sehr hohem Schutzbedarf bewertet. Die gepunktete Schraffur zeigt an, dass der gesamte Siedlungsbereich entlang der Straße im Kaltlufteinwirkungsbereich liegt, das heißt mit überdurchschnittlich viel Kaltluftvolumen versorgt wird.

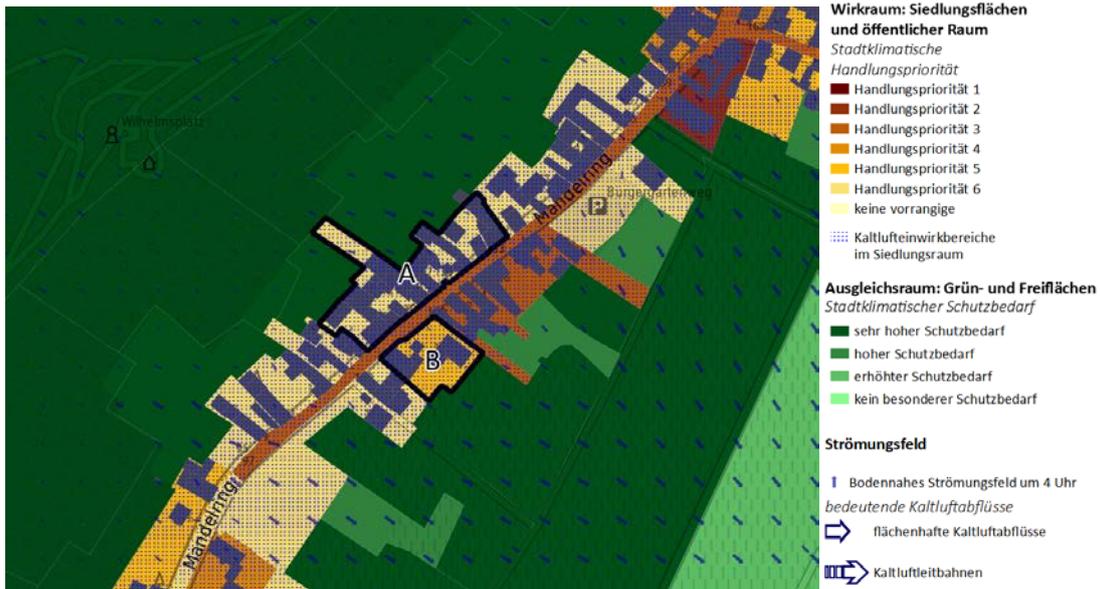


Abbildung 36: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima für einen Siedlungsbereich entlang des Mandelrings (das Strömungsfeld ist hier auf 25 m Rasterweite aggregiert)

Für die Flächen A und B wird im Folgenden die Herleitung der Handlungsprioritäten anhand der Bewertungskarten dargestellt. Die Bewertungskarten geben Aufschluss darüber, ob sich auf den betrachteten Flächen vornehmlich der humanbioklimatische Komfort in der Nacht oder die Aufenthaltsqualität am Tage als schützenswert bzw. verbesserungswürdig herausstellen. Hierdurch wird für die spätere Maßnahmenentscheidung bereits eine erste grobe Richtung vorgegeben. In der Nacht zeigt Siedlungsfläche A eine geringe (Ist-Situation) bis mittlere (Zukunftsszenarien), und Siedlungsfläche B eine geringe (Ist), mittlere („schwacher Klimawandel“) bzw. hohe (Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) Wärmebelastung (Abbildung 37).

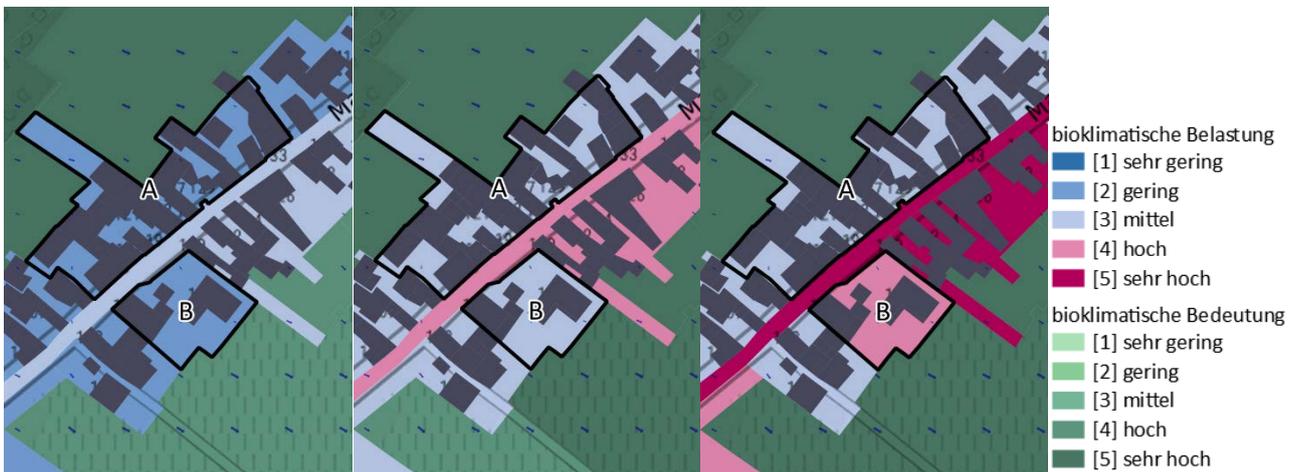


Abbildung 37: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (das Strömungsfeld ist hier auf 25 m Rasterweite aggregiert). Von links nach rechts: Ist-Situation, Zukunftsszenario schwacher Klimawandel, Zukunftsszenario starker Klimawandel.

Am Tage ist die Siedlungsfläche A in der Ist-Situation und im Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ mittel, und im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ hoch wärmebelastet. Der Siedlungsbereich B östlich der Straße ist in allen drei Szenarien hoch belastet (Abbildung 38).



Die Bewertung der bioklimatischen Belastung geschieht anhand der PET (Tagsituation) bzw. der bodennahen Lufttemperatur (Nachtsituation), welche als jeweiliger Flächen-Mittelwert die Klasseneinteilung definiert (vgl. Tabelle 12 sowie Tabelle 13 im Kapitel 6.3.1). Im Falle von Siedlungsfläche B liegt der Flächenmittelwert der PET in der Ist-Situation genau am unteren Ende der Klasse für „hoch belastet“, während der Flächenmittelwert im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ am oberen Ende derselben Klasse liegt. Als Resultat verbleibt die Fläche in allen drei Szenarien in derselben Einstufung.



Abbildung 38: Ausschnitt aus den Bewertungskarten (Tagsituation). Von links nach rechts: Ist-Situation, Zukunftsszenario schwacher Klimawandel, Zukunftsszenario starker Klimawandel.

Als Zwischenschritt von den Bewertungskarten zur Planungshinweiskarte geschieht die Kombination von Tag- und Nachtbewertung, für jedes Szenario (Ist, schwacher & starker Klimawandel). Die Bewertungsmatrix wurde in Tabelle 19 (Seite 72) dargestellt. Für Wohnsiedlungsfläche A ergibt sich

- Ist-Situation: Nacht gering [2] / Tag mittel [3] → Gesamt-Wärmebelastung: gering [2]
- Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“: Nacht mittel [3] / Tag mittel [3] → Gesamt-Wärmebelastung: mittel [3]
- Zukunftsszenario „starker Klimawandel“: Nacht mittel [3] / Tag hoch [4] → Gesamt-Wärmebelastung: mittel [3]

Für Wohnsiedlungsfläche B ergibt sich

- Ist-Situation: Nacht gering [2] / Tag hoch [4] → Gesamt-Wärmebelastung: mittel [3]
- Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“: Nacht mittel [3] / Tag hoch [4] → Gesamt-Wärmebelastung: mittel [3]
- Zukunftsszenario „starker Klimawandel“: Nacht hoch [4] / Tag hoch [4] → Gesamt-Wärmebelastung: hoch [4]

Die Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten für die Planungshinweiskarte ist in Tabelle 20 (Seite 73) beschrieben. Für Siedlungsfläche A trifft die „Handlungspriorität 6“ zu, denn sie weist bereits im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung auf. Für Siedlungsfläche B ergibt sich „Handlungspriorität 5“, denn es ist eine Fläche mit Klimafunktion (Kaltlufteinwirkungsbereich), die im Szenario „starker Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweist.



Als Beispiel für die Definition des Schutzbedarfs einer Grünfläche wird der Grünzug Wallgasse herangezogen. Abbildung 39 zeigt einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte, in der der Grünzug mit „hoher Schutzbedarf“ belegt ist.



Abbildung 39: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima für den Bereich um den Grünzug Wallgasse – Bereich zwischen Waldorfschule und Schubert-Schule (schwarz umrandet in der Mitte der Abbildung)

Die Bewertungskarte für die Tagsituation (Abbildung 40) zeigt sowohl für die Ist-Situation als auch für beide Zukunftsszenarien eine geringe bioklimatische Bedeutung. Grünflächen werden am Tage je nach ihrer Erholungsfunktion, abhängig vom Flächenmittelwert der PET klassifiziert (vgl. Tabelle 14). Der Grünzug Wallgasse weist einen großen Flächenanteil an baumloser Freifläche bzw. Versiegelung (Sportplatz) auf, was am Tage für hohe PET-Werte sorgt.

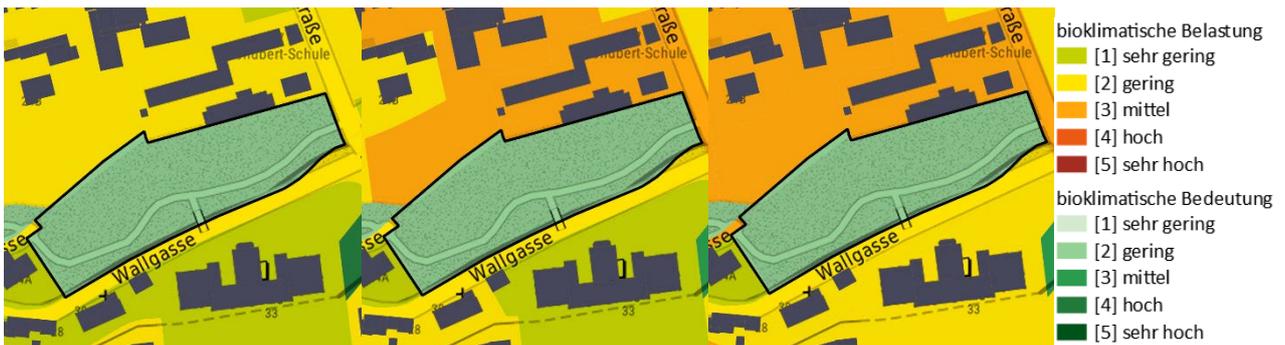


Abbildung 40: Ausschnitt aus den Bewertungskarten (Tagsituation). Von links nach rechts: Ist-Situation, Zukunftsszenario schwacher Klimawandel, Zukunftsszenario starker Klimawandel.



Abbildung 41: Ausschnitt aus den Bewertungskarten (Nachtsituation). Von links nach rechts: Ist-Situation, Zukunftsszenario schwacher Klimawandel, Zukunftsszenario starker Klimawandel.

In der Nacht ist die Funktion als Kaltluftlieferant in Zusammenhang mit den umliegenden Wohnsiedlungsflächen entscheidend für die Einstufung in die Bewertungskategorien. Wie die Bewertungsmatrix in Abbildung 32 (Seite 66) zeigt, erhalten Grünflächen, welche an Wohngebiete mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Belastung in der Nacht angrenzen, eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung. Dies ist für den Grünzug Wallgasse in beiden Zukunftsszenarien der Fall (vgl. Abbildung 41). In der Ist-Situation sind die angrenzenden Wohnsiedlungsflächen in der Nacht höchstens mit mittlerer Wärmebelastung belegt. Die Fläche des Grünzugs erhält eine hohe bioklimatische Bedeutung, da sie an Wohngebiete angrenzt und ihre Flächengröße > 5000 m² beträgt (vgl. Abbildung 32).

Analog zum vorangegangenen Beispiel geschieht als Zwischenschritt von den Bewertungskarten zur Planungshinweiskarte die Kombination von Tag- und Nachtbewertung für jedes Szenario (Ist, schwacher & starker Klimawandel). Die Bewertungsmatrix für Grün- und Freiflächen wurde in Tabelle 22 (Seite 76) dargestellt. Der Grünzug Wallgasse gilt als fußläufiger Erholungsraum. Für die Gesamt-Bioklimatische Bedeutung ergibt sich

- Ist-Situation: Nacht hoch [4] / Tag gering [2] → Gesamt- Bioklimatische Bedeutung: mittel (3)
- Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“: Nacht sehr hoch [5] / Tag gering [2] → Gesamt- Bioklimatische Bedeutung: hoch (4)
- Zukunftsszenario „starker Klimawandel“: Nacht sehr hoch [5] / Tag gering [2] → Gesamt- Bioklimatische Bedeutung: hoch (4)

Die Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarfs ist in Tabelle 23 (Seite 77) beschrieben. Für den Grünzug Wallgasse trifft ein „hoher Schutzbedarf“ zu, denn er weist bereits im Szenario „schwacher Klimawandel“ eine hohe bioklimatische Bedeutung auf.



6.4.4 STADTKLIMATISCHE BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen sind in der Planungshinweiskarte mit einer farblichen Umrandung versehen. Hierbei handelt es sich um Gewerbeflächen im Bereich zwischen Adolf-Kolping-Straße und Louis-Escande-Straße sowie 22 Wohnbauflächen, die sich über das gesamte Stadtgebiet verteilen und fast ausnahmslos jeweils am Siedlungsrand liegen. Sämtliche Entwicklungsflächen sind aktuell unbebaute Grünflächen mit höchstens niedriger Vegetation. Im Folgenden werden die städtebaulichen Entwicklungsflächen in Bezug auf ihre derzeitige und zukünftige stadtklimatische Funktion sowie hinsichtlich des Schutzbedarfs im Ausgleichsraum beurteilt.

Gewerbegebiet zwischen Louis-Escande-Straße und Adolf-Kolping-Straße

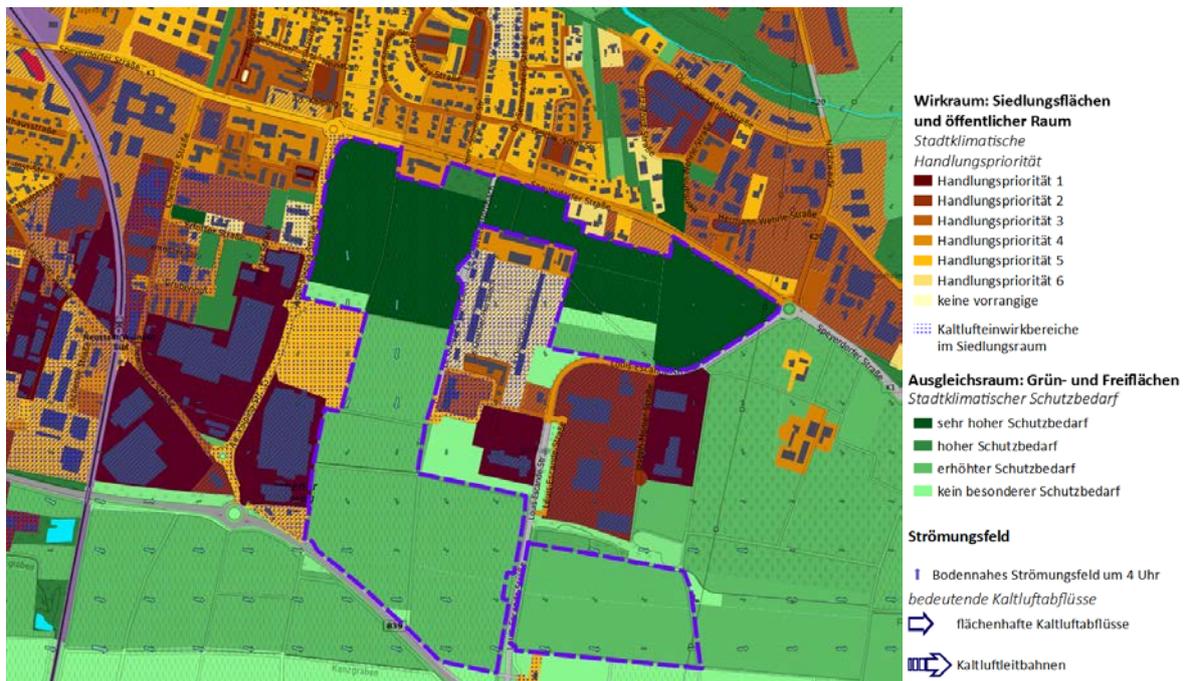


Abbildung 42: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima für den Bereich um die Entwicklungsfläche für ein Gewerbegebiet (violett gestrichelt umrandet in der Mitte der Abbildung)

Die Entwicklungsfläche für das Gewerbegebiet im Südosten der Kernstadt von Neustadt an der Weinstraße liegt zwischen bzw. angrenzend an bereits bestehende Gewerbeflächen. Insgesamt handelt es sich um 46 Hektar landwirtschaftliche Fläche, die im Norden aufgrund der benachbarten Wohnsiedlungen mit sehr hohem Schutzbedarf bewertet ist. Da die Wohnsiedlungen im Vergleich zu den bereits existierenden Gewerbeflächen nachts relativ kühle Bedingungen vorweisen (lediglich im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ sind einige Teilflächen hoch belastet, ansonsten vorrangig gering bis mittel), fließen die Kaltluftmassen im Plangebiet in der hier modellierten windschwachen Wetterlage in Richtung stärker erwärmter Gewerbegebiete. Da auch in anderen Wetterlagen und Windrichtungen die Versorgung der Wohngebiete mit Frisch- und ggfs. Kaltluft gewährleistet werden sollte, muss bei der zukünftigen Bebauung auf einen möglichst geringen Versiegelungsgrad und das Freihalten von Durchlüftungskorridoren geachtet werden. Bauliche Strömungsbarrieren sind zu vermeiden. Für eine gute Aufenthaltsqualität an heißen Tagen sollte vor allem durch Bäume, aber möglicherweise auch durch Wasserflächen und bauliche Installationen, für Verschattung bzw. Kühle gesorgt werden.



Grundsätzlich besteht für die Fläche des geplanten Gewerbegebietes ein geringes Konfliktpotential aus stadtklimatischer Sicht. Eine Entwicklung ist – unter Beachtung der oben genannten Hinweise – in Verbindung mit optimierenden Maßnahmen vertretbar.

Innenliegende Wohngebiet-Entwicklungsflächen in Geinsheim

Im Westen von Geinsheim liegen zwei Entwicklungsflächen im Innenbereich zwischen Wohnsiedlungen. Aktuell sind die Flächen als Privatgärten oder Grünflächen genutzt. Die östliche Entwicklungsfläche ist derzeit als Grünfläche mit sehr hohem Schutzbedarf eingeordnet, was an ihrer Nachbarschaft zu teilweise schon in der Ist-Situation hoch wärmebelasteten Wohnsiedlungsflächen begründet ist. Hier ist die Erhaltung der stadtklimatischen Funktion nachzuweisen. Die westliche Entwicklungsfläche ist Teil einer Wohnsiedlungsfläche mit Handlungspriorität 4, welche sowohl am Tage als auch in der Nacht eine geringe bis mittlere, und nur im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ hohe bioklimatische Belastung aufweist. Laut Planungshinweiskarte sind Maßnahmen zu Verbesserung der bioklimatischen Situation bei allen baulichen Entwicklungen umzusetzen. Die zukünftige Bebauung sollte in Abwägung aller weiteren Belange möglichst mit geringer Versiegelung und wenig Baumasse einhergehen. Für die Freiflächen kann eine Mischung aus Baumgruppen und baumlosen Grünflächen die Vielfalt an Mikroklima sicherstellen und so stellenweise eine Verbesserung der bioklimatischen Situation zumindest am Tage bewirken. Grundsätzlich besteht für die Fläche des geplanten Wohnsiedlungsgebietes ein mittleres Konfliktpotential aus stadtklimatischer Sicht. Eine Entwicklung ist in Abhängigkeit von Art und Maß der Bebauung, in Verbindung mit optimierenden Maßnahmen noch vertretbar.



Abbildung 43: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima für den Bereich um die Entwicklungsflächen im Westen vom Ortsteil Geinsheim (pink gestrichelt umrandet in der Mitte der Abbildung)

Wohngebiet-Entwicklungsfläche zwischen Dammstraße und Weinstraße in Hambach

Im Ortsbezirk Hambach liegt die Entwicklungsfläche im Innenbereich zwischen Wohnsiedlungen (Abbildung 44). Aktuell sind die Flächen für Weinanbau oder als Grünflächen genutzt. Angrenzende Wohngebiete sind



teilweise mit Handlungspriorität 1 oder 2 belegt. Grundsätzlich besteht – in ähnlichem Maße wie die vorgehend beschriebenen Flächen – für die Fläche des geplanten Wohnsiedlungsgebietes ein mittleres Konfliktpotential aus stadtklimatischer Sicht. Eine Entwicklung ist in Abhängigkeit von Art und Maß der Bebauung, in Verbindung mit optimierenden Maßnahmen noch vertretbar.

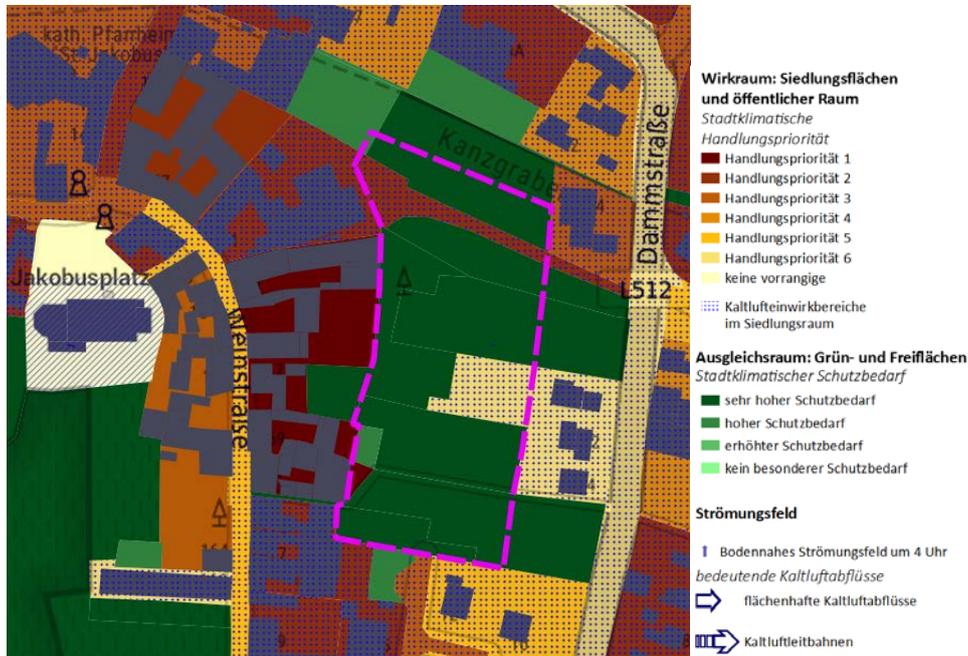


Abbildung 44: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima für den Bereich um die Entwicklungsfläche zwischen Dammstraße und Weinstraße im Ortsteil Hambach (pink gestrichelt umrandet)

Weitere Wohngebiet- und Mischgebiet- Entwicklungsflächen an den Siedlungsrändern

Die weiteren Entwicklungsflächen für Wohngebiete und Gebiete mit Mischnutzung befinden sich jeweils am Siedlungsrand der einzelnen Ortsbezirke, in direkter Nachbarschaft zur bestehenden Wohnbebauung (teilweise in Abbildung 45 dargestellt). Ihr stadtklimatischer Schutzbedarf ist ausnahmslos hoch oder sehr hoch. Die meisten Flächen liegen nicht im Luv der Kaltluftströme in der Nacht (Ausnahme: Gebiet am Scheidweg in Mußbach), so dass eine potenzielle Bebauung in der modellierten windschwachen Wetterlage kein direktes Strömungshindernis darstellen würde. Trotzdem muss für alle Wetterlagen und Windrichtungen die Versorgung der Wohngebiete mit Frisch- und Kaltluft gewährleistet werden, so dass im Falle von Bebauung auf einen möglichst großen Anteil unversiegelter Flächen ohne Strömungshindernisse geachtet werden muss. Durch eine klimaangepasste Gestaltung der (öffentlichen) Freiflächen sowie des Verkehrsraums kann sich eine deutliche Verbesserung der Aufenthaltsqualität am Tage im Vergleich zur derzeitigen Nutzung einstellen. Grundsätzlich bestehen für die Flächen geringe bis keine Konfliktpotenziale aus stadtklimatischer Sicht. Städtebauliche Entwicklung sind – abhängig von Art und Maß der Bebauung – voraussichtlich vertretbar.

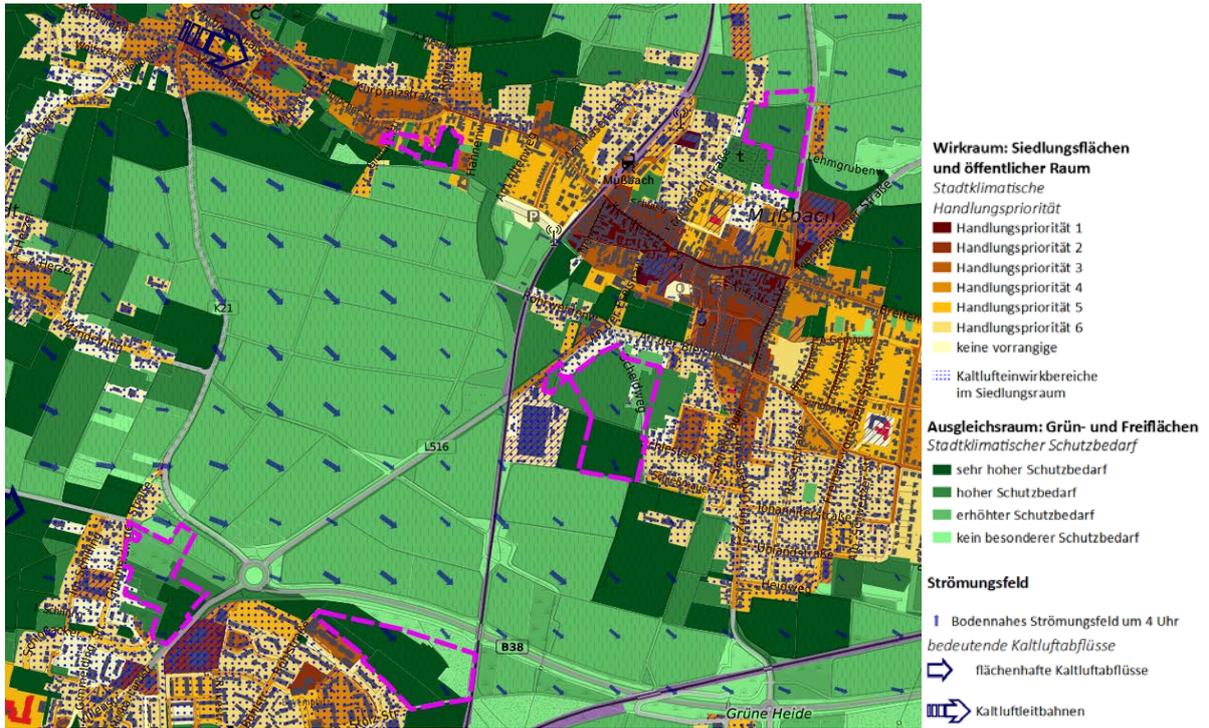


Abbildung 45: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima für den Bereich um die Entwicklungsflächen im Nordosten der Kernstadt (pink gestrichelt umrandet)



6.5 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. so-zio-demographischen Daten).

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte, welche als QGIS-Projekt vorliegt (Abbildung 46). Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf dem vektorbasierten Datensatz (shapefile), in dem alle relevanten Informationen zu jeder der über 7.300 Teilflächen enthalten sind.

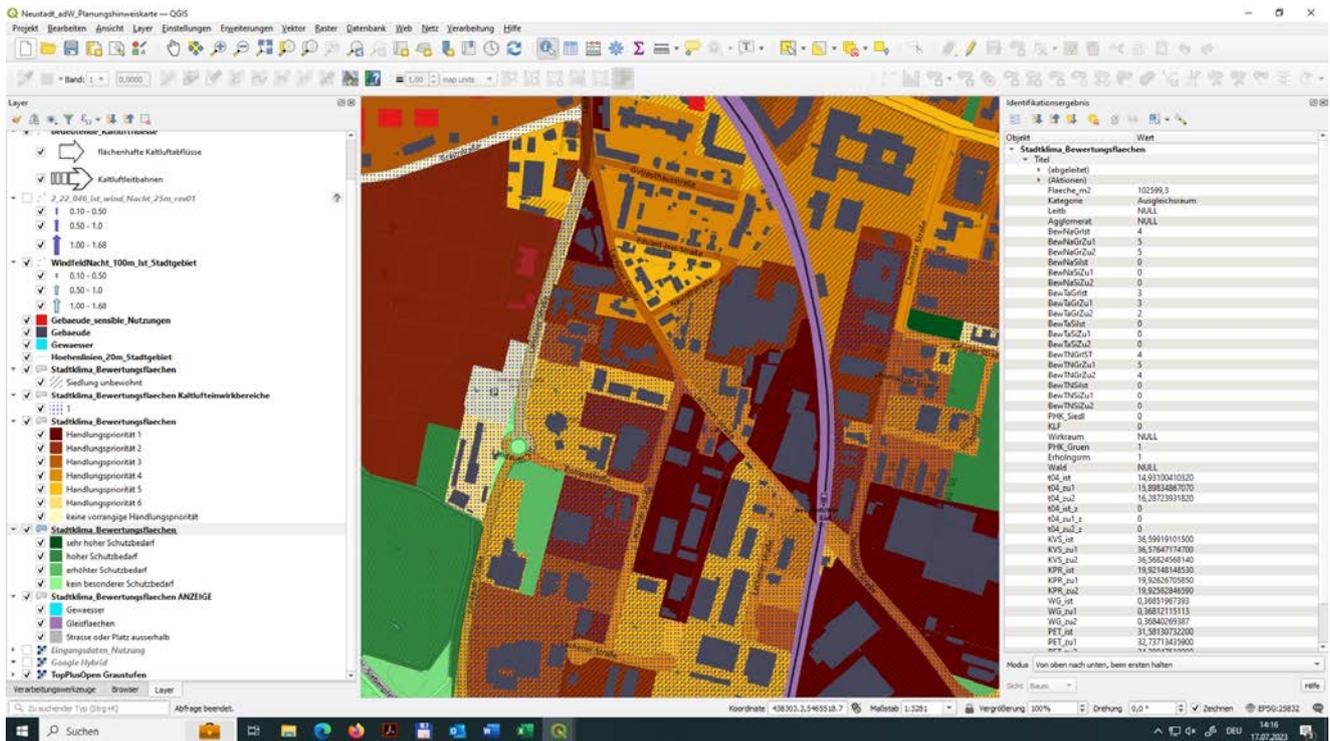


Abbildung 46: Screenshot aus der digitalen Planungshinweiskarte (QGIS Projekt) innerhalb des Stadtklimamanagementsystems

Insgesamt umfasst die Datei „Stadtklima_Bewertungsflächen.shp“ 49 Einzelinformationen zu den Kategorien Nutzung, Ergebnisse der Modellrechnungen, Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten. Die Attributfelder sind in Tabelle 25 beschrieben. Zusätzlich zu dieser Bewertungsflächen-Geometrie sind die Modellergebnisse jeweils als rasterbasiertes *tif verfügbar.



Sämtliche Kartenwerke sind jeweils als QGIS Projekt aufbereitet:

- Rasterbasierte Modellergebnisse
- Klimaanalysekarten
- Bewertungskarten
- Planungshinweiskarte

Tabelle 25: Attributtabelle und Erläuterung zum Vektordatensatz (Stadtklima_Bewertungsflaechen.shp).

FELDNAME	EINHEIT	ERLÄUTERUNG
Flaeche_m2	m ²	Fläche in Quadratmeter
Kategorie	-	Ausgleichsraum Gewässer Gleisflächen Siedlung unbewohnt Strasse oder Platz Strasse oder Platz außerhalb Wohnsiedlung
Leitb	-	1 = Fläche mit Kaltluftleitbahnen oder flächenhaften Kaltluftabflüssen (Primärfunktion) 2 = Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder flächenhaften Kaltluftabflüssen (Sekundärfunktion) (Kriterium für die Bewertung der bioklimatischen Bedeutung in der Nacht im Ausgleichsraum)
Agglomerat	-	1 = Agglomeration: geschlossener Siedlungsraum (ohne Splitterflächen, Einzelhöfe etc. im Außenraum; gutachterliche Einteilung)
BewNaGrIst	-	Bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsfläche für die Nacht, Ist-Situation 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = hoch 5 = sehr hoch
BewNaGrZu1	-	Bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsfläche für die Nacht, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewNaGrIst“
BewNaGrZu2	-	Bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsfläche für die Nacht, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewNaGrIst“



BewNaSilst	-	Bioklimatische Belastung der Siedlungsfläche (Wirkraum) für die Nacht, Ist-Situation 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = hoch 5 = sehr hoch
BewNaSiZu1	-	Bioklimatische Belastung der Siedlungsfläche (Wirkraum), Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewNaSilst“
BewNaSiZu2	-	Bioklimatische Belastung der Siedlungsfläche (Wirkraum), Zukunftsszenario „starker Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewNaSilst“
BewTaGrIst	-	Bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsfläche am Tage, Ist-Situation 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = hoch 5 = sehr hoch
BewTaGrZu1	-	Bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsfläche am Tage, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewTaGrIst“
BewTaGrZu2	-	Bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsfläche am Tage, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewTaGrIst“
BewTaSilst	-	Bioklimatische Belastung der Siedlungsfläche (Wirkraum) am Tage, Ist-Situation 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = hoch 5 = sehr hoch
BewTaSiZu1	-	Bioklimatische Belastung der Siedlungsfläche (Wirkraum), Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewTaSilst“
BewTaSiZu2	-	Bioklimatische Belastung der Siedlungsfläche (Wirkraum), Zukunftsszenario „starker Klimawandel“. Kategorien: siehe „BewTaSilst“
BewTNGrIst	-	Kombinierte Tag/Nacht-Bewertung für den Ausgleichsraum, Ist-Situation
BewTNGrZu1	-	Kombinierte Tag/Nacht-Bewertung für den Ausgleichsraum, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“



BewTNGrZu2	-	Kombinierte Tag/Nacht-Bewertung für den Ausgleichsraum, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
BewTNSilst	-	Kombinierte Tag/Nacht-Bewertung für den Wirkraum, Ist-Situation
BewTNSiZu1	-	Kombinierte Tag/Nacht-Bewertung für den Wirkraum, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
BewTNSiZu2	-	Kombinierte Tag/Nacht-Bewertung für den Wirkraum, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
PHK_Siedl	-	Stadtklimatischer Handlungspriorität im Wirkraum, Planungshinweiskarte 1 = Handlungspriorität 1 2 = Handlungspriorität 2 3 = Handlungspriorität 3 4 = Handlungspriorität 4 5 = Handlungspriorität 5 6 = Handlungspriorität 6 99 = keine vorrangige Handlungspriorität
KLF	-	1 = > 50 % der Fläche liegen im Kaltluftereinwirkungsbereich → Siedlungsfläche mit Klimafunktion (Kriterium bei der Bewertung der stadtklimatischen Handlungspriorität)
Wirkraum	-	1 = Wirkraum (Kategorien: „Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“)
PHK_Gruen	-	Stadtklimatischer Schutzbedarf im Ausgleichsraum, Planungshinweiskarte 1 = sehr hoher Schutzbedarf 2 = hoher Schutzbedarf 3 = erhöhter Schutzbedarf 99 = kein besonderer Schutzbedarf
Erholungsrm	-	1 = fußläufiger Erholungsraum im Umkreis von 500 m von Siedlung (Kriterium für die kombinierte Bewertung Tag/ Nacht im Ausgleichsraum)
Wald	-	1 = Wald
t04_ist	°C	Flächenmittelwert: Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand
t04_zu1	°C	Flächenmittelwert: Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“.
t04_zu2	°C	Flächenmittelwert: Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“.



t04_ist_z	-	Z-Wert des Flächenmittelwert der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für die Ist-Situation (Werte nur für die Kategorien: „Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“, alle anderen = „0“)
t04_zu1_z	-	Z-Wert des Flächenmittelwert der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für das Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ (Werte nur für die Kategorien: „Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“, alle anderen = „0“)
t04_zu2_z	-	Z-Wert des Flächenmittelwert der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens für das Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ (Werte nur für die Kategorien: „Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“, alle anderen = „0“)
KVS_ist	$m^3/(s*m)$	Flächenmittelwert: nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte um 04:00 morgens, Ist-Zustand
KVS_zu2	$m^3/(s*m)$	Flächenmittelwert: nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
KVS_zu2	$m^3/(s*m)$	Flächenmittelwert: nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
KPR_ist	m^3/m^2*h	Flächenmittelwert: nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Ist-Zustand
KPR_zu1	m^3/m^2*h	Flächenmittelwert: nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
KPR_zu2	m^3/m^2*h	Flächenmittelwert: nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
WG_ist	m/s	Flächenmittelwert: nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand
WG_zu1	m/s	Flächenmittelwert: nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
WG_zu2	m/s	Flächenmittelwert: nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
PET_ist	°C	Flächenmittelwert: PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Ist-Zustand
PET_zu1	°C	Flächenmittelwert: PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
PET_zu2	°C	Flächenmittelwert: PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, „starker Klimawandel“
PET_ist_z	-	Z-Wert des Flächenmittelwert der PET in 1,1m Höhe um 14:00 für die Ist-Situation (Achtung, unterschiedliche Wertebasis für die Kategorien: „Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“ einerseits, und Kategorie „Ausgleichsraum“ andererseits)
PET_zu1_z	-	Z-Wert des Flächenmittelwert der PET in 1,1m Höhe um 14:00, Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“ (Achtung, unterschiedliche Wertebasis für die Kategorien:



		„Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“ einerseits, und Kategorie „Ausgleichsraum“ andererseits)
PET_zu2_z	-	Z-Wert des Flächenmittelwert der PET in 1,1m Höhe um 14:00, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ (Achtung, unterschiedliche Wertebasis für die Kategorien: „Wohnsiedlung“, „Siedlung unbewohnt“, „Strasse oder Platz“ einerseits, und Kategorie „Ausgleichsraum“ andererseits)

Zusätzlich zum oben beschriebenen Shape-File „Stadtklima_Bewertungsflaechen.shp“ gehören folgende Geodaten im Vektorformat (shape) bzw. Rasterformat (tif) zum Gesamt-Datenpaket der Stadtklimaanalyse:

Vektorformat (Shape)

- Punkt-Shapes mit nächtlichen Strömungsfeldern (Geschwindigkeit und Richtung) in verschiedenen Auflösungen (10 m, 25 m 50 m, 100 m, 150 m)
- Gebäude
- Gebäude mit hitzesensibler Nutzung
- Gewässer (als zusätzlicher Kartenlayer für Gewässerflächen die nicht in der Basisgeometrie erfasst sind)
- Höhenlinien
- Kaltluftentstehungsgebiete
- Stadtgrenze
- Bedeutende Kaltluftabflüsse
- Städtebauliche Entwicklungsflächen – Gewerbegebiet
- Städtebauliche Entwicklungsflächen – Wohnbaugebiete

Rasterformat (*tif, 10 m Auflösung)

- Eingangsdaten: Nutzung
- Eingangsdaten: Strukturhöhe
- Eingangsdaten: Digitales Geländemodell
- Modellergebnisse, jeweils für Ist-Situation sowie beide Zukunftsszenarien
 - PET um 14 Uhr in 1,1 m Höhe [°C]
 - Temperatur um 4 Uhr in 2 m Höhe [°C], sowie 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]



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. Für Neustadt an der Weinstraße wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert. Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 26 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 Neustadt an der Weinstraße beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Am Tage sind viele Siedlungsbereiche in den umliegenden Ortsbezirken 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. Da in den nicht am Haardtrand liegenden Gemeindeteilen kaum fußläufige Ausgleichsräume vorhanden sind, bieten die außenliegenden Grün- und Freiflächen aus Stadtklimasicht viel Optimierungspotenzial. Hier sollten kühle Erholungsräume geschaffen werden (→ M02: Öffentliche Grünräume schaffen). Die Wohngebiete südlich des Hauptbahnhofs zeigen am Tage größtenteils eine geringe bis höchstens mittlere bioklimatische Belastung. Hier befinden sich ausladende Grünflächen mit zum Teil hoher, Kühle spendender Vegetation zwischen den Gebäuden, dies es beizubehalten gilt. Auch die Wohnviertel Hambacher Höhe und Afrika-Viertel genießen durch die Nähe zum Wald und einen hohen Baumanteil gute bioklimatische Bedingungen.

Die hohe Hitzebelastung im Altstadtbereich resultiert aus der großen Baumasse sowie dem hohen Versiegelungsgrad. Im Schatten der hohen Gebäude ist es zu den entsprechenden Tageszeiten trotzdem kühl. Für eine bioklimatische Aufwertung in Verbindung mit Aufenthaltsqualität empfiehlt sich sowohl eine Begrünung der Innenhöfe (→ M01 Innen-/Hinterhofbegrünung) als auch der öffentlichen Räume (→ M02 Öffentliche Grün-



räume schaffen). Im Einzelfall muss geprüft werden, inwiefern Entsiegelung, Dachbegrünung und Fassadenbegrünung möglich ist (→ M04, M17, M18). Als Verkehrsraum sollte die Fußgängerzone flächendeckend zumindest teilverschattet gestaltet sein. (→ M05 Verkehrsraumgestaltung).

In der Nacht sind die außenliegenden Ortsbezirke zumindest in den Wohngebieten 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). Nicht zuletzt ist es auch für den Weinbau entscheidend, dass an den Hängen des Haardtrands im Frühjahr die Kaltluft möglichst ungehindert in Richtung Siedlungsgebiete abfließen kann.

Die Gewerbegebiete weisen am Tage eine hohe bis sehr hohe bioklimatische Belastung auf. Als Beispiel sei hier das Gewerbegebiet an der Adolf-Kolping-Straße genannt, mit hohem Besucheraufkommen am Tage. Maßnahmen zur Verschattung verringern 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).

Neustadt an der Weinstraße hat zwar keine großen Flussläufe oder siedlungsnahen Seen, jedoch einige Fließgewässer wie Speyerbach, Rehbach, Mußbach, Floßbach sowie weitere kleinere permanent wasserführende Gewässer wie z.B. der Bürgergraben. 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 umgebenden 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. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauster Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Der Grünzug Wallgasse in Kombination mit dem Grünzug Böbig sind ein gutes Beispiel in ihrer Funktion als grüne Verkehrsverbindung für Fußgänger und Fahrradfahrer von der Innenstadt bis zum Bahnhof Böbig und dem Schulzentrum, in Kombination mit dem naturnahen Ausbau des Speyerbachs, welcher neben der ökolo-



gischen Aufwertung auch den Menschen eine erhöhte Aufenthaltsqualität bietet. In der Kernstadt bieten verschiedene Brunnen und Wasserspiele wie der Brunnen am Daniel-Meining-Platz, der Elwetrutsche Brunnen sowie der Wasserlauf in der Lautergasse bereits lokal Abkühlung.

Strukturreiche, gut wasserversorgte Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die Waldgebiete und Weinhänge am Haardtrand stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08: Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Darüber hinaus sind aber auch Parkanlagen innerhalb der Stadt, wie zum Beispiel Rosengarten, Kriegergarten und Hetzelanlage zu bewahren und ggfs. neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichsströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).

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: Opti-



mierung 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). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepassten Nachverdichtungsprojekten 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 klima-angepasste Umgestaltung öffentlicher Räume).



Tabelle 26: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Neustadt an der Weinstraße.

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 (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<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



Bild: Helle Fassade in Ulm (Quelle: J. Förster, GEO-NET)

04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) ▪ Anzahl an oberirdischen Stellplätzen verringern zugunsten von Grünflächen

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<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



Bild: Rasengittersteine, Parkplatz in Lüneburg (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)



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 ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“ 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsigelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	<p>Bild: Grünzug Böbig in Neustadt an der Weinstraße (Quelle: www.neustadt.eu)</p>
<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>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 	<p>Bild: Am Daniel-Meiningner-Platz / Innungsbaum in Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>



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 (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</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 (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	<p>Bild: Kriegergarten, Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</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 ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	 <p>Bild: Brunnen am Daniel-Meiningner-Platz in Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität ▪ 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>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>Bild: Regenwasserteich, Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: M. Lübbecke)</p>
<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 	



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>11</p> <p>(Temporäre) Saisonale klima-angepasste 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 (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)
<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 (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)

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

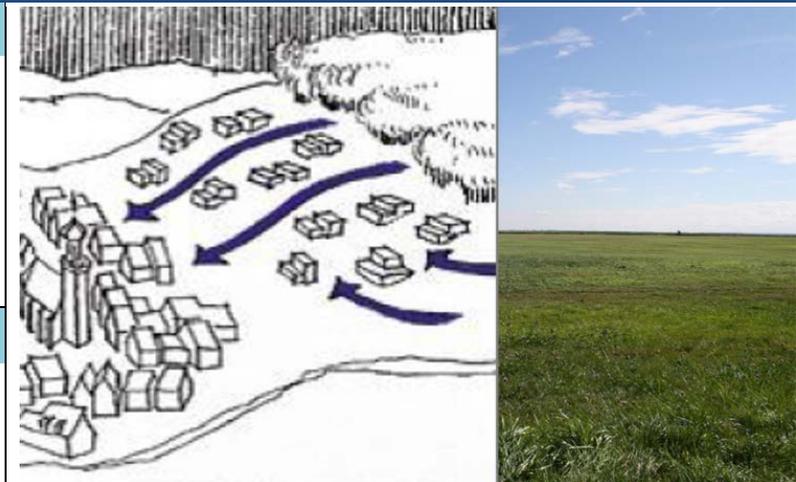


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: GEO-NET)



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 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 	
<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 (Quelle: J. Förster, GEO-NET)</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung 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: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: D. Leßmann, GEO-NET)

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; soweit rechtlich zugelassen) 	



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



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<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 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)



Bild: Fassadenbegrünung in der Altstadt von Neustadt an der Weinstraße (Quelle: E. Hipler, GEO-NET)

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

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<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 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand)



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



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19 Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen

Kurzerläuterung

- Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme

Wirkung

- in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs
- Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Bestand)



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

20 Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

- Möglichst ressourcenschonende Lösung
- Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird
- Erdkältenutzung
- Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden

Wirkung

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung

Räumliche Umsetzung

- Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können

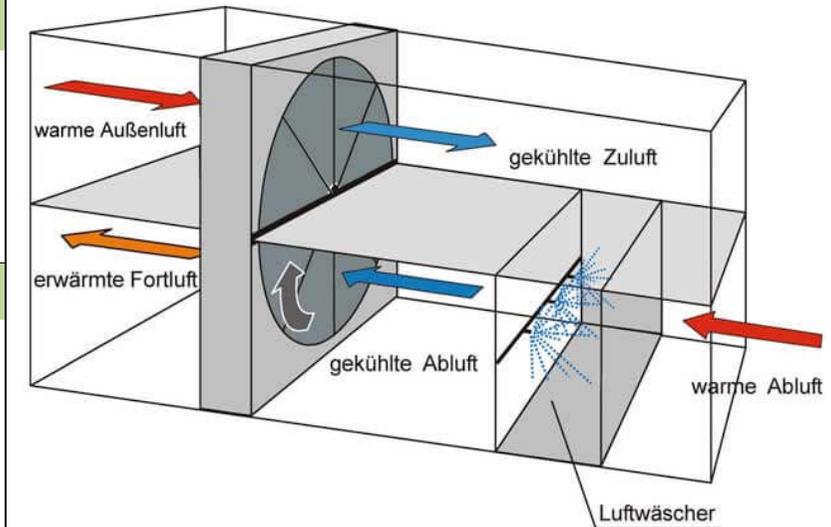


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>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>Bild: Aufnahme eines nach West ausgerichteten Büroraums. (Quelle: G. Meusel, GEO-NET)</p>
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege) vorwiegend im Neubau umsetzbar 	



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 Klimamolldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamolldaten“, 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., 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 24.07.2023

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 „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Klimaanalysekarten**
 - Klimaanalysekarte Ist-Situation
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Bewertungskarten**
 - Bewertungskarte Nachtsituation Ist-Situation
 - Bewertungskarte Nachtsituation Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Bewertungskarte Nachtsituation Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Bewertungskarte Tagsituation Ist-Situation
 - Bewertungskarte Tagsituation Zukunftsszenario „schwacher Klimawandel“
 - Bewertungskarte Tagsituation Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **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