

Klimaanalyse Stadt Wetzlar



Oktober 2023

<p>GEO-NET Umweltconsulting GmbH Große Pfahlstraße 5a 30161 Hannover Tel: (0511) 388 72-00 www.geo-net.de</p>	<p>im Auftrag der Stadt Wetzlar Amt für Umwelt und Naturschutz Klimaschutzmanagement 35573 Wetzlar www.wetzlar.de</p>
	<p>STADT WETZLAR</p> 



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Glossar	VII
Zusammenfassung	1
1. Hintergrund und Anlass	3
2. Fachliche Grundlagen	4
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	4
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse.....	8
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	11
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	14
4. Klima und Klimawandel im Raum Wetzlar	17
4.1 Datengrundlage und Methodik.....	17
4.2 Gegenwärtiges Klima	21
4.3 Autochthone Wetterlagen	24
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen.....	25
5. Analysemethoden	29
5.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D.....	29
5.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	33
5.3 Rahmen- und Randbedingungen der Modellierung.....	36
5.4 Modellausgabe-Größen	37
5.5 Qualitätssicherung	38
5.6 Unsicherheiten und Herausforderungen	38
6. Analyseergebnisse	41
6.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	41
6.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht.....	43
6.3 Wärmebelastung am Tag (PET).....	45
7. Zwischenprodukte	46
7.1 Klimaanalysekarte	46
7.2 Sensitivitätsanalyse	49
8. Endprodukte	56
8.1 Grundlagen	56



8.2	Geometrische Basis.....	57
8.3	Bewertungskarten.....	58
8.4	Planungshinweiskarte Stadtklima	70
8.5	Maßnahmen und ihre Wirkungen.....	77
8.6	Stadtklimamanagementsystem.....	105
	Quellenverzeichnis.....	109
	Anhang.....	114



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	4
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2022).....	5
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)	6
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	7
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	8
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	9
ABBILDUNG 7: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18)	12
ABBILDUNG 8: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE	14
ABBILDUNG 9: 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).....	18
ABBILDUNG 10: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.....	20
ABBILDUNG 11: JAHRESMITTELTEMPERATUR IN WETZLAR IM ZEITRAUM 1881 BIS 2022 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023D)	21
ABBILDUNG 12: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE ($T_{MAX} \geq 30 \text{ °C}$) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN WETZLAR (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023D)	21
ABBILDUNG 13: TROCKENHEITSINDEX NACH DE MARTONNE IN WETZLAR IM ZEITRAUM 1970 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023D)	22
ABBILDUNG 14: SAISONMITTELWERTE DER BODENFEUCHTE (IN % NFK) IN WETZLAR IM ZEITRAUM 1991 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2023D)	23
ABBILDUNG 15: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) AN DER WETZLAR NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION GIEßEN-WETTENBERG FÜR DEN ZEITRAUM 1981 – 2020 (DWD 2023C)	24
ABBILDUNG 16: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN WETZLAR (ALLE RCP-SZENARIEN)....	26
ABBILDUNG 17: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN DEN DREI ZUKUNFTSPERIODEN IN WETZLAR (RCP 8.5)	26
ABBILDUNG 18: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN DEN DREI ZUKUNFTSPERIODEN IN WETZLAR (RCP 8.5)	28
ABBILDUNG 19: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	32
ABBILDUNG 20: 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.	33
ABBILDUNG 21: DIGITALES GELÄNDEMDELL FÜR WETZLAR UND DIE NÄHERE UMGEBUNG.....	34
ABBILDUNG 22: MODELLEINGANGSDATEN „LANDNUTZUNGSKLASSEN“ FÜR DEN STATUS QUO IN EINEM AUSSCHNITT DER WETZLARER KERNSTADT	35
ABBILDUNG 23: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION.....	36
ABBILDUNG 24: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN DER WETZLARER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE)	41
ABBILDUNG 25: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IN DER WETZLARER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE)	42
ABBILDUNG 26: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IN DER WETZLARER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE)	44
ABBILDUNG 27: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IN DER WETZLARER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE)	44
ABBILDUNG 28: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DER WETZLARER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE)	45



ABBILDUNG 29: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAAANALYSEKARTEN (VERKÜRZTE DARSTELLUNG) 46

ABBILDUNG 30: KLIMAAANALYSEKARTE IN EINEM AUSSCHNITT DES WETZLARER STADTGEBIETS (VERKÜRZTE LEGENDE)
..... 48

ABBILDUNG 32: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON SENIORINNEN IM WETZLARER STADTGEBIET (AUSSCHNITT
KERNSTADT). DARSTELLUNG DER SENIORINNENDICHTE IN DEZILEN. 51

ABBILDUNG 31: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON HOCHALTRIGEN IM WETZLARER STADTGEBIET (AUSSCHNITT
KERNSTADT). DARSTELLUNG DER HOCHALTRIGENDICHTE IN DEZILEN. 51

ABBILDUNG 33: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON KLEINKINDERN IM WETZLARER STADTGEBIET (AUSSCHNITT
KERNSTADT). DARSTELLUNG DER KLEINKINDERDICHTE IN DEZILEN. 52

ABBILDUNG 34: KONZENTRATION DER VON ARMUT BENACHTEILIGTEN BEVÖLKERUNG IM WETZLARER STADTGEBIET.
..... 52

ABBILDUNG 35: SENSIBLE NUTZUNGEN / EINRICHTUNGEN. ORTE, AN DENEN SICH VULNERABLE GRUPPEN (ALTE,
KRANKE, KINDER) IM WETZLARER STADTGEBIET AUFHALTEN. 53

ABBILDUNG 36: SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE DER STADT WETZLAR (AUSSCHNITT). DARSTELLUNG DER SENSITIVITÄT
DER WETZLARER BEVÖLKERUNG AUF BASIS VON SENSIBLEN BEVÖLKERUNGSGRUPPEN. 54

ABBILDUNG 37: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IM AUSGANGSRASTER (LINKS) UND ALS ERGEBNIS DER
RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE IN EINEM AUSSCHNITT DES WETZLARER
STADTGEBIETS (RECHTS; GEBÄUDE JEWEILS IN SCHWARZ) 57

ABBILDUNG 38: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN
UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) 58

ABBILDUNG 39: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION 62

ABBILDUNG 40: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM 63

ABBILDUNG 41: BEWERTUNGSKARTE NACHTSITUATION (AUSSCHNITT). DARSTELLUNG DER BIOKLIMATISCHEN
SITUATION IM WIRKRAUM (SIEDLUNGSGEBIET) SOWIE DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG DER
AUSGLEICHSFÄCHEN FÜR DEN WOHNIEDLUNGSRaum IN DER NACHT. 66

ABBILDUNG 42: BEWERTUNGSKARTE TAGSITUATION (AUSSCHNITT). DARSTELLUNG DER BIOKLIMATISCHEN
SITUATION IM WIRKRAUM (SIEDLUNGSGEBIET) SOWIE DER AUFENTHALTSQUALITÄT DER AUSGLEICHSFÄCHEN
(GRÜNFLÄCHEN) AM TAGE. 69

ABBILDUNG 43: PHK-SYMBOLLOGIE FÜR SIEDLUNGSRÄUME MIT KALTLUFTFUNKTION. 71

ABBILDUNG 44: PHK-LEGENDE MIT SIGNATUREN ZUR KENNZEICHNUNG DER GEBIETE MIT SENSITIVEN
BEVÖLKERUNGSANTEILEN ANHAND DER BEVÖLKERUNGSDICHTE. 71

ABBILDUNG 45: PHK-SYMBOLLOGIE MIT INFORMATIONEN ZU FUßLÄUFIG ERREICHBAREN ENTLASTUNGSRÄUMEN. ... 72

ABBILDUNG 46: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR EINEN AUSSCHNITT DES WETZLARER STADTGEBIETS... 76

ABBILDUNG 47:: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA. FOKUSRAUM "NEUSTADT" MIT NUMMERIERTEN
BEISPIELFLÄCHEN. 95

ABBILDUNG 48: BEWERTUNGSKARTE TAG, FOKUSRAUM "NEUSTADT" 96

ABBILDUNG 49: BEWERTUNGSKARTE NACHT, FOKUSRAUM "NEUSTADT" 96

ABBILDUNG 50: PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR AM TAGE (PET) FÜR DEN FOKUSRAUM "NEUSTADT". . 97

ABBILDUNG 51: KLIMAAANALYSEKARTE (KAK) FÜR DEN FOKUSRAUM "NEUSTADT" 98

ABBILDUNG 52: NUTZUNGSRASTER FÜR DEN FOKUSRAUM "NEUSTADT" 98

ABBILDUNG 53: LUFTBILD FÜR DEN FOKUSRAUM "NEUSTADT" 99

ABBILDUNG 54: PHK, BEISPIELFLÄCHE (1) 101

ABBILDUNG 55: BEWERTUNGSKARTE TAG, BEISPIELFLÄCHE (1)..... 101

ABBILDUNG 56: BEWERTUNGSKARTE NACHT, BEISPIELFLÄCHE (1) 101

ABBILDUNG 57: PET, BEISPIELFLÄCHE (1) 101

ABBILDUNG 58: KAK, BEISPIELFLÄCHE 1 101

ABBILDUNG 59: NÄCHTLICHES WINDFELD, BEISPIELFLÄCHE (1) 101

ABBILDUNG 60: NUTZUNGSRASTER, BEISPIELFLÄCHE (1) 101

ABBILDUNG 61: LUFTBILD, BEISPIELFLÄCHE (1)..... 101

ABBILDUNG 62: PHK, BEISPIELFLÄCHE (2) 102

ABBILDUNG 63: BEWERTUNGSKARTE TAG, BEISPIELFLÄCHE (2)..... 102



ABBILDUNG 64: BEWERTUNGSKARTE NACHT, BEISPIELFLÄCHE (2)	102
ABBILDUNG 65: PET, BEISPIELFLÄCHE (2)	102
ABBILDUNG 66: KAK, BEISPIELFLÄCHE (2)	102
ABBILDUNG 67: NÄCHTLICHES WINDFELD, BEISPIELKARTE (2)	102
ABBILDUNG 68: NUTZUNGSRASTER, BEISPIELKARTE (2)	102
ABBILDUNG 69: LUFTBILD, BEISPIELKARTE (2)	102
ABBILDUNG 70: VERORTUNG VON MÖGLICHEN MAßNAHMEN AUF DEN BEISPIELFLÄCHEN (1) BIS (4).....	104
ABBILDUNG 71: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB DES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	105



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN WETZLAR (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	25
TABELLE 2: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE SOWIE DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN IN WETZLAR (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	27
TABELLE 3: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 10 M.	31
TABELLE 4: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	37
TABELLE 5: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT.	38
TABELLE 6: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAAANALYSEKARTEN.	47
TABELLE 7: KLASSIFIZIERUNG DER SENSITIVITÄT DER BEVÖLKERUNG.	54
TABELLE 8: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	59
TABELLE 9: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT SOWIE ANGABE DER KLIMAFUNKTION DER FLÄCHEN (WENN ZU MINDESTENS 1/3 KALTLUFTEINWIRKBEREICH).	59
TABELLE 10: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	60
TAB. 11: ABLEITUNGSVORSCHRIFT ZUR BEWERTUNG DER AUSGLEICHSRAUMBEDEUTUNG	62
TABELLE 12: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR WOHN- UND GEWERBERAUM.	70
TABELLE 13: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE HANDLUNGSPRIORITÄTEN FÜR DEN WIRKRAUM.	71
TABELLE 14: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSRAUM.	72
TABELLE 15: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE SCHUTZBEDARFE FÜR DEN AUSGLEICHSRAUM.	73
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	73
TABELLE 17: FLÄCHENANTEILE DER SCHUTZBEDARFE IM AUSGLEICHSRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	74
TABELLE 18: PLANUNGSHINWEISKATALOG - EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT WETZLAR	81
TABELLE 19: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004).	99
TABELLE 20: METADATEN ZUM VEKTORDATENSATZ (BEWERTUNGSKARTEN, PHK)	106



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.

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

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

Ausgleichsraum: Grüengeprägte, relativ unbelastete Freifläche, die an einen → *Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über → *Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Belastungen 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.

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 Forste 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).

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



Kaltlufteinwirkungsbereich: Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs-, Gewerbeflächen und der Straßenraum, die von einem überdurchschnittlich hohen \rightarrow *Kaltluftvolumenstrom* $> 44,9 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ oder einer bodennahe Windgeschwindigkeit $\geq 0,2 \text{ m/s}$ durchflossen werden.

Kaltluftleitbahnen: Vorwiegend lineare Strukturen, die Kaltluftentstehungsgebiete (\rightarrow *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (\rightarrow *Wirkungsräume*) miteinander verbinden und sind somit elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, sollten als Faustregel jedoch mindestens 50 m breit sein (Mayer et al. 1994).

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der \rightarrow *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an \rightarrow *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer \rightarrow *Kaltluftleitbahn* fließt. Anders als das \rightarrow *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom somit auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

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

PET (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 Siedlungs- und Gewerbeflächen im Stadtgebiet (\rightarrow *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als \rightarrow *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien: 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 sozioökonomischen 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 (*Representative Concentration Pathway*).

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 \rightarrow *Autochthone Wetterlage*

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

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

z-Transformation: Die z-Transformation ist ein mathematisches Verfahren zur Standardisierung. Über die z-Transformation werden (vereinfacht gesagt) Werten mit verschiedenen Einheiten eine neue gemeinsame „Standardabweichungs-Einheit“ zugewiesen. Das Ergebnis der z-Transformation sind sogenannte "z-Werte", die die Standardabweichungen vom Mittelwert darstellen. Ein z-Wert von 0 entspricht genau dem Mittelwert, ein z-Wert von 1 bedeutet, dass dieser Wert eine Standardabweichung oberhalb des Mittelwerts liegt. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, sodass beispielsweise die relativen Unterschiede der thermischen Belastung in einem Stadtgebiet miteinander verglichen werden können.



Zusammenfassung

Im Jahr 2022/23 wurde erstmalig eine Stadtklima- und Vulnerabilitätsanalyse für das Stadtgebiet von Wetzlar durchgeführt. Im Fokus der Untersuchung standen dabei insbesondere der städtische Kaltlufthaushalt sowie die kleinräumige, sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht, welche mithilfe einer hochaufgelösten, computergestützten Modellsimulation des Wetzlarer Stadtklimas untersucht wurden.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte mit angebundenem Planungshinweiskatalog sowie einer integrierten Vulnerabilitätsanalyse, die in einem verwaltungsinternen, ämterübergreifenden Prozess (inklusive Workshops) unter Leitung des Amtes für Umwelt und Naturschutz entwickelt worden ist. Als Orientierungshilfe für die Vulnerabilitätsanalyse diente der Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen (KLIMPRAX Stadtklima) vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG 2019). Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) der Wetzlarer Stadtbevölkerung 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. Hierbei flossen sowohl die Tag- als auch die Nachtsituation des Status quo in die Bewertungsabwägung ein.

Im Vorfeld der Modellierung erfolgte innerhalb der Stadtklimaanalyse eine umfassende Aufbereitung des vergangenen und zukünftigen Klimas Wetzlars. Bezogen auf die letzten 30 Jahre (1991 – 2020) weist die Stadt eine Jahresmitteltemperatur von 9,6 °C und eine Jahresniederschlagssumme von 705 mm auf und ist damit um 0,3 °C wärmer und um 85 mm trockener als der bundesdeutsche Durchschnitt. Bei der Betrachtung des Wetzlarer Stadtklimas der Vergangenheit bis heute wird deutlich, dass die klimatische Entwicklung der Stadt den globalen Trends folgt. Hinsichtlich der mittleren Jahrestemperatur konnte seit Beginn der Messungen im 19. Jh. bis zur aktuellen Klimareferenzperiode von 1991 bis 2020 eine Zunahme um 1,4 °C nachgewiesen werden, wobei die fünf wärmsten Jahre des Zeitraumes allesamt in den letzten 10 Jahren registriert wurden. So stieg auch die Zahl der temperaturinduzierten sommerlichen Kenntage wie Sommertage oder Heiße Tage in den letzten 30 Jahren merklich an. Besonders hoch ist der sommerliche Hitzestress zu windschwachen Strahlungswetterlagen, die am Tage die ungehinderte Einstrahlung auf die städtischen Flächen begünstigen und in der Nacht den Unterschied zwischen überwärmter Stadt und kühlerem Umland (Urbane Wärmeinsel) am stärksten aufzeigen. Aus diesen Gründen verwendet auch das für die Analyse genutzte Modell FITNAH-3D diese sog. autochthone Wetterlage als Randbedingung. In Wetzlar unterliegt fast jede dritte Sommernacht diesen Witterungsbedingungen, wodurch sich kleinräumig Ausgleichsströmungen einstellen.

Die Interpolation des Klimas in die Zukunft bestätigt die genannten Temperaturentwicklungen ebenfalls – bis zum Ende des Jahrhunderts ist je nach betrachtetem RCP-Szenario mit einem Temperaturanstieg zwischen 0,8 °C und 4,7 °C zu rechnen, zudem ist künftig tendenziell eine Sommertrockenheit zu erwarten. Gleichzeitig ist in der Zukunft davon auszugehen, dass die Intensität von klimatologischen Extremereignissen zunimmt. So wird es zwar im Schnitt weniger oft regnen, dafür werden Starkregenereignisse häufiger auftreten als im aktuellen Referenzzeitraum. Da Starkregen oftmals mit hohen Windgeschwindigkeiten einhergeht, sind häufigere Stürme zukünftig nicht auszuschließen, eine Signifikanz für diese Vermutung konnte im Rahmen dieser Analyse für Wetzlar jedoch nicht festgestellt werden.

Für die Modellrechnung des Ist-Zustandes wurde eine umfangreiche Datenaufbereitung der Landnutzung, des Geländes und der Strukturhöhen auf Grundlage einer Datenbasis von 2022 in einer horizontalen Auflösung



von 5 m vorgenommen, wobei zusätzlich 5 Bebauungspläne eingepflegt wurden, um die bevorstehende Stadtentwicklung bereits in der Klimaanalyse zu berücksichtigen. Als meteorologische Randbedingungen lag dem Modell ein Sommertag mit idealisierter autochthoner Wetterlage ohne Bewölkung und eine Bodenfeuchte von 60 % zugrunde.

Die Modellergebnisse der Nacht (Ausgabezeitpunkt 04 Uhr: Temperatur, Windfeld, Kaltluftvolumenstromdichte und Kaltluftproduktionsrate) und des Tages (Ausgabezeitpunkt 14 Uhr: Physiologisch Äquivalente Temperatur) bilden die Grundlage für die Klimaanalysekarte sowie für die Bewertungskarten und schließlich für die Planungshinweiskarte und beschreiben die wichtigsten klimaökologischen Prozesse der Stadt und sind in Planungsprozessen aus Klimasicht stets hinzuzuziehen. So weisen die großflächigen Agrargebiete im Außenbereich der Stadt Kaltluftentstehungsgebiete auf, deren gebildete Kaltluft durch Hang-ab- und Flurwinde hin zum (belasteten) Siedlungsraum transportiert wird. Während die Stadtteile Wetzlars in Randlage weniger dicht bebaut sind und ein weites Eindringen dieser entlastenden Windsysteme erlauben, nimmt die Bebauungsdichte in Richtung der Kernstadt weiter zu, was einen strömungsabbremsenden Effekt begründet. Insbesondere in den höher versiegelten Innenstadtbereichen ist daher die Verfügbarkeit eigener, mit flacher Vegetation bestandener Kaltluftproduktionsflächen geboten, ohne die Tagsituation zu vernachlässigen, bei welcher die Reduktion der Wärmebelastung insbesondere durch schattenspendende Bäume prioritär zu betrachten ist.

Ergänzend zur klimaökologischen Modellierung wurde für das Wetzlarer Stadtgebiet eine Sensitivitäts- und Vulnerabilitätsanalyse durchgeführt, welche die Betroffenheit der Wetzlarer Bevölkerung gegenüber Hitzeextremen aufzeigt. Durch eine Überlagerung der Vulnerabilitätsanalyse mit den klimaökologischen Inhalten der Planungshinweiskarte (PHK) werden Räume im Wetzlarer Stadtgebiet aufgezeigt, in denen der Handlungsdruck und der Bedarf an Anpassungsmaßnahmen besonders hoch ist.

Dem gesamten Kartenwerk der Klimaanalyse Wetzlar ist ein 21 Maßnahmen umfassender Planungshinweiskatalog angehängt, der unterstützt durch vier Anwendungsbeispiele 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 Planungshinweiskatalogs im Speziellen ist somit 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. Neben diesem Bericht wurde zusätzlich ein externes Dokument als Lesehilfe für das im Rahmen der Klimaanalyse erzeugte Kartenwerk angefertigt. Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Wetzlarer Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 Jahren anzustreben.



1. Hintergrund und Anlass

Vor dem Hintergrund des Klimawandels und städtebaulicher Entwicklungen haben die Themen Stadtklima bzw. Klimawandelanpassung in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen – sowohl hinsichtlich der Gesetzgebung (bspw. Novellierung des BauGB 2011 und des UVPG 2017) als auch im Bewusstsein der Bevölkerung. Um den Belangen des Stadtklimas planerisch adäquat begegnen zu können, sind aktuelle Informationen in geeigneter räumlicher Auflösung erforderlich. Im Folgenden sind rechtliche, fachliche, planerische und politische Gründe aufgetragen, die die Wichtigkeit einer Stadtklimaanalyse verdeutlichen.

- Mit den Klima-Novellen des Baugesetzbuches (BauGB) im Jahr 2011 sowie des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) im Jahr 2017 haben sich die für die Stadtklimatologie relevanten Rechtsnormen noch deutlicher als zuvor für stadtklimatische Fragen mit Blick auf das Schutzzut der menschlichen Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse geöffnet. Mit diesen Entwicklungen sind die Ansprüche an die inhaltliche Aussagetiefe und räumliche Aussagegenauigkeit der benötigten Analysen noch einmal deutlich gestiegen.
- Die für Stadtklimaanalysen maßgebliche VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 „Klima- und Lüfthygienekarten für Städte und Regionen“ ist heutzutage ein umweltmeteorologischer Standard, der zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert wurde (VDI 2015).
- Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute entsprechende Instrumente zur Verfügung, die einen hohen Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen ermöglichen. Die Modelle sind dabei in der Lage, die meteorologisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen Wärmeinseleffekt in den besiedelten Wirkungsräumen und (planerisch beeinflussbaren) kühlenden Kaltluftabflüssen und Flurwinden aus dem Ausgleichsraum für bestimmte thermisch belastende Wetterlagen umfassend abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, szenarienbasierte Ansätze (z.B. zur summarischen Wirkung von Stadtentwicklungsvorhaben und/oder Anpassungsmaßnahmen) zu untersuchen und zu bewerten.
- Die Klimafolgenanpassung (hier die Hitzevorsorge und die Bedeutung von Kaltluft) ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. Ein wichtiges Element ist die Klimaanalyse als Grundlage zur Berücksichtigung stadtklimatischer Aspekte in räumlichen Planungen. Die Sicherstellung der Berücksichtigung der Klimafunktions- und Planungshinweiskarten bei Planungen und Vorhaben wurde im Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung festgelegt. (Stadt Wetzlar – Erik Berge 2020).

Aus diesen Rahmenbedingungen wurde für die vorliegende Klimaanalyse das übergeordnete Ziel einer Analyse des Wetzlarer Stadtklimas hinsichtlich Wärmeinsel und thermischem Komfort abgeleitet. In der Umsetzung bedeutet dies eine computermodellgestützte, analytische Fokussierung auf den städtischen Kaltlufthaushalt und die kleinräumige, sommerliche, thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht. Primäres Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der Planungshinweiskarte soll die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen erforderliche, kleinräumige Klimamodellierungen darstellen.

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) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten (Kap. 2.3). 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).

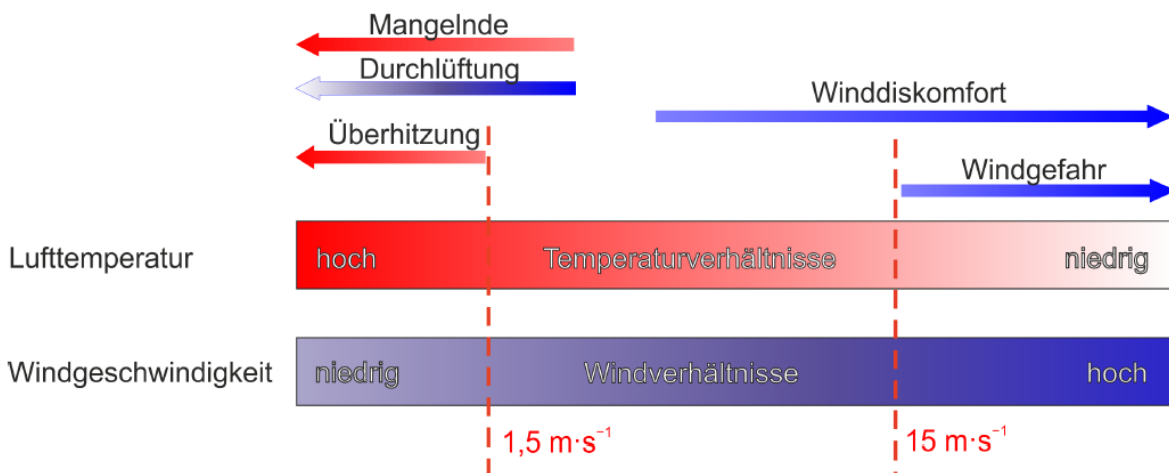


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

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 wird darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI) verwendet (Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute weniger 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 letztlich physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen.

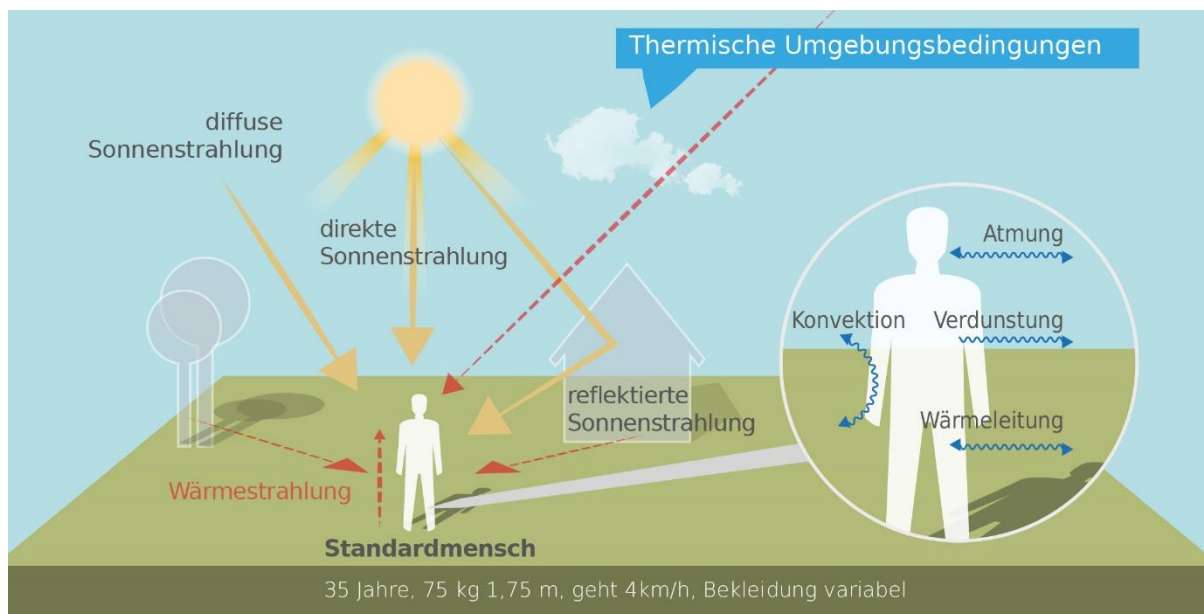


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2022)

Da die Indizes hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerterroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max}^1 \geq 30^\circ\text{C}$) 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.

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 zufolge der VDI 3787, Blatt 2(2008a) 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 Arbeitsgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit

¹ T_{\max} = Maximaltemperatur, T_{\min} = Minimumtemperatur

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.

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).

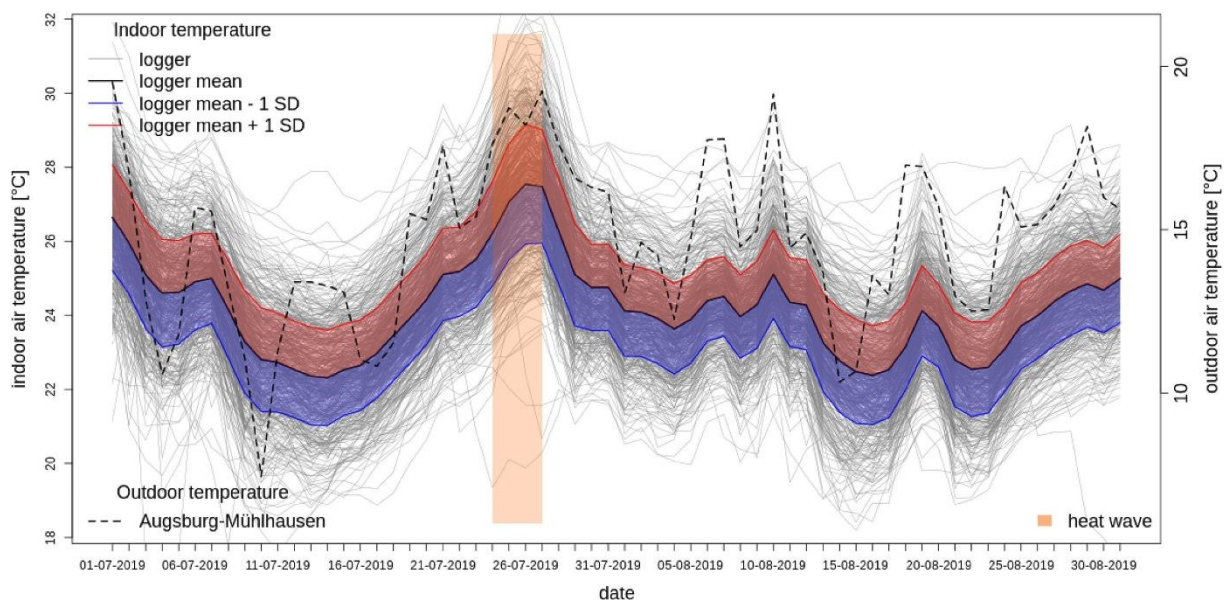


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

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 Schwellenwert von 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steininger 2015). In einer amerikanischen Studie, die



die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % 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 sozio-ökonomische 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 und Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

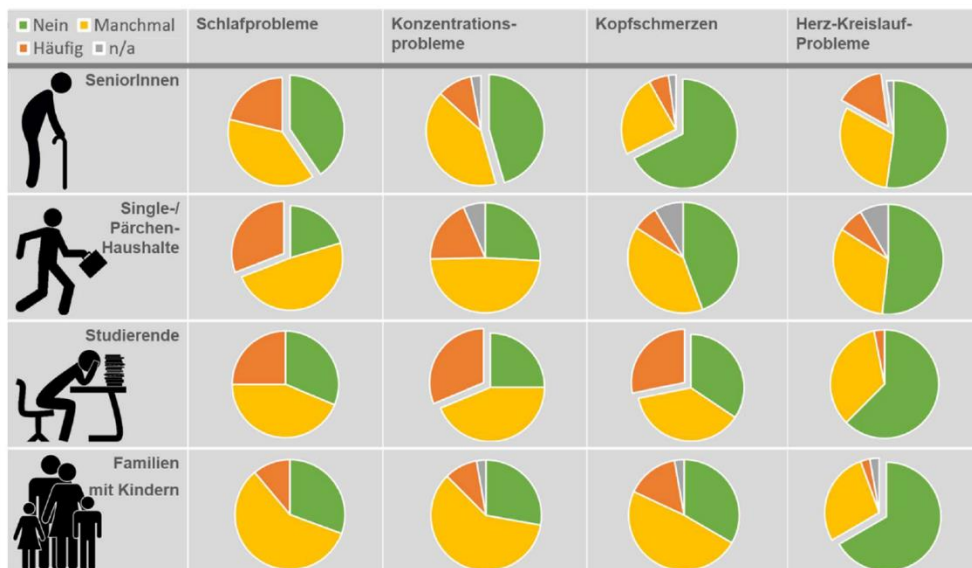


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75–84 und vor allem 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kommt. Als besonders relevant sind dabei Wochenmitteltemperaturen von > 20 °C ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet (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 – nach den aktuellen Modellierungen zur Temperaturentwicklung entspräche dies für Deutschland bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts einem Anstieg von über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze (UBA 2020).

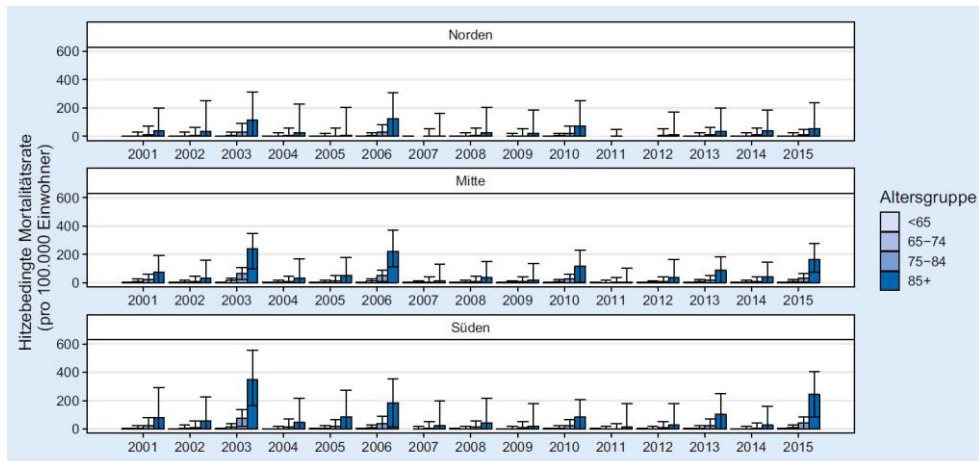


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFEXT 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 Einströmen 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 (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 abnehmenden 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 Advektion² 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 tief liegenden 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.

² Advektion = Horizontale Luftbewegung

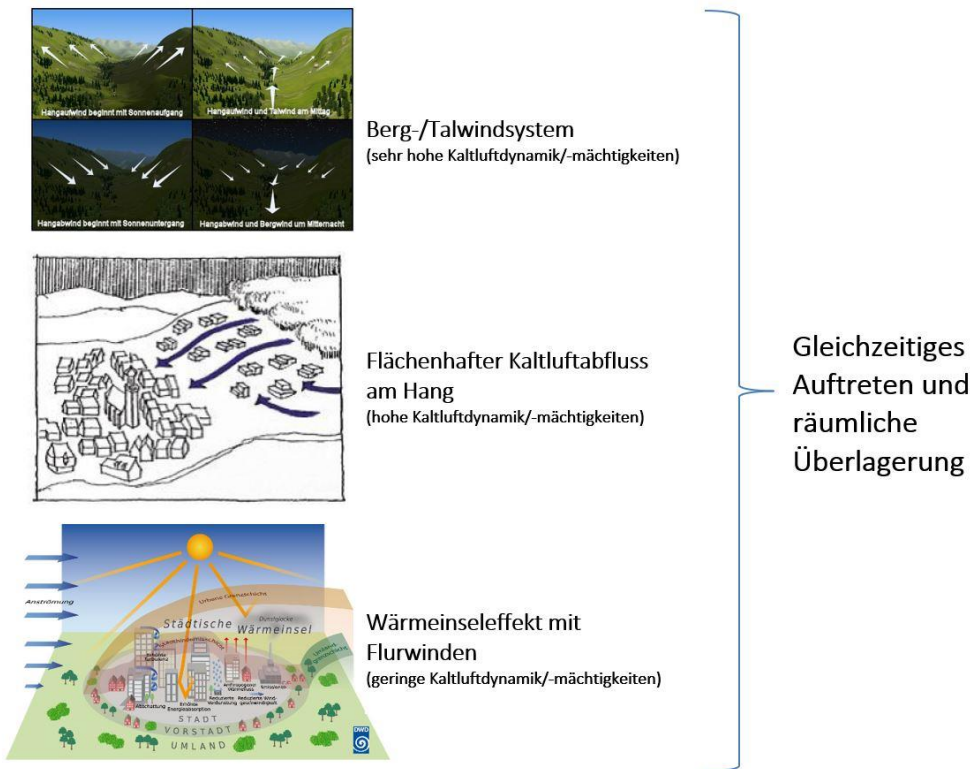


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 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 konvektivem³ Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindssystem“). 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.

³ Konvektion = Vertikale Luftbewegung



Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse⁴ 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.

⁴ durch unterschiedlich hohe Geländeoberflächen (reliefiertes Gelände) ausgelöste Kaltluftabflüsse

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

Die in VDI 3787 Bl. 1 beschriebene **Klimaanalysekarte** (Zusammenfassung der wesentlichen Analyseergebnisse für die Nachtsituation) wird als Zwischenprodukt und die **Planungshinweiskarte** (klimaökologische Bewertung von Flächen) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse verstanden. Auf die Methodik und Inhalte der Karten wird in den entsprechenden Kapiteln näher eingegangen (Kap. 7 und 8).

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.

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten weitere Normen neben die VDI-Richtlinien, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System⁵, das für Quartiere, Gebäude und Innenräume

⁵ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Online: <https://www.dgnb-system.de>)

u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtklima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert (DGNB 2020). Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z.T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

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“ (Abbildung 7). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der jedoch keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).

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 in der Nachbearbeitung ("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.

	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 oder andere • 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

Abbildung 7: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt. 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 operativen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

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

Dabei steigt über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung 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.

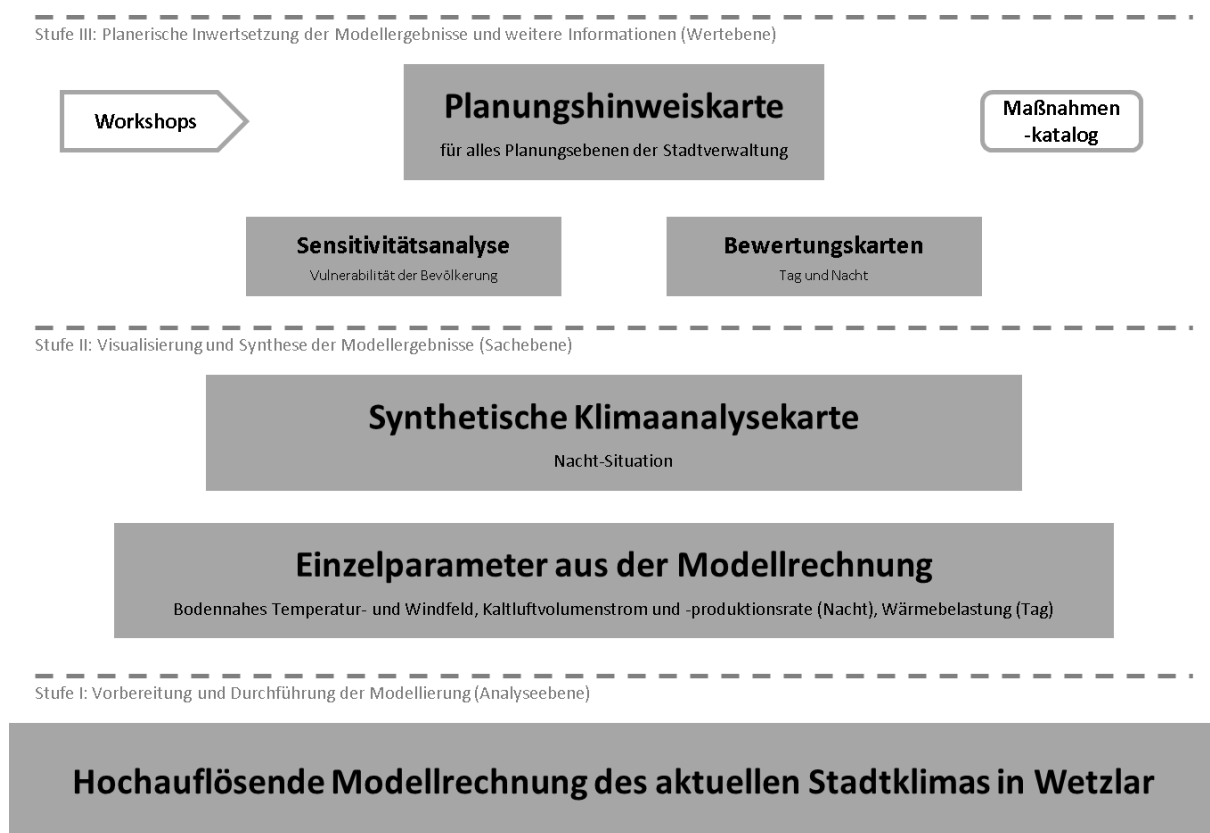
Für die Durchführung der Stadtklimaanalyse von Wetzlar wurde das Modell FITNAH-3D angewandt, welches der Kategorie 2 (RANS-Modelle) angehört. Die Modellausgabegrößen (Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder) liegen hier in einer horizontalen Auflösung von 5 Metern vor.

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.

3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus Analyse, Synthese und Planerische Bewertung (Abbildung 8). Die Bearbeitungszeit lag zwischen Juni 2022 und September 2023. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte, numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse (Kap. 6) und insbesondere die Klimaanalysekarten (Kap. 7).

Abbildung 8: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse



Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere den dortigen Projektleitungen beim Amt für Umwelt und Naturschutz, dem Amt für Stadtentwicklung sowie spezieller Einzelthemen (Bevölkerungsdaten, sozio-ökonomische Daten) zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (Fürst und Scholles 2008). Ohne diese Prämissen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

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

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

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

Folgende Ämter und Büros der Stadtverwaltung Wetzlar waren regelmäßiges Mitglied der begleitenden Arbeitsgruppe zur Planungshinweiskarte Stadtklima:

- Amt 39 - Amt für Umwelt und Naturschutz
- Amt 50 - Sozialamt
- Amt 60 - Büro des Baudezernats
- Amt 61 – Amt für Stadtentwicklung
- Amt 65 – Amt für Gebäudemanagement
- Amt 66 – Tiefbauamt
- Amt 68 – Stadtbetriebsamt
- Koordinationsbüro Soziales und Jugend
- Seniorenbüro

Insgesamt fanden ein Kickoff-Termin, drei Workshops der begleitenden Arbeitsgruppe zur Planungshinweiskarte Stadtklima und weitere Abstimmungstermine in kleinerer Runde sowie die Teilnahme an der Magistrat-Sitzung mit folgenden Themenschwerpunkten statt:

- 15.07.2022 Kickoff (digital)
- 21.03.2023 Workshop I (Vor-Ort-Termin): Zwischenprodukte Stadtklimaanalyse, Ausblick auf und Erwartungen an die Planungshinweiskarte (PHK). Grundlagendaten der Sensitivitätsanalysekarte.
- 26.04.2023 Workshop II (Vor-Ort-Termin): Zwischenergebnisse der Bewertungskarten und Abstimmung von deren Methodik und Inhalten. Vorstellung des Entwurfs zur PHK und zur Sensitivitätsanalysekarte.
- 07.06.2023 Workshop III (digitaler Termin): Vorstellung der Verschneidung von Planungshinweiskarte und Sensitivitätsanalysekarte.

4. Klima und Klimawandel im Raum Wetzlar

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

4.1.1 BEOBACHTETER KLIMAWANDEL

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Wetzlar basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2023c, DWD 2023d, 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 Wetzlars 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 Messungengenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen jüngerer Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

4.1.2 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) bereitgestellt.

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 weisen daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit auf, 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 Wetzlar ein Modellensemble bestehend aus 39 Simulationen verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klima-Szenarien angetrieben werden (Tabelle A 1 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 Wetzlar 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.

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 Klima-Szenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*). Im Jahr 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst, die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*; DKRZ 2023). Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien⁶), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten enthalten.

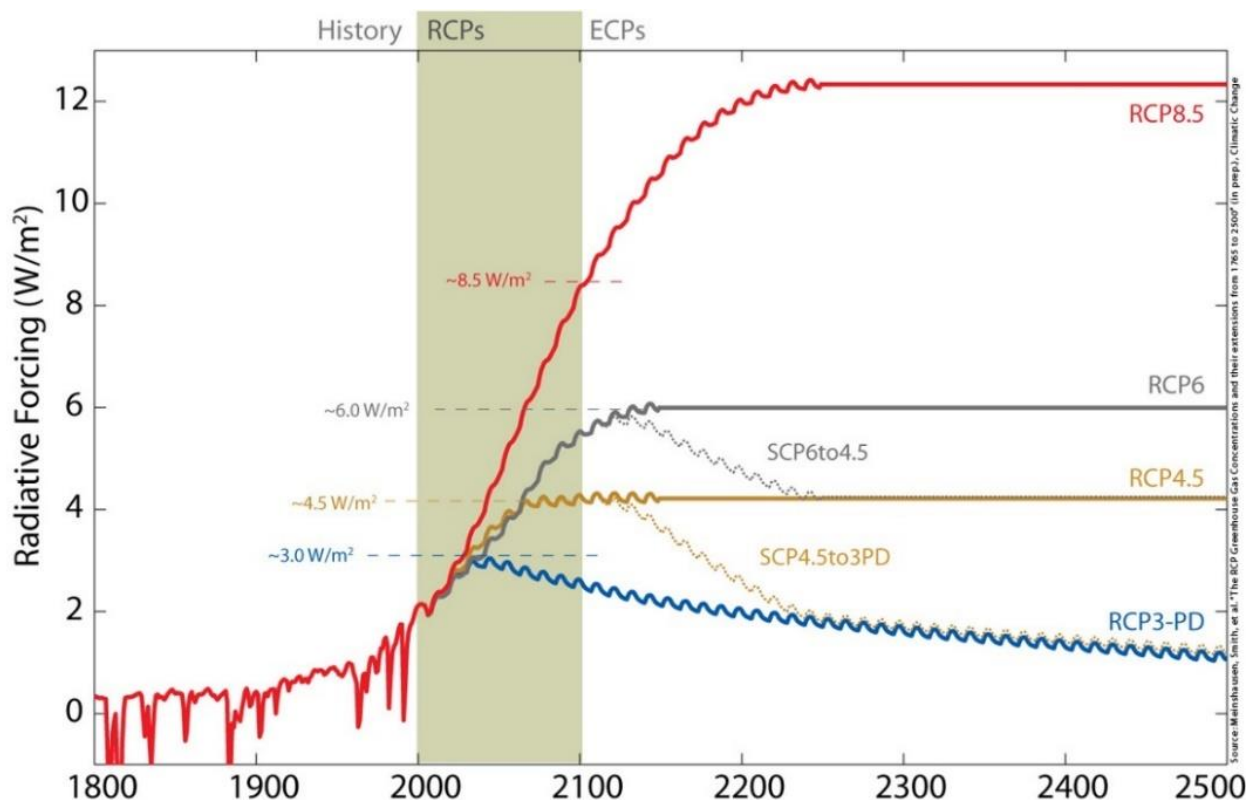


Abbildung 9: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100⁷ (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)

⁶ CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms

⁷ ECP = Extended Concentration Pathways sind ergänzende Szenarien bis zum Jahr 2300.

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 9):

- 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.

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 et al. 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. $T_{\text{max}} \geq 25 \text{ °C}$ 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 Wetzlar wurden schwollenwertbasierte Kenntage verwendet.

Einige Modellläufe der regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen 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 Beobachtungsdaten das jeweilige Perzentil der statistischen Verteilung berechnet und anhand dieses Perzentilwertes aus dem Referenzlauf jeder Modellsimulation der adjustierte Schwellenwert bestimmt. Die Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (Tabelle A 2 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 verschiedenen 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 (mittelfristige 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 10).

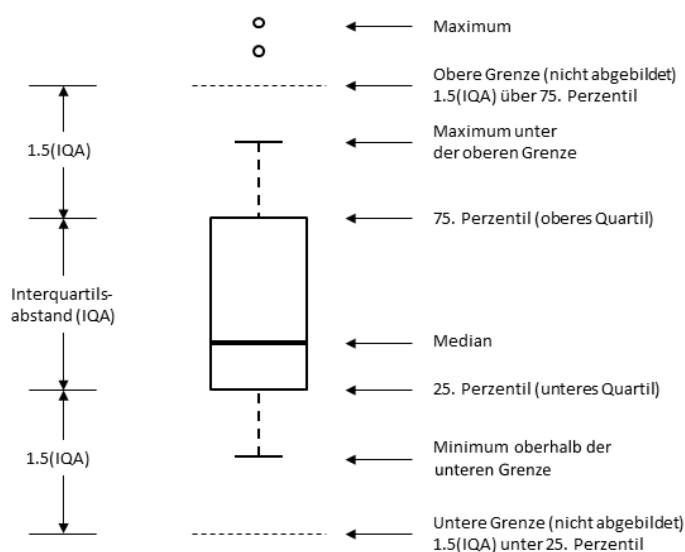


Abbildung 10: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Bezogen auf die letzten 30 Jahre (1991 – 2020) ist Wetzlar durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,6 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von ca. 705 mm/Jahr gekennzeichnet. Damit weist Wetzlar eine leicht höhere Mitteltemperatur als im deutschlandweiten Durchschnitt (9,3 °C; UBA 2022a) und eine geringere jährliche Niederschlagsmenge auf (gesamtd deutscher Mittelwert 790 mm/Jahr; UBA 2022b).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Wetzlar – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Jahresmitteltemperatur im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 bereits um 0,8 °C und seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen sogar um 1,4 °C gestiegen (bezogen auf die Periode 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 alleamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 11).

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 Wetzlar zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 35 auf 45 pro Jahr und die Anzahl an Heißen Tagen von 6 auf 10 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 12).

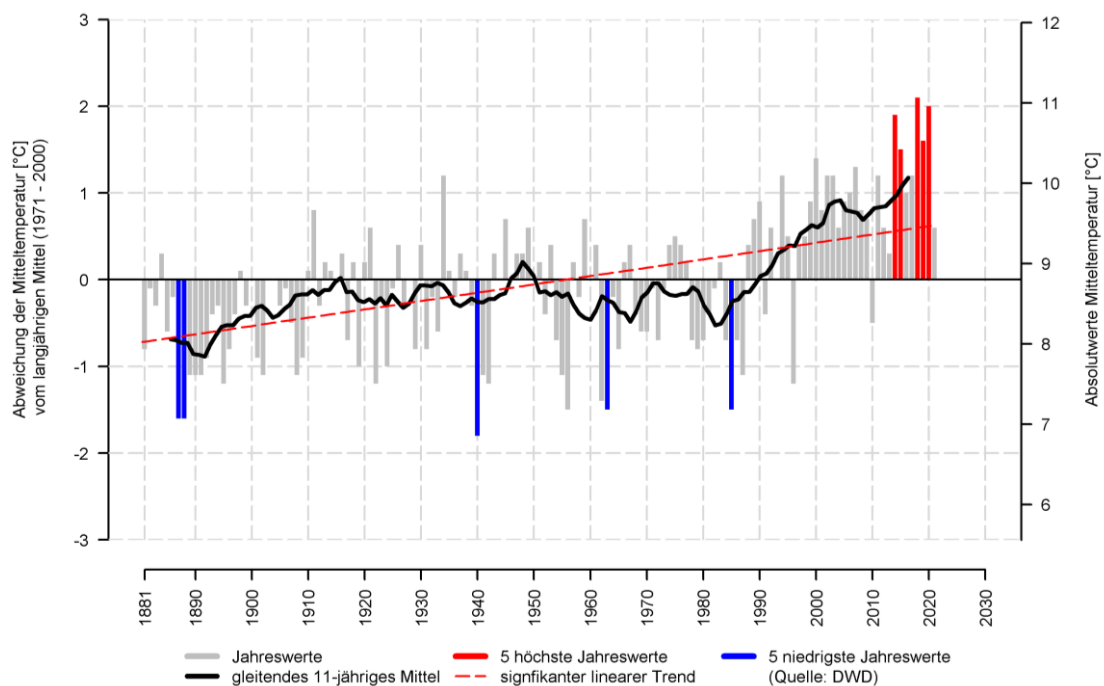


Abbildung 11: Jahresmitteltemperatur in Wetzlar im Zeitraum 1881 bis 2022 (eigene Berechnung nach DWD 2023d)

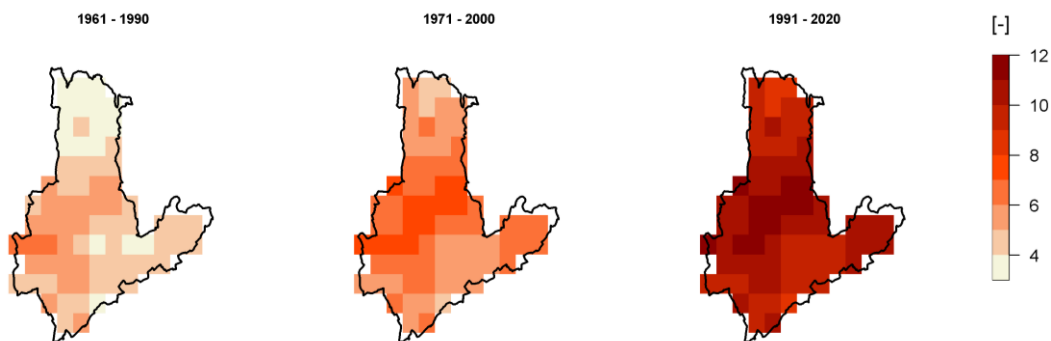


Abbildung 12: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißen Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in verschiedenen Perioden in Wetzlar (eigene Berechnung nach DWD 2023d)

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 mögliches Maß für die Trockenheit ist der Trockenheitsindex nach de Martonne, der sich aus dem Jahresniederschlag und der Jahresmitteltemperatur ergibt (Gavrilov et al. 2019). Der Trockenheitsindex unterliegt in Wetzlar deutlichen Schwankungen, zeigt seit 1970 insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (vermehrte Trockenheit), wobei der Grenzwert zur (semi-)Aridität bislang selbst in den extremen Trockenjahren nicht unterschritten wurde (Abbildung 13). Die Abnahme des Trockenheitsindex ist nicht der einzige, aber ein wesentlicher Faktor für die Bodenfeuchte, die in Wetzlar über die letzten 30 Jahre gesehen ebenfalls signifikant abnimmt (Abbildung 14). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind (MWVLW RLP 2023). Erwartungsgemäß fällt die Bodenfeuchte im Sommer (orange Balken in der Abbildung 14) deutlich geringer aus als in den anderen Jahreszeiten (graue Balken). Vereinzelt gab es in Wetzlar bereits Sommer, die im Mittel keine optimale Wasserversorgung der Pflanzen boten und es ist davon auszugehen, dass es mindestens lokal in Wetzlar Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress stehen.

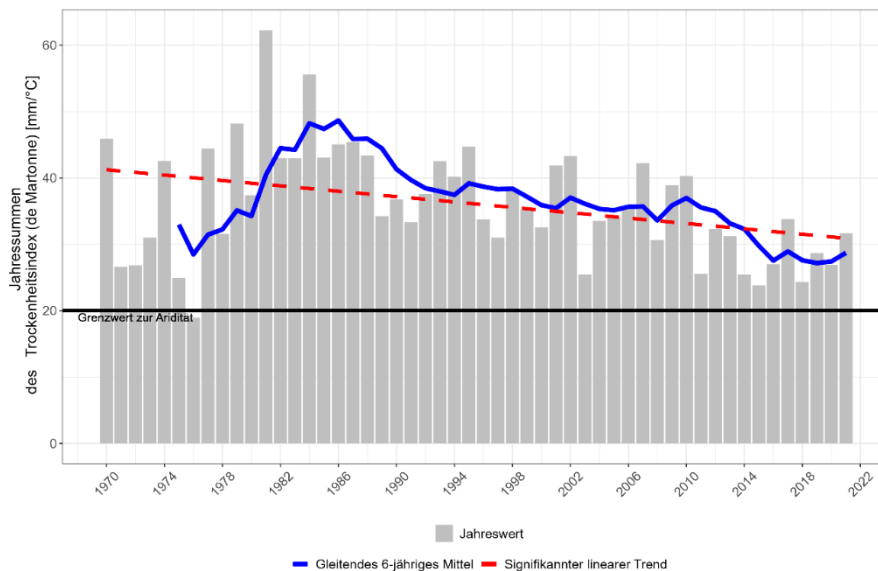
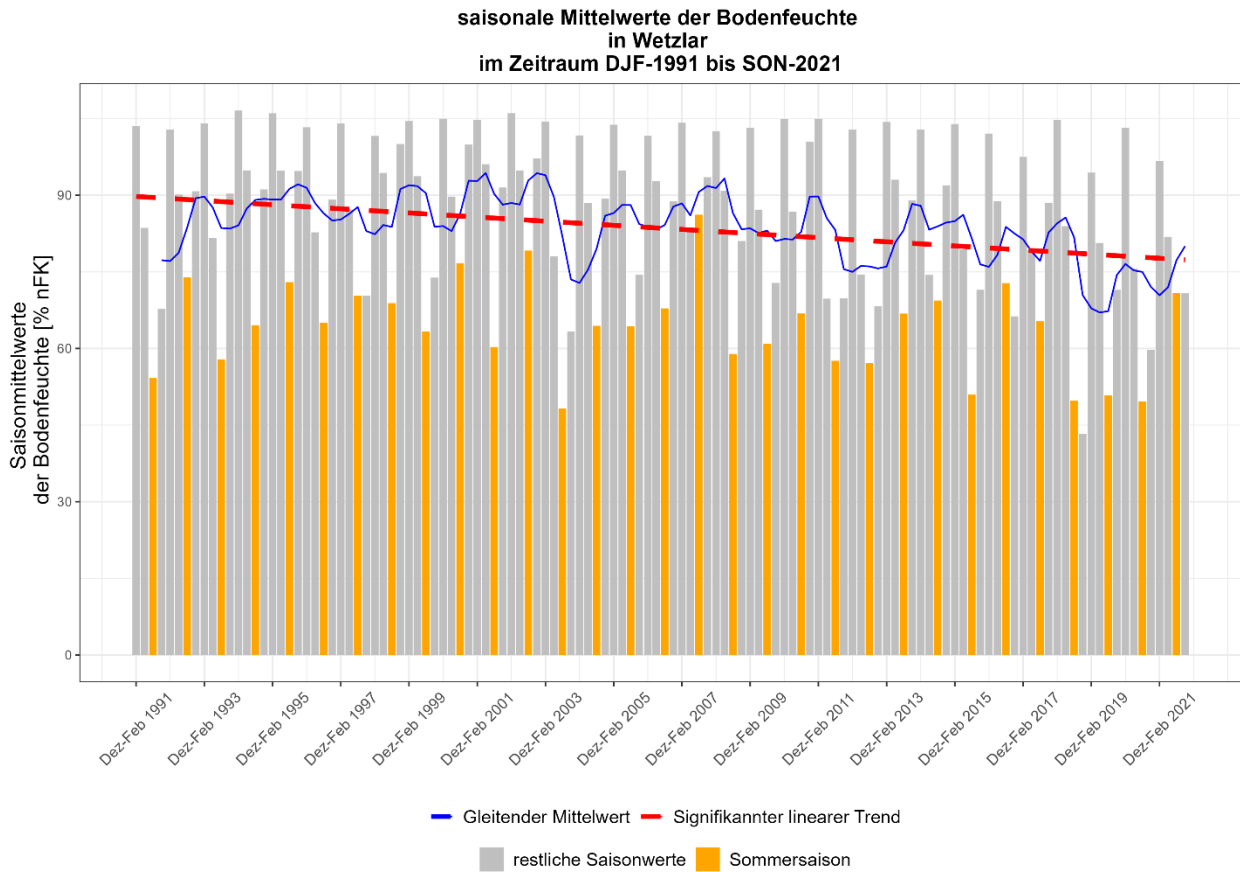


Abbildung 13: Trockenheitsindex nach de Martonne in Wetzlar im Zeitraum 1970 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2023d)



(Quelle: DWD 1x1km Raster)

Abbildung 14: Saisonmittelwerte der Bodenfeuchte (in % nFK) in Wetzlar im Zeitraum 1991 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2023d)

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Gießen-Wettenberg dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Wetzlar. Am häufigsten traten Windgeschwindigkeiten zwischen 0,3 – 5,4 m/s auf (leichter Zug bis schwacher Wind). Sowohl in den Nachtstunden als auch am Tag häufen sich Südwestwinde gefolgt von sekundären Maxima aus nordöstlichen (in der Nacht stärker ausgeprägt) und südöstlichen Richtungen (tagsüber stärker ausgeprägt; Abbildung 15) – gerade in Bezug auf die Windrichtung sind die Ergebnisse aus Gießen nur bedingt auf Wetzlar übertragbar, da das lokale Windfeld in Wetzlar durch das Gelände beeinflusst wird. Das im Rahmen der Stadtklimaanalyse modellierte kleinräumige Windfeld ist hingegen nahezu unabhängig von den zuvor beschriebenen Windverhältnissen, da es die örtlich entwickelten, landschaftsgesteuerte Luftaustauschprozesse während einer windschwachen sommerlichen autochthonen Wetterlage aufzeigt.

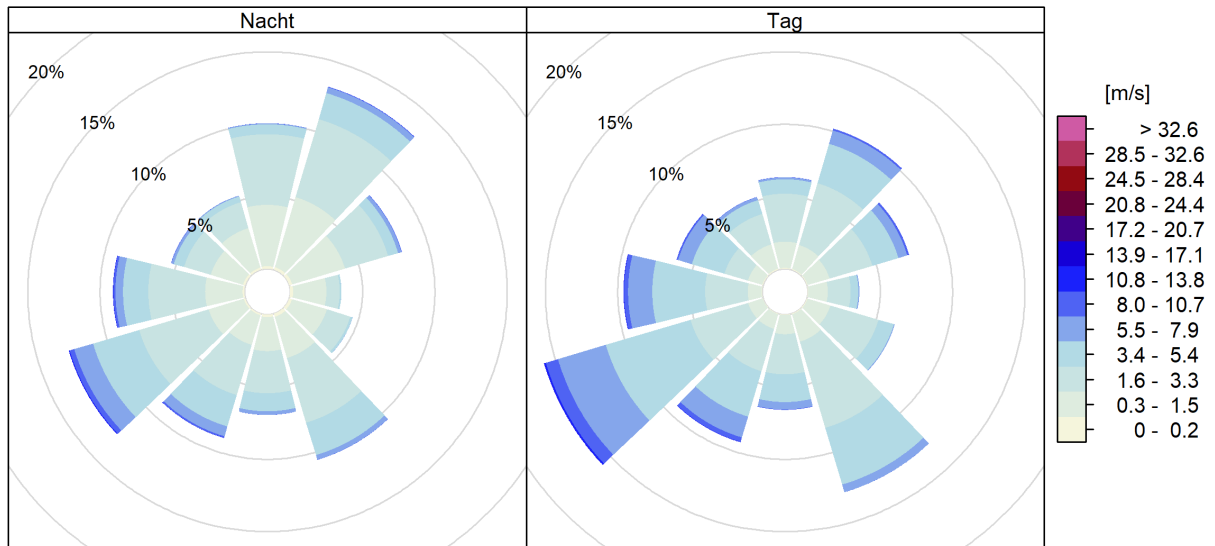


Abbildung 15: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) an der Wetzlar nächstgelegenen DWD-Station Gießen-Wettenberg für den Zeitraum 1981 – 2020 (DWD 2023c)

4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer wind-schwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Stadtgebiet erzeugt.

An der DWD-Station Gießen-Wettenberg traten im langjährigen Mittel der letzten 30 Jahre rund 70 wind-schwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung A 1 im Anhang). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel knapp 25 wind-schwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 27 % entspricht. Es ist anzunehmen, dass das Auftreten autochthoner Wetterlagen in Wetzlar vergleichbar zu den Ergebnissen aus Gießen ist, sodass etwas mehr als jede vierte Sommernacht unter autochthonen Bedingungen steht.

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Wetzlar bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 16 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen (Tabelle 1).

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	1,6	0,9	1,2	1,5	0,9	1,1	1,6
	RCP 4.5	0,9	1,4	1,8	1	1,6	2,4	1,5	2,1	2,7
	RCP 8.5	1,4	2	2,4	1,7	2,4	2,9	3	3,8	4,7
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,7	2,7	3,4	2	2,6	3,4	2	2,5	4,3
	RCP 4.5	1,6	3,6	5,2	1,6	4,3	6,7	3,8	4,6	6,5
	RCP 8.5	2,3	4,6	6,2	3,1	4,8	7,3	6,1	7,9	10,1
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1,2	2,5	0,7	1,5	2,6	1	1,6	2,8
	RCP 4.5	1,1	1,7	2,8	1,2	2	3,3	1,6	2,4	4,1
	RCP 8.5	1,4	2,6	3,3	2	3,5	4,7	4,1	5,1	7,5

Tabelle 1: Langjährige Änderung der Temperatur in Wetzlar (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Wie auch in der Abbildung 16 zu erkennen ist, fällt der Temperaturanstieg im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen 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.

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 16 enthaltene Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil der Ergebnisse des Modellensembles.

Der nachfolgenden Abbildung 17 ist zu entnehmen, dass im Jahresgang ein Temperaturanstieg in allen Monaten vorliegt, jedoch treten im Sommer und Winter größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Herbst. Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien (ohne Abbildung), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (dargestellt durch die roten Boxen in Abbildung 17).

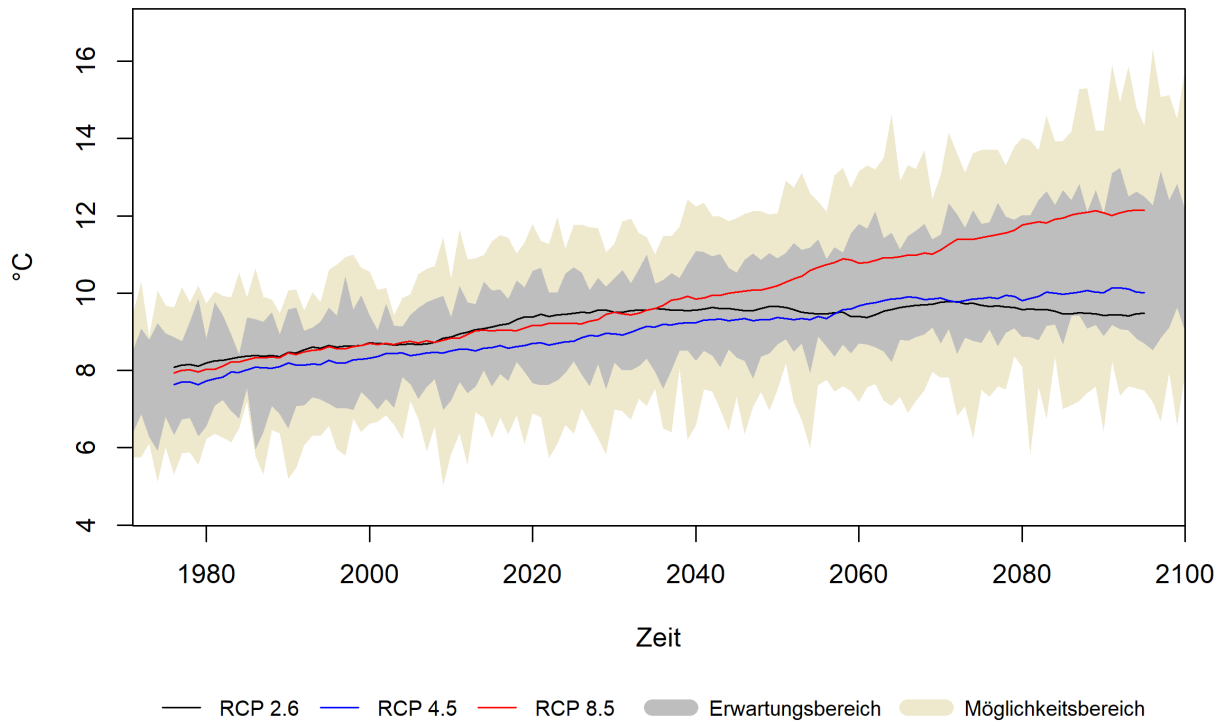


Abbildung 16: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Wetzlar (alle RCP-Szenarien)⁸

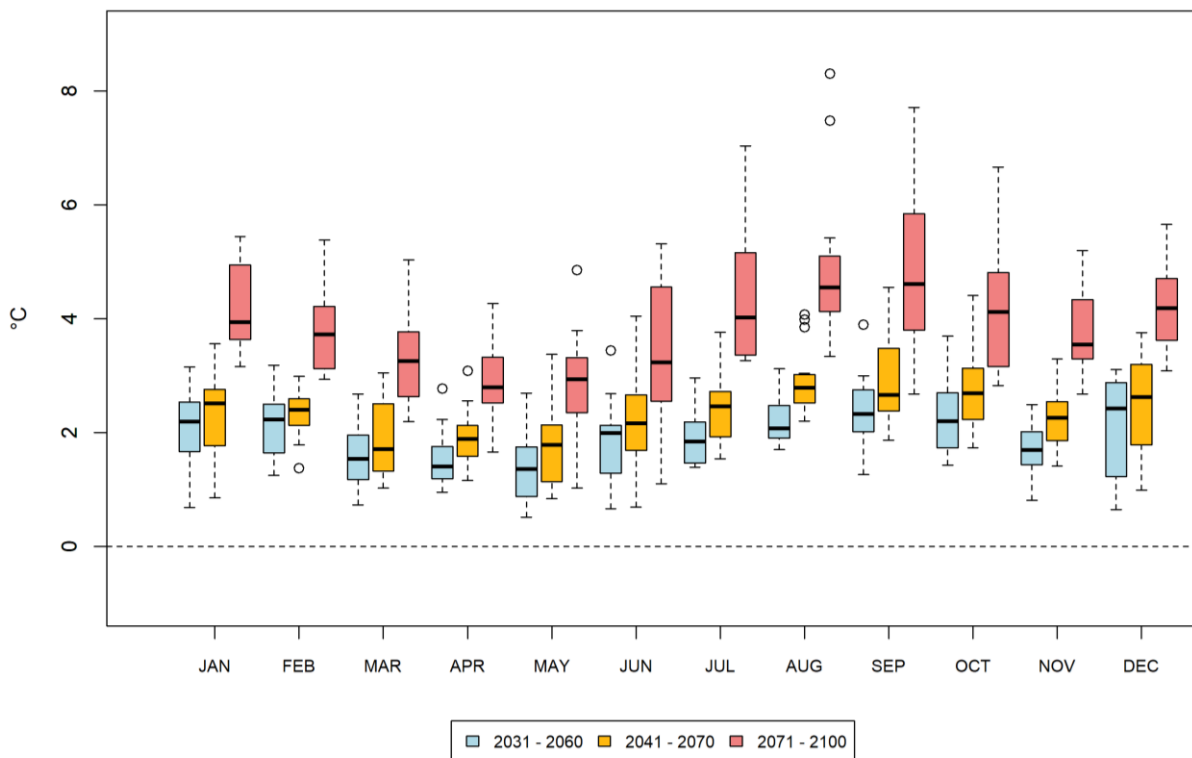


Abbildung 17: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in den drei Zukunftsperioden in Wetzlar (RCP 8.5)

⁸ 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; dies gilt für sämtliche Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel)

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 2). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Median mit 25 heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode im Durchschnitt 6-mal jährlich auftraten (1971 – 2000).

Tropennächte sind derzeit in Wetzlar die Ausnahme (im Mittel weniger als 1 Tropennacht pro Jahr). Zur Mitte des Jahrhunderts wird ein regelmäßiges Auftreten von Tropennächten erwartet (je nach Szenario im Mittel 1-3 Tropennächte pro Jahr in der Periode 2031 – 2060). In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts ist die Entwick-lung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 stagniert, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der dritten Zukunftspe-riode im Median 12 Tropennächte pro Jahr in Wetzlar möglich. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

Die Zunahme Heißer Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schlie-ßen. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Wetzlar zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts im Median um 1 bis 7 Tage (Tabelle 2). In den vergan-genen Zeiträumen (1997-2000 und 1991-2020) beliefen sich Hitzeperioden im Durchschnitt auf jeweils 3 Tage.

Tabelle 2: Langjährige Änderung thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Wetzlar (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	8,7	13,6	19,4	9,3	12,8	21,1	9,7	13,1	17,3
	RCP 4.5	7,2	14,5	21,5	9	21,2	29,6	17,5	21	27,7
	RCP 8.5	16,5	19,6	27,6	20,7	26,6	37,4	39,6	48,6	65,1
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	2,2	4,4	8,8	2,7	4,5	9	4,2	5,4	10,2
	RCP 4.5	4,6	6	9,2	5,8	8,2	11,8	7,6	10,2	13,1
	RCP 8.5	7,4	9,7	13,6	9,4	12,3	17,8	19,5	25,3	35,3
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,1	1,1	1,3	0,1	1	1,6	0,4	1,2	1,8
	RCP 4.5	0,2	1,7	2,2	0,9	2,4	2,9	1,8	3,6	5,2
	RCP 8.5	1,2	2,8	3,7	2,1	4,1	6	8,2	11,6	19,4
Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Heiße Tage)	RCP 2.6	0,6	1,4	2,8	0,6	1,4	2,8	1,1	1,9	3,3
	RCP 4.5	1	1,4	2,6	1,6	2,3	3	2,4	3	4,8
	RCP 8.5	1,7	2,1	4,3	2,5	3,3	4,5	4,5	6,7	8,4

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 18). 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).

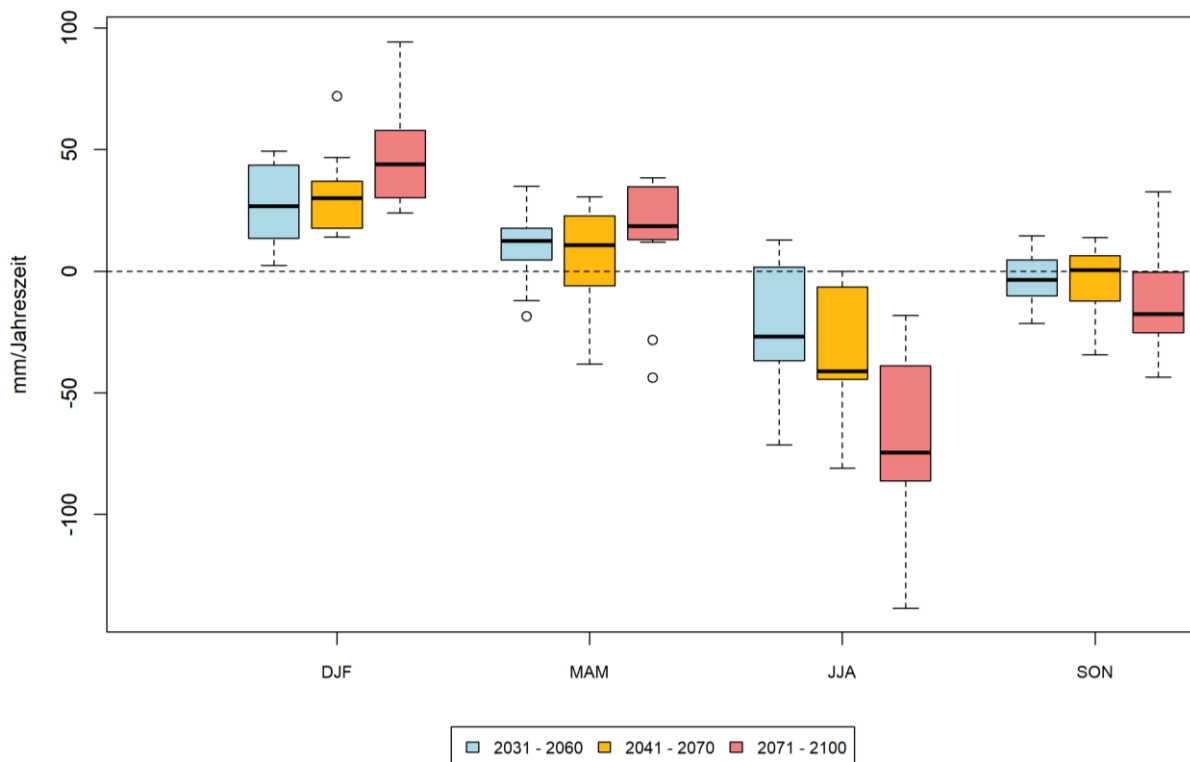


Abbildung 18: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in den drei Zukunftsperioden in Wetzlar (RCP 8.5)

5. Analysemethoden

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Groß 1992). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEO-NET Umweltconsulting GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerterroutinen weiterentwickelt (u.a. Groß 2002, Groß et al. 2002, Groß 2012a, Groß 2012b, Groß 2013, Groß 2017).

Das Grundgerüst des dreidimensionalen Modells FITNAH besteht aus den Erhaltungsgleichungen für Impuls, Masse und innerer Energie sowie Bilanzgleichungen für Feuchtekomponenten und Luftbeimengungen. Die verschiedenen turbulenten Flüsse werden mit Hilfe empirischer Ansätze mit den berechenbaren mittleren Größen verknüpft. Der dabei auftretende turbulente Diffusionskoeffizient wird aus der turbulenten kinetischen Energie berechnet, für die eine zusätzliche Gleichung gelöst wird. Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität⁹ 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 1989).

Das gesamte Gleichungssystem einschließlich der Parametrisierungen wird in ein dem Gelände folgenden 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 2017) definierten Standards für mesoskalige¹⁰ Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regel-

⁹ Emissivität = Austausch von Wärmestrahlung mit der Umgebung

¹⁰ Mesoskalig = von mittlerer Größe seiend

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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Wetzlar und angrenzendes Umland ca. 9,5 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.

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 25 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 3 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Tabelle 3: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 10 m.

Landnutzungsklasse	Strukturhöhe
Gebäude	Individuell
Unbebaut versiegelt / Straße	0 m
Gewässer	0 m
Gleisflächen	0 m
Freiland / Rasen / niedrige Vegetation	0,5 m
Niedrige Vegetation auf naturfermem Boden ¹¹	0,5 m
Baum über Rasen	Individuell
Baum über naturfermem Boden	Individuell
Baum über Versiegelung	individuell

Zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses zeigt Abbildung 19 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, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 Uhr morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Grad Celsius über derjenigen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Grad 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 dies in der Realität über längere Zeiträume einstellt, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlich träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau demnach 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

¹¹ Naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen

Wärme (vereinfacht ausgedrückt in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 20 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 °C gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 °C) wärmer. Die Abbildung 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 °C und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat 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.

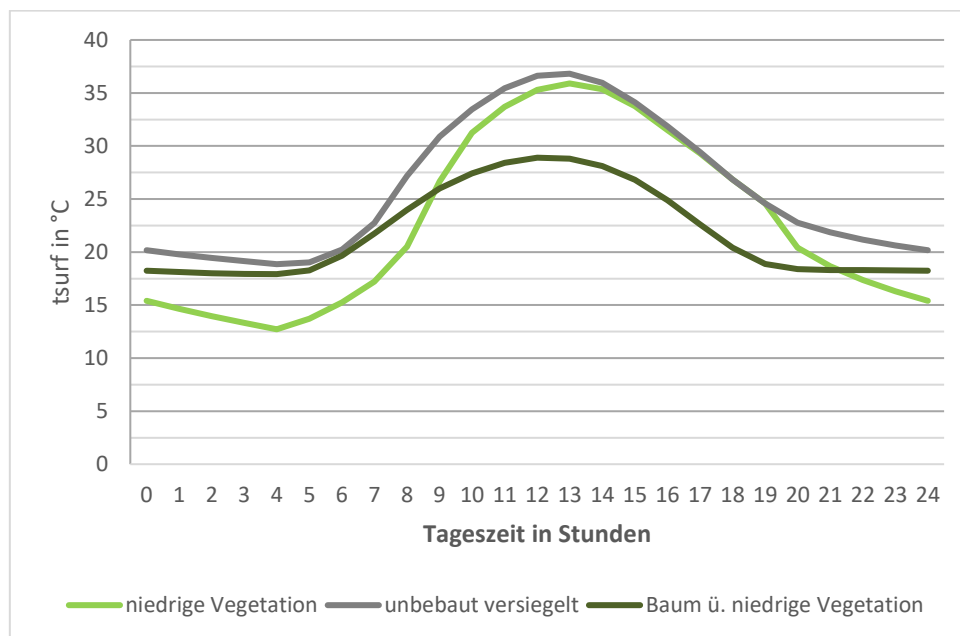


Abbildung 19: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

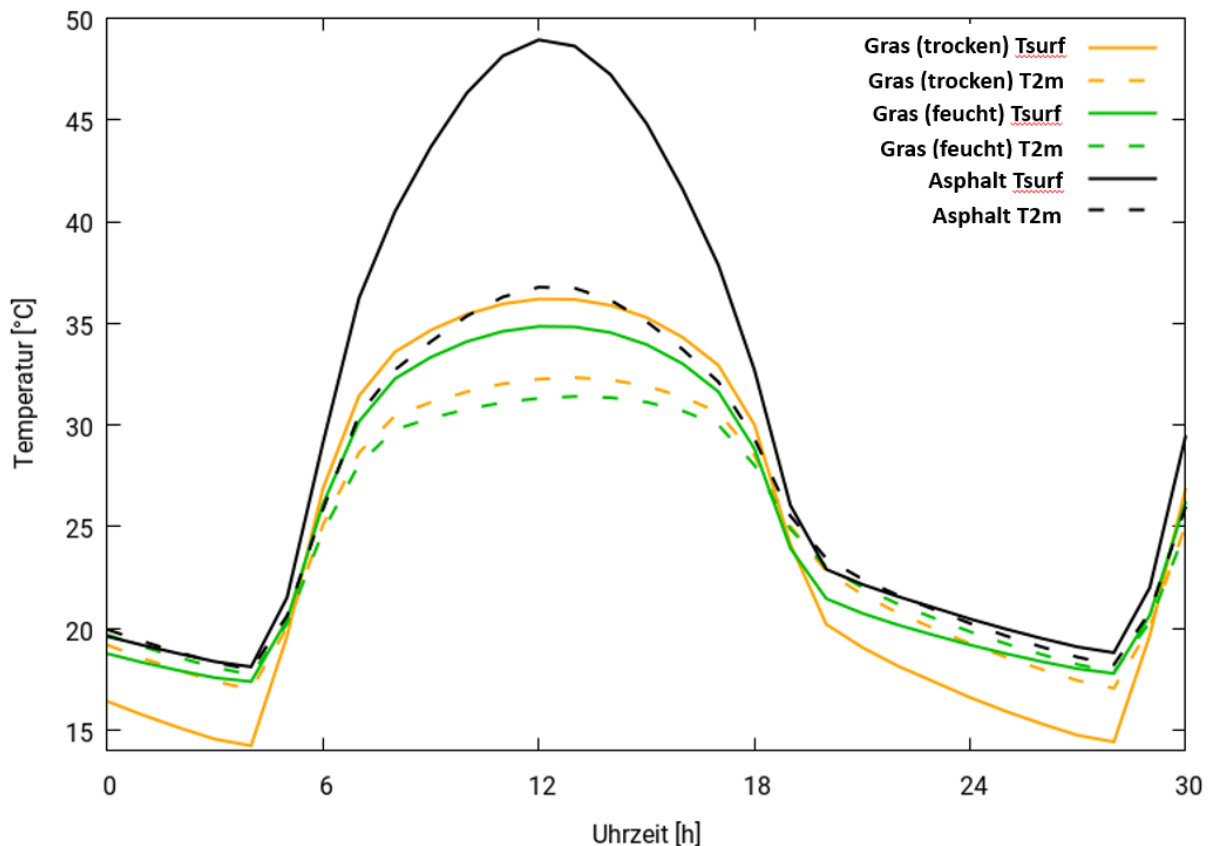


Abbildung 20: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur (Tsurf) sowie der bodennahen Lufttemperatur (T2m) von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages.

5.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, um die Stadtstruktur und die Topografie im Umfeld abbilden zu können. Für das Wetzlarer Stadtgebiet wurden folgende Geodaten von der Stadt Wetzlar zur Verfügung gestellt.

- Geländehöhe
 - Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2019)
- Landnutzung
 - ALKIS (Stand 2022)
 - Gebäudeumrisse und -höhe (LoD1; Stand 2021)
 - Grünflächenkataster (Stand 2022)
 - Digitale Orthophotos¹² (Stand 2020)
 - RGBI-Luftbilder¹³ (Stand 2020)
- Strukturhöhe
 - Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Stand 2019)
 - Lage von Lärmschutzwänden (Stand 2022)
- Versiegelungsgrad
 - Versiegelungskataster (Stand 2022)
 - RGBI-Luftbilder (Stand 2020)

¹² Luftbildaufnahme, bei denen der (durch unterschiedliche Geländehöhen bedingte) zentralperspektivische Bildpunktversatz mithilfe eines digitalen Höhenmodells rückgerechnet wurde.

¹³ 4-Kanal Multispektralbilder mit der Kanalbelegung RGBI (Rot-Grün-Blau-Nahes Infrarot)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation in Wetzlar wird aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2019 aufweisen. Da die Eingangsdaten zudem mittels Orthophotos (aus dem Jahr 2020) sowie den Luftbildern von *Google Satellite* (2021) hinsichtlich ihrer Plausibilität verglichen wurden, kann 2021 als Bezugsjahr für den Status quo der Klimaanalyse verstanden werden.

Außerhalb des Wetzlarer Stadtgebiets wurde auf online frei verfügbare Daten aus der OpenStreetMap zurückgegriffen, um die räumliche Lageinformation der Gebäude zu erhalten.

Untersuchungsgebiet

Das Stadtgebiet von Wetzlar erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 12 km in Ost-West- und 14 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von rund 75 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 240 km² auf (ca. 15 km x 16 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Wetzlarer Stadtklima berücksichtigt werden können.

Geländehöhe¹⁴

In Wetzlar fließen als größere Gewässer die Lahn und die Dill, letztere mündet westlich der Kernstadt in die Lahn. Das Lahntal erstreckt sich in ostwestliche Richtung und befindet sich auf einer Geländehöhe von rund 145 bis 200 Metern. Nördlich und südlich des Stadtgebiets steigt das Gelände bis zu einer Höhe von 400 Metern an. Der höchste Punkt befindet sich auf dem 402 m hohen Stoppelberg im Süden von Wetzlar, die tiefste Stelle liegt mit 145 m am westlichen Flussabschnitt der Lahn.

Das Wetzlarer Stadtklima wird wesentlich von der Topografie des Stadtgebiets beeinflusst. Die Siedlungsbereiche der Kernstadt befinden sich teilweise im tiefer gelegenen Lahntal (rd. 140-160 m ü. NHN) und sind von einem ansteigenden Gelände umgeben, einige Kerngebiete wie Büblingshausen, Sturzkopf oder Dalheim liegen selbst auf einer höheren Geländeebene (rd. 200-300 m).

Der Altstadt kern befindet sich auf einer Höhe von rund 170 Metern und ist von einem teils erhöhten Grüngürtel (rd. 190 m) umgeben.

Die Topografie im Stadtgebiet wirkt sich insbesondere auf die nächtliche Kaltluftströmung aus. In den vom Lahntal abgehenden Seitentälern und besiedelten Hangbereichen treten Kaltluftabflüsse auf, die das klimatische Geschehen in einem Teil der Wetzlarer Kernstadt prägen (darunter die Bezirke Altstadt, Neustadt, Silhöfer Aue, Altenberger Straße, Dillfeld, Niedergirmes).

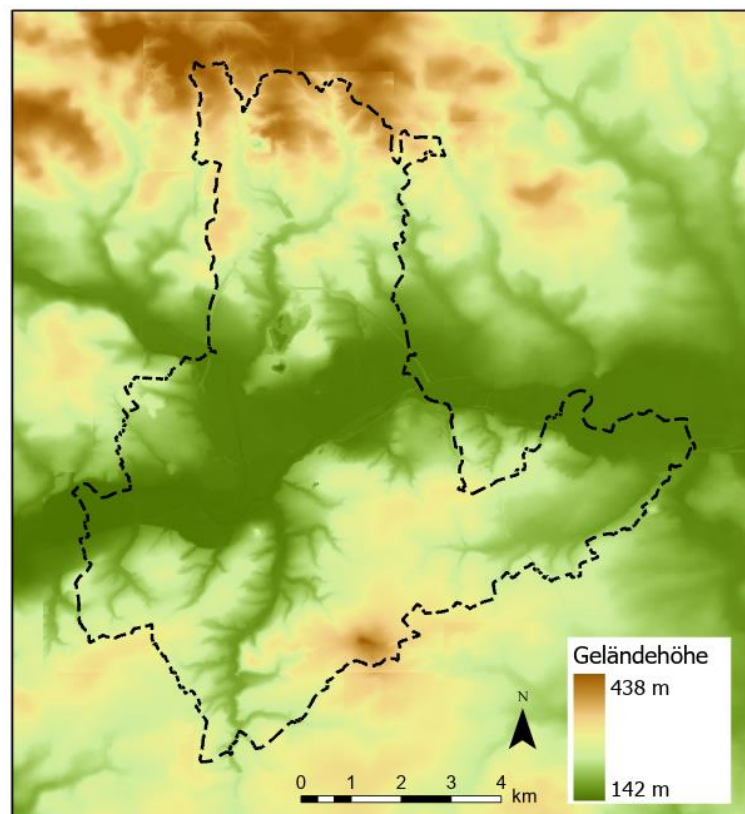


Abbildung 21: Digitales Geländemodell für Wetzlar und die nähere Umgebung

¹⁴ Alle Höhenangaben beziehen sich auf Normalhöhennull.

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, das von einer ursprünglichen 1-m-Auflösung in das für die Modellierung notwendige 5-m-Raster gemittelt wurde.

Landnutzung

Die Wetzlarer Landnutzung wird über verschiedene Landnutzungsklassen definiert, die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 22). Mit der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen (vgl. Tabelle 3).

Zur Erfassung der Bäume wurden die RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2020 in den Vegetationsindex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) überführt. Über einen NDVI-Schwellwert von 0,1 konnten Bäume automatisiert von vegetationslosen Flächen getrennt und somit in Kombination mit der Strukturhöhe Baumstandorte identifiziert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass auch Bäume im privaten Bestand erfasst werden, die i.d.R. kein Bestandteil öffentlicher Baumkataster sind. Allerdings war es bei der vorgegeben Modellauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von 2,5 m und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

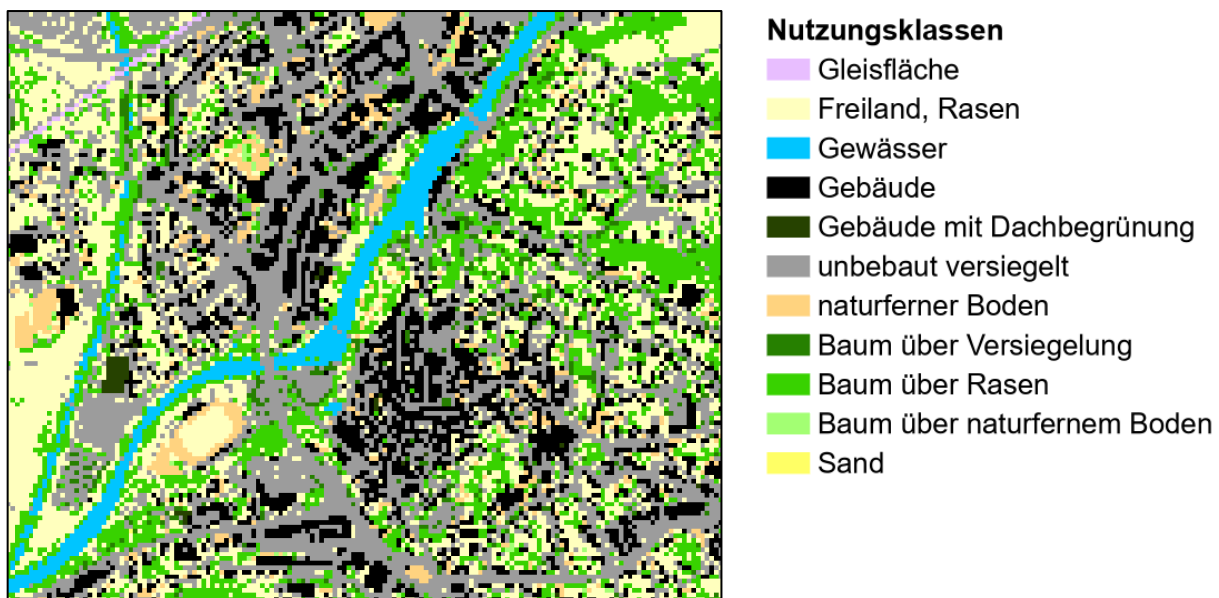


Abbildung 22: Modelleingangsdaten „Landnutzungsklassen“ für den Status quo in einem Ausschnitt der Wetzlarer Kernstadt

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 23). Aus diesen punkthaften Eingangsdaten ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnlichen Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem; Stand 2022), die auf Basis von digitalen Orthophotos (Stand 2020) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap.6), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Planungshinweiskarte in Kapitel. 8).

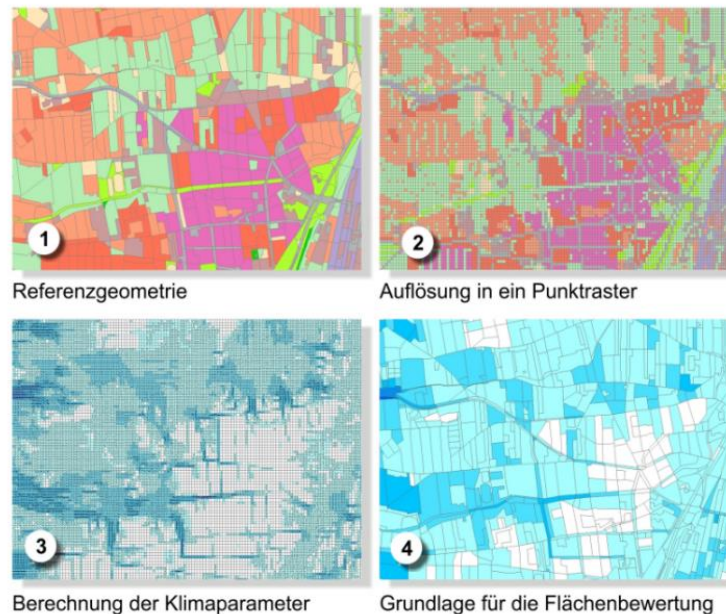


Abbildung 23: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

5.3 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN DER MODELLIERUNG

Mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21.06.) modelliert. 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. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-)Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage in Wetzlar regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (an ca. 27 % der Tage im Sommer, vgl. Kap. 4.3).

Für die Ausgangsbedingungen der Modellierung ergibt sich daraus:

- 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

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 allein auf dieser Basis in klassischen Stadtklimaanalysen entschärft werden zu können. Dennoch besitzen selbstverständlich alle im Handlungskonzept zur Klimaanpassung aufgeführten Maßnahmen das Potential, auch absolute Extremwetterlagen in ihrer gesundheitlichen Wirkung zu reduzieren.

5.4 MODELLAUSGABE-GRÖßEN

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 4). 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 (GB). 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 4: 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
Potentielle 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 oben genannten Modellausgabe-Größen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von den Anwendenden in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachter:innen gleichermaßen verstanden und interpretiert werden können. 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 sechs abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertzeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 5).

Dabei handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische 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, da sich diese nicht auf das bodennahe Niveau begrenzen lässt, sondern bis zu einer spezifischen Höhe im Modell berücksichtigt wird. Die Auswertzeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges 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 5: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt.

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Auswertezeit
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

5.5 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 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 der Stadtstruktur im Wirkgefüge mit dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass alle Modellläufe erfolgreich die Qualitätssicherung durchliefen.

5.6 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 2017) 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 im sogenannten RANS-Modus betrieben (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende LES-Modus (*Large Eddy Simulation*), der im Zusammenhang mit Stadtklima-Anwendungen noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus 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 Stadtentwicklungs- bzw. Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis 0,2 °C 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 Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Insgesamt zeigt sich, dass modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

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

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

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

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchen-Modell (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. Da zum heutigen Stand keine gesamtstädtischen Geodaten in der benötigten Differenzierung vorliegen, wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformationen aus dem Versiegelungskataster über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall zu einem Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 °C und in den Nachtstunden von 1,1 °C führen kann, was wiederum kleinräumige Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen bedingen kann (Groß 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. 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.

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.

6. Analyseergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kap. 4.3). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Modellergebnisse wurden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten (georeferenzierte Raster (.tif)) an die Stadt Wetzlar übergeben.

6.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche zu identifizieren (sogenannte städtische Wärmeinseln) und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten **Absolutwerte** der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die **relativen Unterschiede** innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen. In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur von ca. 12 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis ca. 20 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Wetzlar damit eine Spannweite von 8 °C (Abbildung 24). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 15,0 °C.

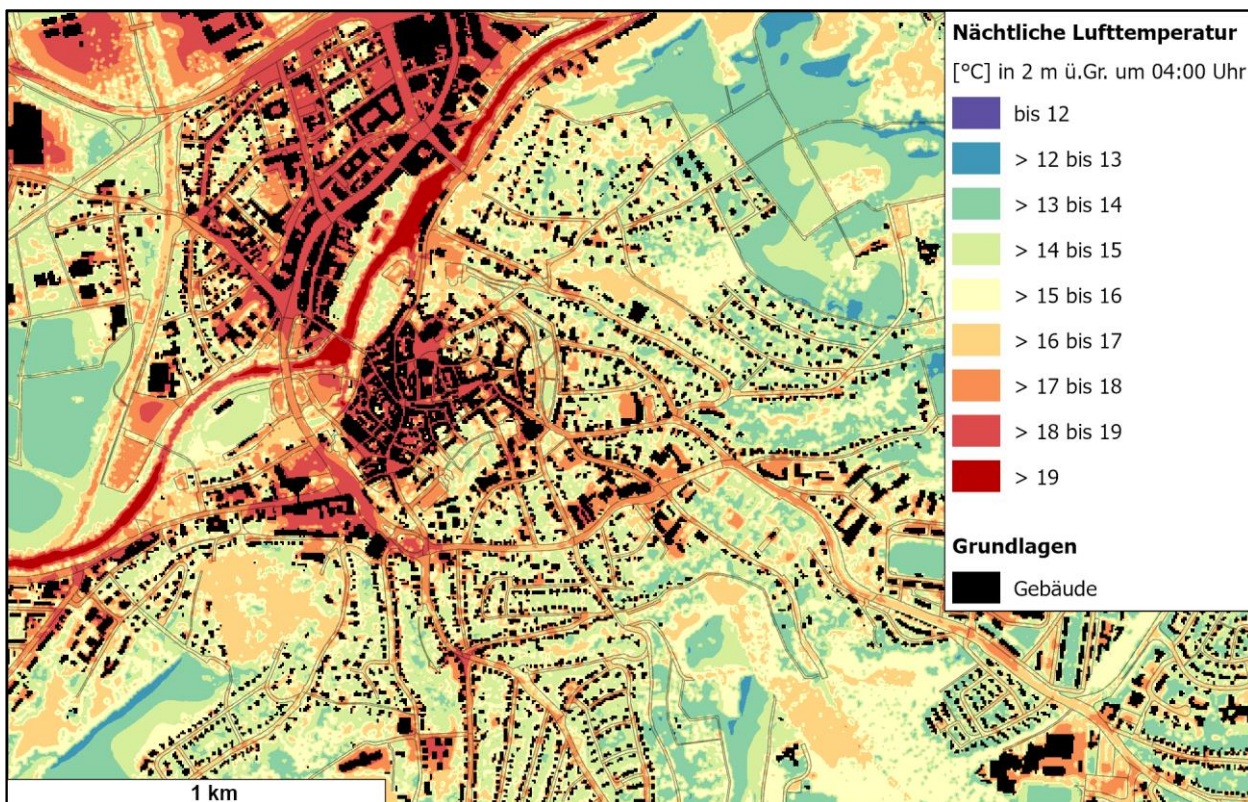


Abbildung 24: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in der Wetzlarer Kernstadt (verkürzte Legende)

Die höchsten nächtlichen Belastungen (über 18 °C) treten vorwiegend in der Wetzlarer Altstadt, in der Neustadt und den hoch versiegelten Gewerbegebieten (z.B. in Dillfeld) auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums sind in den aufgelockerten Bereichen am Siedlungsrand und in den Außenstadtteilen mit geringer Bebauungsdichte vorzufinden (12 – 15 °C).

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 12 - 14 °C auf (z.B. landwirtschaftliche Flächen um Münchholzhausen und Naunheim). In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche, sodass bodennah Temperaturen von etwa 15 – 17 °C in der Nacht erreicht werden (bspw. in Waldgebieten am Stoppelberg, südöstlich von Büblingshausen oder südlich von Garbenheim). Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüntem Siedlungsraum 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 für die Lahn und die größeren Stillgewässer in Wetzlar zu (Lufttemperaturen von 19 °C über der Lahn bzw. 20 °C über dem Dutenhofener See).

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 (Abbildung 25). Entsprechend der genannten Ergebnisse findet über versiegelten Flächen und über Gewässern (nahezu) keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über Freiflächen produziert, doch auch mit Bäumen bestandene Grünflächen sowie Parks und Gärten im Wohnumfeld können als Kaltluftentstehungsgebiete dienen.

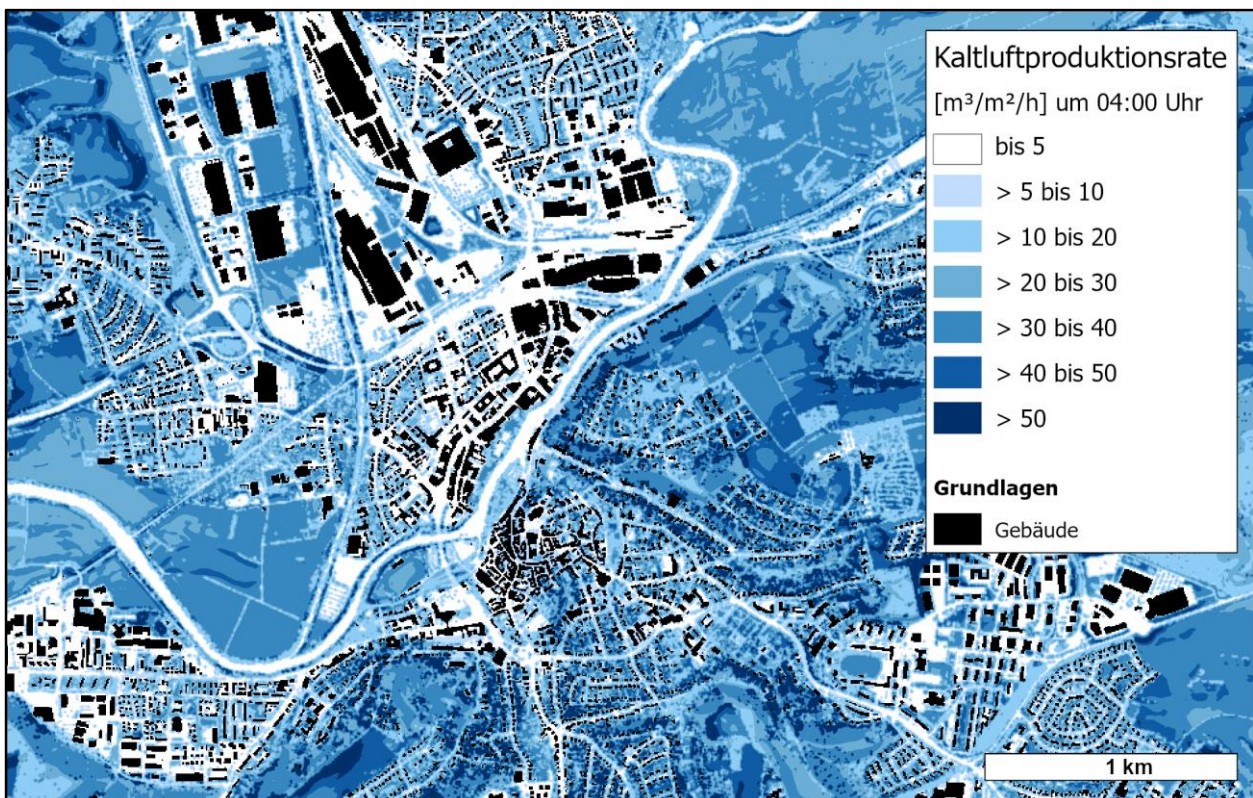


Abbildung 25: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate in der Wetzlarer Kernstadt (verkürzte Legende)

6.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief¹⁵ bestimmt und zeigt im hügeligen Gebiet eine große Variabilität. Auf den Freiflächen des Stadtumlands von Wetzlar werden Werte bis über $80 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ erreicht, wodurch die Außenstadtteile Blasbach, Naunheim, Steindorf und Nauborn reichlich von Kaltluft durchströmt werden.

Die für den Wetzlarer Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte, u.a. über die Darstellung von Kaltluftleitbahnen hervorgehoben (Kap. 7).

Die Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht auf, sodass in vielen Hangbereichen auch bodennah eine Durchströmung mit Kaltluft stattfindet. In Abbildung 27 ist die Strömungsrichtung der bodennahen Kaltluftströmung über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 100 m aggregiert wurden. Kaltluftströmungen, die in Richtung der Wetzlarer Kernstadt fließen, entstehen u.a. am Lahnberg, am Kalsmunt oder auf der Anhöhe zwischen dem Stoppelberger Hohl, Büblingshausen und Sturzkopf.

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert (z.B. Gebäude umströmt) und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme (bspw. aus der Ilmenau-Anlage, dem Alten Friedhof, dem Altstadt-Grüngürtel oder ausgehend von Friedhöfen, Rasensportflächen oder sogar begrünten Innenhöfen). So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in den zahlreichen Wäldern in Wetzlar sehr gering ausfällt (Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs). Auch der Kaltluftvolumenstrom ist im Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, doch ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern, wie bspw. am Stoppelberg oder in der Kühmark südlich von Garbenheim.

¹⁵ Relief = Oberflächenform der Erde (Gelände)

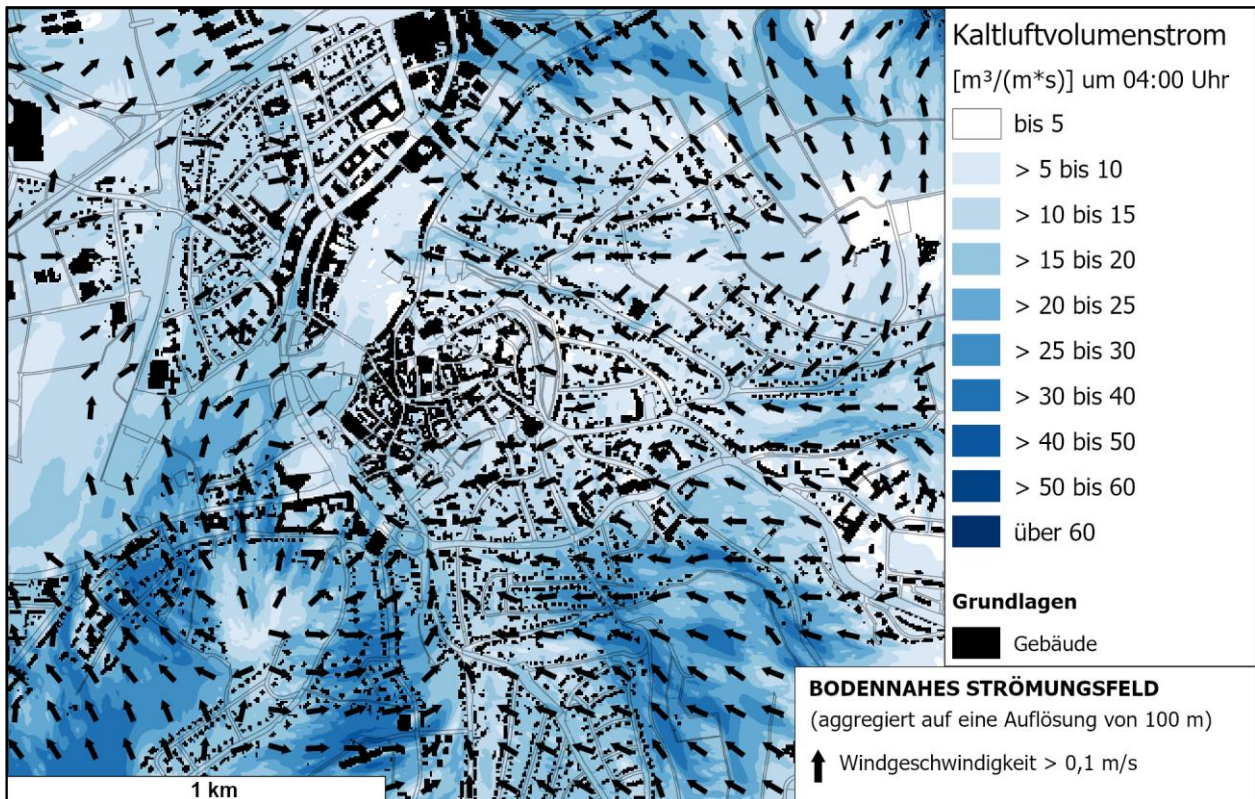


Abbildung 26: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom in der Wetzlarer Kernstadt (verkürzte Legende)

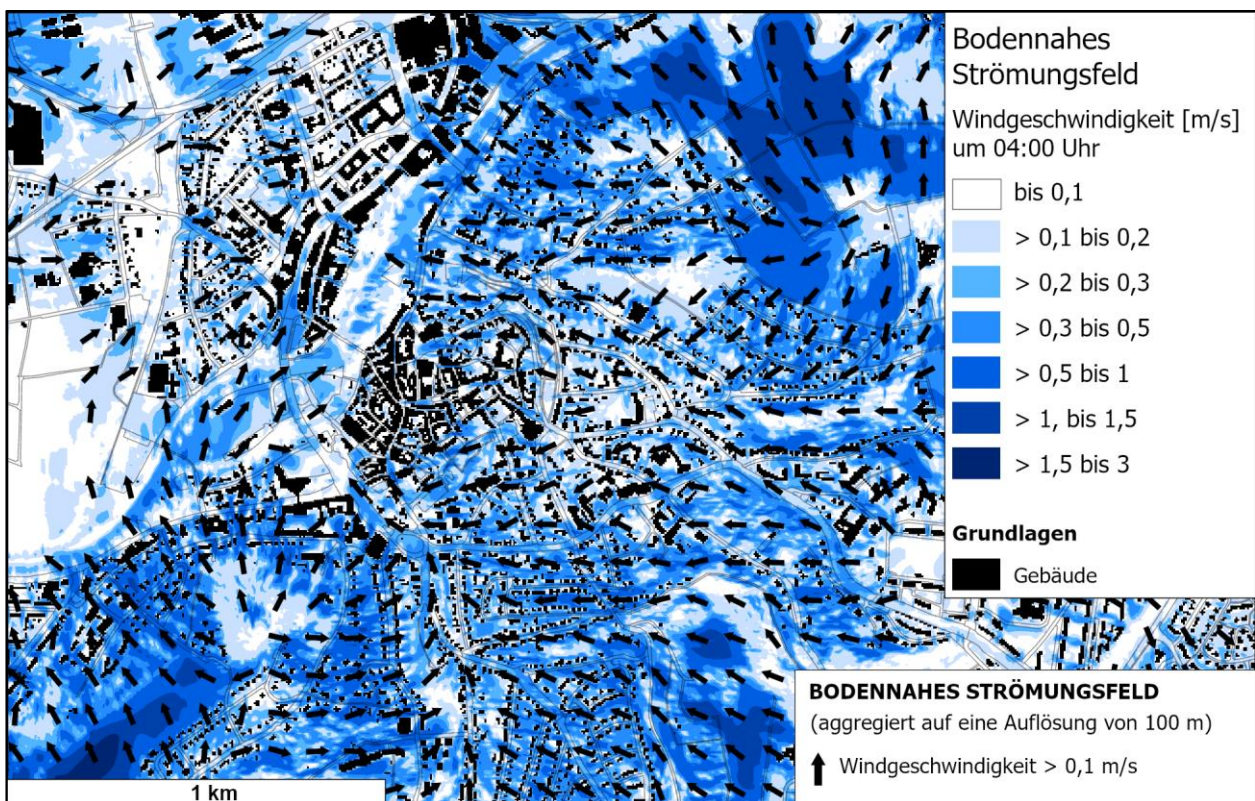


Abbildung 27: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld in der Wetzlarer Kernstadt (verkürzte Legende)

6.3 WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET)

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von unter 23 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Tabelle A 2 im Anhang). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (z.B. auf dem Karlsmund, dem Stadtforst oder bewaldeten Bereich östlich des Stoppelberger Hohl; Abbildung 28). Auch Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die angrenzenden Grünflächen entlang der Lahn, der Dill oder den Gewässern bei Dutenhofen überwiegend eine schwache Wärmebelastung aufweisen und damit 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 Neustadt und den Gewerbegebieten zu finden sind. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Stadtteilen wie Dutenhofen, Münchholzhausen oder Garbenheim (ohne Abbildung). Die Wohngebiete bieten zwar 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 (bspw. in den Bezirken Hauserberg oder Stoppelberger Hohl). Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 5 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Innerhalb des Stadtgebiets stellen mit Bäumen bestandene Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge sowie begrünte Innenhöfe aufgrund ihrer geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar (z.B. die Grünanlagen um die Altstadt „Rosengärtchen“, „Siena-Promenade“, „Avignon-Anlage“ und „Colchester-Anlage“, der alte Friedhof oder die Ilmenau-Anlage).

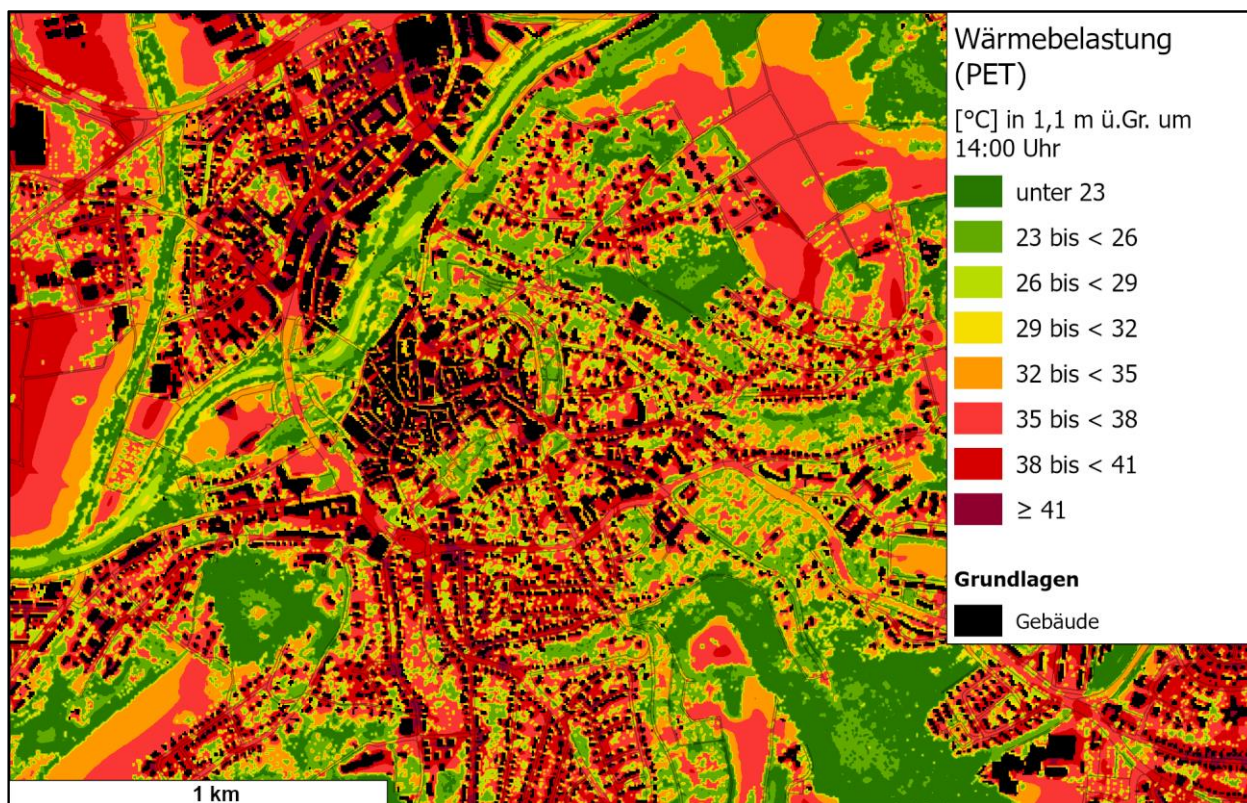


Abbildung 28: Wärmebelastung am Tag (PET) in der Wetzlarer Kernstadt (verkürzte Legende)

7. Zwischenprodukte

7.1 KLIMAANALYSEKARTE

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 Kaltluftentstehung und Kaltluftströmung.

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015,13). 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, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt im Projekt über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap. 8). Mit diesem Verständnis wurde im vorliegenden Projekt eine Klimaanalysekarten erstellt, die den gegenwärtigen Zustand (Bestand) aufzeigt.

Die entwickelte Legende der Klimaanalysekarte

Abbildung 29) 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 Modellausgabe (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich flächenhaft dargestellt, wobei gilt: Je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

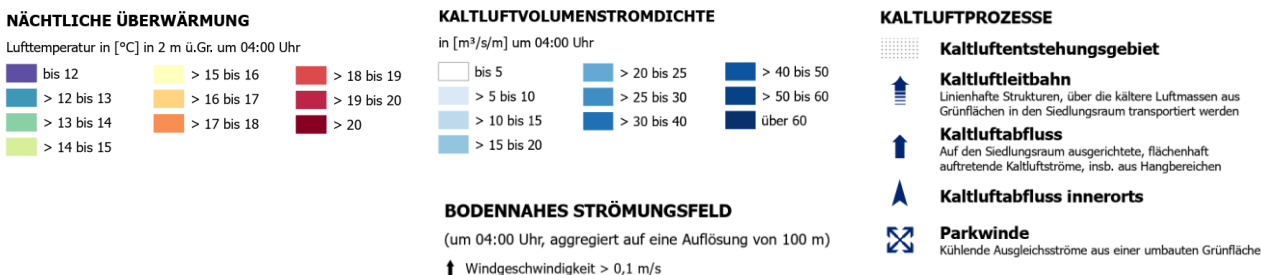


Abbildung 29: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten (verkürzte Darstellung)

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch zentrale Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 6). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit

von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Die als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichneten Räume sind Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate $\geq 35,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Wetzlar von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen linienhafte Kaltluftleitbahnen, die kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander verbinden und mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens sind. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite 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 (nach Mayer et al. (1994) sollte eine Kaltluftleitbahn mindestens 50 m breit sein). Flächenhafte Kaltluftaustauschbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Hangfolgende Kaltluftabflüsse, wie sie in Wetzlar vielfach auftreten, 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 Kaltluftabfluss und linearer Kaltluftleitbahn 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. In Wetzlar setzen sich die Kaltluftabflüsse stellenweise innerhalb des Siedlungsraums fort, insbesondere in den Hangbereichen und im Falle einer aufgelockerten Bebauung. Diese Bereiche wurden als innerörtliche Kaltluftabflüsse hervorgehoben. Zudem kennzeichnen Parkwinde urbane Grünflächen, aus denen sich (nahezu) radial Kaltluftströmungen in die umliegende Bebauung ergeben, etwa bei der bewaldeten Erhebung der Burgruine Kalsmunt.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Kaltluft-Strömungsrichtung	Auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Kaltluftentstehungsgebiet	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 35,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$
Kaltluftleitbahn (linear)	Gutachterlich auf Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen bestimmt
Kaltluftabfluss (flächenhaft)	Gutachterlich auf Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen bestimmt
Kaltluftabfluss innerorts	Gutachterlich auf Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen bestimmt
Parkwinde	Gutachterlich auf Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen bestimmt

Tabelle 6: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Die Ausweisung der Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse, etc. erfolgte fachgutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, den Kaltluftentstehungsgebieten, des bodennahen Strömungsfeldes sowie der Landnutzungsklassen. Die besonderen Kaltluftprozesse sind immer auf den Wirkraum ausgerichtet, wobei dabei unerheblich ist, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen – dies erklärt die auf die kleineren, außerhalb der Kernstadt liegenden Stadtteile ausgerichteten Kaltluftabflüsse wie bspw. auf Blasbach oder Steindorf (ohne Abb.). Oder es können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein – wie bspw. der Bezirk Silhoyer Aue auf die Kaltluftabflüsse aus dem südlich angrenzenden Weinberg (Abbildung 30).

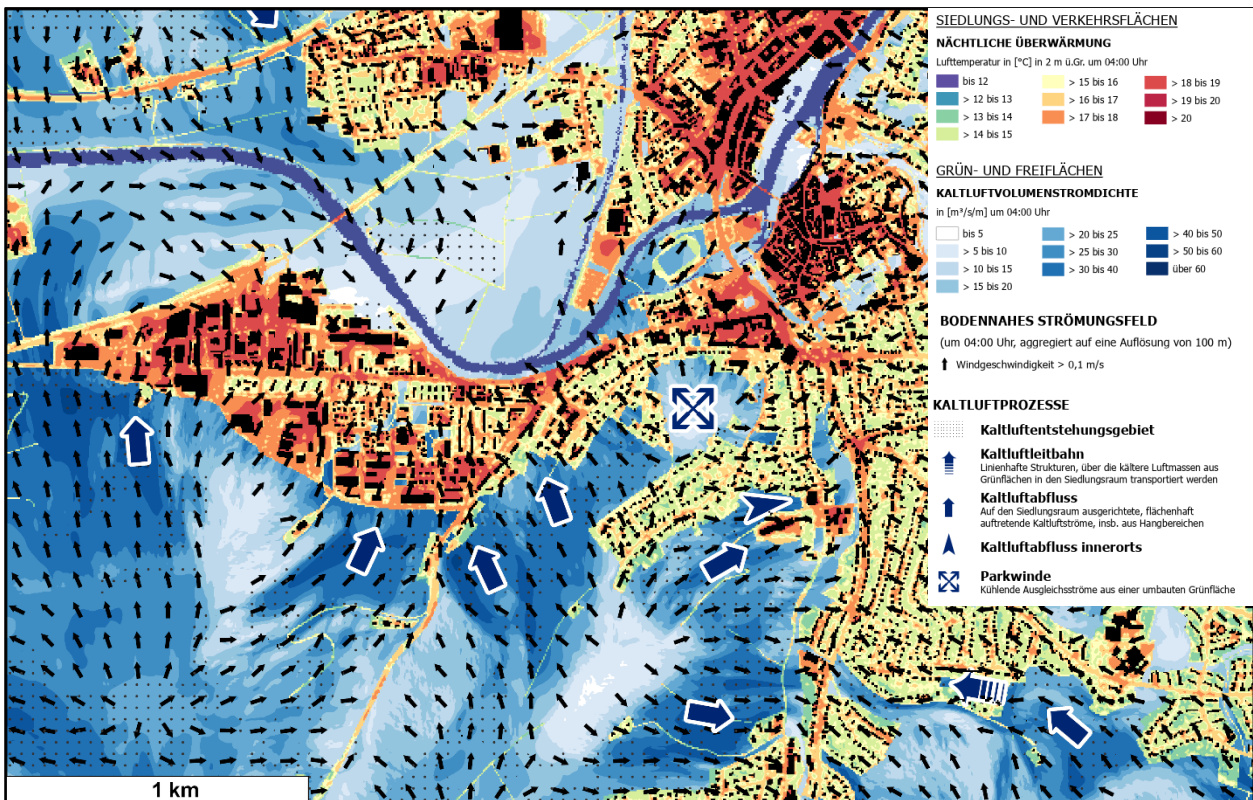


Abbildung 30: Klimaanalysekarte in einem Ausschnitt des Wetzlarer Stadtgebiets (verkürzte Legende)

7.2 SENSITIVITÄTSANALYSE

Die in diesem Kapitel vorgestellte Sensitivitäts- und Vulnerabilitätsanalyse soll als Ergänzung zur Klimaanalyse die Betroffenheit der Wetzlarer Bevölkerung in Bezug auf eine anzunehmende Wärmebelastung aufzeigen. Auf der Basis von sozialen und demographischen Daten wurden verschiedene vulnerable Bevölkerungsgruppen identifiziert, die eine im besonderen Maße physiologische Empfindlichkeit (Vulnerabilität) gegenüber Hitzeextremen aufweisen. Die methodische Vorgehensweise orientiert sich am „Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen -Hitze und Gesundheit-“, welcher vom Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG 2019) herausgegeben wurde.

7.2.1 DATENGRUNDLAGE

Für die Analyse wurden bestimmte Indikatoren ermittelt, anhand derer die Sensitivität eines jeden Gebietes ermittelt werden kann. Die Indikatoren umfassen diejenigen Bevölkerungsgruppen, welche im Folgenden als vulnerabel gegenüber Hitze definiert sind.

Hochaltrige: Personen im Alter ab 75 Jahren wurden in dieser Untersuchung als „Hochaltrige“ bezeichnet und gehören zu einer gegenüber Hitze vulnerablen Gruppe. Bei Menschen in dieser Altersklasse besteht ein erhöhtes Risiko von Übersterblichkeit. Die erhöhte Mortalität begründet sich durch größere hitzeabhängige Gesundheitsrisiken infolge chronischer Erkrankungen, kognitiver und körperlicher Einschränkungen, Multimorbidität sowie Multimedikation sowie herabgesetzten Fähigkeiten zur physiologischen Anpassung an Hitze. (HLNUG 2019, Becker et al. 2019)

Senioren: Personen im Alter von 65 bis 75 Jahren wurden aufgrund ihrer Einstufung als „ältere“ Bevölkerung ebenfalls als potenziell vulnerabel betrachtet und als „Senioren“ bezeichnet. Ältere Menschen sind u.U. weniger mobil und besitzen eine geringe physiologische Anpassungsfähigkeit gegenüber Hitze (geringere Abgabe der Körperwärme, fehlende Wahrnehmung der Hitze, schnellere Dehydratation) (BMG 2021).

Kleinkinder: Im Vergleich zu Erwachsenen besteht bei Kleinkindern eine geringere Thermoregulation, der Körper produziert weniger kühlenden Schweiß, gleichzeitig bietet die Körperoberfläche eine größere relative Absorptionsfläche für Wärmestrahlungen. Weiterhin liegt bei Kleinkindern ein höherer Flüssigkeitsanteil im Körper vor und die relative Verdunstung ist aufgrund der größeren Körperoberfläche in Bezug zum Körpervolumen ebenfalls höher als bei Erwachsenen. Bei Hitze sind sie daher einem größeren Risiko ausgesetzt, eine Exsikkose (Austrocknung des Körpers) als Folge einer Dehydratation zu erleiden. (HLNUG 2019)

Ökonomisch und sozial Benachteiligte: Leistungsempfänger nach SGB II (Grundsicherung für Arbeitssuchende) und SGB XII (Sozialhilfe) müssen ihren Lebensunterhalt mit knappen ökonomischen Ressourcen führen. Eine potenziell höhere Gefährdung bei Hitzeextremen ergibt sich bei sozial benachteiligten Bevölkerungsgruppen aus einer Kombination von schlechten Wohnbedingungen, mobilen oder finanziellen Einschränkungen bei Aufenthaltsalternativen bei Hitze sowie geringeren Teilhabechancen und einem schlechteren Gesundheitszustand (HLNUG 2019).

Die Sensitivitätsanalyse soll die räumliche Verteilung der vulnerablen Bevölkerung Wetzlars in einer Karte aufzeigen. Die demographischen Daten lagen mit hoher Genauigkeit vor und wurden auf die Ebene von „Baublöcken“, die aus zumeist mehreren Wohngebäuden bestehen, zusammengefasst. Die sozioökonomischen Daten (Leistungsempfänger nach SGB II und XII) lagen in einer gröberen räumlichen Auflösung vor als die demographischen Daten und wurden auf die 20 statistischen Bezirke Wetzlars zugeschnitten.

Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Nutzungen sowie die Einwohnerdichte und -anzahl pro Baublock im Zuge der Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

Analyse sensibler Orte / Nutzungen

Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen, an denen sich vulnerable Gruppen (alte oder kranke Menschen, Kinder) aufhalten. In Wetzlar wurden Kinderspielflächen, Kindergärten, Grundschulen, Alten- / Pflegeheime und das Klinikum Wetzlar erfasst. Diesen Orten sollte eine besondere Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zugeteilt werden, welche bei Hitze den Aufenthalt im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend gestalten.

Analyse der Bevölkerungsanzahl /-dichte

Gebiete (*hier*: Baublöcke) mit einer hohen absoluten Anzahl an Einwohnern (*nf. kurz* Einw.) oder einer hohen relativen Anzahl an Einwohnern auf geringem Raum (= hohe Einwohnerdichte) wurden ebenfalls zur Identifikation sensibler Bereiche herangezogen. Eine hohe Einwohnerzahl wurde festgelegt ab 100 Einw. / Hektar pro Baublock und eine hohe Einwohnerdichte ab 200 Einw. / Hektar pro Baublock. Enger Wohnraum kann als eine relevante Benachteiligung betrachtet werden. Gegenüber einer Einfamilienhaussiedlung steht weniger Fläche pro Person für Wohnraum oder für Ausweichmöglichkeiten im Freien zur Verfügung. Zudem geht eine hohe Einwohnerdichte häufig auch mit einer hohen Bebauungsdichte einher, welche die Hitzebelastung im Straßenraum zusätzlich fördert.

7.2.2 METHODIK

Zur Ermittlung der Sensitivität eines Gebietes wurden Klassengrenzen definiert, welche sich aus den vorhandenen demographischen Daten ableiten. Dafür wurde die Verteilung eines jeden Indikators (Hochaltrige, Senioren, Kleinkinder) berechnet und in Dezile eingeteilt. Der erste Schritt bestand aus der Berechnung der Dichte der jeweiligen vulnerablen Bevölkerungsgruppe in Einwohner pro Hektar pro Baublock. Als nächstes wurden die einzelnen Einwohnerdichten in je zehn Dezile eingeteilt¹⁶, wodurch sich jeweils 10 Prozent der betrachteten Raumeinheit miteinander vergleichen lassen.

Die berechneten Dezile wurden nach folgender Klassifikation zur Beschreibung von Sensitivitätsgraden eingeteilt:

- Dezile 1 bis 7 = Klasse „wenig sensitives Gebiet“
- Dezil 8 = Klasse „sensitives Gebiet“
- Dezil 9 = Klasse „hoch sensitives Gebiet“
- Dezil 10 = Klasse „extrem sensitives Gebiet“

Die räumliche Verteilung der zuvor vorgestellten Basisindikatoren und deren Einteilung in Dezile ist in den nachfolgenden Karten (Abbildung 31 bis Abbildung 33) für jede vulnerable Bevölkerungsgruppe innerhalb eines Ausschnittes des Wetzlarer Stadtgebiets dargestellt.

Nach selbigem Verfahren wurden ebenfalls die Dichte- und Dezilberechnungen für die von Armut benachteiligte Bevölkerung vorgenommen (Leistungsempfänger nach SGB II und SGB XII). Die kleinstmögliche räumliche Ebene lag hierbei auf den 20 Stadtbezirken von Wetzlar (s. Abbildung 34).

Ergänzend dazu sind in Abbildung 35 die sensiblen Nutzungen und Einrichtungen für einen Ausschnitt von Wetzlar als punkthafte Orte dargestellt.

¹⁶ Dezil-Bildung: Die Einzelwerte eines Indikators werden der Größe nach sortiert und in zehn gleichstark besetzt Gruppen eingeteilt.

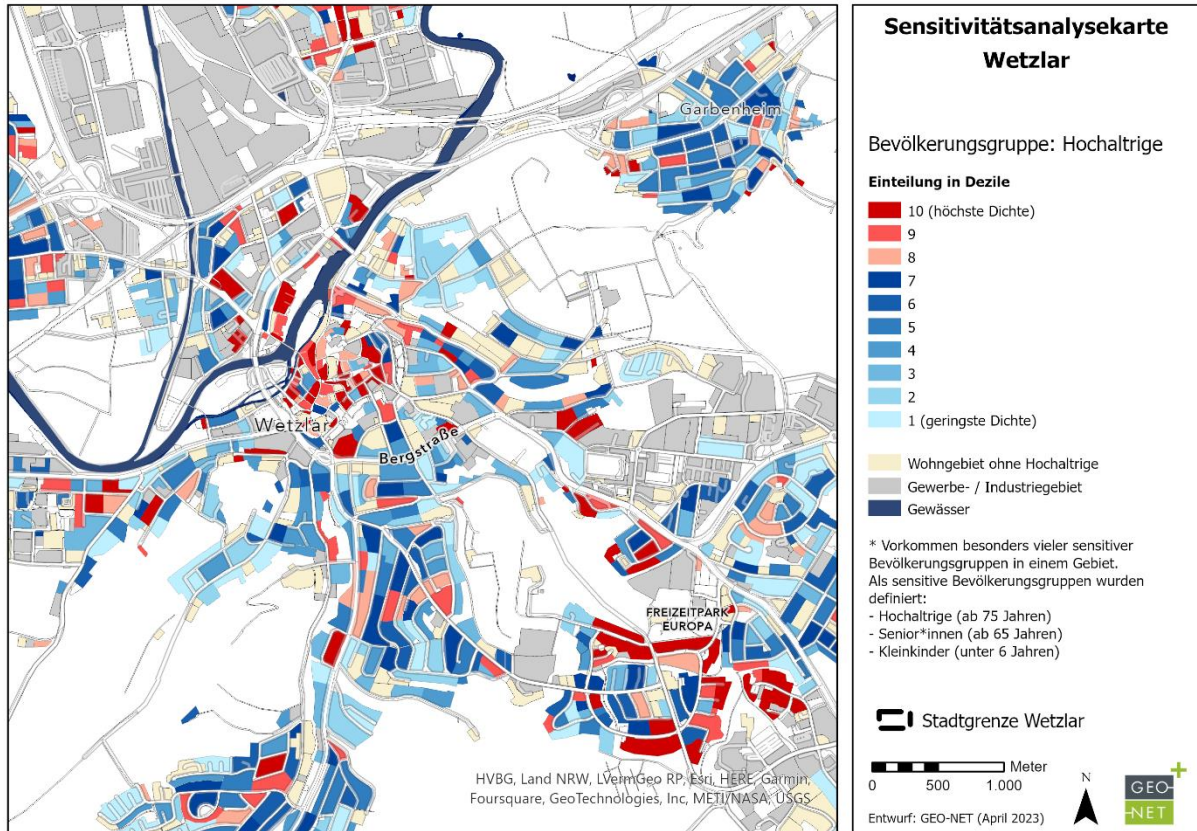


Abbildung 31: Konzentration der Sensitivität von Hochaltrigen im Wetzlarer Stadtgebiet (Ausschnitt Kernstadt). Darstellung der Hochaltrigendichte in Dezilen.

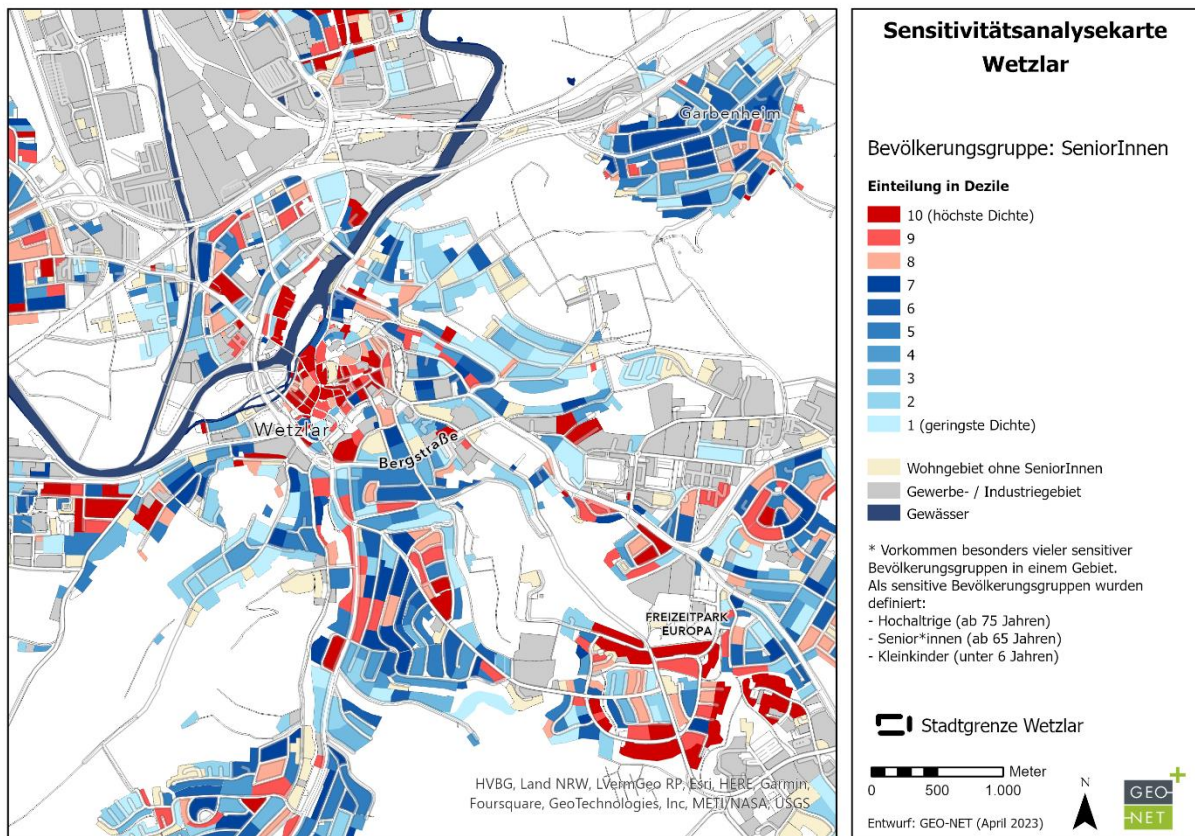


Abbildung 32: Konzentration der Sensitivität von SeniorInnen im Wetzlarer Stadtgebiet (Ausschnitt Kernstadt). Darstellung der SeniorInnendichte in Dezilen.

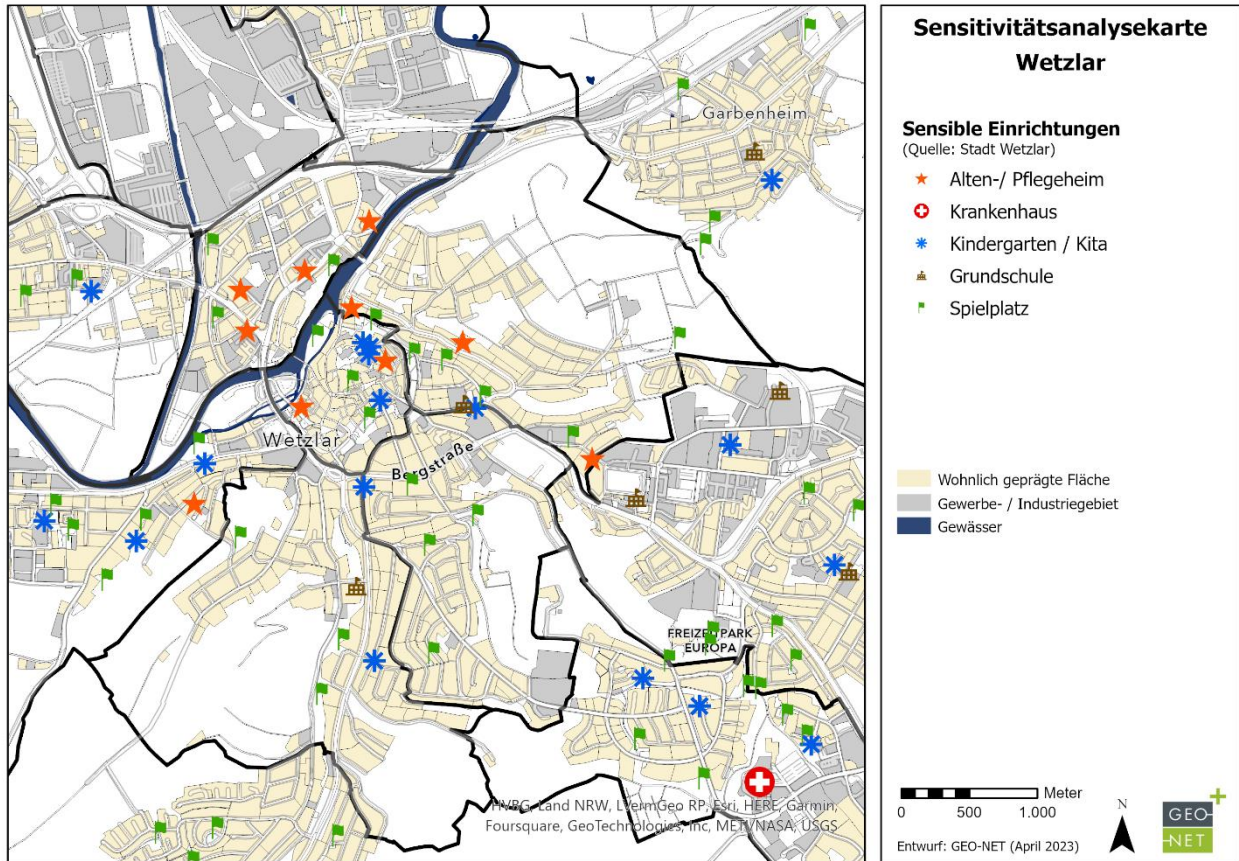


Abbildung 35: Sensible Nutzungen / Einrichtungen. Orte, an denen sich vulnerable Gruppen (Alte, Kranke, Kinder) im Wetzlarer Stadtgebiet aufhalten.

7.2.3 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

Die vorangestellte Analyse ermöglicht es der Stadtplanung bereits, Gebiete mit einer besonders hohen Dichte an sensiblen Bevölkerungsgruppen zu identifizieren. Über eine Kombination der ausgewählten Indikatoren können im Detail städtische Räume lokalisiert werden, in denen verschiedene gefährdete Bevölkerungsgruppen gehäuft vorkommen. Auf diese Weise können zielgerichtet Maßnahmen in besonders sensiblen Gebieten im Stadtgebiet geplant und umgesetzt werden, da dort die Vulnerabilität der Bevölkerung gegenüber Hitze besonders hoch ist.

Zur Identifizierung sensibler Gebiete wurde eine Überlagerung der Einzelindikatoren vorgenommen, was der folgenden Tabelle 7 zu entnehmen ist.

Die Gefährdung der Hochaltrigen und Senioren wurde bei der Ausweisung sensibler Gebiete stärker gewichtet als die Kinderdichte, da eine auf Deutschland übertragbare, wissenschaftliche Evidenz für die Vulnerabilität von älteren Menschen gegenüber Hitze vorliegt (HLNUG 2019, Becker et al. 2019) wohingegen die Kinder- und Armutsdichte nicht auf eindeutiger Evidenz beruht (HLNUG 2019).

Tabelle 7: Klassifizierung der Sensitivität der Bevölkerung.

Klasse	Indikatoren
Extrem sensitives Gebiet	Hochaltrigendichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 10
Sehr hoch sensitives Gebiet	Hochaltrigen- oder Seniorendichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 10
Hoch sensitives Gebiet	Hochaltrigen- oder Seniorendichte Dezile 8 bis 10 oder Kinderdichte Dezil 10
Sensitives Gebiet	bisheriges nichtzutreffend, aber hohe Einwohneranzahl /-dichte* oder 1 sensibler Ort
wenig sensitives Gebiet	bisheriges nichtzutreffend

* hohe Einwohneranzahl = ab 100 Einwohner pro Wohnblock

hohe Einwohnerdichte = ab 200 EWO / Hektar und mind. 25 Einwohner

Die Sensitivitätsanalysekarte (s. Abbildung 36) zeigt die räumliche Verteilung hitzesensibler Bevölkerungsgruppen auf Wohnblockebene. Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Wetzlarer Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

In der „Planungshinweiskarte Stadtklima“ (s. Kapitel 0) wird die Sensitivität der Bevölkerung mit den Ergebnissen der stadtklimatischen Belastung in Wetzlar verschnitten, um Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze treffen zu können.

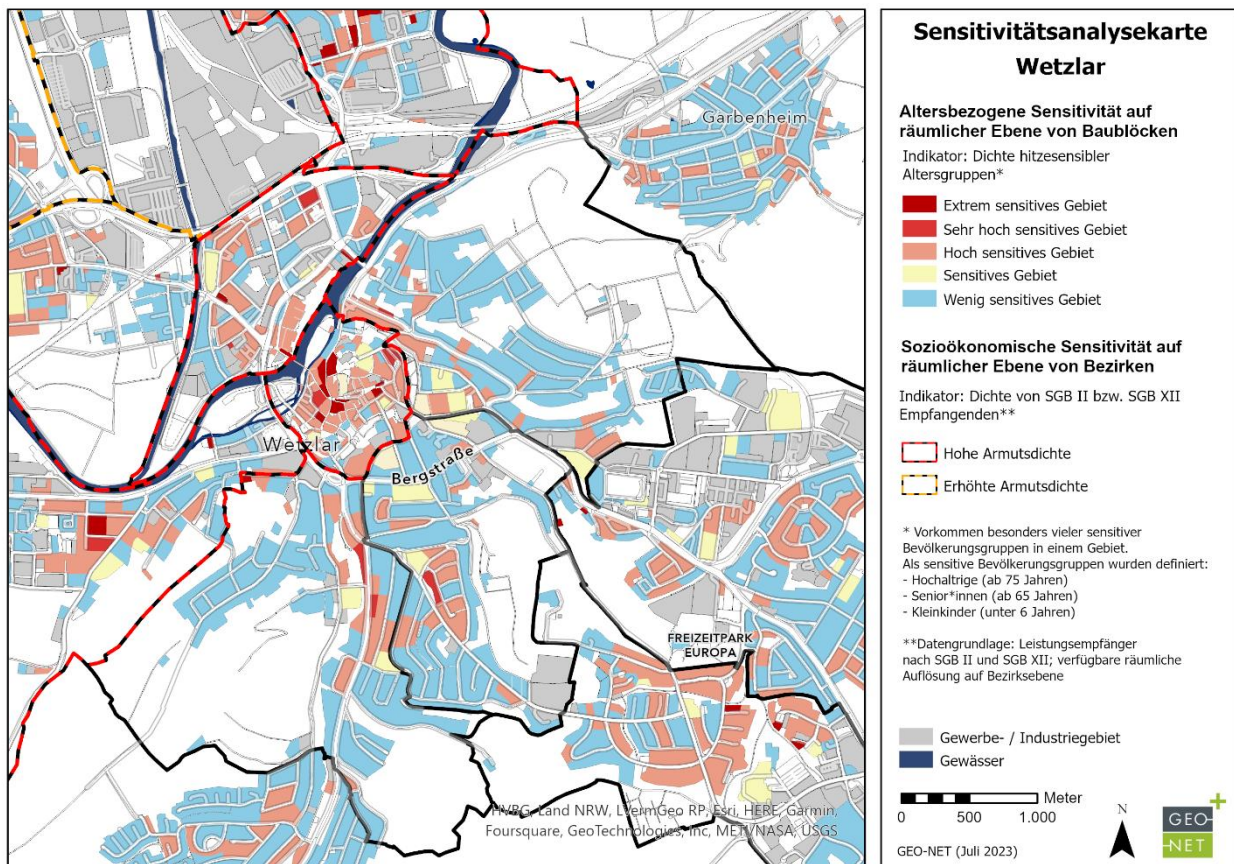


Abbildung 36: Sensitivitätsanalysekarte der Stadt Wetzlar (Ausschnitt). Darstellung der Sensitivität der Wetzlarer Bevölkerung auf Basis von sensiblen Bevölkerungsgruppen.

7.2.4 EMPFEHLUNGEN UND MAßNAHMEN

In den extrem bzw. (sehr) hoch sensitiven Gebieten wird empfohlen, Maßnahmen zur Anpassung an Hitzeextreme vorzunehmen, da dort gehäuft Menschen mit besonderem Schutzbedarf in Bezug auf Hitzeminderung leben.

Der Leitfaden zur Klimaanpassung (HLNUG 2019) gibt zum Schutz von Hochaltrigen folgende Empfehlungen vor: „Zur Vermeidung von Übersterblichkeit ist der präventive Aufbau von geeigneten Unterstützungsstrukturen für ältere, alleinlebende Menschen im Stadtteil im Rahmen der kommunalen Gesundheitsförderung anzustreben. Während Hitzeextremen wird empfohlen, kühle Orte bereit zu stellen, an denen sich hochaltrige Menschen aufhalten können.“ (HLNUG 2019, S. 108).

In sensitiven Gebieten werden folgende Empfehlungen für Kinder unter 5 Jahren vorgeschlagen: „Insbesondere dann, wenn die betroffenen Gebiete zugleich eher bildungsbenachteiligte Gebiete sein könnten, sollten Strategien zur Information von Eltern über geeignete Multiplikatoren entwickelt werden. Die Bauten von Kindertagesstätten und Schulen in öffentlicher Trägerschaft sollten auf ihr thermisches Verhalten hin überprüft und ggf. saniert werden. Empfehlungen zum Aufenthalt im Freien während Hitzeextremen sollten gegeben werden. Familienhebammen, Kinderärzte, Erzieher und Lehrkräfte sind potenzielle Multiplikatoren für Präventionsstrategien.“ (HLNUG 2019, S. 108).

In Gebieten mit einer erhöhten Armutsdichte gilt Folgendes: „Hier ist mit einem geringeren Potenzial für Schutzmöglichkeiten zu rechnen. Sowohl Wohnbedingungen als auch geringes Wissen könnten Anpassungen an Hitzeextreme erschweren. Öffentlich nutzbare, gut beschattete Grünflächen, öffentliche kühle Räume sowie eine Sanierung der Bausubstanz im Bezirk haben eine besondere Bedeutung.“ (HLNUG 2019, S. 108).

8. Endprodukte

8.1 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 Lastraum (mit potentiellen 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 den städtischen Fachbereichen. Zunächst wurden zwei „Bewertungskarten“ erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation eine stadtklimatische Bewertung für den Status quo vorgenommen wurde. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse der beiden Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo daher in Wetzlar Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.

Des Weiteren wird in der Planungshinweiskarte Stadtklima die Sensitivität der Bevölkerung (Sensitivitätsanalysekarte) mit den Ergebnissen der stadtklimatischen Belastung in Wetzlar verschnitten, um Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze treffen zu können. Aus der Planungshinweiskarte geht damit hervor, in welchen klimatischen Belastungsbereichen besonders viele vulnerable Menschen wohnen. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für die Klimaanpassung in Wetzlar dar (vgl. Abbildung 8).

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet (vgl. Kap. 6). 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 und stadtklimatische Funktions- bzw. Nutzungseinheiten beziehen. Diese sogenannte „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 Analyse-Ansatz 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 besteht jedoch 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).

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen), der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Die Basisgeometrie von Wetzlar umfasst über 9.000 Teilflächen, welche jeweils einen größeren Flächeninhalt als die Fläche einer einzelnen Rasterzelle des Modells (25m²) aufweisen. Aus diesem Grund treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 37). Auch für die Straßengeometrien wird in den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte eine Bewertung hinsichtlich der bioklimatischen Situation vorgenommen. Verkehrsräume ohne Bewertung (Gleise) sind entsprechend grau dargestellt.

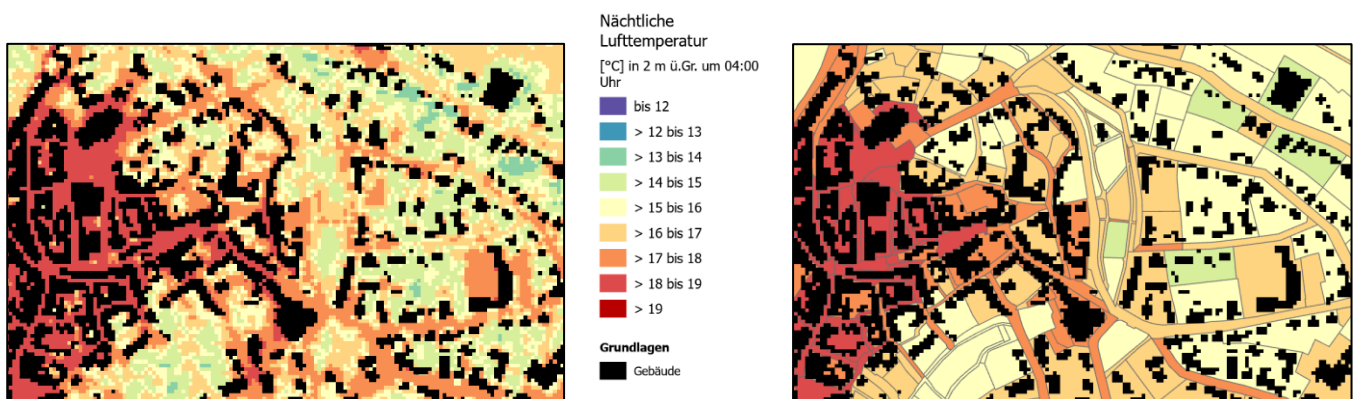


Abbildung 37: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Ausgangsraster (links) und als Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie in einem Ausschnitt des Wetzlarer Stadtgebiets (rechts; Gebäude jeweils in schwarz)

8.3 BEWERTUNGSKARTEN

8.3.1 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 (PET; vgl. Kap. 2). Bei der Temperatur und der PET, die wie in Kap. 8.2 beschrieben auf die Basisgeometrie gemittelt werden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Modellantrieb: „sommerliche autochthone Wetterlage“ (wolkenfreie Wetterlage ohne überregionalen Wind) gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb eines Sommers sowie selbst innerhalb der zu betrachtenden Wetterlage auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Planungshinweiskarte muss nun 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 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei dieser 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 resultierenden 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 38).

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

Dabei ist

z standardisierter Wert der Variablen x

x Ausgangswert der Variablen x

μ arithmetisches Mittel

σ Standardabweichung

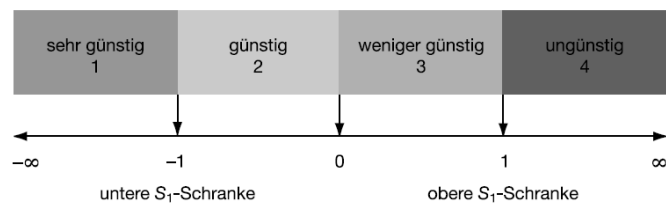


Abbildung 38: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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 Bewertungsverfahren 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). Für diesen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation¹⁷:

¹⁷ 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.

- Nächtliche Temperatur: Mittelwert = 15,951 °C Standardabweichung = 1,419 °C
- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 35,299 °C PET Standardabweichung = 5,505 °C PET

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 38) 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. Für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr günstige – günstige – mittlere – ungünstige – sehr ungünstige* bioklimatische Situation eingeteilt (Tabelle 8). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert (z = 0) schwankenden Klassen.

In der Nacht steht die bioklimatische Situation in den Wetzlarer Wohngebieten im Fokus (Ziel: gesunde Schlafbedingungen). Im Abstimmungsprozess hat sich ergeben, dass auch innerhalb von Gewerbegebieten eine Bewertung in der Nacht vorgenommen werden soll, auch der Straßenraum sowie Plätze bekamen eine Bewertung zugeschrieben. Aufgeheizte Plätze und Straßen geben nachts ihre Wärme an die Umgebung ab und beeinflussen damit die Situation in der umliegenden Bebauung, was in den Modellergebnissen bereits enthalten ist (ein Grundstück im Umfeld hoher Versiegelung ist stärker überwärmt als ein Grundstück neben einer Freifläche). Die Tabelle 8 zeigt die Klassengrenzen der z-Transformation sowie die zugehörigen PET-Werte für das Siedlungsgebiet (Wirkraum), Tabelle 9. zeigt äquivalent dazu die Grenzwerte für die Nachtsituation.

Tabelle 8: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

	Bioklimatische Situation am Tag	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
	Sehr günstig	$z \leq -0,75$	$PET \leq 31,16$
	Günstig	$-0,75 < z \leq -0,25$	$31,16 < PET \leq 33,91$
	Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$33,91 < PET \leq 36,68$
	Ungünstig	$0,25 < z \leq 0,75$	$36,68 < PET \leq 39,44$
	Sehr ungünstig	$z > 0,75$	$PET > 39,44$

Tabelle 9: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht sowie Angabe der Klimafunktion der Flächen (wenn zu mindestens 1/3 Kaltlufteinwirkungsbereich).

	Bioklimatische Situation in der Nacht	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C]
	Sehr günstig	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 14,39$
	Günstig	$-1,0 < z \leq -0,33$	$14,39 < T04 \leq 15,48$
	Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$15,48 < T04 \leq 16,42$
	Ungünstig	$0,33 < z \leq 1,0$	$16,42 < T04 \leq 17,37$
	Sehr ungünstig	$z > 1,0$	$T04 > 17,37$

8.3.2 AUSGLEICHSRAUM

Als Ausgleichsräume werden vegetationsgeprägte, unbebaute Flächen bezeichnet, die vornehmlich in der Nacht durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen dazu in der Lage sind, lufthygienische oder humanbioklimatische Belastungen in Wirkräumen zu vermindern oder abzubauen oder durch ihre Schattenwirkung am Tage als wertvolle Naherholungsräume dienen können. Durch diese unterschiedlichen Kerneigenschaften der Ausgleichsräume zu unterschiedlichen Tageszeiten war es notwendig, die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt zu bewerten und wie bereits beim Wirkraum geschehen, in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) (vgl. Tab. 11) einzuteilen.

Folgende statistische Werte wurden für die z-Transformation ermittelt:

- Wärmebelastung am Tag: Mittelwert = 29,689 °C PET Standardabweichung = 7,048 °C PET

Tabelle 10: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

	Aufenthaltsqualität an Sommertagen	Grenzen der z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
	Sehr hoch	$z \leq -1,0$	$PET \leq 22,51$
	Hoch	$-1,0 < z \leq -0,33$	$22,51 < PET \leq 27,35$
	Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$27,35 < PET \leq 32,02$
	Gering	$0,33 < z \leq 1,0$	$32,02 < PET \leq 36,74$
	Sehr gering	$z > 1,0$	$PET > 36,74$

Analog zur Wirkraumbewertung am Tage ist auch für die Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung der Flächen im Ausgleichsraum die modellierte Wärmebelastung (PET) bzw. deren z-Transformation maßgeblich. Neben einer möglichst hohen Aufenthaltsqualität im bewohnten Siedlungsraum ist zusätzlich jene im Umfeld von Industrie- und Gewerbeflächen von übergeordneter Relevanz, um den Beschäftigten Rückzugsorte zu bieten.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. Während in der Klimaanalysekarte die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder vornehmlich auf Grundlage ihres siedlungsunabhängigen, auf das Prozessgeschehen fokussierten Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in der Bewertungs- und der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt. Zur Bewertung der klimaökologischen Charakteristika des Ausgleichsraumes im Hinblick auf planungsrelevante Belange bedarf es einer Bewertung der vorhandenen Wirkungsraum-Ausgleichsraum-Systeme im Untersuchungsgebiet. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb der Grünflächen und Freiräume entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann.

So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen bzw. Parkwinden stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion), eine hohe Bedeutung, wenn sich in deren direktem Luv¹⁸ befanden (Sekundärfunktion) und eine mittlere Bedeutung, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet). Auch bei den weiteren Grünflächen spielen der Siedlungsbezug und die Funktion des Kaltlufthaushalts eine wichtige Rolle. So bekommt eine Grünfläche, die eine angrenzende Siedlungsfläche mit hoher thermischer Belastung mit Kaltluft versorgt, beispielsweise die höchste bioklimatische Bedeutung zugewiesen.

¹⁸ Luv = dem Wind zugewandte Seite

Die folgende Abbildung 39 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten, hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Klimafunktion:
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 21,53 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,43 \text{ m/s}$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 31,12 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 700 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Siedlungsagglomerationen

Als Lesehilfe des Bewertungsschlüssels kann folgendes Beispiel dienen: Für eine Grünfläche, die nicht Teil einer Kaltluftleitbahn bzw. eines Kaltluftabflusses ist und an Wohngebiete mit (sehr) ungünstiger humanbioklimatischer Situation angrenzt, gilt folgende Zuordnung:

- Die Fläche weist eine Kaltluftfunktion (hohe Kaltluftströmung /-entstehung) auf → Sie besitzt eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung.
- Die Fläche weist keine hohe Kaltluftfunktion auf → Sie besitzt eine hohe bioklimatische Bedeutung.

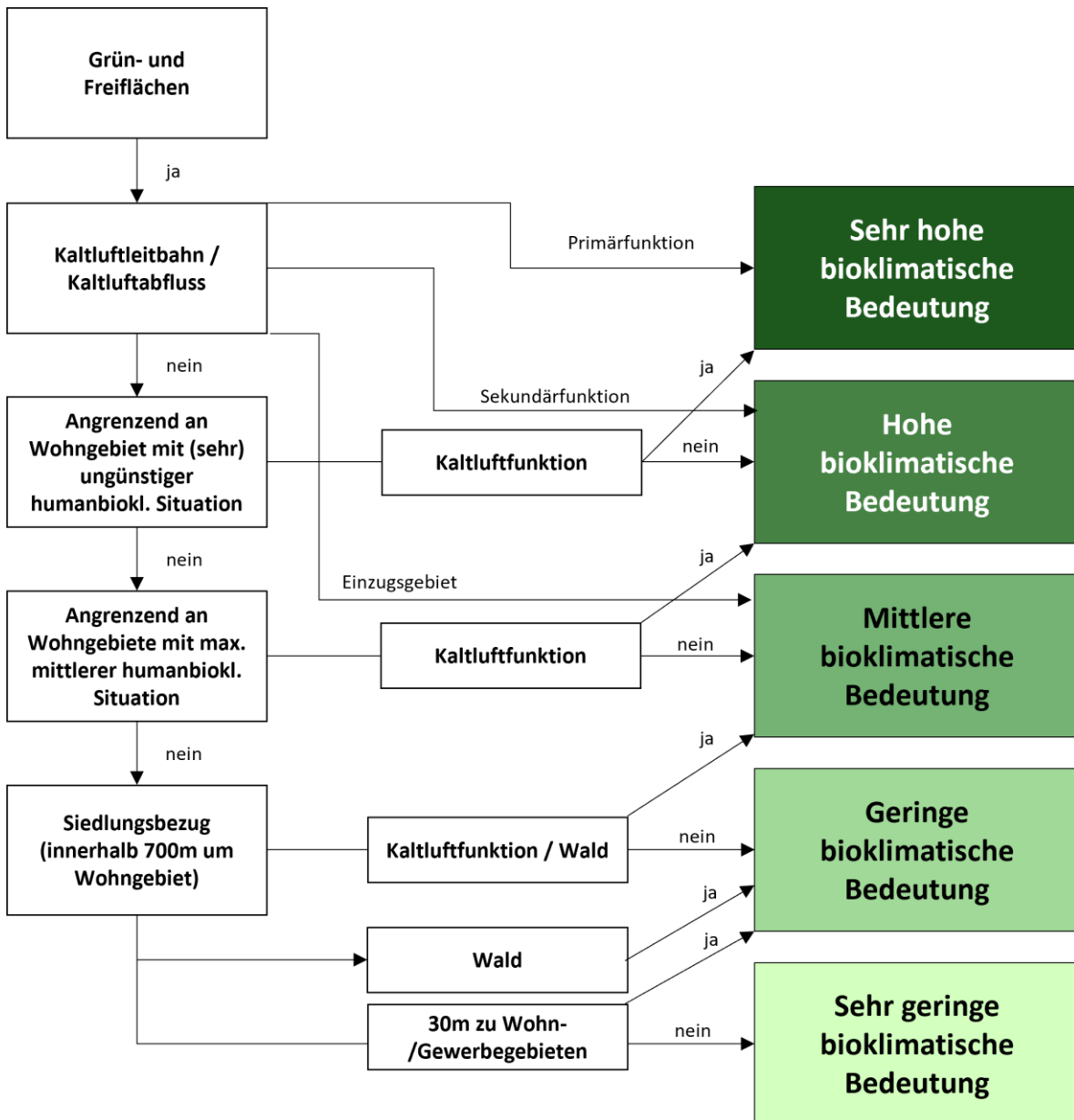


Abbildung 39: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation

Tab. 11: Ableitungsvorschrift zur Bewertung der Ausgleichsraumbedeutung

Karte	Bedeutung	Ableitung der Bedeutung	Pufferung
1	Sehr hoch	Zentrale Leitbahn, Richtung Belastungsstufen 1 – 5	250 m
2	Hoch	Kerngebiete Luftaustauschbereiche, Richtung Belastungsstufen 4 und 5 Rand-/Quellbereiche Leitbahnen (1)	700 m 30 m
3	Erhöht	Kerngebiete Luftaustauschbereiche, Richtung Belastungsstufen 1, 2 oder 3 Rand-/Quellbereiche Luftaustauschbereiche (2)	700 m
4	Gering	Übrige Flächen im Ausgleichsraum	–

Die nach diesem vereinfachten Verfahren ermittelte bioklimatische Bedeutung der Grünflächen basiert einerseits auf ihrer Lage in Bezug zu bioklimatisch belasteten Siedlungsstrukturen, zum anderen auf der flächeninternen Ausprägung der Klimaparameter, d. h. im Wesentlichen auf ihrem Kaltluftliefervermögen. Diese Unterscheidung wurde getroffen, weil die flächeninternen Klimaparameter nicht in allen Bereichen gleichermaßen aussagekräftig sind. So kann eine Ausgleichsfläche trotz relativ geringem Kaltluftliefervermögen in einem ansonsten stark überbauten Umfeld signifikant zur Verminderung der dort auftretenden hohen Belastungen beitragen. Aus diesem Grund wurden Luftaustauschbereichen im direkten Umfeld von Wirkräumen mit besonders ungünstigen humanbioklimatischen Verhältnissen generell eine höhere Bedeutung zugesprochen. Da bei Luftleitbahnen die Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Fokus der Bewertung stehen sollte, wurde bei ihnen vorsorgeorientiert keine Unterscheidung bezüglich der bioklimatischen Situation des angrenzenden Wirkraums getroffen.

Zusammenfassend wirkt eine in ihrer humanbioklimatischen Bedeutung als „Sehr hoch“ eingestufte Ausgleichsfläche als Kaltluft- oder Frischluftleitbahn. Eine als „Hoch“ eingestufte Ausgleichsfläche verfügt entweder über einen direkt zugeordneten, bioklimatisch hoch belasteten Wirkungsraum oder ist als Quellgebiet einer Kaltluft- oder Frischluftleitbahn einzustufen. Ist der Wirkraum geringer belastet oder der Ausgleichsraum als Quelle für Luftaustauschbereiche anzusehen, wird den Flächen eine erhöhte Bedeutung zugesprochen. Flächen, die weder unter der heutigen Siedlungsstruktur noch unter dem Einfluss des zukünftig zu erwartenden Klimawandels eine mehr als geringe Bedeutung für die wirkraumbezogene Kaltluftproduktion und den Kaltlufttransport aufweisen, werden in ihrer Bedeutung als „Gering“ eingestuft.

8.3.3 ZUSÄTZLICHER KARTENINHALT ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in der Klimaanalysekarte (Abbildung 30) ist auch in der nächtlichen Bewertungskarte das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine blaue Punktraster-Signatur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarte gleicht.

Neben diesen die Ausgleichflächen betreffenden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum eine weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Es wird der Kaltlufteinwirkbereich in blauer, rasterbasierter Schraffur dargestellt, der anzeigt, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (s. Abbildung 40). Kaltlufteinwirkbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von $18,08 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von $0,31 \text{ m/s}$ erreichen oder überschreiten.



Kaltlufteinwirkbereich im Siedlungsraum

Abbildung 40: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum

8.3.4 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN DES STATUS QUO

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 41 zeigt die Bewertungskarte der Nachsituation für Wetzlar im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 5,7 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt sind durch eine **sehr günstige thermische Situation** gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen am Siedlungsrand, wie jene in Büb-

lingshausen oder am Hauserberg östlich der Altstadt dazu sowie Blockflächen am Rande der Ortschaften Blasbach und Kirschenwäldchen dieser Kategorie an. Diese weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte bereits am Tage dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann.

Große Teile der weiter außen gelegenen Stadtteile wie Blasbach, Naunheim, Garbenheim, Nauborn, Büblingshausen, Münchholzhausen und Dutenhofen sowie Stoppelberger Hohl und der Bezirk Hauserberg zählen zu etwa einem Drittel (32,9 %) zu den Wirkungsräumen mit einer **günstigen thermischen Situation**. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die dennoch über einen hohen Grünanteil verfügen.

30,2 % der Wohn- und Gewerbeflächen weisen **mittlere thermische Bedingungen** auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad oder Gebiete im Übergangsbereich von Innenstadt und weiter außen gelegenen Stadtteilen. Beispielhaft sind hierfür Bereiche von Steindorf, Nauborn, Hermannstein, Dutenhofen oder Niedergirmes sowie Gewerbeflächen in Büblingshausen zu nennen.

16,9 % der Wohn- und Gewerbeflächen Wetzlars gehören der Klasse der **ungünstigen thermischen Situation** an. Darunter fallen einige Wohnblöcke im zentrumsnahen Siedlungsraum in der Neustadt oder Altenberger Straße, aber auch außenliegende Bereiche wie Steindorf oder Silhöfer Aue. Zudem liegen große Teile dieser Flächenkategorie auf den zahlreichen Industrie- und Gewerbegebieten Wetzlars vor. Exemplarisch sind hier Teile von Büblingshausen und Dillfeld zu nennen. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt, verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Oftmals stehen in unmittelbarer Umgebung darüber hinaus nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

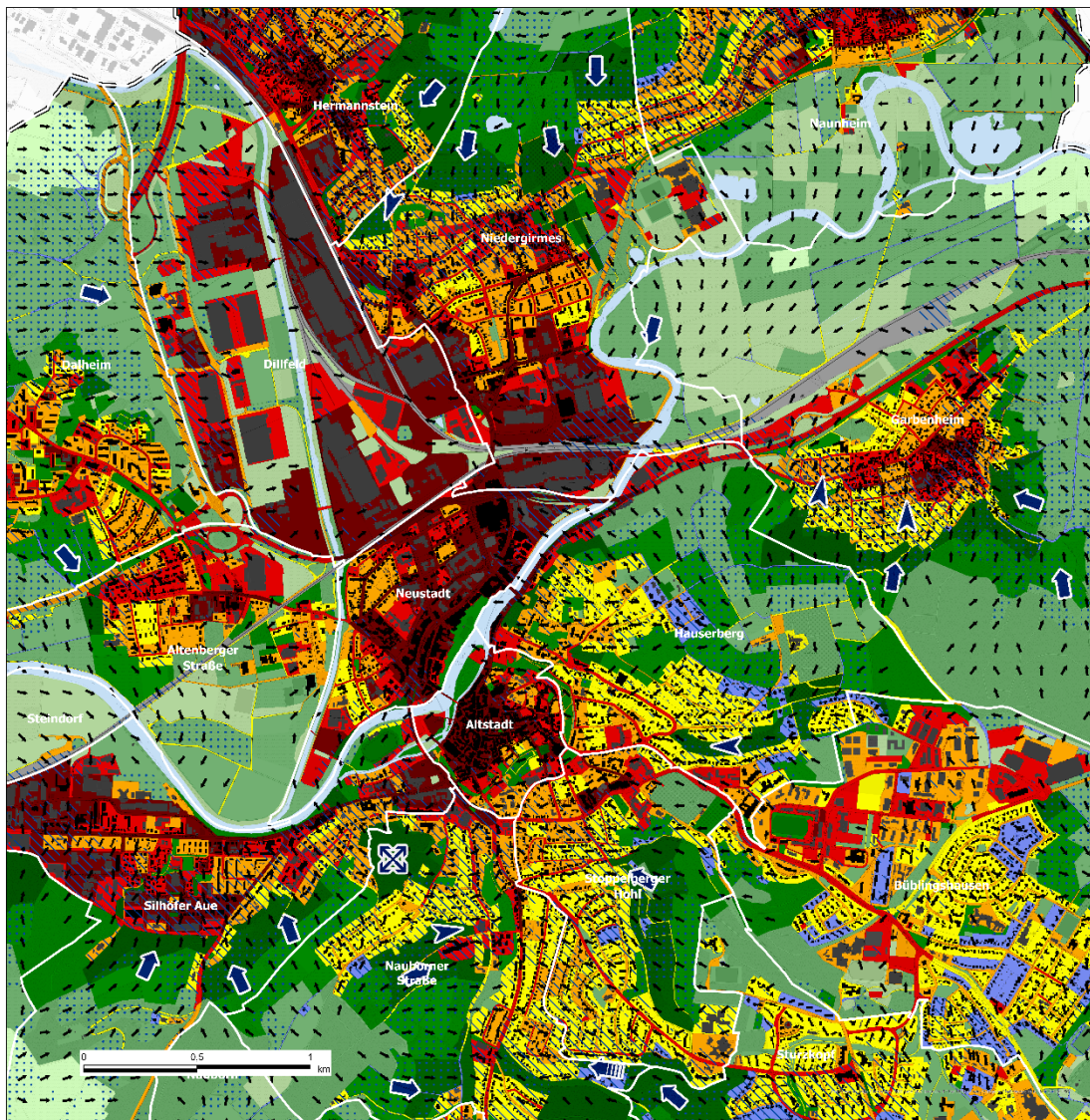
Ca. 14,4 % der Wohn- und Gewerbeflächen sind durch eine **sehr ungünstige thermische Situation** charakterisiert. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr. Die Bewertungskarte der Nacht zeigt im Status quo, dass nicht allein die Innenstadtbereiche oder die Altstadt von einer ungünstigen thermischen Situation betroffen sind. Neben dem bewohnten gilt dies auch für den unbewohnten Bereich, wobei Gewerbeflächen im Vergleich zu Wohngebieten tendenziell ungünstigere Bedingungen aufweisen. Viele der Industrie und Gewerbebestände in den Bezirken Niedergirmes, Neustadt, Dillfeld, Silhöfer Aue und östlich von Dutenhofen sind mit ungünstigen thermischen Bedingungen assoziiert.

Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand eine Ausweisung von 6,9 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit **„sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung** statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen und der Kaltluftabflüsse, z.B. am Kellerberg bei Nauborn, entlang des Brühlsbachs, die östlich der Wohnsiedlungen in Steindorf und im Stoppelberger Hohl angrenzenden Grünflächen, im Norden der Siedlungsbereiche von Hermannstein, Niedergirmes und Naunheim sowie um Münchholzhausen. Der innerstädtische Parkwind am Kalsmunt fällt ebenfalls in diese Kategorie.

Ausgleichsflächen von noch immer **„hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung** finden sich zu 12,2 % innerhalb der Wetzlarer Stadtgrenzen wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Umgebung oben genannter Kaltluftprozesse. Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Sportplätze (z.B. die Bezirkssportanlage im östlichen Büblingshausen) oder an den Siedlungsraum anschließende Agrarflächen (z.B. zwischen Münchholzhausen und Dutenhofen).

Mit 41,5 % entfällt der Großteil aller Ausgleichflächen auf die **„mittlere“ Bewertungskategorie**. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrarflächen im Stadtgebiet in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen. Auch Waldbereiche mit einem reliefbedingt ausgeprägteren Kaltluftabfluss, bspw. am Stoppelberg und am Welschbach in Büblingshausen, fallen in diese Kategorie.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit **geringer human-bioklimatischer Bedeutung** nimmt mit 28,6 % fast ein Drittel und damit einen weiteren großen Teil aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Ackerflächen und Waldbereiche, die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen. Einen vergleichsweise geringen Anteil der Ausgleichsflächen bilden mit 10,8 % all jene Grün- und Freiflächen, die **keinen nennenswerten Beitrag** zum Kaltluftprozessgeschehen leisten. Hierzu zählen siedlungsferne, nicht baumbestandene Flächen.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN

Bewertung von Wohn-/Gewerbeflächen, Straßen und Plätzen

- Sehr günstige bioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

Kaltlufteinwirkungsbereich im Siedlungsraum

KALTLUFTPROZESSE

Kaltluftentstehungsgebiet

Kaltluftleitbahn

Kaltluftabfluss

Kaltluftabfluss innerorts

Parkwinde

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD

(UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

AUSGLEICHSRAUM: GRÜN- / FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Bioklimatische Bedeutung für den Wohnsiedlungsraum

- Sehr hoch
- Gering
- Hoch
- Sehr gering
- Mittel

Abbildung 41: Bewertungskarte Nachtsituation (Ausschnitt). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der bioklimatischen Bedeutung der Ausgleichsflächen für den Wohnsiedlungsraum in der Nacht.

8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Wetzlar, die in Abbildung 42 aufgetragen ist, werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und Ausgleichsräume im Hinblick auf die humanbioklimatische Bedeutung bewertet. Anders als in der Nacht ist am Tage nicht das Kaltluftprozessgeschehen die bewertungssteuernde Größe, sondern die PET, die vornehmlich durch Verschattung modifiziert wird.

In Wetzlar sind 6,1 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 16,9 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine **sehr günstige thermische Situation** gekennzeichnet. Vor allem die baumbestandenen und durchgrünten Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbauung (z.B. Kirschenwäldchen, Sturzkopf, Stoppelberger Hohl, Hauserberg) gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün- und Baumanteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum. Beispiele für den Verkehrsraum mit sehr günstiger thermischer Situation sind die zu großen Teilen mit Bäumen bestandenen Fuß- und Radwege entlang der Forsthausstraße, der Pestalozzistraße, Abschnitte der Frankfurter Straße und der Braunfelser Straße, die entlang des Gewässers führende Dilluferstraße sowie ein Großteil der Straßen in der Siedlung Kirschenwäldchen.

14,8 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Wetzlar wurden der Kategorie der **günstigen human-bioklimatischen Situation** zugeordnet. Diese vergleichsweise noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Beispielflächen befinden sich in den Bezirken Hauserberg, Nauborner Straße oder Dalheim, aber auch an den Rändern anderer Stadtteile, insbesondere Büblingshausen und Sturzkopf. Prägnant treten auch einige grüne Innenhöfe hervor, wobei teils nicht nur eine günstige, sondern teilweise gar eine sehr günstige human-bioklimatische Situation erreicht werden konnte. Die Höfe profitieren sowohl von der Beschattung durch Baumpflanzungen als auch durch jene der Gebäudefassade selbst. Beispiele hierfür sind in der Siedlung Dalheim (südlich der Altenberger Str. / Ludwigstraße sowie nördlich der Hohe Str. / am Schwalbengraben) oder auch in Niedergirmes (entlang des südlichen Abschnittes der Pestalozzistraße) vorzufinden. Bei den Verkehrsflächen weisen 15,0 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf, wie beispielsweise der Philosophenweg und die Wertherstraße.

Mit 33,1 % ist ein großer Anteil der Wohn- und Gewerbeflächen, aber auch etwa ein Drittel der Verkehrsflächen (29,4 %) heutzutage mit **mittleren thermischen Bedingungen** assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Teile der Altstadt, zahlreiche Flächen in den Bezirken Nauborner Straße und Stoppelberger Hohl sowie die Wohn- und Gewerbegebiete in Büblingshausen sind mit dieser Klassifizierung belegt. Obwohl die Grünausstattung in der Altstadt oftmals gering ausfällt, erzeugt die enge Gassenbebauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen. In den anderen Ortsteilen finden sich viele Wirkraumflächen mittlerer Belastung aufgrund niedrigerer Bebauung und etwas höherem verschattenden Grünanteil. Durch auf der Wirkraumfläche befindliche Bäume kann sogar auf Gewerbearealen eine mittlere Klassifizierung erfolgen.

Mit 40,9 % der Wetzlarer Wohn- und Gewerbeflächen und 32,9 % der Verkehrsflächen sind am Tage Großteile der Wirkraumflächenkulisse durch eine **ungünstige thermische Situation** charakterisiert. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die nur mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation

bestandenen weiter außen gelegenen Stadtteile (z.B. Münchholzhausen, Dutenhofen, Garbenheim, Hermannstein, Blasbach), aber auch die nördlichen Siedlungsagglomerationen (wie Neustadt, Altenberger Straße, Altstadt). Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 5 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei den großen Industrie- und Gewerbearealen am Stadtrand ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades (z.B. im Dillfeld, im südlichen Niedergirmes, im Bereich des Hauptbahnhofs). Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören z.B. Nauborner Straße, Solmserstraße und Bergstraße, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr mit sich bringen.

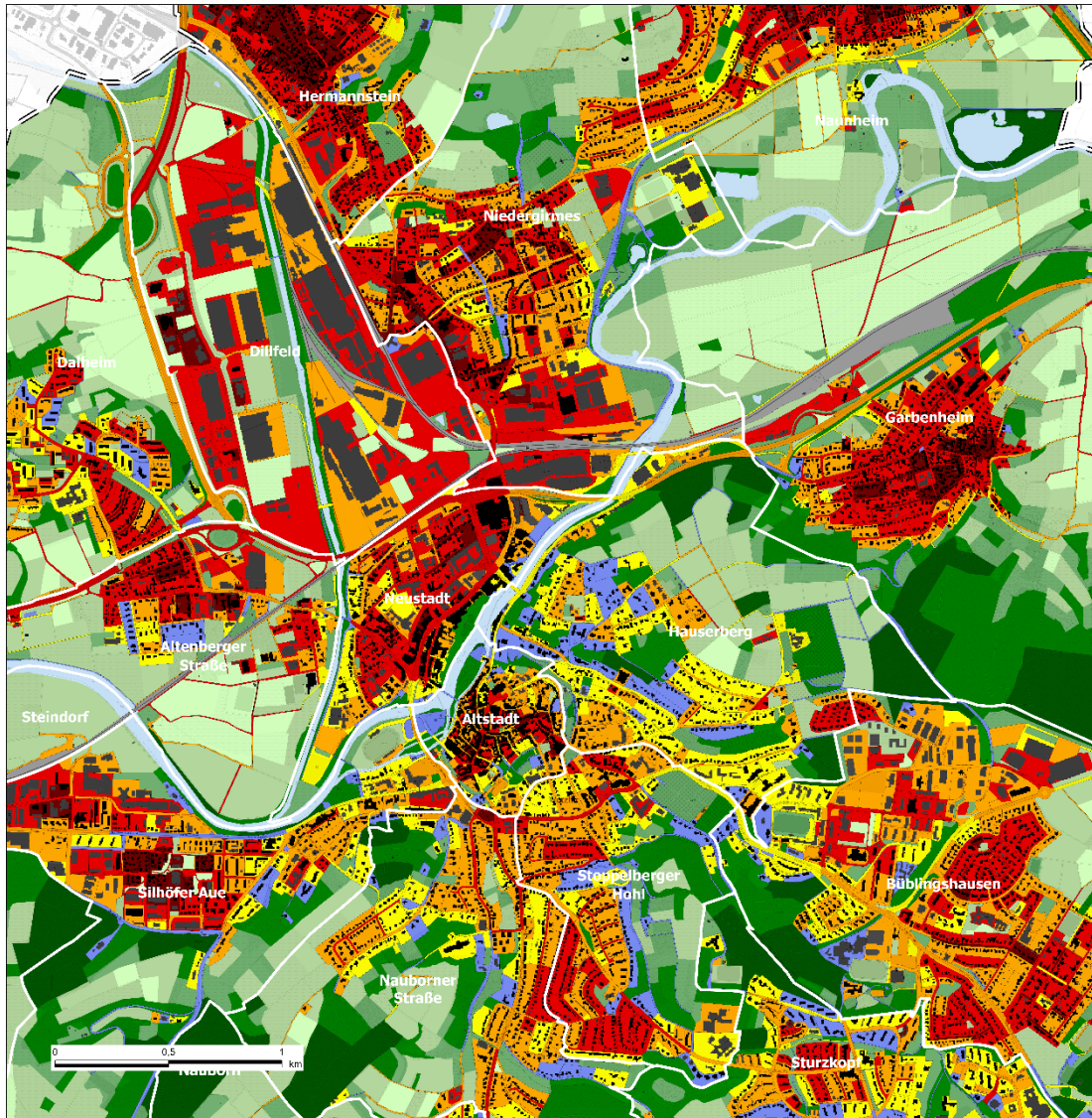
Der restliche Teil der Wohn- und Gewerbeflächen (5,2 %) sowie der Verkehrsflächen (5,8 %) fällt in die Klasse der **sehr ungünstigen thermischen Situation**. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper mit hoher Wärmekapazität und / oder eine mangelnde Verschattung. In Wetzlar weisen einige Wohnquartier mit mangelnder Verschattung in den Bezirken Hermannstein, Naunheim, Münchholzhausen und Nauborn eine sehr ungünstige thermische Situation auf. Oftmals ist der an hoch belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende, unverschattete Verkehrsraum ebenfalls durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert – u.a. Abschnitte der Wetzlarer Straße, Hermannsteiner Straße oder Großaltenstädter Straße fallen in diese Kategorie.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit **sehr hoher Aufenthaltsqualität** (21,9 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese höchste Bewertungsklasse fallen etwa die Waldareale um Kirschenwäldchen (Stoppelberg), am Welschbach in Büblingshausen oder um Blasbach herum. Auch innenstadtnah gibt es sehr hoch bewertete Ausgleichsflächen (z.B. am Kalsmunt, im Bezirk Hauserberg und entlang der Friedenstraße zwischen Büblingshausen und Sturzkopf), die einen stadtnahen Rückzugsort für die Bewohner der belasteten Zentrumsbereiche darstellen.

Ein Viertel (25,7 %) der Ausgleichsflächen ist einer **hohen Aufenthaltsqualität** am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den genannten Waldbereichen zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichtereren Baumbestand, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch innerhalb des Siedlungsraums sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. Grüngürtel um die Altstadt: Colchester Anlage, Rosengärtchen, Teile der Siena-Promenade, Avignon Anlage sowie südlich der Lahninsel zwischen Flutgraben und Wetzbach) und wirken ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.

Ausgleichsräume **mittlerer Aufenthaltsqualität** (9,3 % der Grünflächen) sind über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wege-

beziehungen die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit **geringer** (29,2 %) oder **sehr geringer** (13,9 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen nördlich und südlich der Wetzlarer Kernstadt ausmachen.



WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN UND ÖFFENTLICHER RAUM

Bewertung von Wohn-/Gewerbeflächen, Straßen und Plätzen

- Sehr günstige bioklimatische Situation
- Günstige bioklimatische Situation
- Mittlere bioklimatische Situation
- Ungünstige bioklimatische Situation
- Sehr ungünstige bioklimatische Situation

AUSGLEICHSRaum: GRÜN- / FREIFLÄCHEN, LANDWIRTSCHAFTLICHE FLÄCHEN, WALD

Aufenthaltsqualität im Ausgleichsraum an Sommertagen

- Sehr hohe Aufenthaltsqualität
- Hohe Aufenthaltsqualität
- Mittlere Aufenthaltsqualität
- Geringe Aufenthaltsqualität
- Sehr geringe Aufenthaltsqualität

Abbildung 42: Bewertungskarte Tagsituation (Ausschnitt). Darstellung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Siedlungsgebiet) sowie der Aufenthaltsqualität der Ausgleichsflächen (Grünflächen) am Tage.

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der zwei Bewertungskarten „Nacht“ und „Tag“ in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen einen hohen Schutzbedarf innehaben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine Handlungspriorität besteht.

8.4.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird die *stadtklimatische Handlungspriorität* dargestellt. Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Diese Bewertungsunterschiede wurden aus den Klassenzuweisungen der Bewertungskarten des Tages und der Nacht extrahiert und jeweils im Rahmen zweier Bewertungsmatrizen für den Wohn- und den Gewerbebereich gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue gesamthafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5 für den Status quo (s. Tabelle 12).

Tabelle 12: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für Wohn- und Gewerbebereich.

Wohnsiedlung: (Nacht stärker gewichtet)						
		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	2	3	3	4
	2	1	2	3	4	4
	3	2	2	3	4	5
	4	2	3	3	4	5
	5	3	3	4	5	5

Wirkraumbewertung: 1 = sehr günstig, 2 = günstig, 3 = mittel, 4 = ungünstig, 5 = sehr ungünstig

Gewerbe: (Tag stärker gewichtet)						
		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	1	1	2	2
	2	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	3	4
	4	3	4	4	4	5
	5	4	4	5	5	5

Wirkraumbewertung: 1 = sehr günstig, 2 = günstig, 3 = mittel, 4 = ungünstig, 5 = sehr ungünstig

Aus der Tag-Nacht-Kombination der Wirkraumbelastung wurden verschiedene Handlungsprioritäten vergeben. Für den Verkehrsraum wurden die Bewertungskennzahlen direkt aus der Tagsituation in die Handlungsprioritäten überführt (s. Tabelle 13).

Tabelle 13: Aus Bewertungskarten abgeleitete Handlungsprioritäten für den Wirkraum.

Wirkraumbewertung aus den Matrizen Wohnen und Gewerbe (Bewertungskarten)	Wirkraumbewertung des Verkehrsraums (Bewertungskarten)	Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum
5= sehr ungünstig	5= sehr ungünstig	1.
4= ungünstig	4= ungünstig	2.
3= mittel	3= mittel	3.
2= günstig	2= günstig	4.
1= sehr günstig	1= sehr günstig	5.



Sind mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufterwirkbereiche ausgewiesen, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Klimafunktion“ gekennzeichnet (s. Abbildung 43). Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als „Trittsteine“¹⁹ für Ausgleichsströmungen in den Siedlungskörper hinein.



Abbildung 43: PHK-Symbologie für Siedlungsräume mit Kaltluftfunktion.

Zusätzlich sind für den Wirkraum die in der Sensitivitätsanalysekarte abgebildeten Informationen (vgl. Kapitel 7.2) überlagert. Über Schraffuren erfolgte eine Kennzeichnung von Baublöcken, die ein extrem oder sehr hoch sensitives bzw. ein (hoch) sensitives Gebiet darstellen. Diese Gebiete weisen einen entsprechend hohen Anteil an (vulnerabler) Wohnbevölkerung auf, sodass kenntlich wird, wo sich thermische Belastungsräume mit hohen Bevölkerungsdichten überschneiden. Weiterhin sind diejenigen Stadtbezirke eingerahmt, welche eine hohe Armutsdichte aufweisen (s. Abbildung 44).

Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze

-  Extrem oder sehr hoch sensitives Gebiet auf Baublockebene
-  Hoch sensitives oder sensitives Gebiet auf Baublockebene


-  Stadtbezirke mit hoher Armutsdichte (9. und 10. Dezil)

Abbildung 44: PHK-Legende mit Signaturen zur Kennzeichnung der Gebiete mit sensitiven Bevölkerungsanteilen anhand der Bevölkerungsdichte.

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt den **stadtklimatischen Schutzbedarf** dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum, wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation gegenüberstellt (s. Tabelle 14).

¹⁹ „Trittstein für Kaltluft“: Gemeint sind im Stadtgebiet verteilte, kleine Grün- oder Freiflächen, über denen sich nächtliche Kaltluft bildet und herant transportierte Luft reibungsarm abfließen kann und somit im Siedlungsgebiet zu einer thermischen Entlastung beiträgt.

Tabelle 14: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Grünflächen						
Schritt 1	Bewertung in der Nacht					
	1	2	3	4	5	
Aufenthaltsqualität Tag	3	3	3	4	4	5
Entlastungsraum	4	4	4	4	5	5
	5	5	5	5	5	5
Ausgleichsraumbedeutung: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch						
Grünflächen						
Schritt 2	Bewertung in der Nacht					
	1	2	3	4	5	
Aufenthaltsqualität Tag	1	1	2	3	4	5
kein Entlastungsraum	2	1	2	3	4	5
	3	2	2	3	4	5
	4	3	3	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Ausgleichsraumbedeutung: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch						

Der Durchlauf der Matrix findet in zwei Schritten statt, je nachdem, ob die betrachtete Fläche einen Entlastungsraum darstellt oder nicht. Entlastungsräume sind vom tagsüber belasteten Siedlungsraum (Wirkraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4) fußläufig gut erreichbare (Luftlinie 300 m), öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder von mindestens hoher Bedeutung am Tage (Ausgleichsraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4). In Schritt 1 der Matrix werden Entlastungsräumen berücksichtigt, welche eine mittlere bis sehr hohe Aufenthaltsqualität am Tage aufweisen. Die Gesamtheit der (potenziellen) Entlastungsräume, die von der Bevölkerung an heißen Tagen aufgesucht werden können, wird auch als Punktschraffuren über den betreffenden Ausgleichsräumen der PHK als zusätzliche Information angezeigt (s. Abbildung 45).

Öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder innerhalb von 300 m Luftlinie zu Siedlungsräumen mit mindestens hoher Bedeutung am Tag


 Entlastungsraum (mindestens hohe Bedeutung am Tag)

Abbildung 45: PHK-Symbologie mit Informationen zu fußläufig erreichbaren Entlastungsräumen.

Nach der Gegenüberstellung der Bewertung von Entlastungsräumen am Tage und der nächtlichen Bewertung wird letztere in einem zweiten Schritt den restlichen Ausgleichsraumflächenbewertungen des Tages gegenübergestellt. Für die genannten Ausgleichsflächen ist die nächtliche Abkühlung mit der Produktion von Kaltluft ausschlaggebend dafür, dass hierbei die Nachtsituation stärker gewertet wird als die Tagsituation. Die daraus

resultierenden Schutzbedarfe und Planungshinweise sind in Tabelle 15 aufgeführt. In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen.

Tabelle 15: Aus Bewertungskarten abgeleitete Schutzbedarfe für den Ausgleichsraum.

Ausgleichsaumbewertung aus der Matrix Grünflächen (Bewertungskarten)	Schutzbedarfskategorie in der PHK im Ausgleichsraum	Bedeutung des Schutzbedarfs gemäß Kategorie 1 bis 4
5= sehr hoch	Kategorie 1	Sehr hoch
4= hoch	Kategorie 2	Hoch
3= mittel	Kategorie 3	Erhöht
2= gering oder 1= sehr gering	Kategorie 4	Keiner

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftleitbahnen, -abflüssen und Parkwinden sowie die Wetzlarer Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden und Gleisflächen.

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse Wetzlar, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 46 aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Schutzbedarfen und Handlungsprioritäten aus.

Die **Handlungsprioritäten des Wirkraums** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise 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 wird (s. Tabelle 16).

Tabelle 16: Flächenanteile der Handlungsprioritäten im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Handlungspriorität in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
1	10,7	Optimierende Maßnahmen, die über klimaökologische Standards hinausgehen, sind bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen umzusetzen. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen sowie ggf. einer klimagerechten Gebäudekühlung zu prüfen.
2	20,7	Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende, optimierende Maßnahmen umzusetzen (bspw. Entsiegelung, Fassadenbegrünung, Flächen mit hoher Aufenthaltsqualität schaffen)
3	40,4	
4	22,0	Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen sind klimaökologische Standards bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.)
5	6,2	

Die Tabelle 16 zeigt zudem die Flächenanteile der verschiedenen Handlungsprioritäten auf. Mit 10,7 % und 20,7 % sind die beiden höchsten Handlungsprioritäten zuvorderst im hoch versiegelten und oftmals sowohl

tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerberaum zu finden. Aber auch in den stärker versiegelten bzw. schlechter durchlüfteten Innenstadtbereichen sind solch hohe Handlungsprioritäten verzeichnet. Besonders kritisch und prioritär sind hierbei diejenigen Flächen zu betrachten, die zusätzlich Bereiche hoher **Bevölkerungsdichte** umfassen und darüber hinaus vornehmlich **vulnerable Bevölkerungsgruppen** beherbergen. Die mittleren Handlungsprioritäten von 3 bis 5 machen mit insgesamt 68,6 % der Wirkraumflächen den größten Teil des Wirkraumes aus. Die in den Planungshinweisen genannten „klimaökologischen Standards“ meinen u.a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung. In der VDI 3787, Blatt 08 (2020) werden Begrünungs- und Entsiegelungsmaßnahmen als klassische Möglichkeiten zur Verbesserung des Stadtklimas aufgeführt. Darüberhinausgehenden „optimierenden Maßnahmen“ beinhalten neue technische und planerische Möglichkeiten - je nach Vorhaben bspw. das Freihalten von Durchlüftungachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume durch Bäume, Sonnensegel und Fontänen bzw. Brunnen und damit die Schaffung zugänglicher kühler Orte. Eine Auswahl der wichtigsten Maßnahmen verschiedener Funktionsziele ist in Kapitel 8.5.1 zusammengefasst.

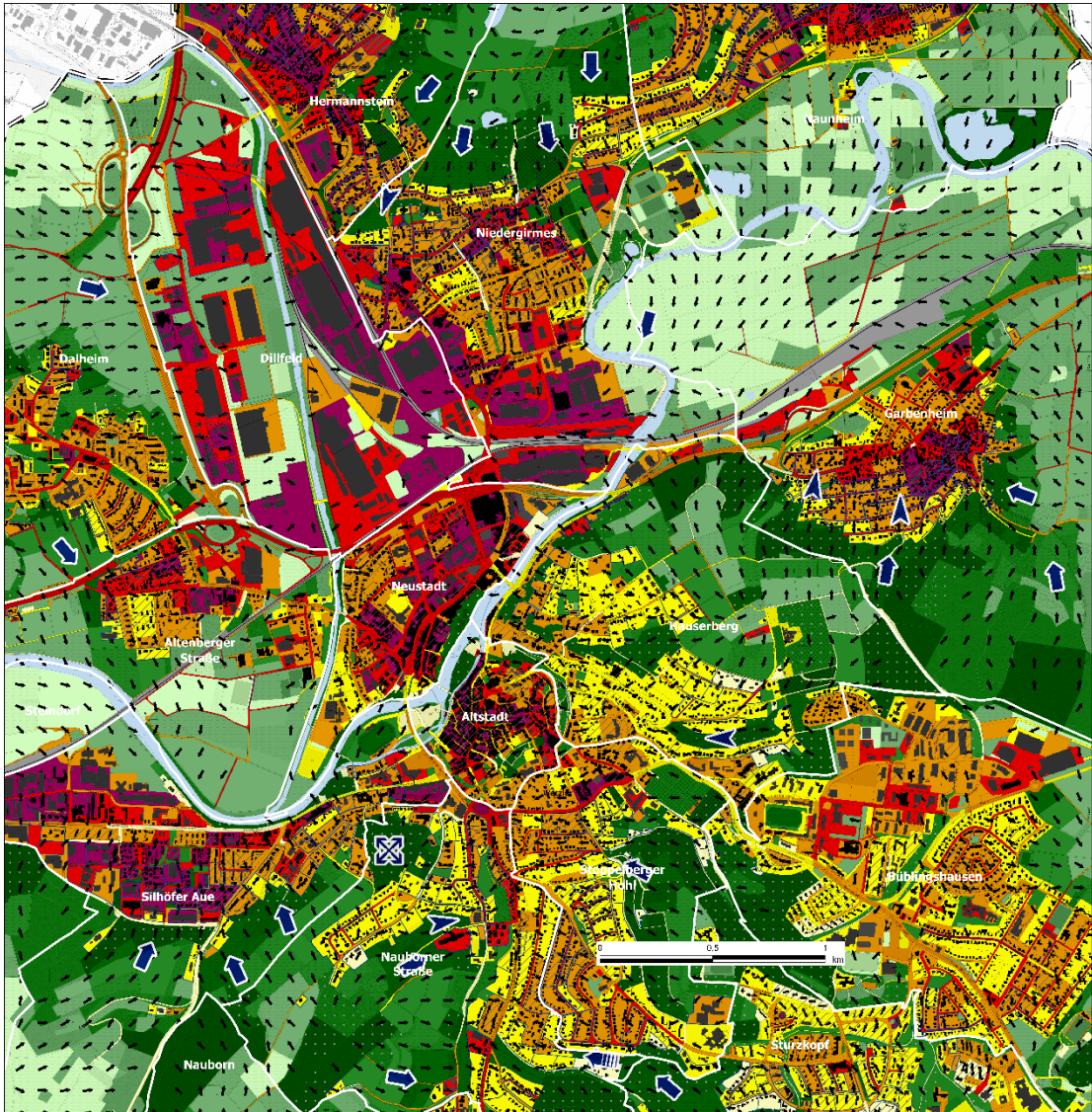
Grün- und Freiflächen, die nachts einen großen Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten und/oder durch schattenspendende Vegetation tagsüber einen wertvollen human-bioklimatischen Rückzugsort an heißen Tagen darstellen, sind in der PHK durch entsprechende **Schutzbedarfe im Ausgleichsraum** ausgewiesen. Tabelle 17 stellt den Schutzbedarfen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Schutzbedarfsklasse.

Tabelle 17: Flächenanteile der Schutzbedarfe im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Schutzbedarf in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
1	14,9	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion nachzuweisen (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
2	28,8	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
3	39,7	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
4	16,6	Die Flächen weisen aktuell für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf.

Zu einem Anteil von knapp 15 % ist der Wetzlarer Ausgleichsraum besonders schutzbedürftig. Hierzu zählen etwa die großflächigen, öffentlich begehbaren Waldbereiche zwischen Nauborn und Kirschenwäldchen, am Stoppelberg oder zwischen Stoppelberger Hohl und Büblingshausen sowie am Kalsmunt sowie der Grüngürtel um die Altstadt. Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche oder Parkwindareale mit ihren jeweils sehr hohen Schutzbedarfen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, an der die Flächen ihre Funktion entfalten, ist deren Fortbestand in der sehr hohen Kategorie bei geplanten Flächenentwicklungen modellhaft nachzuweisen oder durch eine fachliche Stellungnahme einzuschätzen. Auch auf den Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse des hohen Schutzbedarfs, die knapp ein Drittel aller

Ausgleichsflächen betrifft (28,8 %), ist zu achten und durch eine verbalargumentative oder modellhafte Untersuchung eine Klimaoptimierung des Planvorhabens zu erreichen. Der größte Anteil (39,7 %) der Grün- und Freiflächen weist einen erhöhten Schutzbedarf auf. Hierzu zählt z.B. der Großteil der um die Siedlungsgebiete liegenden Agrarflächen. Deren Klimafunktionen, insb. Kaltluftentstehung, sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere bei größeren Entwicklungsvorhaben (z.B. bei Gewerbeparks/Hochhäusern) eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten. 16,6 % der Flächen weisen aktuell noch keine besondere stadtklimatische Funktion auf, allerdings wäre langfristig zu prüfen, ob sich deren Schutzbedarf mit der Siedlungsentwicklung verändert.



Stadtklimatischer Schutzbedarf

In die Bewertung fließen sowohl die Kaltluftentstehung und Kaltluftströmung auf den Flächen als auch deren Funktion als öffentlich zugängliche Rückzugsorte an heißen Tagen ein.

- Schutzbedarf Kategorie 1** (14,9 % Flächenanteil)
Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion nachzuweisen (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
- Schutzbedarf Kategorie 2** (28,8 % Flächenanteil)
Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
- Schutzbedarf Kategorie 3** (39,7 % Flächenanteil)
Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
- Schutzbedarf Kategorie 4** (16,6 % Flächenanteil)

Öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder innerhalb von 300 m Luftlinie zu Siedlungsräumen mit mindestens hoher Bedeutung am Tag

Entlastungsraum (mindestens hohe Bedeutung am Tag)

KALTLUFTPROZESSE IM AUSGLEICHSRAUM

- Kaltluftleitbahn
- Kaltluftabfluss
- Parkwind
- Kaltluftabfluss innerorts

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD (um 04:00 Uhr, aggregiert auf eine Auflösung von 100 m)
↑ Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

Stadtklimatische Handlungspriorität

Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten vorrangig auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Grundsätzlich wird die Einhaltung klimaökologischer Standards in allen Flächen empfohlen. Die Bewertung soll eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Liegt bei den Flächen neben einer Wärmebelastung auch eine hohe Vulnerabilität oder besondere Sozialfunktion vor, steigen der Handlungsdruck und der Bedarf an Anpassungsmaßnahmen.

- Handlungspriorität 1** (10,7 % Flächenanteil)
Maßnahmen zur Verbesserung der klimat. Situation sind bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen umzusetzen. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen sowie ggf. einer klimagerechten Gebäudekühlung zu prüfen.
- Handlungspriorität 2** (20,7 % Flächenanteil)
- Handlungspriorität 3** (40,4 % Flächenanteil)
Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende, optimierende Maßnahmen umzusetzen (bspw. Entsiegelung, Fassadenbegrünung, Flächen mit hoher Aufenthaltsqualität schaffen)
- Handlungspriorität 4** (22,0 % Flächenanteil)
Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen sind klimaökologische Standards bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.)
- Handlungspriorität 5** (6,2 % Flächenanteil)

Siedlungsräume mit Kaltluftfunktion Bereiche mit einer hohen Kaltluftströmung bzw. -entstehung, die potenziell auch auf angrenzende Räume günstig wirken. Bei Vorhaben in diesen Bereichen ist die Kaltluftfunktion der Flächen zu beachten (Grünflächen erhalten, Gebäudestellungen beachten, etc.).

Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze

- Extrem oder sehr hoch sensitives Gebiet auf Baublockebene
- Hoch sensitives oder sensitives Gebiet auf Baublockebene
- Stadtbezirke mit hoher Armutsdichte (9. und 10. Dezil)

Abbildung 46: Planungshinweiserte Stadtklima für einen Ausschnitt des Wetzlarer Stadtgebiets.

8.5 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN

8.5.1 PLANUNGSHINWEISKATALOG STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Planungshinweiskatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für Wetzlar wurde ein Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert.

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

So hängt beispielsweise ...

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

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

Der hohe Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: *Innen-/Hinterhof-Begrünung*, → M02: *Öffentliche Grünräume schaffen*, → M04: *Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren*). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: *Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren*). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die Waldgebiete Wetzlars (z.B. am Stoppelberg) oder die Auenbereiche von

Lahn und Dill stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ *M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen*). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln (z.B. die Grünanlagen um die Altstadt), da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage, nachts auch als „Trittsteine“²⁰ 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*).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.) übernehmen Bäume (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filtrierung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ *M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben*). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (→ *M12: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung*). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen²¹. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume den Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz²² geachtet werden (vgl. Stadt Jena 2016).

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

Die Stadt Wetzlar zeichnet das Vorhandensein einiger größerer (z.B. Lahn und Dill) aber auch kleinerer Fließgewässer wie Gräben und Bäche aus (z.B. Blasbach und Wetzbach). 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 Wasser einen stärkeren Kühleffekt als stehendes Gewässer, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen²³ Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung

²⁰ „Trittstein für Kaltluft“: Gemeint sind im Stadtgebiet verteilte, kleine Grün- oder Freiflächen, über denen sich nächtliche Kaltluft bildet und herantransportierte Luft reibungsarm abfließen kann und somit im Siedlungsgebiet zu einer thermischen Entlastung beiträgt.

²¹ Baumarten sowie ergänzende Informationen siehe Menke et al. 2013

²² Straßenbaumliste mit Standortangaben zur Hitze- und Trockenheitsverträglichkeit: <https://www.galk.de/arbeitskreise/stadtbaeume/themenueber-sicht/strassenbaumliste/galk-strassenbaumliste>

²³ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)

(z.B. über die Offenlegung eingehauster Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ *M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen*). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ *M10: Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme*), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ *M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes*). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → *M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch*). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo²⁴ kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ *M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten*). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ *M16: Dachbegrünung*, → *M17: Fassadenbegrünung*, → *M19: Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen*, → *M20: Technische Gebäudekühlung*).

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

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

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume

²⁴ Albedo bezeichnet das Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung)

und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der Planungshinweiskarte weiter zu priorisieren.

In dicht bebauten Siedlungsgebieten lassen sich Erholungsräume über sogenannte „Pocket Parks“ auch auf kleinem Raum einrichten. Schattenspendende Bäume, Sitzgelegenheiten und ansprechende Pflanzungen schaffen einen Raum zum Verweilen und Entspannen, insbesondere für Menschen, die keinen eigenen Garten oder Balkon besitzen. Beispiele finden sich mittlerweile in zahlreichen Städten, wie Bochum²⁵, Nürnberg²⁶ Bonn²⁷ oder Düsseldorf²⁸.



²⁵ <https://www.bochum.de/Pressemeldungen/30-Mai-2023/Eine-kleine-grosse-Erfolgsgeschichte-3.-Pocket-Park-eroeffnet>

²⁶ https://www.nuernberg.de/internet/soer_nbg/pocketpark_pestadel.html

²⁷ <https://www.bonn.de/pressemitteilungen/mai-2022/klimaanpassung-im-kleinformat-pocket-park-in-duisdorf-neugestaltet.php>

²⁸ <https://www.duesseldorf.de/aktuelles/news/detailansicht/newsdetail/pocketpark-stadt-macht-aus-schotter-parkplatz-ein-quartierswaeldchen>

Tabelle 18: Planungshinweiskatalog - Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Wetzlar

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
01 Innen-/Hinterhofbegrünung	Kurzerläuterung	
	<ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit 	
Wirkung	Räumliche Umsetzung	
<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 	<ul style="list-style-type: none"> Innen- und Hinterhöfe 	
	Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: © Jan Weber-Ebnet)	
02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	Kurzerläuterung	
	<ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	
Wirkung	Räumliche Umsetzung	
<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 	<ul style="list-style-type: none"> Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten) 	
	Bild: (Quelle: © Stadt Wetzlar)	

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 und 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
		
<p>Bild: Helle Fassade (Quelle: © Jens-Robert Schulz, pixelio)</p>		
04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) ▪ niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen
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
		
<p>Bild: Teilversiegelung Neukölln-Anlage in Dalheim (Quelle: © Stadt Wetzlar)</p>		

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 (auf Wasser bezogen) und/oder grüne Maßnahmen (auf Vegetation bezogen) für den Verkehrsraum ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“²⁹ 	
<p>Wirkung</p>	<p>Räumliche Umsetzung</p>	<p>Bild: Begrünter Straßenrand (Quelle: © Stadt Wetzlar)</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 ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	

²⁹ Zum Projekt „BlueGreenStreets“: <https://www.hcu-hamburg.de/research/forschungsgruppen/reap/reap-projekte/bluegreenstreets/>




<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 	

Bild: Verschattung durch Bäume oder Gebäude (Quelle: © Stadt Wetzlar)

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 (Schaffung durch Mix aus offenen Wiesenflächen, Bäumen, Wasserflächen, niedrigen 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 	

Bild: Vielfältige Grünfläche Neukölln-Anlage in Dalheim (Quelle: © Stadt Wetzlar)

08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe „Wirkung“) 	 <p>Bild: Grünfläche in Wetzlar (Quelle: © Stadt Wetzlar)</p>
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 		
MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM			
09	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	Kurzerläuterung <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: Lahn (Quelle: © Stadt Wetzlar)</p>
Wirkung <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 	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen 		

10	Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen 	
	Wirkung	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze 	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün 			

Bild: Regenwasserteich am Potsdamer Platz in Berlin
(Quelle: © Miriam Lübbecke)

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM


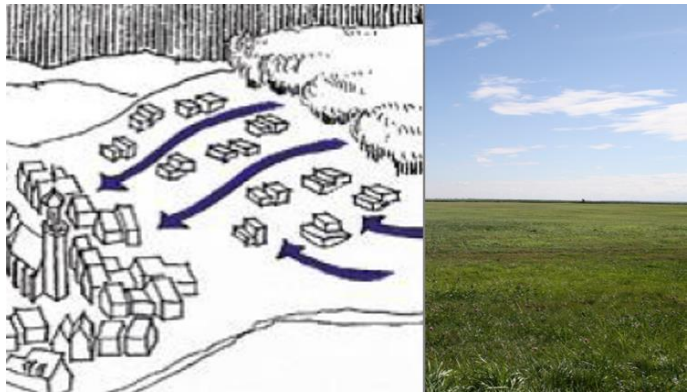
11	(Temporäre) Saisonale klimangepasste Umgestaltung öffentlicher Räume	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer zu städtischen Klimaoasen, bspw. durch das Aufstellen von Kübelbäumen, Sonnenschirmen oder Strauchgewächsen. ▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebbarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg³⁰) 	
	Wirkung	Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt) 	
<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 			

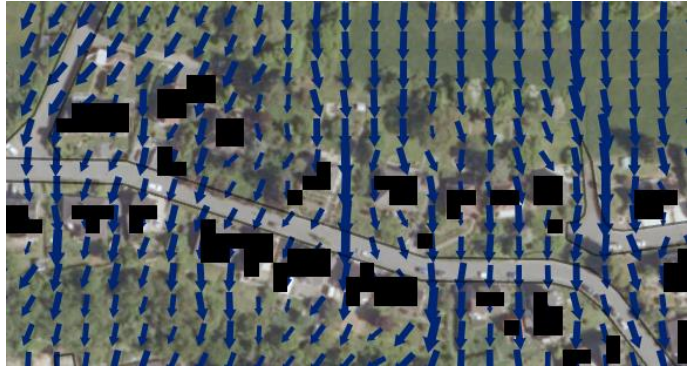
Bild: Anlage eines Pocket Parks (Quelle: Stadt Bochum 2023)

³⁰ Zum Projekt Pop-Up-Innenstadt Ludwigsburg: <https://www.ludwigsburg.de/home/stadt+entwickeln/pop-up+innenstadt.html>

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 Bauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen 	 <p>Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)</p>
<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 	

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: Durch ausreichend große Gebäudeabstände begünstigte Kaltluftströmung in den Wetzlarer Siedlungsbereich (GEO-NET 2023).</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 	


14 Entdichtung (Rückbau)	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen 	
	Wirkung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts ▪ Verbesserung der Durchlüftung ▪ Synergien zum Niederschlagswassermanagement 	

Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

15 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	Kurzerläuterung <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 	
	Wirkung <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 	

Bild: Freifläche in Dillfeld (Quelle: © Stadt Wetzlar)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>16 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>Bild: Dachbegrünung (Quelle: Johannes Gerstenberg, Pixelio Media GmbH)</p>
<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) 	

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

17 Fassadenbegrünung	Kurzerläuterung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene³¹ 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 Wetzlar (Quelle: © Stadt Wetzlar)

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: Verschattung von Innenraum (Markise) und Außenraum (Sonnenschirm) (Quelle: Stadt Wetzlar)

³¹ Bodengebundene Begrünung: Die verwendeten Pflanzen besitzen eine direkte Verbindung zum gewachsenen Boden (i.d.R. „Kletterpflanzen“).

Systemgebundene (auch Fassadengebundene) Begrünung: Die verwendeten Pflanzen besitzen keinen Bodenanschluss, sondern wurzeln in Substrat-Systemen („vertikale Gärten“).

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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

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

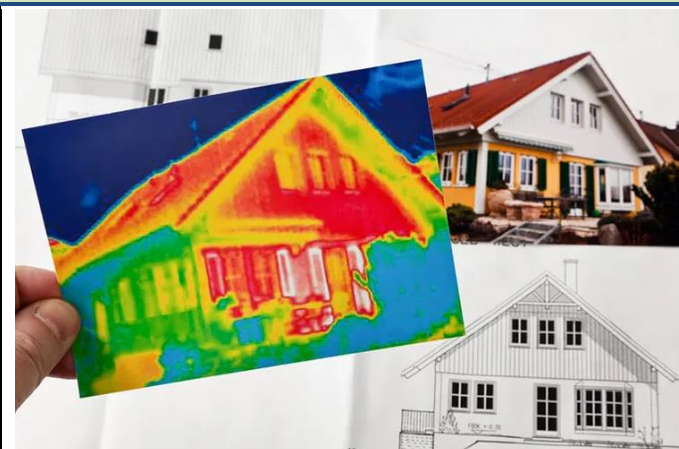


Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)

20	Technische Gebäudekühlung	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung ▪ Adiabate³² Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird ▪ Erdkältenutzung ▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können

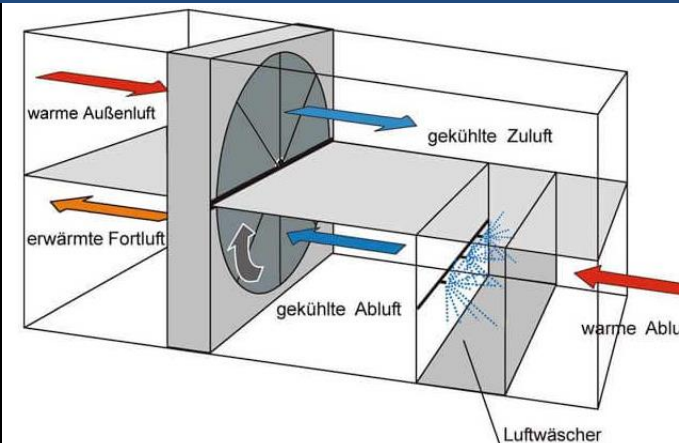


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

³² Adiabate Kühlung: Abkühlung warmer Luft durch Entzug von Verdunstungswärme (Wasserverdunstung).


<p>21 Anpassung der Raumnutzung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung der Gebäudeausrichtung ▪ Nutzung von Innenräumen, d.h. Räume, die nach Süden ausrichten sind, nicht für sensible Nutzungen vorgesehen (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum) 	
	<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	

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

8.5.2 MAßNAHMENKATALOG

Anhand einer Vorlage des HLNUGs aus dem „Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen“ (HLNUG 2019) wurde ein zweiter Maßnahmenkatalog erstellt, welcher ergänzend zu dem im vorherigen Kapitel vorgestellten Planungshinweiskatalog genutzt werden kann. Der Planungshinweiskatalog beinhaltet optimierende Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation, welche in denjenigen Bereichen des Wetzlarer Stadtgebiets umgesetzt werden sollten, die in der Planungshinweiskarte ausgewiesen werden. Der ergänzende Maßnahmenkatalog umfasst hingegen verwaltungsspezifische Beispielmaßnahmen und Instrumente, um die Klimaanpassung und die Erkenntnisse aus der Stadtklimaanalyse in den Strukturen, Prozessen und Planungsinstrumenten der Verwaltung zu verankern.

Im ergänzenden Maßnahmenkatalog werden insgesamt 22 Planungshinweise aufgeführt, die anhand von Maßnahmenbeispielen nochmals konkretisiert werden. Des Weiteren werden Vorschläge zur Umsetzung von Maßnahmen sowie zur Auswahl stehende Instrumente aufgeführt (bspw. Bebauungs-/ Flächennutzungs-/Landschaftsplan, Konzept, Beratung, Förderung etc.). Über vier Raumkategorien (A,B,C,D) werden die Maßnahmen den in der Planungshinweiskarte Stadtklima dargestellten Gebieten zugeordnet:

- A = Ausgleichsräume
- B = Siedlungsräume mit Handlungspriorität 1 (sehr hohe bioklimatische Belastung)
- C = Siedlungsräume mit Handlungspriorität 2 und 3 (hohe bis mittlere bioklimatische Belastung)
- D = Siedlungsräume mit Handlungspriorität 4 und 5 (geringe bis keine bioklimatische Belastung)

Weitere Ergänzungen im Katalog beinhalten Synergieeffekte von Maßnahmen mit anderen Bereichen nachhaltiger Stadtentwicklung, deren Zielgruppe sowie den Verweis auf konkrete Projektbeispiele und ggf. Hinweise zur Umsetzung der Maßnahmen.

Der Katalog ist im Anhang dieses Berichts (Tabelle A 4) zu finden und wird zudem in digitaler Version an die Stadt Wetzlar übergeben.

Der Katalog ist nicht als abschließendes Produkt zu verstehen und kann von der Stadtverwaltung beispielweise im Rahmen des Integrierten Klimaanpassungskonzeptes weiterentwickelt werden.

8.5.3 BEISPIELE ZUR ANWENDUNG DER KARTENERGEBNISSE

Für die im Rahmen der PHK flächenkonkret definierten Handlungsprioritäten des Wirkraums und Schutzbedarfe des Ausgleichsraums sollten geeignete Maßnahmen zugeordnet und angewandt werden, um die thermische Belastung im Siedlungsraum zu reduzieren und die Klimafunktionen zu erhalten bzw. zu stärken.

Anhand konkreter Flächenbeispiele wird nachfolgend erklärt, wie die Planungshinweiskarte in Verbindung mit allen weiteren Ergebniskarten der Stadtklimaanalyse Wetzlar zu nutzen ist. Hierbei ist eine hierarchische Herangehensweise analog zur in Kapitel 3 aufgeführten Produktpyramide ratsam. Durch diese gelingt es, die konzentrierte Information der PHK über die Bewertungskarten und die Klimaanalysekarte bis hin zu den Einzelkarten zentraler Stadtklimakenngrößen und den Eingangsdaten zu entflechten und auf diese Weise eine vereinfachte Entscheidungsfindung über geeignete Maßnahmen herbeizuführen. Dieser Leitfaden zur Entscheidungshilfe wird für folgende Flächenbeispiele durchgeführt (vgl. Abbildung 47):

- (1) Platz: Wirkraumfläche Neustädter Platz (Kreuzung Neustadt / Waldschmidtstraße)
 - Tag: mittlere humanbioklimatische Situation
 - Nacht: sehr ungünstige bioklimatische Situation

- (2) Wohnblock: Wirkraumfläche Gloelstraße (Kreuzung Bannstraße / Albinstraße)
 - Tag: ungünstige bioklimatische Situation
 - Nacht: ungünstige bioklimatische Situation
- (3.1) Parkplatz: Wirkraumfläche Parkplatz Gloelstraße (Kreuzung Albinstraße / Eduard-Kaiser-Straße)
 - Tag: sehr ungünstige bioklimatische Situation
 - Nacht: sehr ungünstige bioklimatische Situation
- (3.2) Parkplatz: Parkplatz der Zulassungsstelle: zwischen Karl-Kellner-Ring und Baumeisterweg
 - Tag: ungünstige bioklimatische Situation
 - Nacht: ungünstige bioklimatische Situation
- (4) Straßen: Karl-Kellner-Ring, Neustadt oder die Gloelstraße
 - Tag: ungünstige bioklimatische Situation
 - Nacht: ungünstige bioklimatische Situation

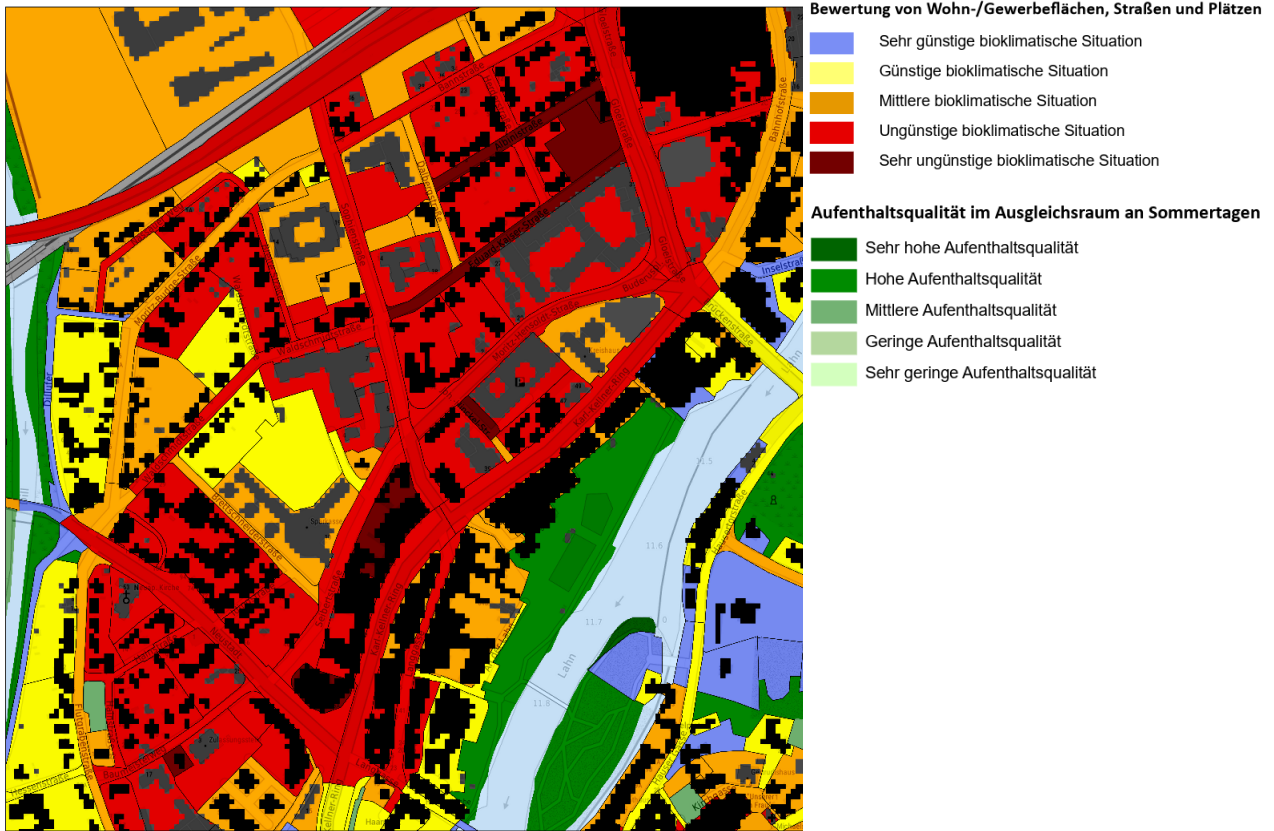


Abbildung 48: Bewertungskarte Tag, Fokusraum "Neustadt"

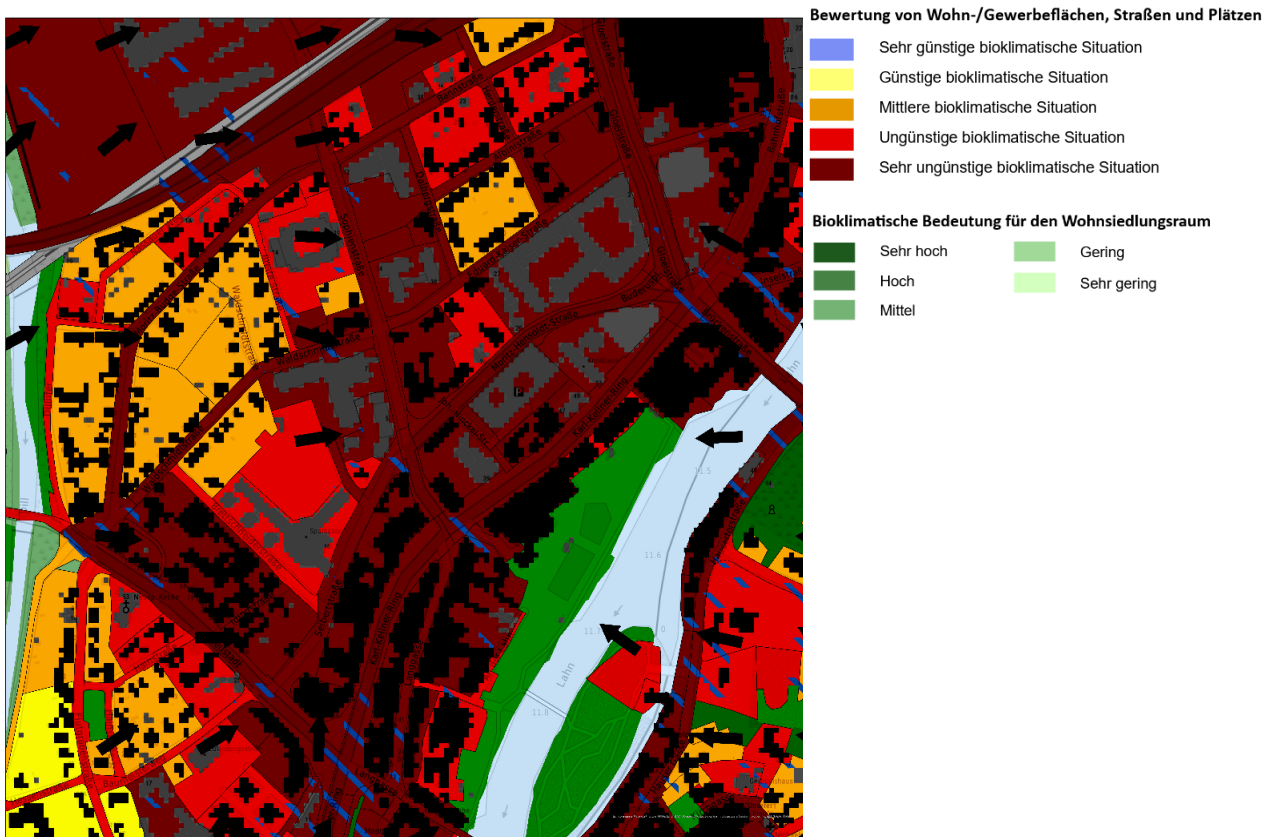


Abbildung 49: Bewertungskarte Nacht, Fokusraum "Neustadt"

Die methodische Grundlage der Wirkraumbewertung am Tage bildet die rasterbasierte Information der PET, die hierfür auf Gebietsumrisse der Basisgeometrie gemittelt wurde. Im hierarchisch nächstfolgenden Schritt wird daher die Karte der PET hinzugezogen (vgl. Abbildung 50), wodurch lokale Minima und Maxima dieser gefühlten Temperatur in Erscheinung treten, die nachfolgend die Zuweisung ortsbezogener Maßnahmen für die Tagsituation zulassen.

Zur Veranschaulichung der örtlichen Begebenheiten sind zudem das Landnutzungsraaster (s. Abbildung 52) sowie ein Luftbild (s. Abbildung 53) des Fokusraum „Neustadt“ abgebildet.

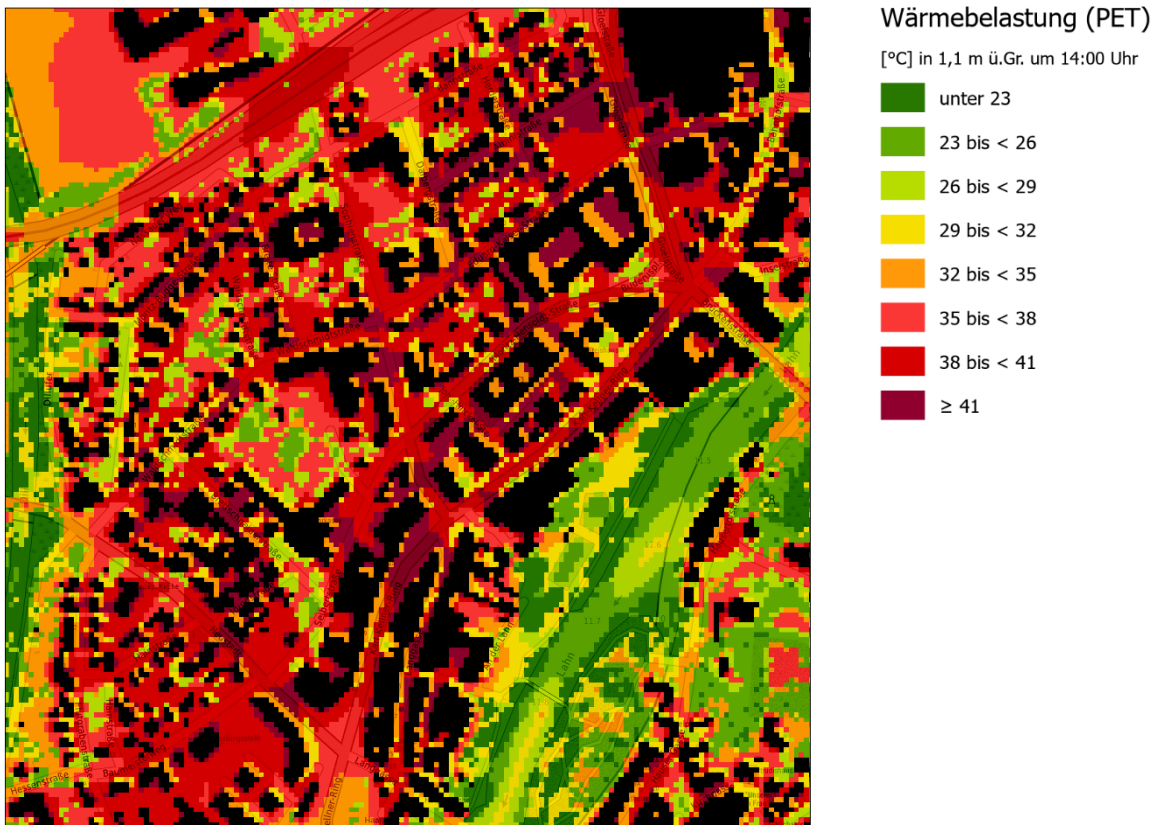


Abbildung 50: Physiologisch äquivalente Temperatur am Tage (PET) für den Fokusraum "Neustadt".

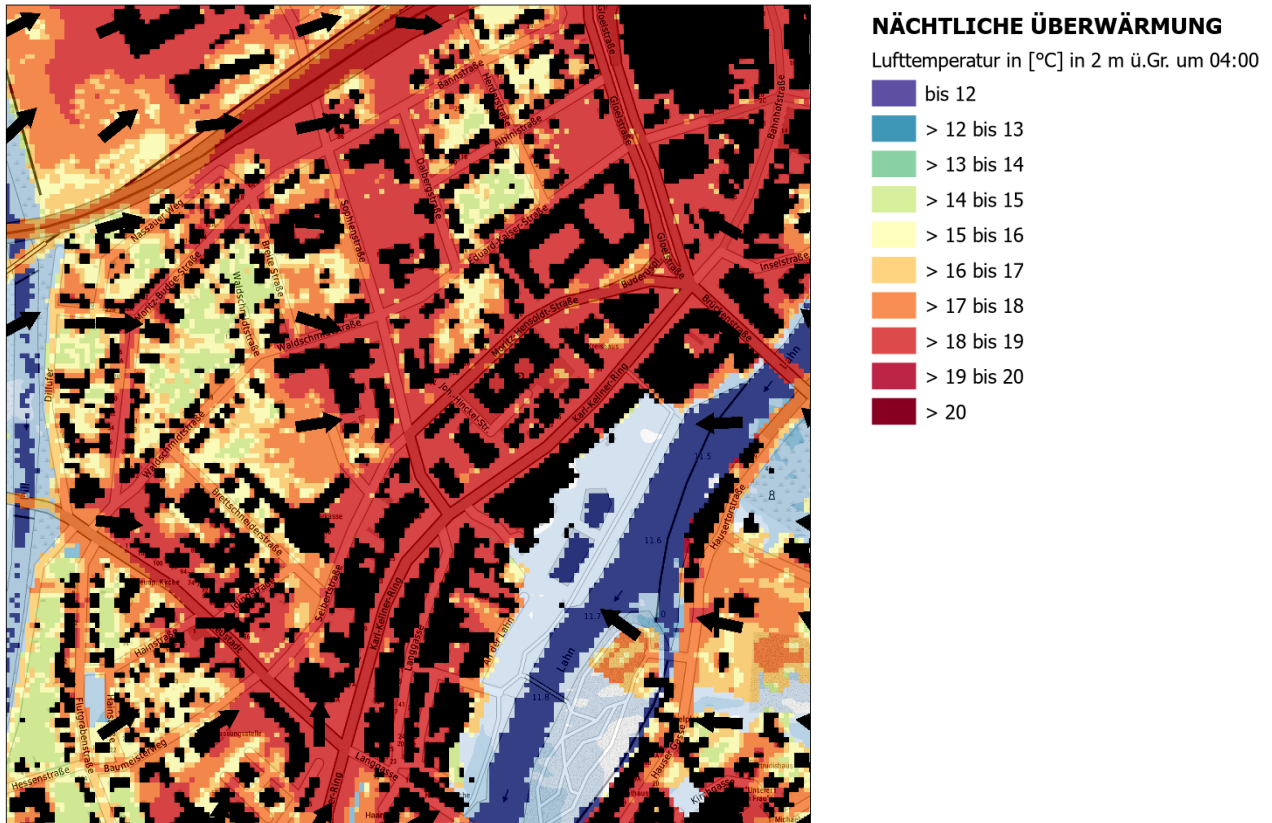


Abbildung 51: Klimaanalysekarte (KAK) für den Fokusraum "Neustadt"

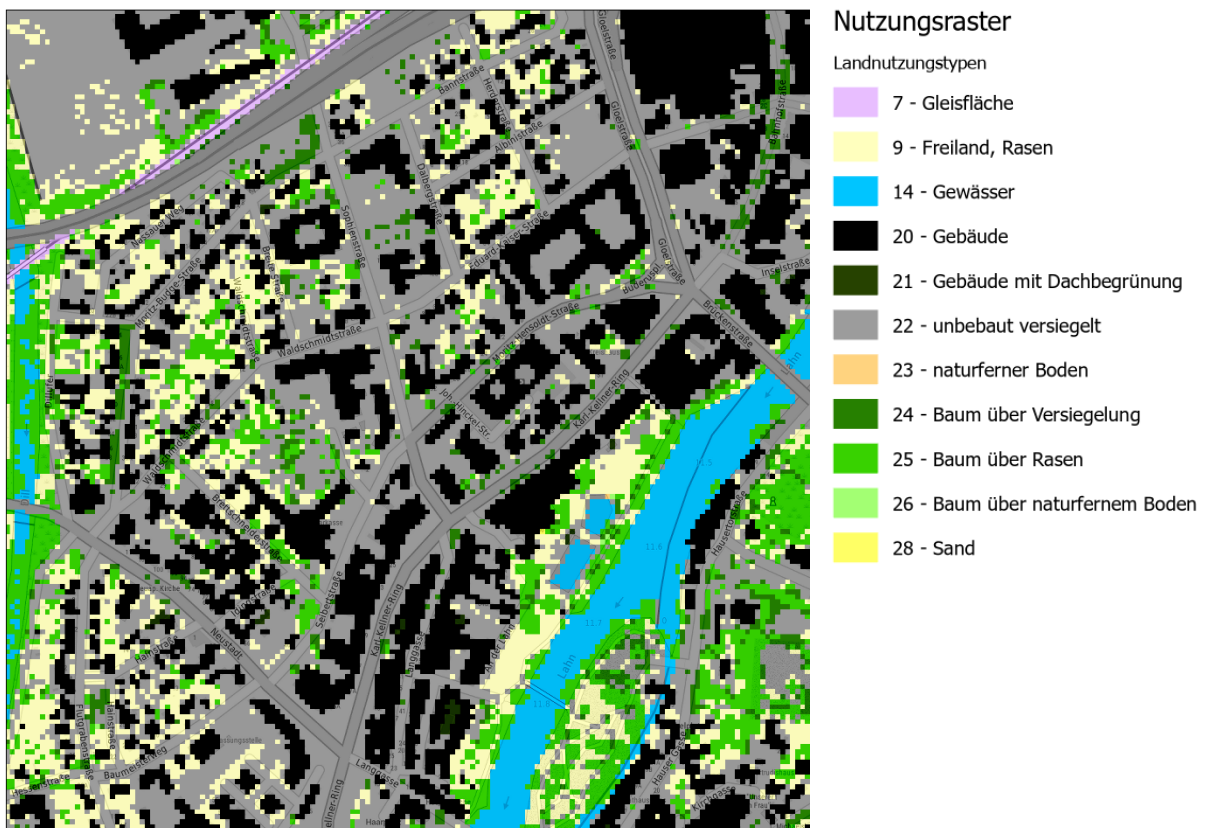


Abbildung 52: Nutzungsrastrer für den Fokusraum "Neustadt"

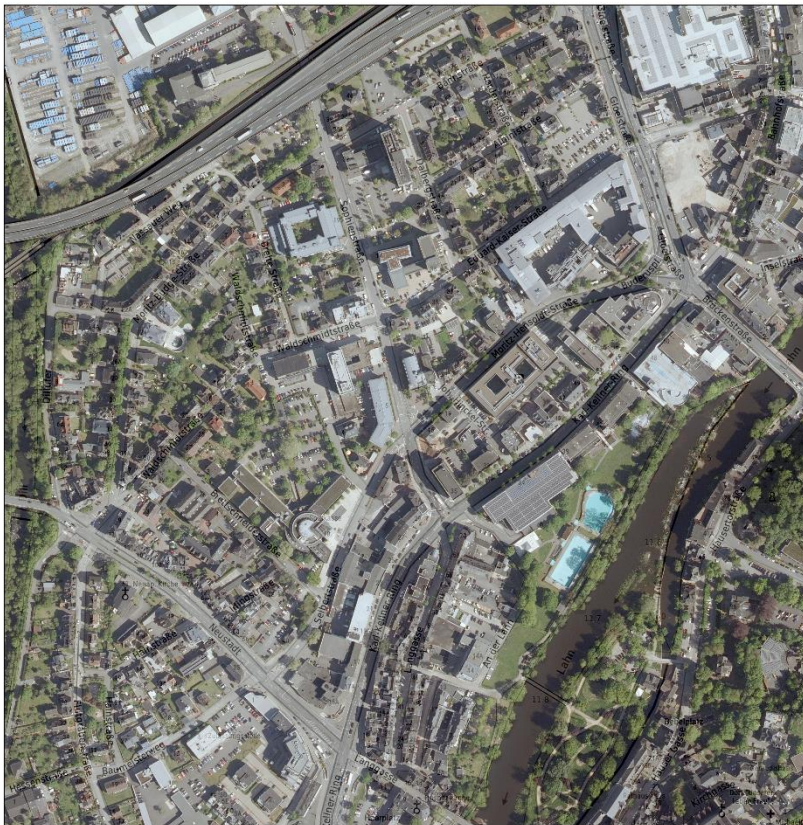


Abbildung 53: Luftbild für den Fokusraum "Neustadt".

Bei der **Beispielfläche (1)** handelt es sich um den öffentlichen Neustädter Platz, welcher in der PHK die Handlungspriorität 3 aufweist (s. Abbildung 54). Am Tage besteht dort eine mittlere humanbioklimatische Situation (s. Abbildung 55), wobei die PET (physiologische äquivalente Temperatur) zwischen 32 und < 35 °C im gewässerzugewandten, westlichen Bereich und zwischen 35 und < 38 °C auf dem östlichen Bereich liegt, was einer starken bis extremen Wärmebelastung entspricht (s. Tabelle 19) Die vor dem Gebäude auf dem Platz stehenden Straßenbäume reduzieren die PET durch ihren Schattenwurf lokal auf 26 bis < 29 °C (s. Abbildung 57). Im Hinblick auf die Tagsituation wären vorrangig Entsiegelungs- und Verschattungsmaßnahmen aus dem Katalog zu empfehlen (M02, M04, M05, M06, M11).

Tabelle 19: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004).

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

Für die Beurteilung der Nachtsituation der Beispielflächen wird der nächtlichen Bewertungskarte nachfolgend die Klimaanalysekarte oder falls nötig (z.B. bei einer genaueren Untersuchung des Kaltluftprozessgeschehens) die vier nächtlichen Einzelparameter (nächtliche Lufttemperatur, Kaltluftvolumenstrom, Kaltluftproduktionsrate, Windfeld) betrachtet.

Der in Landnutzung und Luftbild gleichermaßen (s. Abbildung 60, Abbildung 61) erkennbare hohe Versiegelungsanteil der Fläche bedingt eine erhöhte Wärmespeicherung und damit eine hohe nächtliche Überwärmung sowie eine sehr ungünstige humanbioklimatische Bewertungsklassifizierung (s. Abbildung 56). Die nächtliche Lufttemperatur beträgt im westlichen Bereich $> 17 - 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und im östlichen Bereich $> 18 - 19 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (s. Abbildung 58). Das Windfeld zeigt eine ost-west-gerichtete Kaltluftströmung im Bereich des Platzes und der angrenzenden Straße (s. Abbildung 59). Die Kronendächer der Bäume von Fläche (1) bringen nachts keine Verbesserung, sondern vermindern die nächtliche vertikale Ausstrahlung. Zur Verbesserung der nächtlichen thermischen Situation kämen folgende Maßnahmen aus dem Katalog, die vor allem Entsiegelungsmaßnahmen umfassen, in Frage: M02, M04, M05. Hierbei ist jedoch anzumerken, dass Plätze in der Nacht weniger als Aufenthaltsraum genutzt werden als am Tage, sodass Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation zu priorisieren sind.



Abbildung 54: PHK, Beispielfläche (1)

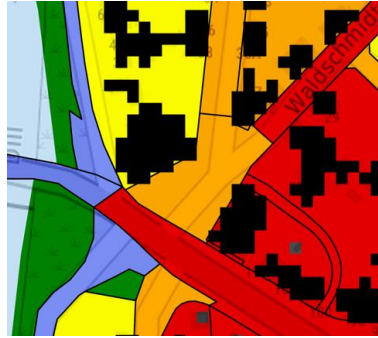


Abbildung 55: Bewertungskarte Tag, Beispielfläche (1)



Abbildung 56: Bewertungskarte Nacht, Beispielfläche (1)

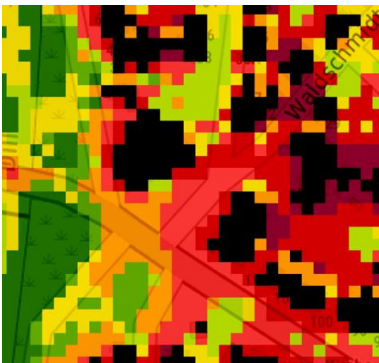


Abbildung 57: PET, Beispielfläche (1)

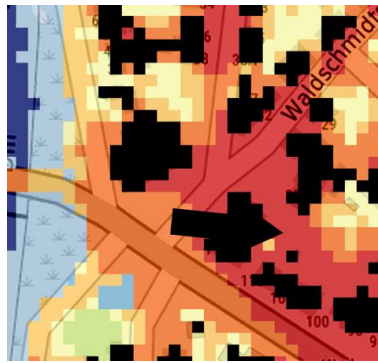


Abbildung 58: KAK, Beispielfläche 1

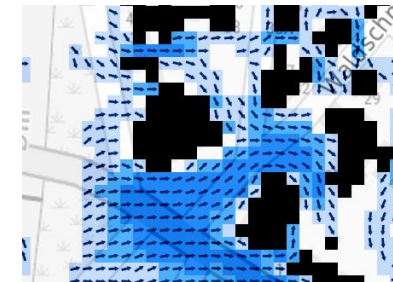


Abbildung 59: Nächtliches Windfeld, Beispielfläche (1)



Abbildung 60: Nutzungsraster, Beispielfläche (1)



Abbildung 61: Luftbild, Beispielfläche (1)

Die **Beispielfläche (2)** zeigt einen Wohnblock an der Gloelstraße, der sich zwischen den abgehenden Straßen Bannstraße und Albinstraße befindet. Neben der bestehenden Handlungspriorität 2 (s. Abbildung 62.) handelt es sich zudem um ein extremes oder sehr hoch sensitives Gebiet, was bedeutet, dass dort eine hohe Dichte an vulnerablen Bevölkerungsgruppen (Alte Menschen, Kleinkinder) vorliegt. Die bioklimatische Situation ist innerhalb dieses Wohnblocks am Tage ungünstig (s. Abbildung 63). Im östlichen Bereich liegt eine hohe Versiegelungsrate vor, der westliche Teil weist dagegen überwiegend unbeschattete Grünfläche auf (s. Abbildung 68). Beide Nutzungsarten bewirken hohe PET Werte von teils über 41 °C und eine extreme Wärmebelastung (s. Abbildung 65). In einigen Bereichen ist die PET aufgrund der vorhandenen Gebäudeschatten bzw. der Beschattung durch einige wenige Bäume etwas geringer (29 bis > 35 °C). Für eine Verbesserung der thermischen Belastung im Innen- und Außenraum bieten sich für die Tagsituation folgende Maßnahmen aus dem Katalog an: M01, M03, M04, M06 (Außenraum); M16, M17, M18, M19, M20, M21 (Innenraum).

In der Nachtsituation zeigt sich für den Wohnblock an der Gloelstraße ebenfalls eine ungünstige bioklimatische Situation (s. Abbildung 64), da eine nächtliche Überwärmung vor allem im Bereich der versiegelten Flächen besteht (17 bis 19 °C) wohingegen die unversiegelten Freiflächen (Hausgärten) in der Nacht stärker auskühlen (15 – 16 °C) (s. Abbildung 66). Das nächtliche Windfeld zeigt auf (s. Abbildung 67), dass kaum Kaltluft aus der Umgebung in den Wohnblock strömt, sodass dort keine Abkühlung über herantransportierte Kaltluft stattfinden kann, gleichzeitig bewirkt der unversiegelte Anteil des Wohnblocks (Hausgärten) nur eine geringe Abkühlung. Maßnahmen zur Verbesserung der Nachtsituation innerhalb des Wohnblocks bestehen aus einer Entsigelung des östlichen Teils des Wohnblocks (M01, M04,) sowie aus gebäudebezogenen Eingriffen (M03, M19, M20).



Abbildung 62: PHK, Beispielfläche (2)



Abbildung 63: Bewertungskarte Tag, Beispielfläche (2)



Abbildung 64: Bewertungskarte Nacht, Beispielfläche (2)

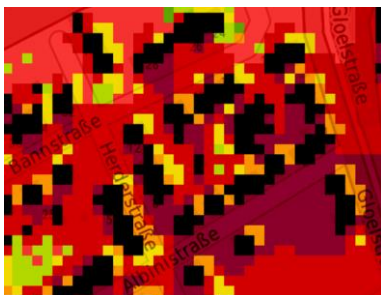


Abbildung 65: PET, Beispielfläche (2)



Abbildung 66: KAK, Beispielfläche (2)

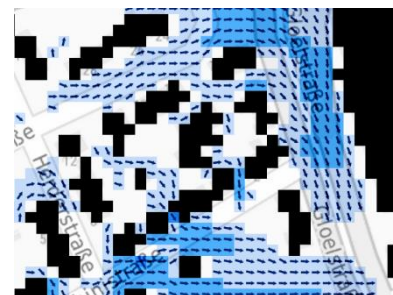


Abbildung 67: Nächtliches Windfeld, Beispielkarte (2)



Abbildung 68: Nutzungsraster, Beispielkarte (2)



Abbildung 69: Luftbild, Beispielkarte (2)

Die **Flächen (3.1) und (3.2)** geben ein Beispiel für thermisch belastete Parkflächen ab. Die Planungshinweis-karte gibt für den Parkplatz an der Gloelstraße die Handlungspriorität 1 und für den Parkplatz der Zulassungs-stelle die Handlungspriorität 2 vor (s. Abbildung 47). Aufgrund der hohen Versiegelungsdichte und der fehlenden Beschattung liegt am Tage eine sehr ungünstige bzw. ungünstige thermische Situation (s. Abbildung 48)

aufgrund der hohen PET (38 bis > 41 °C) vor (s. Abbildung 50). Klimaökologische Maßnahmen wären ähnlich zur Beispielfläche (1) vorrangig Entsiegelungs- und Verschattungsmaßnahmen (M02, M04, M05, M06, M11).

In der Nachtsituation besteht ebenfalls eine sehr ungünstige bzw. ungünstige thermische Situation (s. Abbildung 49). Da Parkplätze in der Nacht weniger als Aufenthaltsraum dienen, sind primär Maßnahmen zur Verbesserung der Tagsituation anzugehen.

Ein aus klimaökologischer Sicht positives Beispiel verkörpert der Parkplatz zwischen der Waldschmidtstraße und der Seibertstraße, welcher in der Planungshinweiskarte die Handlungspriorität 4 aufweist. In der Bewertungskarte Tag liegt für den Platz eine günstige thermische Situation vor (s. Abbildung 48). Wie im Luftbild und im Nutzungsraster zu erkennen ist (s. Abbildung 52, Abbildung 53), ist dieser Parkplatz mit einem hohen Grünvolumen ausgestattet. Die zahlreichen großkronigen Bäume beschatten die versiegelte Fläche, zudem sind die Parkbuchten mit einem teilversiegelten Untergrund ausgestattet. Die PET liegt in den beschatteten Bereichen zwischen 23 bis < 29 °C und in den versiegelten, unbeschatteten Bereichen zwischen 35 bis 38 °C (s. Abbildung 50).

In der Nachtsituation ergibt sich zwar eine ungünstige thermische Situation (s. Abbildung 49) und eine Temperatur von 17 bis < 18 °C. Grund für die nächtliche Überwärmung sind neben der Versiegelung auch die Kronendächer der Bäume, durch welche die nächtliche vertikale Ausstrahlung abgeschirmt und vermindert wird. Allerdings ist die Aufenthaltsqualität von Plätzen in der Nacht weniger relevant als am Tage, sodass für Plätze der Fokus auf einer unbelasteten thermischen Situation am Tage gelegt werden sollte.

Die **Beispielfläche (4)** bezieht sich auf den Straßenraum. Der überwiegende Anteil der Straßen im Kartenausschnitt „Neustadt“ besitzt die Handlungspriorität 2 oder 3. Insbesondere verkehrsreiche Straßen wie der Karl-Kellner-Ring, Neustadt oder die Gloelstraße sollten auch für den Langsamverkehr (Fußgänger, Radfahrer) klimaoptimiert werden. Am Tage liegt im Straßenraum eine ungünstige klimatische Situation (s. Abbildung 48) aufgrund hoher PET Werte (38 bis > 41 °C) vor (s. Abbildung 50). Wie im Luftbild und im Nutzungsraster zu sehen ist, sind die genannten Straßenzüge großteils versiegelt und weisen kaum Straßenbäume auf (s. Abbildung 52, Abbildung 53), was die hohen PET Werte erklärt. Zur Reduzierung der thermischen Belastung am Tage und zum Schutz von Fußgängern und Radfahrern sollten vor allem beschattende Maßnahmen sowie die Erhöhung der Verdunstungskühlung, bspw. über die alleeartige Anpflanzung von Bäumen, umgesetzt werden: M04, M05, M06, M10. Ergänzend können Trinkbrunnen installiert oder „erlebte Wasserflächen“ etabliert werden (M09, M10). Die Bäume spenden nicht nur dem Langsamverkehr Schatten, sondern verschatten zusätzlich Gebäudefassaden, wodurch ein Beitrag für ein angenehmeres Innenraumklima in den umliegenden Gebäuden geleistet wird. Die darüberhinausgehende Installation technischer Verschattungselemente, von Dach- und Fassadenbegrünung, aber auch die klimaoptimierte Gestaltung von Oberflächen im Außenraum verstärkt diesen sekundären Effekt zusätzlich (M03, M16-M18). Zur Verbesserung der Überwärmung sind innerhalb des Siedlungsbereichs vor allem Entsiegelungsmaßnahmen empfohlen. Selbst auf kleineren Grünflächen können Kaltluftentstehungsprozesse in Gang gebracht werden, die sich positiv auf das nahe Umfeld auswirken (M04). Die zuvor genannte, aufgelockerte Alleebepflanzung sorgt dabei für eine gewisse Durchlässigkeit des Strömungsgeschehens.

In der Nacht wird die tagsüber im Asphalt-/ Betonboden gespeichert Wärme wieder an die Luft abgegeben, wodurch sich die hochversiegelten Straßenräume nur geringfügig abkühlen und selbst in der Nacht noch über 18 °C aufweisen (s. Abbildung 51). Durch eine Entsiegelung und Verminderung der Aufheizung des Bodens (bspw. durch Beschattung oder helle Oberflächen) können die thermischen Bedingungen auch für die Nachtsituation verbessert werden.

Im nachstehenden Kartenausschnitt (Abbildung 70) sind die zuvor aufgeführten, möglichen Maßnahmen flächenscharf verortet. Auf den Parkplätzen kann das Parkplatzangebot reduziert werden und freiwerdende Flächen mit Straßenbäumen bepflanzt werden (M05).

Im Wohnblock können die Innenhöfe und Auffahrten entsiegelt und begrünt werden. Zudem auf den vorhandenen Grünflächen verschattete Aufenthaltsbereiche für Anwohner schaffen, dabei auf möglichst großkronige Bäume setzen (M01). Zur Hitzeminderung im Innenraum eignet sich eine energetische Sanierung und klimagerechte Kühlung der Gebäude (M19).

Verkehrsplätze wie der Neustädter Platz oder die Hauptverkehrsstraßen sollten ebenfalls aufgewertet werden. Hier bietet es sich an, Entsigelung sowie Verschattung durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen umzusetzen, um die Aufenthaltsqualität im Freien für Fußgänger und Radfahrer zu verbessern (M04, M05, M06, M10). Ergänzend können Sitzplätze, grüne Ruhebereiche und Trinkbrunnen errichtet werden (M09, M11).

(Die aufgeführten Maßnahmenverortungen beziehen sich vorrangig auf die drei Beispielflächen des Untersuchungsraumes und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Auch sind sie immer im Kontext der baulichen und rechtlichen Umsetzungsmöglichkeiten abzuwägen.)

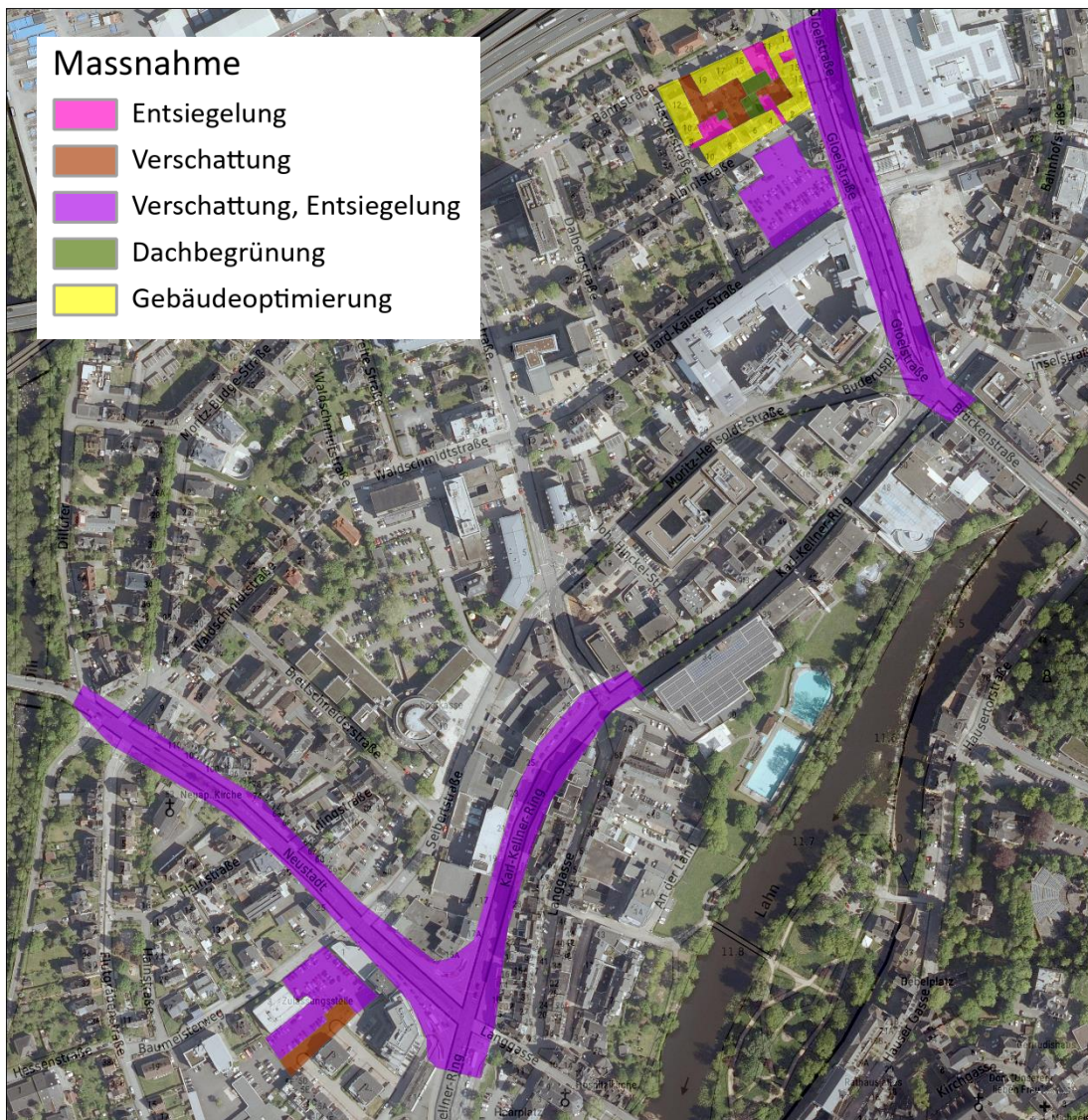


Abbildung 70: Verortung von möglichen Maßnahmen auf den Beispielflächen (1) bis (4)

8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es enthält sämtliche Produkte inkl. deren (Meta-)Daten und steht der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (esri ArcGIS / QGIS) zur Verfügung (s. Abbildung 71).

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. demographische Daten)

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der etwa 9.000 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 60 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen (u.a. Nutzung und Strukturhöhe), Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten, wie z.B. Zugang zu Grünflächen oder Informationen zu Flächen mit Leitbahnfunktionen (s. Tabelle 20 für den gesamten Metadatenatz).

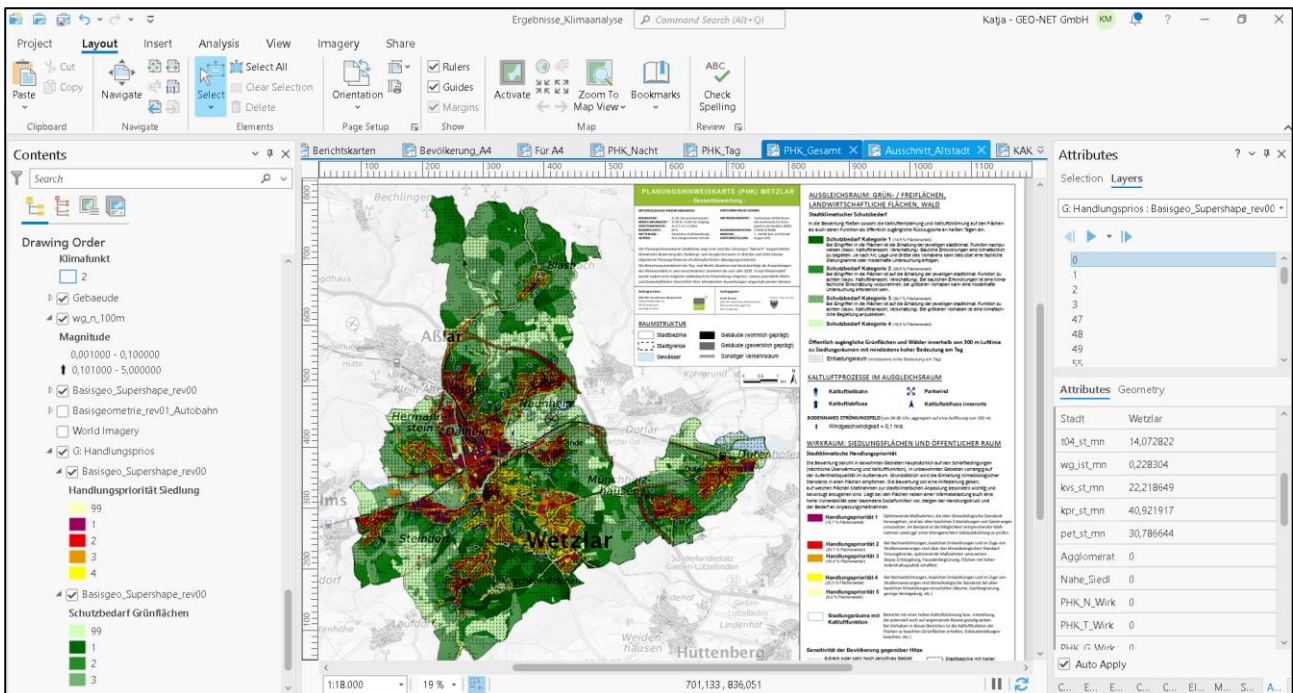


Abbildung 71: Screenshot aus der digitalen Planungshinweiskarte innerhalb des Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.

Tabelle 20: Metadaten zum Vektordatensatz (Bewertungskarten, PHK)

FELDNAME	EINHEIT	ERLÄUTERUNG
Klasse		Landnutzungsklasse Ist-Zustands: 1 = Siedlung 2 = Gewerbe 3 = Straße 4 = Gleis 5 = Gewässer 6 = Frei-/Grünfläche 7 = Wald Methodik: Zonale Statistik (ZS) „Majority“ über Basisgeometrie-Raster (1 m) (Ist-Zustand: rev12)
Flach_h	Hektar	Fläche des Polygons in Hektar
Prkpltz		Parkplatzfläche (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Public		Öffentlich zugängliche Grünfläche (Parks, Spielplätze, Friedhöfe, Freibäder etc. mit Attribut 6 aus „Klasse“) oder Waldfläche (1 = Grünfläche, 7 = Waldfläche, 0 = unzutreffend)
bewohnt		bewohnte Fläche (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Leitbhn		Fläche mit Kaltluftleitbahn (1 = Primärfunktion, 2 = Einzugsgebiet/Sekundärfunktion, 3 = Einzugsgebiet indirekt, 0 = unzutreffend)
ID_fest		Interne laufende Nummer
Autobhn		Autobahnfläche (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Stadt		dem Datensatzes zugehörige Stadt
t04_st_mn	°C	Mittlere nächtliche Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_043_ist_t04_rev00.tif
wg_ist_mn	m/s	Mittlere nächtliche Windgeschwindigkeit in 2m Höhe um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_043_ist_WG_rev00.tif
kvs_st_mn	m ³ /(s*m)	Mittlere nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_043_ist_kvs_rev00.tif
kpr_st_mn	m ³ /m ² *h	Mittlere nächtliche Kaltluftproduktionsrate um 04:00 morgens, Ist-Zustand Methodik: ZS „mean“ von 2_22_043_ist_kpr_rev00.tif
pet_st_mn	°C	Mittlere PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr, Ist-Zustand

FELDNAME	EINHEIT	ERLÄUTERUNG
		Methodik: ZS „mean“ von 2_22_043_ist_PET_rev00.tif
Agglomerat		Zusammenhängende Ortsteile ohne Einzelflächen im Außenraum (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Nahe_Siedl		Öffentliche Grün- / Waldfläche in guter fußläufiger Erreichbarkeit zum Siedlungsraum (bis 300m) (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
PHK_N_Wirk		Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Klasse 1,2,3) in der Nacht: 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig
PHK_T_Wirk		Bewertung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Klassen 1,2,3) am Tag: 1 = sehr gering 2 = gering 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig
PHK_G_Wirk		Kombinierte Bewertung des Wirkraums am Tag und in der Nacht (Klassen 1,2,3)
PHK_T_Ausg		Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums (Klassen 6,7) am Tag: 5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering
PHK_N_Ausg		Bewertung der humanbioklimatischen Bedeutung des Ausgleichsraums (Klassen 6,7) in der Nacht: 5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering
PHK_G_Ausg		Kombinierte Bewertung des Ausgleichsraums am Tag und in der Nacht (Klassen 6,7)
PHK_Gesamt		Bewertung des Wirkraums (Klassen 1,2,3) und des Ausgleichsraums (Klassen 6,7) (aufgeführt aus den Spalten „PHK_G_Wirk“ & „PHK_G_Ausg“)
Schutzbeda		„Schutzbedarf“ - Gesamthafte Bewertung des Ausgleichsraum: 0 = kein Ausgleichsraum

FELDNAME	EINHEIT	ERLÄUTERUNG
		1 = Schutzbedarf Kategorie 1 (sehr hoher Schutzbedarf) 2 = Schutzbedarf Kategorie 2 (hoher Schutzbedarf) 3 = Schutzbedarf Kategorie 3 (mittlerer Schutzbedarf) 99 = Schutzbedarf Kategorie 99(kein Schutzbedarf)
Handlungsprio		„Handlungspriorität“ - Gesamthafte Bewertung des Wirkraums (Siedlungsraum/Gewerbe/Straßen) für die PHK: 0 = kein Wirkraum 1 = Handlungspriorität 1 2 = Handlungspriorität 2 3 = Handlungspriorität 3 4 = Handlungspriorität 4 99 = keine vorrangige Handlungspriorität
WR_PET_Z		Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr (für Wirkraum: Werte von Siedlung/Gewerbe und Verkehr)
WR_T04_Z		Z-Wert des Blockmittelwertes der Temperatur in 2m Höhe um 04:00 morgens (für Wirkraum: Werte von Siedlung/Gewerbe und Verkehr)
AR_PET_Z		Z-Wert des Blockmittelwertes der PET in 1,1m Höhe von 14 Uhr (für Ausgleichsraum: Werte von Grünfläche und Wald)
PHKGesamt2		Handlungspriorität des Wirkraums (Klassen 1,2,3) und Schutzwürdigkeit des Ausgleichsraums (Klassen 6,7) (aufgeführt aus den Spalten „Handlungsprio“ & „Schutzbeda“)
Entlastung		Öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder innerhalb von 300m Luftlinie zu Siedlungsräumen mit mindestens hoher Bedeutung am Tag (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Klimafunkt		Siedlungsräume mit Kaltluftfunktion (1 = mind. 30 % Überdeckung, 2 = mind. 50 % Überdeckung, 0 = unzutreffend) Methodik: Prozentualer Anteil des Kaltlufteinwirkungsbereichs am Baublock (nur Wirkraum) -> Ausweisung als Fläche mit Kaltluftfunktion, wenn dieser Anteil >=50 %
Flaeche_m2	m ²	Fläche des Polygons in Quadratmeter
KL_Entsteh		Kaltluftentstehungsgebiet: Grün-/Waldflächen mit Überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
Siedlbez		Flächen innerhalb von 700 m um Wohngebiete ohne Gewerbe in Agglomeration (Attributspalte „Agglomerat“ = 1) (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
An_WohnGew		Flächen bis 30 m Entfernung zu Wohn- und Gewerbegebieten (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)
An_Wohn		Flächen bis 30 m um Wohnsiedlung in Agglomeration (Attributspalte „Agglomerat“ = 1) (1 = zutreffend, 0 = unzutreffend)

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.
- Becker, C., A. Herrmann, W. E. Haefeli, K. Rapp, U. Lindemann (2019): Neue Wege zur Prävention gesundheitlicher Risiken und der Übersterblichkeit von älteren Menschen bei extremer Hitze. In: Bundesgesundheitsblatt 62, S. 565-570.
- 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.
- 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.
- BMG – Bundesministerium für Gesundheit (2021): Hitze: Ältere und pflegebedürftige Menschen schützen. (gesund.bund.de). <https://gesund.bund.de/hitze-pflegebeduerftigkeit>.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik>.
- Cedeño Laurent JG, Williams A, Oulhote Y, Zanobetti A, Allen JG, Spengler JD (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. PLoS Med. 15(7).
- DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (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>
- DR. SEITZ / ÖKOPLANA (1999): Klimaökologische Analyse im Kernstadtgebiet Marburg unter besonderer Berücksichtigung des Strömungsgeschehens. Im Auftrag der Stadt Marburg – Amt für Stadtentwicklung und städtebauliche Planungen.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2022): Gefühlte Temperatur. Online: https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitze_thermische_belastung/gefuehlte_temperatur.html.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. Online: www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html.
- DWD (2023c): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. Online: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2023d): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. Online: ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. Online: https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann.
- Gavrilov, Milivoj & An, Wenling & Xu, Chenxi & Radaković, Milica & Hao, Qingzhen & Yang, Fan & Guo, Zhengtang & Perić, Zoran & Gavrilov, Gavriilo & Markovic, Slobodan. (2019). Independent Aridity and Drought Pieces of Evidence Based on Meteorological Data and Tree Ring Data in Southeast Banat, Vojvodina, Serbia. Atmosphere. 10. 586. 10.3390/atmos10100586.

- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002)
- 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. (2014): On the estimation of wind comfort in a building environment by micro-scale simulation. In: *Meteorologische Zeitschrift* 23, Nr. 1, S. 51-62.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the n environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- Groß, G. (2021): A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. In: *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 30, Nr. 3, S. 227-236.
- Groß, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg., 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: https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (Hrsg., 2019): *KLIMPRAX Stadtklima. Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen -Hitze und Gesundheit-*. 167 S.
- Höppe, P.; H.Mayer (1987): Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19. S. 22–29.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (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.
- ISO - International Organization for Standardization (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 Organization for Standards.
- Jendritzky (2007): *The Universal Thermal Climate Index UTCI*. Online: 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.: *Monitoring of climatechange in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre*. *Adv. Sci. Res.*, 10, 99–106, 2013
- Kosow, Hannah & Leon, Christian (2014). *Die Szenariotechnik als Methode der Experten- und Stakeholdereinbindung*. In: Niederberger M, Wassermann S. (Eds.): *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung*. Springer VS, 217-242.
- Linke C. et al. (2016): *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“*, Potsdam.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): *Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen*. *UVP-report* 5/94, S. 265-268.
- Moore, G. E. (1903): *Principia Ethica*. Ditzingen: REKLAM.

- Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G. A., Mitchell J. F. B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S. J., Stouffer R. J., Thomson A. M., Weyant J. P., Wilbanks T. J. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- MVI - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- MWVLW RLP - Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau Rheinland-Pfalz (2023): Wetterdaten Rheinland-Pfalz. Bodenfeuchte Hilfe. Online: <https://www.wetter.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/b81d6f06b181d7e7c1256e920051ac19/6449e62b480fcb10c1257d5f0034e7b5?OpenDocument>
- Oke (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- ÖKOPLANA (2018): Zusammenfassendes Klimagutachten zu den B-Planverfahren Nr. 26/4 Görzhäuser Hof, 1. und 2. Änderung in Marburg-Michelbach. Im Auftrag der Pharamserv GmbH & Co. KG.
- 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
- Rauthe M., Malitz G., Gratzki A., Becker A. (2014): Stark-regen. In: Becker P., Hüttl R. F. (Hrsg.): *Forschungsfeld Naturgefahren*. Potsdam und Offenbach, S. 112.
- ReKliEs-De (2017): *Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland - Nutzer-handbuch*.
- Richter & Röckle – iMA Richter & Röckle Immissionen Meteorologie Akustik (2013): *Modellgestützte Klimaanalyse und –bewertung für die Regionalplanung in Hessen*. Grundlagen am Bsp. Marburg. Forschungsvorhaben „klamis“: Klimaanpassung in Mittel- und Südhessen. Im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung.
- 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.
- Schwalm, Christopher & Glendon, Spencer & Duffy, Philip. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117.
- SenStadtUm (2015): *Klimamodell Berlin – Ausgabe 2016*. Online: www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib411.htm
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stadt Karlsruhe (2014): *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung*. Online: www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de
- Stadt Zürich (2020): *Fachplanung Hitzeminderung*. Online: www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html
- Stadt Wetzlar – Erik Berge (2020): *Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelpassung*. Stadt Wetzlar, 03.07.2020, 31 S. ONLINE: https://www.wetzlar.de/medien/bindata/lebeninwetzlar/umwelt-naturschutz/200703_Aktionsplan_Klimaschutz_und_Klimawandelpassung.pdf
- The COMET program (2017): *Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds*. Online: <https://satelliteliasonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- Themeßl 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 – Umweltbundesamt (2005): *GESÜNDER WOHNEN – ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag*. Umweltbundesamt.

- UBA – Umweltbundesamt (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. Online: www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze
- UBA – Umweltbundesamt (2021): Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Kurzfassung. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>
- 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>
- Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenthaler 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 (2020): VDI-RICHTLINIE 3787, Bl. 8: STADTENTWICKLUNG IM KLIMAWANDEL.

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 06.10.2023

Erstellt von:

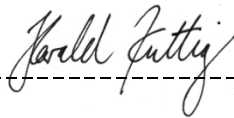


Lara Wichmann (M. Sc. Landschaftswissenschaften)



Janko Löbig (M. Sc. Geoökologie)

Gepüft von:



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

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

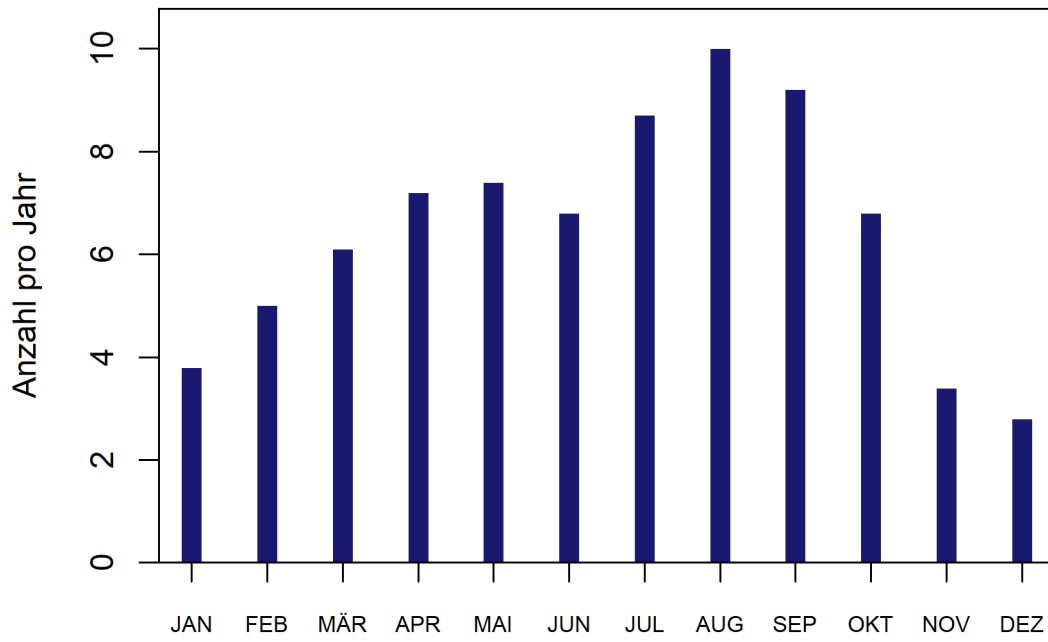


Abbildung A 1: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten an der von Wetzlar nächstgelegenen DWD-Station Gießen-Wettenberg für den Zeitraum 1971 – 2020 (70 pro Jahr; DWD 2023c)

Tabelle A 3: Erläuterungen zum Maßnahmenkatalog (verändert nach: Quelle: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Hochschule Fulda, INFRASTRUKTUR & UMWELT Professor Böhm und Partner)

Erläuterung der Felder	
Nr.	Nummerierung der Planungshinweise
Planungshinweis	Allgemein formulierte Planungshinweise, welche Kommunen für die betroffenen Belastungs- und Ausgleichsräume bei der zukünftigen Planung berücksichtigen können.
Beispielmaßnahmen	Maßnahmenbeispiele konkretisieren die Planungshinweise und bieten eine Grundlage für die Überlegungen zu weiteren, detaillierten und örtlich angepassten Maßnahmen.
Umsetzung	Hier werden (nicht abschließend) Möglichkeiten zur Umsetzung der genannten Beispielmaßnahmen zu den Planungshinweisen aufgezeigt. Die Anregungen sind aus verschiedenen Projekten und Planungen in Deutschland sowie aus dem Ausland zusammengetragen.
Instrumente	In der Spalte "Instrumente" finden Sie Hinweise, mit Hilfe welcher Instrumente eine Umsetzung möglich ist. Bei zahlreichen Beispielmaßnahmen können mehrere Instrumente miteinander kombiniert werden bzw. Sie können die Umsetzung entsprechend der lokalen Situation gestalten. Auch diese Nennung ist nicht abschließend, es gibt sicher weitere Möglichkeiten, die Planungshinweise umzusetzen.
Bebauungsplan	Umsetzung durch Festsetzungen im Bebauungsplan möglich.
Flächennutzungsplan	Umsetzung durch Darstellung im Flächennutzungsplan möglich.
Landschaftsplan	Umsetzung durch Aufnahme in den Landschaftsplan - ggf. durch thematische Karten/Analysen - möglich
Satzung	Umsetzung durch lokale Satzungen (Gestaltungssatzung, Baumschutzsatzung etc.) möglich.
Konzept	Für die Umsetzung ist i.d.R. die Erstellung eines kommunalen Konzepts zu empfehlen.
Beratung	Umsetzung durch Beratung entsprechender Zielgruppen möglich.
Förderung	Umsetzung kann durch kommunale Förderangebote unterstützt werden.
Information	Umsetzung kann durch entsprechende Information an die Zielgruppen unterstützt werden.
eigene Ausführung	Die Umsetzung kann innerhalb der kommunalen Verwaltung erfolgen, z.B. durch entsprechende Vorgaben an den Bauhof, Betriebshöfe, für die Grünflächenpflege etc.
Vorhaben Wettbewerbe, VEP	Umsetzung über entsprechend Vorgaben für städtebauliche Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne etc.
Anordnung	In Einzelfällen kann eine Anordnung (z.B. zur Beseitigung baulicher Anlagen) bei der Umsetzung notwendig sein.
Fachplanung	Umsetzung über entsprechende Fachplanungen, z.B. im Verkehrswesen
Raumkategorie A	Ausgleichsräume dienen dem lokalklimatischen Ausgleich (z.B. Kaltluftentstehung und Versorgung von Belastungsräumen mit Kaltluft). Sie sind von besonderer Bedeutung für die Durchlüftung und Abkühlung von Belastungsgebieten.
Raumkategorie B	In Siedlungsräumen mit hoher bioklimatischer Belastung liegen für den betrachteten Raum überdurchschnittliche Wärmebelastungen vor. Flächen der Handlungspriorität 1 in der Planungshinweiskarte (PHK).
Raumkategorie C	In diesen Siedlungsräumen ist eine mittlere Wärmebelastung gegeben. Flächen der Handlungsprioritäten 2 und 3 in der PHK.

Raumkategorie D	In diesen Siedlungsräumen ist eine im Vergleich geringe Wärmebelastung gegeben, die Situation kann als positiv angesehen werden. Flächen der Handlungsprioritäten 4 und 5 in der PHK.
Synergieeffekte	Hier werden Konzepte und Aufgaben der Stadt Wetzlar aufgelistet, wo potenziell Synergieeffekte bei der Umsetzung der Beispielmaßnahmen genutzt oder erzielt werden können.
Zielgruppe	In der Rubrik „Zielgruppe“ werden Personengruppen aufgelistet, die vornehmlich von der Maßnahme angesprochen werden.
Beispiel	Beispiele aus anderen Kommunen oder aus Wetzlar selbst zeigen die Möglichkeiten der Umsetzung auf und regen einen Erfahrungsaustausch zwischen den Kommunen an.
Hinweise zur Umsetzung	Weitere nützliche Hinweise zu Umsetzung werden durch Verweise auf Praxisleitfäden, Studien, Werkzeugen oder Fördermöglichkeiten aufgenommen.

Tabelle A 4: Maßnahmenkatalog für die Stadt Wetzlar (verändert nach: Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Hochschule Fulda, INFRASTRUKTUR & UMWELT Professor Böhm und Partner)

Maßnahmenkatalog													
Nr.	Planungshinweis	Wirkungsfeld des Planungshinweises	Beispielmaßnahmen	Umsetzung	Instrumente	Raumkategorie				Synergieeffekte mit anderen Bereichen nachhaltiger Stadtentwicklung	Zielgruppe	Beispiele	Hinweise zur Umsetzung
						A	B	C	D				
1	Planung und Festsetzung von Dach- und Fassadenbegrünung	Grün- und Freiflächennutzung	Festsetzung von Dachbegrünungen und Fassadenbegrünungen im Bebauungsplan	Die Dachform (Flachdach) kann auf Basis von § 91 HBO definiert werden, die Begrünung auf der Grundlage von § 9 Abs. 1 Nr. 25 BauGB, der die Gemeinde u. a. zur Festsetzung von Bepflanzungen für Teile baulicher Anlagen ermächtigt. Beispiel: "Im Geltungsbereich des Bebauungsplanes sind die undurchsichtigen Dachflächen über Gebäuden mit mehr als 10 qm Grundfläche flächendeckend zu bepflanzen. Ausnahmsweise sind über bis zu 40 % der Grundfläche andere Materialien zulässig, wenn dies für die Nutzung erneuerbarer Ressourcen (Sonnenlicht, Umgebungstemperatur etc.) erforderlich ist."	Bebauungsplan		x	x	x	- Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Interstädtisches Entwicklungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt	- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren	Bebauungspläne der Stadt Wetzlar mit solchen Festsetzungen oder Anregungen: - Bebauungsplan Nr. 280 - Bebauungsplan Nr. 246	Bundesamt für Naturschutz (2019) Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen (https://www.bfn.de/publikationen/bfn-schriften/bfn-schriften-538-dach-und-fassadenbegrueunung-neue-lebensraeume-im)
			Kommunales Konzept der Dach- und Fassadenbegrünung, z.B. im Landschaftsplan	Ein gesamtstädtisches Konzept zur Dach- und Fassadenbegrünung kann beispielsweise als Fachkonzept zum Landschaftsplan erstellt werden. Im Landschaftsplan können darüber hinaus Maßnahmen zur Begrünung von Dächern und Fassaden für bestimmte Quartiere und Stadtteile dargestellt werden.	Konzept Landschaftsplan		x	x	x	- Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Interstädtisches Entwicklungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt	Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren	Stadt Magdeburg: Gebäudegrünkonzept (https://www.magdeburg.de/index.php?ModID=7&FID=37.24164.1&object=tx%7C37.24164.1)	Bundesamt für Naturschutz (2019) Dach- und Fassadenbegrünung - neue Lebensräume im Siedlungsbereich. Fakten, Argumente und Empfehlungen (https://www.bfn.de/publikationen/bfn-schriften/bfn-schriften-538-dach-und-fassadenbegrueunung-neue-lebensraeume-im)

			<p>Initiierung von Beratungsprogrammen zur Förderung von Dach- und Fassadenbegrünungen</p> <p>Mit Hilfe von Beratungsprogrammen können insbesondere Privateigentümer*innen motiviert werden, Dach- und Fassaden-grün an ihren Eigenheimen und Gewerbeobjekten zu installieren. Zusätzliche Anreize können durch entsprechende Zuschüsse der Kommune zur Dachbegrünung gesetzt werden (Förderung).</p>	Beratung Förderung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Interstädtisches Entwicklungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt 	Private Gebäudeeigentümer	<ul style="list-style-type: none"> - Bundesverband Gebäude-Grün e. V. (BuGG): Beratungsangebot - Stadt Hanau: Kostenlose Vor-Ort-Beratungen im Rahmen des Förderprogramms "Hanau grünt auf" 	Bedingte Förderung über die Klimaschutzrichtlinie Hessen (Punkt 6) schreibt die Beratung mittels Planungsbüro vor.
			<p>Schaffung von Investitionsprogrammen zur Förderung von Dach- und Fassadenbegrünungen</p> <p>Inhalt solcher Programme sind beispielsweise indirekte Zuschüsse der Dachbegrünung bei gesplitteter Abwassersatzung, direkte Zuschüsse für Dach- und Fassadenbegrünung oder direkte finanzielle Unterstützungen, die je nach Fall an Bedingungen geknüpft sind. Die Umsetzung erfolgt über entsprechende Konzepte.</p>	Förderungskonzept		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung- Integriertes Klimaanpassungskonzept- Interstädtisches Entwicklungskonzept- Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt 	Private Gebäudeeigentümer	<ul style="list-style-type: none"> - Förderprogramm "GebäudeGrün hoch³" in Freiburg- Förderprogramm "Hanau grünt auf"- Klimabonus "Frankfurt frisch auf." 	Bedingte Förderung über die Klimaschutzrichtlinie Hessen (Punkt 6)
2	Versiegelung reduzieren durch ...	Grün- und Freiflächennutzung	<p>Entsiegelung öffentlicher Flächen</p> <p>Für Maßnahmen zur Entsiegelung eignen sich z.B. Parkplätze aus Beton und Asphalt, diese Materialien können durch Pflaster mit mindestens 30% Fugenanteil, Rasensteine, Schotterrasen ersetzt werden. Auch Schulhöfe bieten häufig Potenziale für die Entsiegelung von Flächen. Entsprechende Entsiegelungspotenziale können z.B. im Landschaftsplan aufgezeigt werden.</p>	Landschaftsplan Konzept		x			<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Bodenschutzkonzept 	Stadtverwaltung und Eigenbetriebe	<ul style="list-style-type: none"> - Förderinitiative Flächenentsiegelung (Bayerisches Staatsministerium für Wohnen, Bau und Verkehr) - Best Practice: Sanierung des Nikolaikirchhofs in Altenburg (https://www.klimaleitfaden-thueringen.de/best-practice-beispiel-sanierung-des-nikolaikirchhofs-in-altenburg) - DUH: Grüne Schulhöfe in Thüringen (https://www.duh.de/schulhoefe/thueringen/) 	Förderung über die Klimaschutzrichtlinie Hessen (Punkt 2)

			<p>Förderung der Entsiegelung privater Flächen</p> <p>Durch städtische Begrünungsberater kann eine kostenlose Beratung angeboten werden, um die Möglichkeiten der Förderung von privaten Entsiegelungsmaßnahmen zu erörtern und Unterstützung bei der Antragsstellung anzubieten. Gegenstand spezieller Förderangebote kann z.B. die gezielte Entsiegelung und Begrünung von Innenhöfen, Hinterhöfen etc. in dicht bebauten Stadtquartieren sein. Die Förderung kann kombiniert werden mit Vorteilen im Bereich der Regenwasserversickerung (z.B. gesplittete Abwassergebühren).</p>	Beratung Förderung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Bodenschutzkonzept 	Private Gebäudeeigentümer	<ul style="list-style-type: none"> - Förderprogramm "GrüneMitteGießen" - Förderrichtlinie Klimaanpassung in Offenbach am Main (Förderschwerpunkt 3: Flächenentsiegelung mit Begrünung) 	Bedingte Förderung über die Klimaschutzrichtlinie Hessen (Punkt 6) in Kombination mit der Förderung von Dach- und Fassadenbegrünungen
			<p>Sensibilisierung der Öffentlichkeit über Vorteile einer Entsiegelung</p> <p>In entsprechenden Informationsmaterialien können die Folgen einer hohen Versiegelung für die lokale Wärmeentwicklung im Baublock/Quartier aufgezeigt werden. Die Vorteile einer Entsiegelung durch positive Auswirkungen auf die Temperaturen werden dargelegt. Jedem Handlungsträger und Bürger können Informationen darüber vermittelt werden, wie sie vorhandene Versiegelungen gezielt reduzieren können.</p>	Information		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Demographische Entwicklung - Bodenschutzkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Bürger*innen - Private Gebäudeeigentümer - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Multiplikatoren - Lokale Unternehmen 	<p>Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen (2023). Von der Versiegelung zur Entsiegelung. (https://www.abwasser-beratung.nrw/sites/default/files/2023-05/230510_broschuere_entsiegelung_web.pdf)</p>	Umweltbundesamt (2021). Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bessere-nutzung-von-entsiegelungspotenzialen-zur)
3	Neuversiegelung begrenzen durch ...	Grün- und Freiflächennutzung	<p>Einführung ökologischer Standards zur Begrenzung der Versiegelung</p> <p>Ökologische Standards umfassen z.B. eine maximal zulässige Versiegelung oder Schutzzonen zur Vermeidung von Versiegelung. Die ökologischen Standards sollen möglichst konkrete, orts-/flächenbezogene Aussagen beinhalten und bspw. im Landschaftsplan festgesetzt werden.</p>	Landschaftsplan		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Bodenschutzkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe 	<p>BUND-Hildesheim: Leitlinie für Bebauungsplanfestsetzungen für Ökologie, Klimaschutz (2020) (https://www.bund-hildesheim.de/fileadmin/hildesheim/Politik/Bebauungspläne/2020-07-22_Leitlinie_BPlan_Festsetzungen_fuer_Oekologie_Umwelt-_und_Klimaschutz.pdf)</p>	Umweltbundesamt (2021). Bessere Nutzung von Entsiegelungspotenzialen zur Wiederherstellung von Bodenfunktionen und zur Klimaanpassung (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bessere-nutzung-von-entsiegelungspotenzialen-zur)

			<p>Festsetzung von Freiflächenanteilen bzw. reduzierter Versiegelung durch Satzung</p> <p>Durch eine Satzung lässt sich die gärtnerische Gestaltung der Freiflächen festlegen. Somit kann die Nutzung als hauswirtschaftliche Flächen, als Arbeits-, Lager- oder Stellplatzflächen verhindert werden.</p>	Satzung		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Bodenschutzkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe 	<p>- Vorgartensatzung sowie Gestaltungssatzung "Freiraum und Klima" der Stadt Frankfurt a.M.</p>	
			<p>Sensibilisierung der Öffentlichkeit über Nachteile und Risiken der Versiegelung</p> <p>In entsprechenden Informationsmaterialien können die Folgen einer hohen Versiegelung für die lokale Wärmeentwicklung im Baublock/Quartier aufgezeigt werden. Jedem einzelnen Handlungsträger und Bürger können Informationen darüber vermittelt werden, wie diese Versiegelungen vermieden werden können.</p>	Information		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Bodenschutzkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Bürger*innen - Private Gebäudeeigentümer - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 	<p>Verbraucherzentrale Nordrhein-Westfalen (2023). Von der Versiegelung zur Entseiegelung. (https://www.abwasser-beratung.nrw/sites/default/files/2023-05/230510_broschuere_entseiegelung_web.pdf)</p>	
			<p>Erhalt von schattenspendenden Grünstrukturen, insb. großkroniger Bäume durch Baumschutzsatzung</p> <p>Auf Grundlage des § 29 BNatSchG ist es möglich Bäume im Innenbereich als "Geschützte Landschaftsbestandteile" mittels einer Baumschutzsatzung nach §12 Abs. 1 Satz 3 und Abs. 2 Satz 2 HAGB-NatSchG unter Schutz zu stellen.</p>	Satzung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Rad- und Fußverkehrskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 	<p>Baumschutzsatzung vom 14.12.2020 der Stadt Wetzlar</p>	
4	Beschattung von öffentlichen Plätzen und Freiflächen durch ...	Grün- und Freiflächennutzung	<p>Neuanlage von schattenspendenden Grünstrukturen</p> <p>Insbesondere in Bereichen mit hohem Publikumsverkehr wie Plätzen, ÖPNV-Haltestellen, etc. bieten sich Pflanzungen von schattenspendenden Stadtbäumen besonders gut an (bei der Anordnung der Bäume in Straßenräumen und auf Plätzen ist unbedingt auf eine günstige Beschattungswirkung, gerade auch für Sitzgelegenheiten, zu achten). Entsprechende Pflanzungen können über grünordnerische Planungen vorgesehen werden. Falls für entsprechende Gebiete ein Bebauungsplan erstellt wird, können Pflanzgebote über § 9</p>	Bebauungsplan Vorgaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Rad- und Fußverkehrskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Lokale Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Erfolgreiche Beispiele in der Fachbroschüre "Straßen und Plätze neu denken" - Förderbeispiele der Stiftung "Die grüne Stadt" (https://die-gruene-stadt.de/foerderung/uebersicht/) 	<p>Umweltbundesamt (2017). Fachbroschüre Straßen und Plätze neu denken. (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/strassen-plaetze-neu-denken)</p> <p>- Fördercheck https://die-gruene-stadt.de/foerderung/uebersicht/)</p>

				Abs. 1 Nr. 25a BauGB festgesetzt werden.									
5	Baumstandorte auf zunehmende Hitze vorbereiten durch ...	Grün- und Freiflächennutzung	<p>Anpassung der Pflanzbedingungen an zunehmende Hitze und Trockenheit</p> <p>Zur Anpassung an zunehmende Hitze und Trockenheit ist z.B. auf Folgendes zu achten: - Große Baumscheiben und Pflanzgruben- Schaffung von Niederschlagswasserzwischen speichern und Versickerungsmöglichkeiten- Verbesserung der Durchlässigkeit der oberen Bodenschicht durch Einsatz von Stauden und Boden deckern- Anlegen von Baumbeeten mit wasserspeichernden Substraten, um großer Trockenheit vorzubeugen- Einbau von Bewässerungsrohren</p>	InformationBeratungEigene AusführungVorgaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne		x	x	x		- Integriertes Klimaanpassungskonzept- Bodenschutzkonzept	- Multiplikatoren - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren	Schwammstädte:- Offenbach am Main- GrazForschungsprojekte:- „BlueGreenStreets“: Multifunktionale Straßen-raumgestaltung urbaner Quartiere-Leipzig BlauGrün	Stadtklimatologie und Grün (Menke et al. 2010)
			<p>Gewährleistung einer ausreichenden Pflege und Wasserversorgung auch in Trockenperioden</p> <p>Die Grünflächenunterhaltung in der Stadt muss insgesamt auf Herausforderungen durch längere Hitze und Trockenheit angepasst werden. Möglichkeiten sind die Einrichtung automatischer Bewässerungsanlagen oder der Einbezug der Bevölkerung für bspw. "Bewässerungskampagnen" während Hitze- und Trockenperioden.</p> <p>Durch ein Baumkataster kann während Hitzeperioden die Identifizierung von besonders pflegebedürftigen Bäumen erleichtert werden, um so eine rechtzeitige Bewässerung zu gewährleisten.</p>	Information Eigene Ausführung		x	x	x		- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Bodenschutzkonzept	- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Multiplikatoren	- Stadt Bochum (2022): Pilotprojekt zur Klimafolgenanpassung: Smarte Bewässerung für städtische Bäume (https://www.bochum.de/Pressemeldungen/31-Mai-2022/Pilotprojekt-zur-Klimafolgenanpassung-Smarke-Bewaesserung-fuer-staedtische-Baeume) - Baumkataster und Projekt "Natural-digital Ecosystems for Water Savings" der Stadt Frankfurt a.M. (Grünflächenamt)	

6	Auswahl geeigneter Pflanzenarten für Neupflanzungen	Grün- und Freiflächennutzung	<p>Pflanzung von hitzeresistenten und schattenspendenden Stadtbäumen</p> <p>Wichtig ist die Auswahl von hitze- und trockenoleranten Pflanzenarten bei Neupflanzungen (entsprechende Artenlisten gibt die Deutsche Gartenamtsleiterkonferenz GALK heraus). Dabei sollte im innerörtlichen Bereich zugunsten einer langfristigen Vitalität des Gehölzbestandes auch eine Verwendung nichtheimischer Arten möglich sein. Eine für die lokale Situation angepasste Auswahl entsprechender Arten kann u.a. in der Bauleitplanung getroffen werden. Entsprechende Festsetzungen sind über § 9 Abs. 1 Nr. 25a BauGB möglich.</p> <p>Bei Neupflanzungen ist auf allergenes Risiko und auf die Resilienz der Bäume (z.B. Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten) zu achten.</p>	<p>Information Bebauungsplan Vorgaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne</p>		x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept</p> <p>- Rad- und Fußverkehrskonzept</p>	<p>- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p> <p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p> <p>- Multiplikatoren</p>	<p>HLNUG (2023): Online-Tool KLIMPRACT Stadtgrün (https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/projekte/klimpact-stadtgruen/online-tool)</p>	<p>- Baumliste: Menke et al. 2010</p> <p>- GALK-Straßenbaumliste (Arbeitskreis Stadtbäume)</p>
			<p>Vorgabe der Pflanzenarten in grünordnungsplanerischen Festsetzungen bzw. im Bebauungsplan auf Basis entsprechender Artenlisten der Landschaftsplanung</p> <p>Plätze und Freiflächen mit einer guten Grünstruktur und schattenspendenden Bäumen sollten explizit als erhaltenswert ausgewiesen werden. Dies kann insbesondere im Landschaftsplan erfolgen, muss bei Bedarf dann auch in Bebauungspläne übernommen werden (z.B. durch § 9 Abs. 1 Nr. 25b BauGB Flächen für die Erhaltung von Bäumen, Sträuchern und sonstigen Bepflanzungen).</p>	<p>Landschaftsplan Bebauungsplan</p>		x	x		<p>- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p>		

7	Durchlüftungswege schaffen durch ...	Grün- und Freiflächnennutzung	Verbreiterung und Aktivierung von Durchlüftungswegen	<p>Vorhandene Durchlüftungswege, die ggf. teilweise im Querschnitt bereits bebaut oder aus sonstigen Gründen nur eingeschränkt ihre Funktion erfüllen, können durch geeignete Maßnahmen (z.B. Rückbau von Baukörpern (bspw. durch das Rückbau- und Entseigelungsgebot § 179 BauGB), Rücknahme hochwachsender Pflanzungen) erweitert und somit in ihrer Funktion verbessert werden. Gerade in bestehenden Quartieren trägt dies zu einer lokalen Verbesserung der Kaltluftausströmung bei.</p>	<p>Bebauungsplan Anordnung</p>		x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p>	<p>Praxisbeispiele aus der Praxishilfe "Klimaanpassung in der räumlichen Planung" des Umweltbundesamtes: - Landeshauptstadt Stuttgart (2001). Flächennutzungsplan 2010. - Landeshauptstadt Stuttgart (2009. Regionalplan - Stadt Kassel (2009). Flächennutzungsplan - Stadt Freiburg: Klimatisch-lufthygienische Prüfung von Bauflächen im Rahmen der Strategischen Umwelprüfung</p>	<p>Umweltbundesamt (2016). Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe). (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaanpassung-in-der-raeumlichen-planung)</p>
				<p>Sind entsprechende Stellen identifiziert, kann ggf. mit den Eigentümern das Gespräch gesucht und hinsichtlich der erwünschten Maßnahmen beraten werden. Soweit es sich um Grundstücke im Eigentum der Kommune handelt, können eigene Maßnahmen ergriffen werden.</p>	<p>Information Beratung Bebauungsplan Eigene Ausführung</p>		x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Private Gebäudeeigentümer - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p>		
				<p>Durch die Freilegung von Bachläufen können neue Kaltluftleitbahnen geschaffen werden. Entsprechende Maßnahmen können im Landschaftsplan vorbereitet werden. Eine Umsetzung ist z.B. im Rahmen von Ausgleichsmaßnahmen für Eingriffe möglich.</p>	<p>Landschaftsplan Bebauungsplan Eigene Ausführung</p>	x	x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Bodenschutzkonzept</p>	<p>- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p>		

8	Durchlüftungswege sichern durch ...	Grün- und Freiflächennutzung	Sicherung der Flächen mit Funktion eines Durchlüftungswegs	Durchlüftungswege werden durch die Aufnahme und Festsetzung in den Bauleitplänen rechtsverbindlich gesichert (z.B. als Grünfläche, Sport und Spielanlagen oder als landwirtschaftliche Fläche). Dafür kommen die Festsetzungsmöglichkeiten nach § 9 Abs. 1 BauGB in Betracht. Insbesondere über § 9 Abs. 1 Nr. 10 BauGB können relevante Flächen von Bebauung freigehalten werden.	Land-schafts-plan Bebauungsplan	x	x	x		- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Bodenschutzkonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren	Stadt Freiburg: Klimatisch-lufthygienische Prüfung von Bauflächen im Rahmen der Strategischen Umweltprüfung	
9	Optimierte Gebäudeausrichtung durch ...	Gebäude und Baumaterialien	Festsetzung der Gebäudeausrichtung im Bebauungsplan	Gebäudeausrichtung zur Nutzung der natürlichen Durchlüftungswege zur passiven Gebäudekühlung. Textliche Festsetzung im Bebauungsplan auf Grundlage des § 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB.	Bebauungsplan		x	x		- Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren	Flächennutzungsplan (Entwurf) Bremen 2025	Umweltbundesamt (2016). Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe). (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaanpassung-in-der-raeumlichen-planung)
10	Verwendung geeigneter Baumaterialien	Gebäude und Baumaterialien	Verwendung heller, hitzeresistenter Materialien bei Renovierungs- und Neubau-maßnahmen	Geeignete Baumaterialien zeichnen sich aus durch: - Ermöglichung von Dach-/ Fassadenbegrünung - Verwendung von stark reflektierenden Oberflächenmaterialien (Cool Colours) insbesondere bei Dächern (helle Dächer) führt dazu, dass mehr Sonnenstrahlung reflektiert wird und die Bebauung sich weniger stark erwärmt - Reduzierung der Wärmespeicherkapazität durch Wärmeisolierung und geeignete Fassadenmaterialien und Baustoffe Mit Hilfe einer Gestaltungssatzung gem. § 91 HBO können örtliche Regelungen zur äußeren Gestaltung baulicher Anlagen formuliert werden.	Informa-tion Bebauungsplan Satzung		x	x		- Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Private Gebäudeeigentümer - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2012). Städtebauliche Klimafibel. (http://www.staedtebauliche-klimafibel.de/)

11	Konzepte zu präventiven Ansätzen zur Vorbeugung gesundheitlicher Folgen von extremer Hitze	Menschliche Gesundheit	<p>Erarbeitung eines Hitzeaktionsplans</p> <p>Hitzeaktionspläne sind anhand der Empfehlungen des Hessischen Hitzeaktionsplans und der Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen des BMUV in interdisziplinärer Zusammenarbeit zu entwickeln. Mit Hilfe des Hitzeaktionsplans sind Maßnahmen zu entwickeln, um Menschen und Strukturen auf extreme Hitzeereignisse vorzubereiten. Hierbei sind die ortsspezifischen Gegebenheiten, beispielsweise auch die Erkenntnisse der Stadtklimaanalyse zu berücksichtigen.</p>	Konzepte	x	x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe 	- Hitzeaktionsplan der Stadt Offenbach	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von Hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit.
			<p>Berücksichtigung von Hitzeperioden als Szenario in der Alarm- und Einsatzplanung der Rettungsdienste</p> <p>Geeignete Maßnahmen sind beispielsweise: - Durchführung regelmäßiger Übungen mit relevanten Akteuren. Mindestens einzubinden sind Akteure der Feuerwehren, Not- und Rettungsdienste, Krankenhäuser, Ärztschaft/Praxen. - Einführung eines "Buddy-Systems". Während Hitzeperioden werden angemeldete Personen angerufen und nach dem Wohlbefinden gefragt. Falls ein Anruf wiederholt nicht beantwortet wird, wird versucht auf anderen Wegen einen Kontakt herzustellen. Diese Maßnahme richtet sich primär an Personen über 75 Jahren. Die Anmeldung kann telefonisch, per Mail oder über die Sozialdienste erfolgen. Diese Maßnahme kann ggf. in den Hitzeaktionsplan aufgenommen werden- Sicherstellung ausreichender personeller, finanzieller und technischer Ressourcen während Hitzeperioden</p>	Konzepte(Hitzeaktionsplan)		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung- Integriertes Klimaanpassungskonzept- Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt 	<ul style="list-style-type: none"> - Feuerwehr, Not- und Rettungsdienste, Krankenhäuser, Ärztschaft / Praxen 	Buddy-Systeme in Schweizer Kantonen Romandie, Tessin oder Genf	Ragetti, M; Rössli, M (2021): Hitze-Massnahmen Toolbox 2021 (https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/website/sektoren/gesundheits/hitze-massnahmen-toolbox-2021.pdf.download.pdf/Hitze-Massnahmen-Toolbox%202021.pdf)

12	Entlastung der Bevölkerung in hitzebelasteten Stadtquartieren durch ...	Menschliche Gesundheit	<p>Einsatz mobiler Grünanlagen</p> <p>Beispielsweise mit "mobilen Pflanzen (Kübelpflanzen)", welche in hitzebelasteten Stadtquartieren platziert werden.</p>	Eigene Ausführung		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Rad- und Fußverkehrskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Lokale Unternehmen - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 	Wanderbaumallee Hannover (BUND Region Hannover)	
			<p>Installation und Betrieb öffentlicher Trinkwasserspender</p> <p>Entsprechende Trinkwasserspender sollten insbesondere auf Plätzen mit hohem Publikumsverkehr wie öffentliche Plätze, ÖPNV-Haltestellen etc. zur Verfügung stehen.</p>	Eigene Ausführung		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Rad- und Fußverkehrskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Lokale Unternehmen - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 	Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW): Trinkbrunnen und Wasserspender im öffentlichen Raum. Berlin 2020.	<ul style="list-style-type: none"> - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Handlungsempfehlungen für die Erstellung von hitzeaktionsplänen zum Schutz der menschlichen Gesundheit. - Ragetti, M; Rössli, M (2021): Hitze-Massnahmen Toolbox 2021 (https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/webseite/sectoren/gesundheits/hitze-massnahmen-toolbox-2021.pdf.download.pdf/Hitze-Massnahmen-Toolbox%202021.pdf)
			<p>Empfehlungen zum hitzeangepassten Verhalten</p> <p>Über Informationsmaterialien und Beratungsangeboten können Empfehlungen weitergegeben werden, z.B. zu folgenden Themen:- Angepassenes Lüftungsverhalten während der kühleren Nacht- und Morgenstunden- Das Vermeiden der Nutzung von wärmeabgebenden Geräten- Einsatz von Verdunklungen bei direkter Sonneneinstrahlung</p>	InformationBeratung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung- Integriertes Klimaanpassungskonzept- Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt- Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Bürger*innen- Multiplikatoren- Lokale Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung: Klima, Mensch, Gesundheit. Kommunen vor Hitze schützen - beispielhafte Ansätze- Karlsruher Hitzeknigge (2021); Tipps für das richtige Verhalten bei Hitze. (https://web1.karlsruhe.de/service/Kuehle_Orte/)- Deutsche Feuerwehr Verband (2022); Einsatz in der Hitzewelle - was kann ich tun? (https://www.feuerwehrverband.de/app/uploads/2022/07/Der_Bundesfeuerwehrarzt_Einsatz_unter_Hitze_07.22.pdf) 	

			<p>Sensibilisierung und Schulung des Betreuungspersonals von empfindlichen Bevölkerungsgruppen</p> <p>Informationsaktivitäten sind z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Informationsflyer für Betreuungspersonal bereitstellen - Informationsveranstaltungen für Betreuungspersonal im Themenfeld „Hitzegefahren durch den Klimawandel“ anbieten. - Verteilung von Informationen per Post, Rundmails oder der Homepage der Kommune 	Information Beratung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplikatoren - Lokale Unternehmen - Bürger*innen - Feuerwehr, Not- und Rettungsdienste, Krankenhäuser, Ärzteschaft / Praxen 	WHO 2019: Gesundheitshinweise zur Prävention hitzebedingter Gesundheitsschäden.	
			<p>Installation technischer Beschattung</p> <p>Insbesondere in Bereichen mit hohem Publikumsverkehr wie Plätze, ÖPNV-Haltestellen etc.; durch Installation von Sonnensegeln in Fußgängerzonen; Sonnenschutzfolien auf transparenten Dächern, z.B. von Haltestellen.</p>	Konzepte (Hitzeaktionsplan) Vorgaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Rad- und Fußverkehrskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Bürger*innen - Lokale Unternehmen - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Landschaftsplaner, Bauherren 	HeatResilientCity (HRC) - Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten – Bewohnerorientierte Wissensgenerierung und Umsetzung in Dresden und Erfurt (2017-2021) (http://heatresilientcity.de/umsetzung/hitzeresiliente-haltestelle/)	
			<p>Bereitstellung von klimatisierten Aufenthaltsräumen in öffentlichen Gebäuden</p> <p>Bereitstellung von öffentlich zugänglichen Aufenthaltsräumen mit Ausgabe von kostenfreiem Wasser.</p>	Konzepte (Hitzeaktionsplan) Eigene Ausführung		x			<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Lokale Unternehmen - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 	Stadt Karlsruhe: Wasser in der Stadt - Karte (https://web1.karlsruhe.de/service/Kuehle_Orte/#)	
			<p>Kühle-Orte-Karten und Apps</p> <p>Im Falle von Hitzewellen könnte eine App auf Grundlage von Nutzerdaten Informationen über das individuelle Risiko, kostenfreie Trinkwasserentnahmestellen und die nächstgelegenen kühlen Orte der Stadt (wie zum Beispiel Bibliotheken, Gemeinde- und Kulturzentren etc.) aufzeigen und eine Route dorthin berechnen.</p>	Konzepte (Hitzeaktionsplan) Eigene Ausführung	x	x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Rad- und Fußverkehrskonzept- Integriertes Klimaanpassungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplikatoren- Bürger*innen 	<ul style="list-style-type: none"> - DWD: GesundheitsWetter-App- Stadt Karlsruhe: Kühle Orte - Karte (https://web1.karlsruhe.de/service/Kuehle_Orte/#)- Stadt Frankfurt: Kühle Orte Karte (https://frankfurt.de/themen/gesundheit/umwelt-und-gesundheit/umweltmedizin/extreme-hitze-tipps-zur-vermeidung-von-gesundheitsschaeden/kuehle-orte) 	

13	Informationen über Hitzebelastungen am Arbeitsplatz (insb. Freiluftberufe)	Menschliche Gesundheit	<p>Bewusstsein und Aufklärung zur Hitzebelastung am Arbeitsplatz über verschiedene Informationskanäle schaffen</p>	<p>Geeignete Informationsaktivitäten sind z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Hotzeflyer bei Ärzten und in Apotheken auslegen - Rundmails an kommunale Angestellte sowie kooperierende Unternehmen, um auf die Gefahren extremer Hotzeflyerlagen hinzuweisen - Mitteilungshefte und Homepages der Gemeinden nutzen 	Information Beratung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Integriertes Klimaanpassungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Multiplikatoren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Feuerwehr, Not- und Rettungsdienste, Krankenhäuser, Ärzte-schaft / Praxen 	<ul style="list-style-type: none"> - Bundesvereinigung Deutscher Apothekenverbände e.V. (ABDA): Informationsmaterial zu Maßnahmen bei Hitze. - DWD (2020): Hotzeflyer-Newsletter für Pflegeeinrichtungen (https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/gesundheits/hitze/hitzeflyer_node.html) - Bundeszentrale für gesundheitliche Aufklärung: Klima, Mensch, Gesundheit. Mediathek. 	<p>Ragetti, M; Rösli, M (2021): Hitze-Massnahmen Toolbox 2021. (https://www.nccs.admin.ch/dam/nccs/de/dokumente/website/sectoren/gesundheits/hitze-massnahmen-toolbox-2021.pdf.download.pdf/Hitze-Massnahmen-Toolbox%202021.pdf)</p>
			<p>Hinweise an Gewerbebetriebe hinsichtlich Gebieten/Quartieren, bei denen Vorsorge-maßnahmen zum hitzeangepassten Arbeiten wichtig sind</p>	<p>Informierung der Gewerbebetriebe über Standortbewertung in der Stadtklimaanalyse (Bewertung der Aufenthaltsqualität während der Arbeitszeit) und Information über geeignete Vorsorge-maßnahmen, z.B. zu:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sensibilisierung der Mitarbeiter und Schär-fung der Aufmerksamkeit - Bereitstellung von Getränken - Schutz vor über-mäßiger Sonneneinstrahlung 	Information Beratung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Integriertes Klimaanpassungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Lokale Unternehmen - Multiplikatoren 	<p>HEAT Shield. Informationen zum Umgang mit Hitze in verschiedenen Branchen. (https://www.heat-shield.eu/heat-shield-infographics)</p>	<p>Deutsche Allianz Klimawandel und Gesundheit (KLU-G) e.V. (https://hitze.info/hitzeschutz/hitze-in-der-arbeitswelt/)</p>
14	Berücksichtigung von thermischen Anforderungen bei Neubau- oder Modernisierungs-maßnahmen von sozialen Einrichtungen durch ...	Menschliche Gesundheit	<p>Berücksichtigung der Informationen über hitzebelastete Gebiete bei der Standortwahl von sozialen Einrichtungen</p>	<p>Eine Ansiedlung von sozialen Einrichtungen in hitzebelasteten Quartieren sollte möglichst vermieden werden.</p>	Bebauungsplan		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Soziale Stadt / Sozialer Zusammenhalt - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe 		
			<p>Einbau von Sonnenschutz-elementen zur Reduzierung der Wärmeeinstrahlung</p>	<p>Sonnenschutz kann erzielt werden durch z.B.:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sonnenschutz-elemente an Fenstern - Schattenspendende Überdachung - Keine großen Fensterflächen 	Information Beratung eigene Ausführung		x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Demographische Entwicklung 	<ul style="list-style-type: none"> - Private Gebäudeeigentümer - Bürger*innen - Lokale Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadt Dresden. Klimaangepasstes Bauen. Sommerhitze. (https://www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/klima-und-energie/klimaanpassung/inklilbau/klimaeinwirkungen/inklilbau_sommerhitze.php) 	<p>Deutsches Institut für Urbanistik (2017). Praxisratgeber Klimagerechtes Bauen. (https://difu.de/publikationen/2017/praxisratgeber-klimagerechtes-bauen)</p>

			Sicherung der Fließwege in Richtung Siedlung	Hier kann z.B. geprüft werden, ob wichtige Kaltluftbahnen über die Ausweisung als Schutzgebiet, z.B. des Landschaftsschutzes, verbindlich als unbebaubar definiert werden können. Zur Identifizierung solcher Kaltluftbahnen können Themenkarten zum Stadtklima oder Fachgutachten zum Landschaftsplan eine Hilfeleistung bieten.	Landschaftsplan Flächennutzungsplan	x					- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Bodenschutzkonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		
16	Sicherung einer angemessenen Durchgrünung und Gestaltung der Baugrundstücke	Raum- und Siedlungsstruktur	Festsetzung von Freiflächenanteilen bzw. reduzierter Versiegelung im Bebauungsplan	§ 9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB ermöglicht ausdrücklich Festsetzungen zum Schutz des Bodens, z.B. über die Einschränkungen der Versiegelung von Grundflächen (Stellplatzflächen, Zufahrten und Wegen) aus Gründen des Bodenschutzes wie aus Gründen der Anreicherung des Grundwassers. Darüber kann u.a. die Verwendung von wasser- und luftdurchlässigen Unterbauten und Aufbau (z.B. mit Rasensteinen, Schotterrasen oder Pflaster mit mehr als 30 % Fugenanteil) geregelt werden.	Bebauungsplan Vorhaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept- Integriertes Klimaanpassungskonzept- Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung- Bodenschutzkonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe- Private Gebäudeeigentümer	Landeshauptstadt Stuttgart (2020). Satzung über die Ermittlung der Anzahl baurechtlich notwendiger Kfz-Stellplätze für Wohnungen im Stadtgebiet	Umweltbundesamt (2016). Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe) (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaanpassung-in-der-raeumlichen-planung)
				Festsetzung der Größe und Ausgestaltung von Verkehrsflächen auf Grundlage von § 9 Abs. 1 Nr. 11 BauGB.	Bebauungsplan		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		
				Festsetzung der Unzulässigkeit von Stellplätzen, Garagen oder sonstigen Nebenanlagen auf den nicht überbaubaren Grundstücksflächen auf Grundlage von § 12 Abs. 6 u. § 14 BauNVO.	Bebauungsplan		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		
				Festsetzungen zur Errichtung von Stellplätzen und Garagen ausschließlich im Bereich der überbaubaren Grundstücksfläche, also in Geschossen der baulichen Anlage (z.B. Untergeschoss) auf Grundlage von §	Bebauungsplan		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		

				12 Abs. 4 u. Abs. 5 BauNVO.										
				Festsetzungen über das Maß der baulichen Nutzung (Grundflächenzahl) auf Grundlage von § 9 Abs. 1 Nr. 1 BauGB; § 16 Abs. 4 Nr. 1/4 BauNVO.	Bebauungsplan		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		
				Festsetzung der überbaubaren und nicht überbaubaren Grundstücksfläche auf Grundlage von § 9 Abs. 1 Nr. 2 BauGB.	Bebauungsplan		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe		
			Rechtsverbindliche Festsetzung im Bebauungsplan für die Erhaltung von Bäumen und Sträuchern in einem Bebauungsplanangebot oder Teilen davon	Eine Festsetzung ist auf Grundlage des § 9 Abs. 1 Nr. 25 BauGB in Verbindung mit § 178 BauGB möglich.	Bebauungsplan Vorgaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne		x	x			- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe	Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Stadtplanung und Stadterneuerung, Bebauungsplan mit Satzung über örtliche Bauvorschriften Hasenstraße Stuttgart-Süd (Stgt 232) - Entwurf.	
17	Förderung einer angemessenen Durchgrünung und Gestaltung der Baugrundstücke	Raum- und Siedlungsstruktur	Multifunktionale Nutzung von Flächen	Zur Klimaanpassung sollten verschiedene Funktionen wie beispielsweise Regenwasserbewirtschaftung und Verdunstungskühle durch in der Fläche gehaltenes Niederschlagswasser bis hin zum Aufenthalts- und Erholungsraum, Raum für Spiel und Sport und Lebensraum für Pflanzen und Tiere bei der Planung verknüpft werden, um den Flächenverbrauch klimarelevanter Flächen zu minimieren.	LandschaftsplanFlächennutzungsplanVorhaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne	x	x	x	x		- Innerstädtisches Entwicklungskonzept- Integriertes Klimaanpassungskonzept- Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung- Bodenschutzkonzept	- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren- Private Gebäudeigentümer- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe	MUST Städtebau GmbH: Klimaboulevard 2.0 (2021) https://klimazone-findorff.de/wp-content/uploads/2022/03/Klimaboulevard-Muenchener-Str.-2.0.pdf	Umweltbundesamt (2023). Dreifache Innenentwicklung. Definitionen, Aufgaben und Chancen für eine umweltorientierte Stadtentwicklung.

			<p>Die Festsetzung von Entsiegelungsmaßnahmen für Flächen, die künftig nicht mehr als Bau- oder Verkehrsflächen genutzt werden (sollen), kann als bodenschützende Ausgleichsmaßnahme über § 9 Abs. 1 Nr. 20 BauGB festgesetzt werden. Hier ist zu beachten, dass solche Maßnahmen aufgrund potenzieller Entschädigungsforderungen nur in Ausnahmefällen in Betracht kommen.</p>	Bebauungsplan		x	x			<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Bodenschutzkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 	Gestaltungssatzung "Freiraum und Klima" der Stadt Frankfurt a.M.	
			<p>Möglichkeit der Verpflichtung zur Beseitigung einer baulichen Anlage bzw. versiegelten Fläche, wenn diese den Festsetzungen des Bebauungsplans nicht mehr entsprechen und ihnen nicht angepasst werden können (Rückbau- und Entsiegelungsgebot § 179 BauGB)</p>	Bebauungsplan		x	x			<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Bodenschutzkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 		
			<p>Plätze und Freiflächen mit einer guten Grünstruktur und insbesondere schattenspendenden Bäumen sollten explizit als erhaltenswert ausgewiesen werden. Dies kann insbesondere im Landschaftsplan erfolgen, muss bei Bedarf dann auch in Bebauungspläne übernommen werden (z. B. durch § 9 Abs. 1 Nr. 25b BauGB Flächen für die Erhaltung von Bäumen, Sträucher und sonstigen Bepflanzungen).</p>	Landschaftsplan Bebauungsplan	x	x	x	x		<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Rad- und Fußverkehrskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren 		<p>HLNUG (2023): Online-Tool KLIMPRAX Stadtgrün https://www.hlnug.de/themen/klimawandel-und-anpassung/projekte/klimprax-stadtgruen/online-tool</p>

			<p>Textliche Festsetzung der Verwendung durchlässiger Versiegelungsmaterialien im Bebauungsplan</p>	<p>Dadurch kann Niederschlagswasser in der Fläche gehalten werden, wodurch Verdunstungskühle entstehen kann. Dies kann im Textlichen Teil festgehalten werden (Bspw.: "Im Geltungsbereich des Bebauungsplanes sind Stell- und Parkplätze sowie Fahr- und Gehwege auf den privaten Grundstücken nur in wasserdurchlässiger Ausführung (Pflaster mit mindestens 30 % Fugenanteil, Rasensteine, Schotterrasen o.ä.) zulässig."</p>	<p>Bebauungsplan</p>		x	x			<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Private Gebäudeeigentümer</p>	<p>Stadt Frankfurt (2023). Freiräume und Gebäude klimaanagepasst gestalten.</p>	
20	<p>Freihaltung von Transportbahnen für Frischluft- und Kaltluftzufuhr</p>	<p>Raum- und Siedlungsstruktur</p>	<p>Festsetzung der Mindestgröße von Baugrundstücken im Flächennutzungsplan bzw. Bebauungsplan</p>	<p>Die Festsetzung der Mindestgröße von Baugrundstücken (§ 9 Abs. 1 Nr. 3 BauGB) kann auf Basis der Analyse der Kaltluftströme die Durchlüftungsmöglichkeit eines Gebietes fördern. In der Begründung zum Flächennutzungsplan (§ 5 Abs. 5 BauGB) bzw. in der Begründung zum Bebauungsplan (§ 9 Abs. 8 BauGB) ist auf die lokalklimatische Bedeutung der betreffenden Flächen für die Frischluftversorgung des Siedlungsraumes besonders einzugehen.</p>	<p>Flächennutzungsplan Bebauungsplan</p>		x	x			<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren- Private Gebäudeeigentümer</p>	<p>Landkreis Emsland (2022). Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung. Ein praxisorientierter Leitfaden. Maßnahmen ST2 - Transportbahnen für Frischluftzufuhr freigehalten (S. 100)</p>	<p>Umweltbundesamt (2016). Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe). (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaanpassung-in-der-raeumlichen-planung)</p>
			<p>Vorgaben zur Freihaltung von Transportbahnen im Bebauungsplan festlegen</p>	<p>Die Freihaltung der Transportbahnen kann auf Basis der Analyse der Kaltluftströme durch bspw. die Festsetzung der Grundstücksgröße, der Bauweise (§ 22 Abs. 1, 2 BauNVO) und der überbaubaren Grundstücksfläche (§ 23 Abs. 1 i. V. m. § 16 Abs. 5 BauNVO), sowie der Höhe baulicher Anlagen (§ 16 Abs. 4, 5 i. V. m. § 18 Abs. 1 BauNVO) im Bebauungsplan festgelegt werden.</p>	<p>Bebauungsplan Vorgaben Wettbewerbe, Vorhaben- und Entwicklungspläne</p>	x	x	x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p>		

			<p>Anpassung der baulichen Dichte in klimatisch sensiblen Bereichen durch Festlegung im Bebauungsplan</p> <p>Die bauliche Dichte wird u.a. beeinflusst durch die bebaubare Grundfläche (§ 16 Abs. 2 Nr. 1 i. V. m. § 19 BauNVO), Anordnung und Größe der Verkehrsflächen (§ 9 Abs. 1 Nr. 11 BauGB) und Anordnung und Größe der Grünflächen (§ 9 Abs. 1 Nr. 15 BauGB).</p>	Bebauungsplan		x	x			<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept</p> <p>- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p> <p>- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p>		
			<p>Minimierung von negativen Beeinträchtigungen bei unvermeidbaren baulichen Querungen</p> <p>Beispielsweise sind Talquerung durch Brücken verträglicher als in Form von Dämmen.</p>	Fachplanung		x	x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept</p> <p>- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p> <p>- Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren</p>		
21	Klimafunktion von Flächen für angrenzende Siedlungsräume beachten	Raum- und Siedlungsstruktur	<p>Berücksichtigung der Klimafunktionen bei der Stadtentwicklung</p> <p>Über ein entsprechendes Fachgutachten zum Landschaftsplan kann die Berücksichtigung von klimarelevanten Funktionen zwischen unterschiedlichen Siedlungsräumen sichergestellt werden.</p>	Landschaftsplan	x	x	x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept</p> <p>- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p>	Zweckverband Raum Kassel (2007). Landschaftsplanung (https://www.zrk-kassel.de/landschaftsplanung/index.html)	Umweltbundesamt (2016). Klimaanpassung in der räumlichen Planung (Praxishilfe). (https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaanpassung-in-der-raeumlichen-planung)
			<p>Entscheidungsgrundlage zum klimagerechten Flächenmanagement erstellen</p> <p>Erstellung eines Konzeptes zum klimagerechten Flächenmanagement als Entscheidungsgrundlage für die Innen- und Außenentwicklung der Kommune. Dabei werden insbesondere die funktionalen Beziehungen der Flächen zueinander dargestellt. Bei der Erstellung können Fachgutachten zum Landschaftsplan oder Themenkarten zum Stadtklima als hilfreiche Grundlage dienen.</p>	LandschaftsplanFlächennutzungsplan	x	x	x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p>	Klimagerechtes Flächenmanagement Schwäbisch Gmünd (2019) (https://www.schwaebisch-gmuend.de/klimagerechtes-flaechenmanagement.html)	
			<p>Kooperation mit angrenzenden Kommunen zur Sicherung von Flächen mit Bedeutung für Frisch-/Kaltluftversorgung</p> <p>Beispielsweise durch die Schaffung langfristig gültiger Absprachen zwischen benachbarten Kommunen z. B. für das Freihalten von Frischluftschneisen oder Kaltluftentstehungsgebieten über kommunale Grenzen hinweg.</p>	Konzepte	x	x	x	x		<p>- Innerstädtisches Entwicklungskonzept</p> <p>- Integriertes Klimaanpassungskonzept</p>	<p>- Stadtverwaltung und Eigenbetriebe</p>	Zweckverband Raum Kassel (2007). Landschaftsplanung (https://www.zrk-kassel.de/landschaftsplanung/index.html)	

22	Optimierte Oberflächengestaltung zur Verminderung der Aufheizung und Erhöhung der Strapazierfähigkeit	Mobilität und Verkehr	<p>Verwendung heller, hitzeresistenter Materialien</p> <p>Beispielsweise: - Die Verwendung von stark reflektierenden Oberflächenmaterialien (Cool Colours) insbesondere bei Straßenbelägen führt dazu, dass mehr Sonnenstrahlung reflektiert wird. - Verzicht auf Dünnschichtbeläge bzw. an strapazierten Punkten robustere grobkörnige Straßenbeläge verwenden - Verwendung wasserdurchlässiger Beläge zur Nutzung der Verdunstungskühle</p>	Fachplanung Eigene Ausführung		x	x		- Integriertes Klimaanpassungskonzept	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Private Gebäudeeigentümer - Lokale Unternehmen 	<ul style="list-style-type: none"> - Region Köln/Bonn e.V. (2023). Dreifache Innenentwicklung. Praxishilfe für die Region Köln/Bonn. Praxisbeispiel Kronsberg, Hannover (s. S. 58) - Diverse Projekte der MUST Städtebau GmbH (https://www.must.nl/de/) 	<ul style="list-style-type: none"> - Umweltbundesamt (2017). Fachbroschüre Straßen und Plätze neu denken. - Umweltbundesamt (2023). Dreifache Innenentwicklung. Definitionen, Aufgaben und Chancen für eine umweltorientierte Stadtentwicklung.
			<p>Reduzierung von versiegelter Fläche</p> <p>Beispielsweise durch: - (Teil-)Entsiegelung von Parkplätzen - Begrünung von Verkehrsinseln</p>	Eigene Ausführung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Private Gebäudeeigentümer - Lokale Unternehmen 		
			<p>Verschattung von Verkehrsflächen</p> <p>Beispielsweise durch schattenspendende Begrünung von Straßen, Parkplätzen und anderen Verkehrsflächen. Bei der Verwendung von Straßenbäumen als schattenspendende Begrünung sollte bei stark befahrenen Straßenschluchten darauf geachtet werden, dass ausreichend Abstand zwischen den Bäumen eingeplant wird, sodass die Baumkronen nicht den lokalen Luftaustausch behindern. Des Weiteren sollte eine hitze- und schadstofftolerante Bepflanzung gewählt werden.</p>	Fachplanung Eigene Ausführung		x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> - Innerstädtisches Entwicklungskonzept - Integriertes Klimaanpassungskonzept - Aktionsplan Klimaschutz und Klimawandelanpassung - Rad- und Fußverkehrskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> - Stadtverwaltung und Eigenbetriebe - Architekten, Landschaftsplaner, Bauherren - Private Gebäudeeigentümer - Lokale Unternehmen 		

