

Klimaanalyse der Stadt Paderborn



Technische Dokumentation und Abschlussbericht

Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



Im Auftrag der

Stadt Paderborn

Amt für Umweltschutz und Grünflächen –

Klimamanagem

Dezember

24



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis.....	VI
1. Hintergrund und Anlass	1
2. Fachliche Grundlagen	3
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	3
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	7
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	9
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	14
4. Klima und Klimawandel im Raum Paderborn	17
4.1 Datengrundlage und Methodik.....	17
4.2 Gegenwärtiges Klima	21
4.3 Autochthone Wetterlagen	23
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen.....	23
5. Analysemethoden	27
5.1 Messkampagne	27
5.2 Numerische Modellierung	37
6. Analyseergebnisse	56
6.1 Messungen.....	56
6.2 Numerische Modellierungen	76
7. Klimaanalysekarten	92
8. Endprodukte	97
8.1 Grundlagen	97
8.2 Geometrische Basis.....	97
8.3 Bewertungskarten.....	98
8.4 Planungshinweiskarte	114
8.5 Ergänzende Endprodukte.....	120
8.6 Stadtklimamanagementsystem.....	123
9. Zusammenfassung & Ausblick.....	125
Quellenverzeichnis.....	126
Anhang.....	131



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	3
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018).....	4
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)	5
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	6
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	7
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	8
ABBILDUNG 7: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18)	11
ABBILDUNG 8: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE	14
ABBILDUNG 9: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCP) UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100. QUELLE: IPCC 2014 (ECP = EXTENDED CONCENTRATION PATHWAYS, ERGÄNZENDE SZENARIEN BIS 2300).	18
ABBILDUNG 10: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.....	21
ABBILDUNG 11: KLIMADIAGRAMM DER STADT PADERBORN FÜR DEN ZEITRAUM 1971 – 2000, BASIEREND AUF RASTERDATEN DES DWD (NACH DWD 2020)	21
ABBILDUNG 12: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN PADERBORN IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2022 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2020)	22
ABBILDUNG 13: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN PADERBORN FÜR DEN ZEITRAUM 1981 – 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION BAD LIPPSPRINGE (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2020).....	22
ABBILDUNG 14: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN PADERBORN (52 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1980 - 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION BAD LIPPSPRINGE (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2020)	23
ABBILDUNG 15: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN PADERBORN (ALLE RCP-SZENARIEN)	24
ABBILDUNG 16: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN IN PADERBORN (RCP 8.5) (DJF = WINTER, MAM = FRÜHLING, JJA = SOMMER, SON = HERBST).....	25
ABBILDUNG 17: URBANER STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AUF DER BRACHFLÄCHE AN DER BAHNHOFSTRAßE IN PADERBORN MIT BLICKRICHTUNG SÜD (LINKS) UND ALS GOOGLE EARTH-DRAUFSICHT AUS 1,5 KM HÖHE; ROTER PIN MARKIERT DEN STANDORT (RECHTS).....	28
ABBILDUNG 18: RURALER STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AUF DEM GOLFPLATZ HAXTERHÖHE IM SÜDEN PADERBORNS MIT BLICKRICHTUNG NORD (LINKS) UND ALS GOOGLE EARTH-DRAUFSICHT AUS 1,5 KM HÖHE; GRÜNER PIN MARKIERT DEN STANDORT (RECHTS).	29
ABBILDUNG 19: MOBILE MESSROUTE IM STADTGEBIET PADERBORN (ROTE LINIE) SOWIE URBANE (ROTER PIN) UND RURALE (GRÜNER PIN) MESSSTATION.	30
ABBILDUNG 20: ANBRINGUNG DES TEMPERATURSENSORS FÜR DIE MESSFAHRT AM PKW (LINKS), HÖHE ÜBER GRUND (MITTE) UND SEITLICHER ABSTAND VOM FAHRZEUG (RECHTS).....	31
ABBILDUNG 21: STÜNDLICHE WETTERDATEN DER URBANEN UND RURALEN KLIMAMESSTATION IN PADERBORN SOWIE DER DWD-REFERENZSTATION IN BAD LIPPSPRINGE AM TAG DER MESSFAHRTEN (24./25.08.2021).	32
ABBILDUNG 22: STANDORTE DER VERTIKALSONDIERUNG AM 11./12.08.2021 AN DER URBANEN STATION (LINKS, BLICKRICHTUNG SÜD) UND AM 12./13.08.2021 AN DER RURALEN STATION (RECHTS, BLICKRICHTUNG WEST). ..	33



ABBILDUNG 23: (A) MESSSYSTEM AUS HEXAKOPTER DJI FLAMEWHEEL 550 MIT ANGEHÄNGTER RADIOSONDE DFM-06 VON GRAW. (B) HEXAKOPTER FLAMEWHEEL 550 NAHANSICHT MIT AUFHÄNGUNG FÜR FOTOKAMERA DER MARKE GOPRO UND INFRAROTKAMERA VON FLIR.....	34
ABBILDUNG 24: STÜNDLICHE WETTERDATEN DER URBANEN UND RURALEN KLIMAMESSSTATION IN PADERBORN SOWIE DER DWD-REFERENZSTATION IN BAD LIPPSPRINGE AM TAG DER VERTIKALSONDIERUNG AM URBANEN MESSSTANDORT (11./12.08.2021).....	36
ABBILDUNG 25: STÜNDLICHE WETTERDATEN DER URBANEN UND RURALEN KLIMAMESSSTATION IN PADERBORN SOWIE DER DWD-REFERENZSTATION IN BAD LIPPSPRINGE AM TAG DER VERTIKALSONDIERUNG AM RURALEN MESSSTANDORT (12./13.08.2021).....	37
ABBILDUNG 26: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	40
ABBILDUNG 27: IDEALISierter TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES.....	41
ABBILDUNG 28. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE)	43
ABBILDUNG 29: MODELLGEBIET DER SKA, ZUR ORIENTIERUNG IST EIN LUFTBILD AUS DEM WMS DER GEOBASIS NRW DARGESTELLT.	44
ABBILDUNG 30: DIGITALES GELÄNDEMOMELL FÜR DAS UNTERSUCHUNGSGEBIET.	45
ABBILDUNG 31: MODELLEINGANGSDATEN „LANDNUTZUNGSKLASSEN“ FÜR DEN STATUS QUO IN EINEM AUSSCHNITT DER PADERBORNER KERNSTADT (LINKS) UND FÜR DIE ZUKUNFTS-SZENARIEN IN EINEM AUSSCHNITT MIT MÖGLICHEN ENTWICKLUNGEN IM UMFELD VOM GEWERBEGEBIET BENHAUSER FELD (MITTE).	46
ABBILDUNG 32: BEISPIELBILD ZUR IDENTIFIZIERUNG VON FLÄCHENZWILLINGEN ZUR RANDOMISIERTEN BEFÜLLUNG VON MISCHPIXELFLÄCHEN.....	47
ABBILDUNG 33: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION.....	48
ABBILDUNG 34: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992)	49
ABBILDUNG 35: AUSGANGSPROFILE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE BESTANDSSITUATION (BLAU) SOWIE FÜR DIE SZENARIEN „SCHWACHER“ (ORANGE) UND „STARKER“ KLIMAWANDEL (ROT)	49
ABBILDUNG 36: SOMMERTAGE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 23.06.2021 BIS 30.09.2021 AN DEN TEMPORÄREN MESSSTATIONEN IN DER INNENSTADT PADERBORNS, DEM GOLFPLATZ HAXTERHÖHE UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IN BAD-LIPPSPRINGE.	57
ABBILDUNG 37: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 23.06.2021 – 30.09.2021 FÜR ALLE STUNDEN AN DER DWD-REFERENZSTATION BAD-LIPPSPRINGE (LINKS), AN DER URBANEN KLIMAMESSSTATION PADERBORN (MITTE) UND AN DER RURALEN KLIMAMESSSTATION PADERBORN (RECHTS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRISSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN.....	59
ABBILDUNG 38: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 23.06.2021 – 30.09.2021 FÜR ALLE NACHTSTUNDEN (19-07 UHR MESZ) AN DER DWD-REFERENZSTATION BAD-LIPPSPRINGE (LINKS), AN DER URBANEN KLIMAMESSSTATION PADERBORN (MITTE) UND AN DER RURALEN KLIMAMESSSTATION PADERBORN (RECHTS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRISSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN.	59
ABBILDUNG 39: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 23.06.2021 – 30.09.2021 FÜR ALLE AUTOCHTHONEN NACHTSTUNDEN (19-07 UHR MESZ) AN DER DWD-REFERENZSTATION BAD-LIPPSPRINGE (LINKS), AN DER URBANEN KLIMAMESSSTATION PADERBORN (MITTE) UND AN DER RURALEN KLIMAMESSSTATION PADERBORN (RECHTS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRISSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN.	60
ABBILDUNG 40: MODELLIERTE NÄCHTLICHE WINDRICHTUNG UND -GESCHWINDIGKEIT VON 04:00 UHR AM RURALEN UND URBANEN MESSSTANDORT ZU EINER AUTOCHTHONEN WETTERSITUATION.	61



ABBILDUNG 41: SONNENSCHENDAUER UND BEDECKUNGSGRAD ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VON 11.-13.08.2021, ERMITTELT AN DER DWD-STATION BAD-LIPPSPRINGE.....	62
ABBILDUNG 42: GEMESSENE STÜNDLICHE WINDGESCHWINDIGKEITEN UND -RICHTUNGEN AUF 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VON 11.-13.08.2021, ERMITTELT AN DEN TEMPORÄREN MESSSTATIONEN IN DER INNENSTADT PADERBORNS, DEM GOLFPLATZ HAXTERHÖHE UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IN BAD-LIPPSPRINGE.....	62
ABBILDUNG 43: GEMESSENE STÜNDLICHE TEMPERATUREN AUF 2 M UND 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VON 11.-13.08.2021, ERMITTELT AN DEN TEMPORÄREN MESSSTATIONEN IN DER INNENSTADT PADERBORNS, DEM GOLFPLATZ HAXTERHÖHE UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IN BAD-LIPPSPRINGE.	63
ABBILDUNG 44: GEMESSENE STÜNDLICHE RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT AUF 2 M UND 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VON 11.-13.08.2021, ERMITTELT AN DEN TEMPORÄREN MESSSTATIONEN IN DER INNENSTADT PADERBORNS, DEM GOLFPLATZ HAXTERHÖHE UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IN BAD-LIPPSPRINGE.....	64
ABBILDUNG 45: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT DER ERSTEN NACHHÄLFTE (AUF 23 UHR NORMIERT) UND DEM FITNAH-MODELLLAUF VON 23 UHR.....	65
ABBILDUNG 46: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT DER ZWEITEN NACHHÄLFTE (AUF 04 UHR NORMIERT) UND DEM FITNAH-MODELLLAUF VON 04 UHR.....	67
ABBILDUNG 47: VERGLEICH DER VERTIKALPROFILE DER TEMPERATUR ZU VIER NÄCHTLICHEN AUFSTIEGSSTUNDEN DES 12./13.08.2021 AM RURALEN STANDORT. DIE BLAUEN HORIZONTALEN LINIEN DEUTEN DIE ABGESCHÄTZTE HÖHE DER KALTLUFTSCHICHT AN.	69
ABBILDUNG 48: VERGLEICH DER VERTIKALPROFILE DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZU VIER NÄCHTLICHEN AUFSTIEGSSTUNDEN DES 12./13.08.2021 AM RURALEN STANDORT.....	70
ABBILDUNG 49: VERGLEICH DER VERTIKALPROFILE DER WINDRICHTUNG ZU VIER NÄCHTLICHEN AUFSTIEGSSTUNDEN DES 12./13.08.2021 AM RURALEN STANDORT.	70
ABBILDUNG 50: VERGLEICH DER VERTIKALPROFILE DER TEMPERATUR ZU VIER NÄCHTLICHEN AUFSTIEGSSTUNDEN DES 11./12.08.2021 AM URBANEN STANDORT.	71
ABBILDUNG 51: VERGLEICH DER VERTIKALPROFILE DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZU VIER NÄCHTLICHEN AUFSTIEGSSTUNDEN DES 11./12.08.2021 AM URBANEN STANDORT.....	72
ABBILDUNG 52: VERGLEICH DER VERTIKALPROFILE DER WINDRICHTUNG ZU VIER NÄCHTLICHEN AUFSTIEGSSTUNDEN DES 11./12.08.2021 AM URBANEN STANDORT.	73
ABBILDUNG 53: ORTHOGONAL ZUM ERDBODEN GERICHTETE FOTO- UND INFRAROTAUFNAHMEN VERSCHIEDENER ZEITEN AM URBANEN STANDORT IN PADERBORN AM 11./12.08.2021.....	74
ABBILDUNG 54: ORTHOGONAL ZUM ERDBODEN GERICHTETE FOTO- UND INFRAROTAUFNAHMEN VERSCHIEDENER ZEITEN AM RURALEN STANDORT IN PADERBORN AM 12./13.08.2021.....	75
ABBILDUNG 55: KARTE 1: BODENNAHE NÄCHTL. LUFTTEMPERATUR IM STATUS QUO IN PADERBORN (VERKÜRZTE LEGENDE).	80
ABBILDUNG 56: KARTE 13: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM STATUS QUO IN PADERBORN (VERKÜRZTE LEGENDE).	82
ABBILDUNG 57: KARTEN 2 & 3: BODENNAHE NÄCHTL. LUFTTEMPERATUR IN DEN SZENARIEN SCHWACHER KLIMAWANDEL (LINKS) UND STARKER KLIMAWANDEL (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	83
ABBILDUNG 58: KARTE 10: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO IN PADERBORN (VERKÜRZTE LEGENDE).	85
ABBILDUNG 59: KARTE 4: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO IN PADERBORN, WINDPFEILE AGGREGIERT AUF 500M AUFLÖSUNG (VERKÜRZTE LEGENDE).	86
ABBILDUNG 60: AUSSCHNITT: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO IN PADERBORN RUND UM DIE BENHAUSER STRASSE (WINDPFEILE AGGREGIERT AUF 50M AUFLÖSUNG).	87
ABBILDUNG 61: KARTE 12: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM SZENARIO STARKER KLIMAWANDEL IN PADERBORN (VERKÜRZTE LEGENDE).	88



ABBILDUNG 62: KARTE 7: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IM STATUS QUO IN PADERBORN (VERKÜRZTE LEGENDE).	90
ABBILDUNG 63: KARTEN 8 & 9: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DEN SZENARIEN SCHWACHER KLIMAWANDEL (LINKS) UND STARKER KLIMAWANDEL (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	91
ABBILDUNG 64: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN	93
ABB. 65: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTABFLÜSSEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS OHNE UND RECHTS MIT ENTSPRECHENDER AUSWEISUNG)	94
ABBILDUNG 66: KARTE 16: KLIMAANALYSEKARTE (IST-ZUSTAND) FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	95
ABBILDUNG 67: KARTE 17: KLIMAANALYSEKARTE (SZENARIO SCHWACHER KLIMAWANDEL) FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	95
ABBILDUNG 68: KARTE 18: KLIMAANALYSEKARTE (SZENARIO STARKER KLIMAWANDEL) FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	96
ABBILDUNG 69: BEISPIEL: LINKS EIN AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS EINER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	98
ABBILDUNG 70: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008)	99
ABBILDUNG 71: 5-STUFIGE BEWERTUNGSSKALA FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM IN DER BEWERTUNGSKARTE NACHT	101
ABBILDUNG 72: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.	102
ABBILDUNG 73: KARTE 19: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	106
ABBILDUNG 74: KARTE 20: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM SZENARIO P1 FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	107
ABBILDUNG 75: KARTE 21: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM SZENARIO P2 FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	108
ABBILDUNG 76: KARTE 22: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	111
ABBILDUNG 77: KARTE 23: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM SZENARIO P1 FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS (VERKÜRZTE LEGENDE).	112
ABBILDUNG 78: KARTE 24: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM SZENARIO P2 FÜR EINEN AUSSCHNITT PADERBORNS(VERKÜRZTE LEGENDE).	113
ABBILDUNG 79: LEGENDENELEMENTE DER PLANUNGSHINWEISKARTE	117
ABBILDUNG 80: KARTE 25: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE FÜR PADERBORN (VERKÜRZTE LEGENDE).	117
ABBILDUNG 81: ERGÄNZENDER LAYER FÜR DIE PLANUNGSHINWEISKARTE MIT VULNERABLEN EINRICHTUNGEN UND AUSGLEICHSRÄUMEN IN PADERBORN.	121
ABBILDUNG 82: VERTEILUNG DER HANDLUNGSBEDARFE INNERHALB DER ORTE MIT HOHER VULNERABILITÄT	122
ABBILDUNG 83: VERTEILUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG INNERHALB DER ORTE MIT HOHER VULNERABILITÄT	123
ABBILDUNG 84: BEISPIELBILD EINER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB EINES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	124



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN. ..	13
TABELLE 2: BEWERTUNG DER STATISTISCHEN SIGNIFIKANZ ANHAND DES TREND-/RAUSCHVERHÄLTNISSES.....	20
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN PADERBORN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	24
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN PADERBORN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = = MEDIAN).....	26
TABELLE 5: STANDORTE, MESSZEITRÄUME UND INSTRUMENTIERUNG WÄHREND DER IM SOMMER 2021 IM RAHMEN DER KLIMAANALYSE PADERBORN DURCHGEFÜHRTEN METEOROLOGISCHEN MESSKAMPAGNE.	27
TABELLE 6: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	39
TABELLE 7: ENTWICKELTE SZENARIEN FÜR PADERBORN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.	43
TABELLE 8: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS IN PADERBORN ALS BASIS FÜR DIE REFERENZSITUATION SOWIE DIE ZUKUNFTSSZENARIOS	47
TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	50
TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	51
TABELLE 11: ERGEBNISSE DER QUALITÄTSSICHERUNG	52
TABELLE 12: BEZEICHNUNG UND KRITERIEN FÜR KLIMATOLOGISCHE KENNTAGE.....	56
TABELLE 13: IM PROJEKT STADTKLIMAANALYSE PADERBORN ERZEUGTE KARTEN	76
TABELLE 14: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	93
TABELLE 15: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH TAGESZEIT UND STRUKTURTYP.	100
TABELLE 16: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM STATUS QUO UND IM ZUKUNFTSSZENARIO.	105
TABELLE 17: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR WOHN- UND GEWERBERAUM.	114
TABELLE 18: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE BELASTUNGEN FÜR DEN WIRKRAUM.....	114
TABELLE 19: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHsRAUM.	115
TABELLE 20: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE BEDEUTUNGEN FÜR DEN AUSGLEICHsRAUM.	115
TABELLE 21: FLÄCHENANTEILE DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSBEDARFE IM WIRKRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	118
TABELLE 22: FLÄCHENANTEILE DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IM AUSGLEICHsRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	119



1. Hintergrund und Anlass

Das Schutzgut Klima ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab. Für eine fundierte Erarbeitung einer Strategie in der Klimaanpassung ist unter anderem die Klimaanalyse mit der Beurteilung des Status Quo (zum Stichtag der zugrundeliegenden Daten) des Klimas sowie von Klimaszenarien und daraus einhergehenden Planungsempfehlungen eine wichtige Grundlage. Die Klimaanalyse NRW (LANUV, 2018) gab bisher einen Anhaltspunkt über die gesamtstädtischen, feldhaften Zusammenhänge des Klimas in Paderborn und Umgebung. Allerdings ist der Bezugsmaßstab der Klimaanalyse NRW zu grobskalig, um für städtebauliche Entwicklungen oder andere Fragestellungen auf einem Maßstab, der geringer als der eines Flächennutzungsplans ist, Anwendung finden zu können. Des Weiteren ist eine vorhandene Klimatopkarte der Stadt Paderborn auf Basis einer Messkampagne aus dem Jahr 1990 sowohl auf einem älteren Stand der Technik als auch auf ein überholtes Stadtbild bezogen, sodass sie heutigen Ansprüchen an Planungsprozesse nicht mehr genügt (Bangert 1990).

Der Umgang mit „Hitze in der Stadt“ ist eins der relevanten Themen für Paderborn, da in einigen Stadtgebieten bereits heute hohe Wärmebelastungen auftreten und sich in Zukunft steigende Temperaturen sowie häufigere Hitzeereignisse abzeichnen. Um Strategien bzw. Maßnahmen zur Minderung der Belastung und Anpassung an die erwartenden Klimaveränderungen zu entwickeln, bedarf es räumlich genauer Informationen zur bioklimatischen Situation in Paderborn, die mit der vorliegenden Klimaanalyse gegeben werden. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 10 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Paderborner Stadtklimas. Ein wichtiges Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der daraus abgeleiteten Planungshinweiskarte soll unter anderem die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen erforderliche kleinräumige Klimamodellierungen darstellen.



Der vorliegende Bericht gibt zunächst einen Überblick über die fachlichen Grundlagen zum Themenkomplex Stadtklima (Kap. 2). In Kapitel 3 folgt die Dokumentation des Bearbeitungs- und Beteiligungsprozesses. Die übergeordnete Einordnung der Stadtklimaanalyse für Paderborn erfolgt im Kapitel zum Thema Klima und Klimawandel (Kap. 4). Danach wird die Methodik der Messkampagne und der Stadtklimaanalyse (Kap. 5) erläutert. Die Ergebnisse der Messungen und Modellrechnungen werden im anschließenden Kapitel (Kap. 6) dargestellt und werden dabei anhand der entstandenen Karten zu den einzelnen Modellergebnissen für die Ist-Situation und die beiden Zukunftsszenarien erläutert (Übersicht siehe Tabelle 13). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, deshalb wurden die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in drei synthetischen „Klimaanalysekarten“ (wieder jeweils für die Ist-Situation und die zwei Zukunftsszenarien) zusammengefasst (Kap. 7). Diese Karten stellen zusammengefasst die nächtliche Situation in einer Stadt auf der Sachebene dar. Um daraus planerische Konsequenzen ableiten zu können ist allerdings eine zusammenfassende Betrachtung von Tag- und Nachtsituation auf der sog. „Wertebene“ notwendig. Daher beschreibt Kapitel 8 wie die Ergebnisse der Sachebene auf die Wertebene überführt wurden, in dem zunächst jeweils die Tag- und die Nachtsituation mit Hilfe sogenannter Bewertungskarten analysiert wurden. Abschließend wurde aus den Bewertungskarten des Ist-Zustandes eine Planungshinweiskarte erstellt, die etwaigen Handlungsbedarf aus klimaökologischer Sicht aufgezeigt. (Kap. 8).

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kap. 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 3) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten (Kap. 0). 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 subsummieren:

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

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

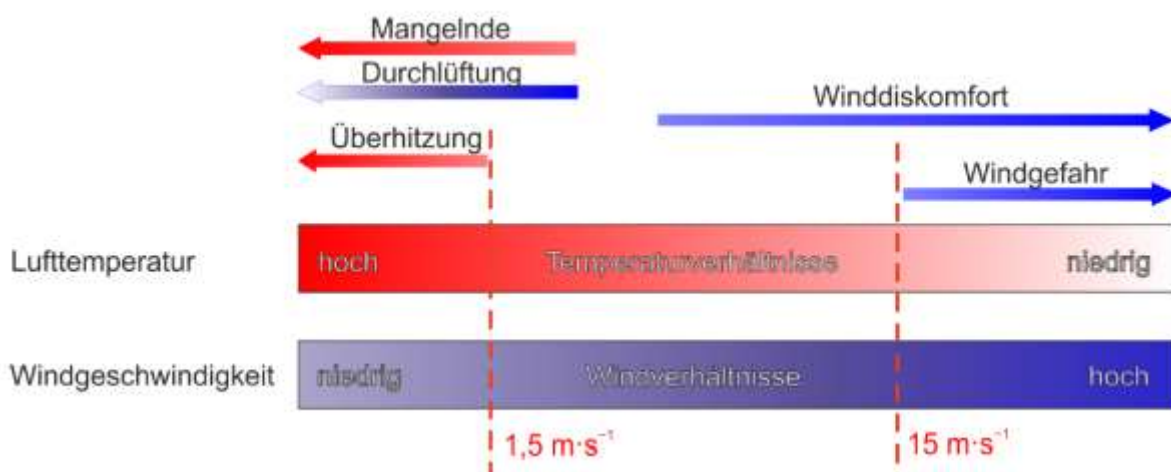


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

Als quantitativ arbeitende Fachdisziplin haben sich in der Stadt- und Regionalklimatologie in den letzten Jahrzehnten verschiedene humanbiometeorologische Kenngrößen durchgesetzt, mit deren Hilfe sich die Auswirkungen dieser Belastungen auf das menschliche Wohlbefinden ermitteln lassen. Im deutschsprachigen Raum ist insbesondere die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) zu nennen (Höppe und Mayer 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI: Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können letztlich physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Da die Indizes hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerteroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

Sowohl die PET als auch der UTCI sind für die Verwendung im Freien und unter Einstrahlungsbedingungen (also für die Tagsituation) optimiert. In Innenräumen – in denen sich Menschen in den Industrieländern zu ca. 90 % der Zeit zum Wohnen und Arbeiten aufhalten – wird in aller Regel auf die Raumtemperatur als maßgebliche Größe Bezug genommen: *„Die Wechselwirkung zwischen dem Außenklima und dem Innenraumklima erfolgt heute aufgrund der hohen Wärmedämmung üblicher Wohngebäude fast ausschließlich über den Luftwechsel, wobei die Lufttemperatur der Außenluft die entscheidende Größe ist“* (VDI 2008a, 24). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, Bundesregierung 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26°C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitsgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit seiner Angestellten möglichst zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung jedoch nicht ableiten.

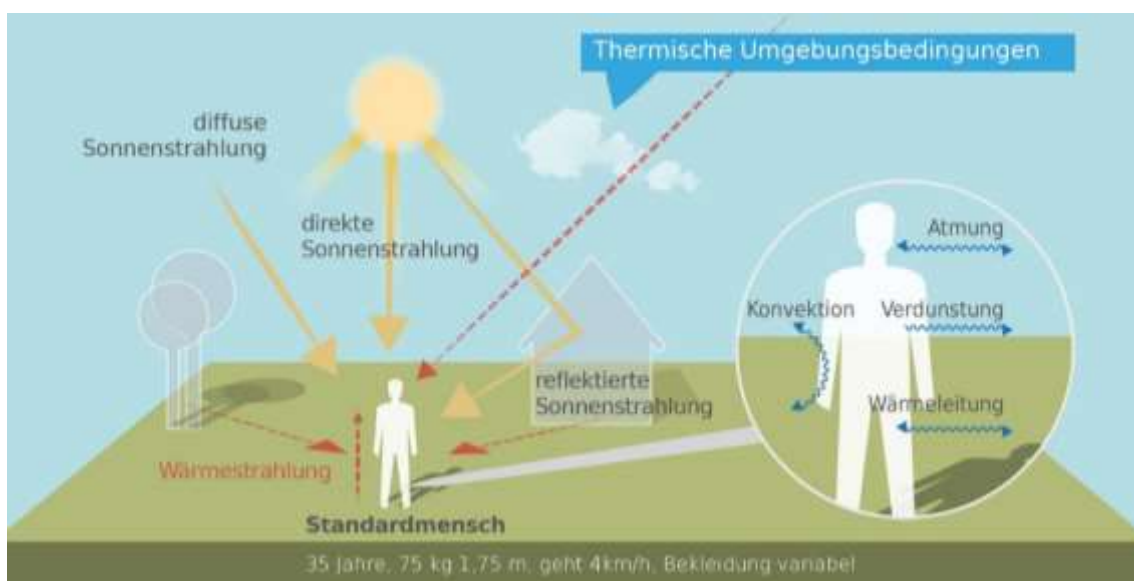


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

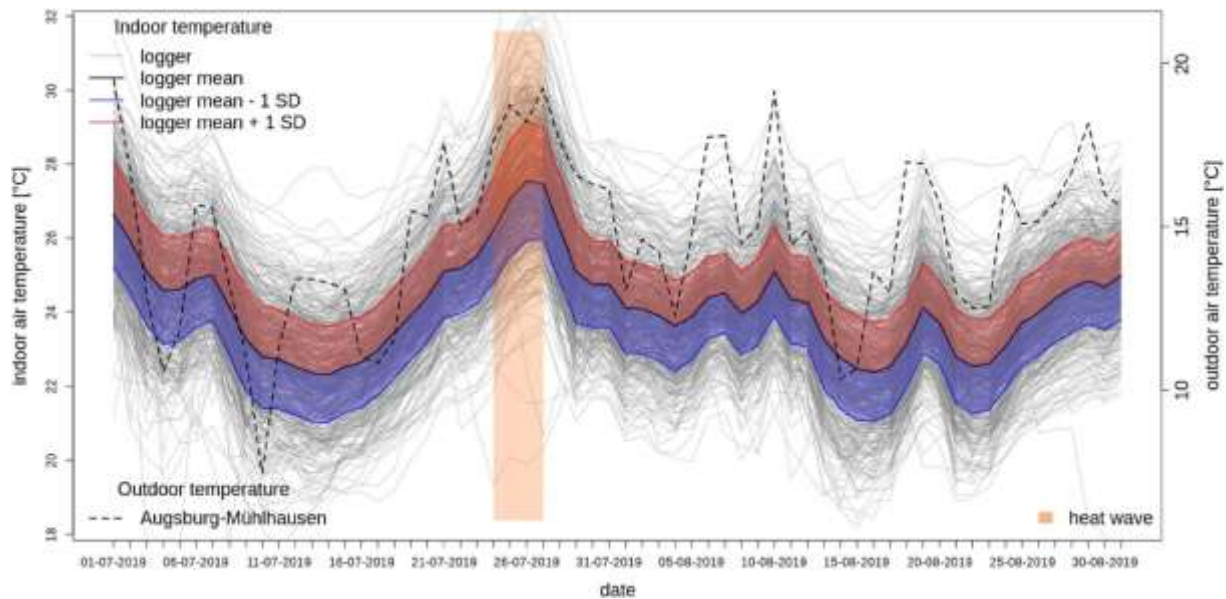


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Während in Arbeitsstätten hohe Temperaturen am Tage zu Belastungen führen, stellen in privaten Wohnräumen insbesondere hohe Nachttemperaturen eine große Herausforderung dar: *„Durch erholsamen Schlaf, der nur bei günstigen thermischen Bedingungen erreicht wird, kann sich der Organismus von thermischen Belastungen des Tages regenerieren. Ungünstige Klimabedingungen während der Nachtstunden können dagegen zu einer Akkumulation von Belastungen führen. Dabei sind in der Regel zu warme Bedingungen als ungünstig anzusehen.“* (VDI 2008a, 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürger:innen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass, unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C; Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steining 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 (Laureant 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).

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 $> 20^{\circ}\text{C}$ ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet (Abbildung 5). Die Jahre 2003, 2006 und 2015 zeigten bundesweit mit 6.000 – 7.000 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen die höchsten Übersterblichkeiten (An der Heiden et al. 2019). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

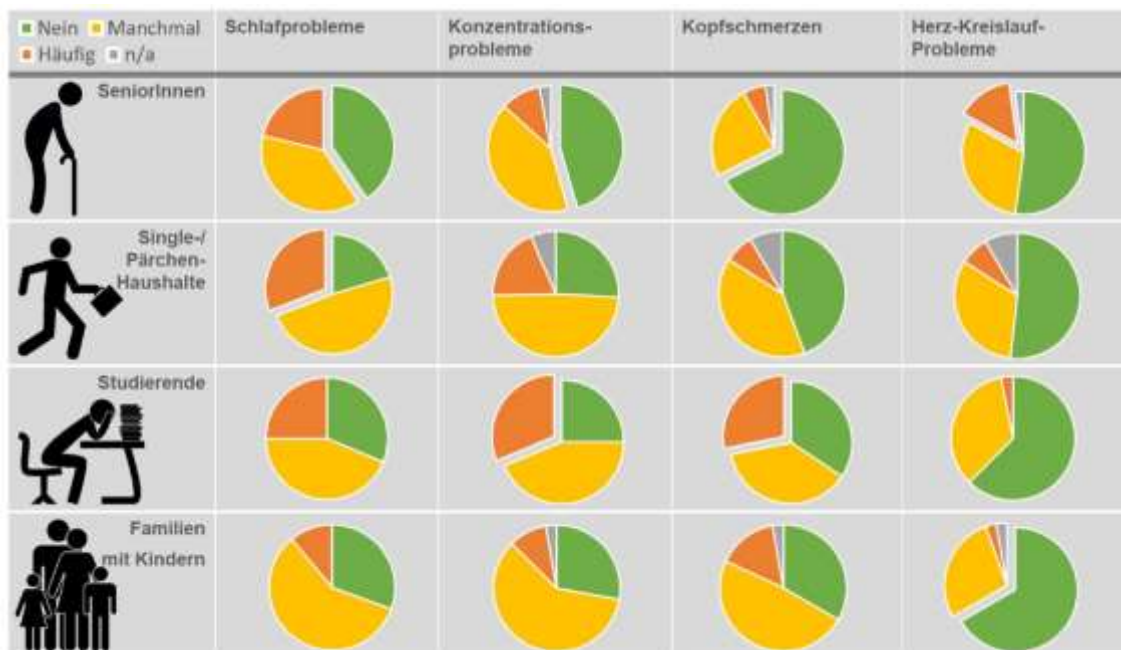


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

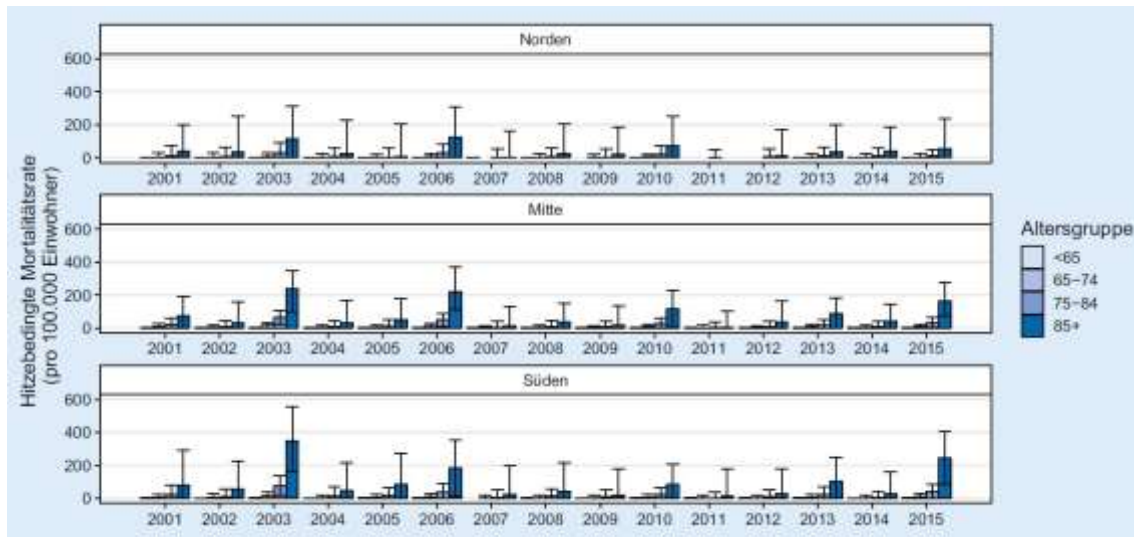


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (vgl. Groß 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (12/2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe 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 Advektion von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen 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.

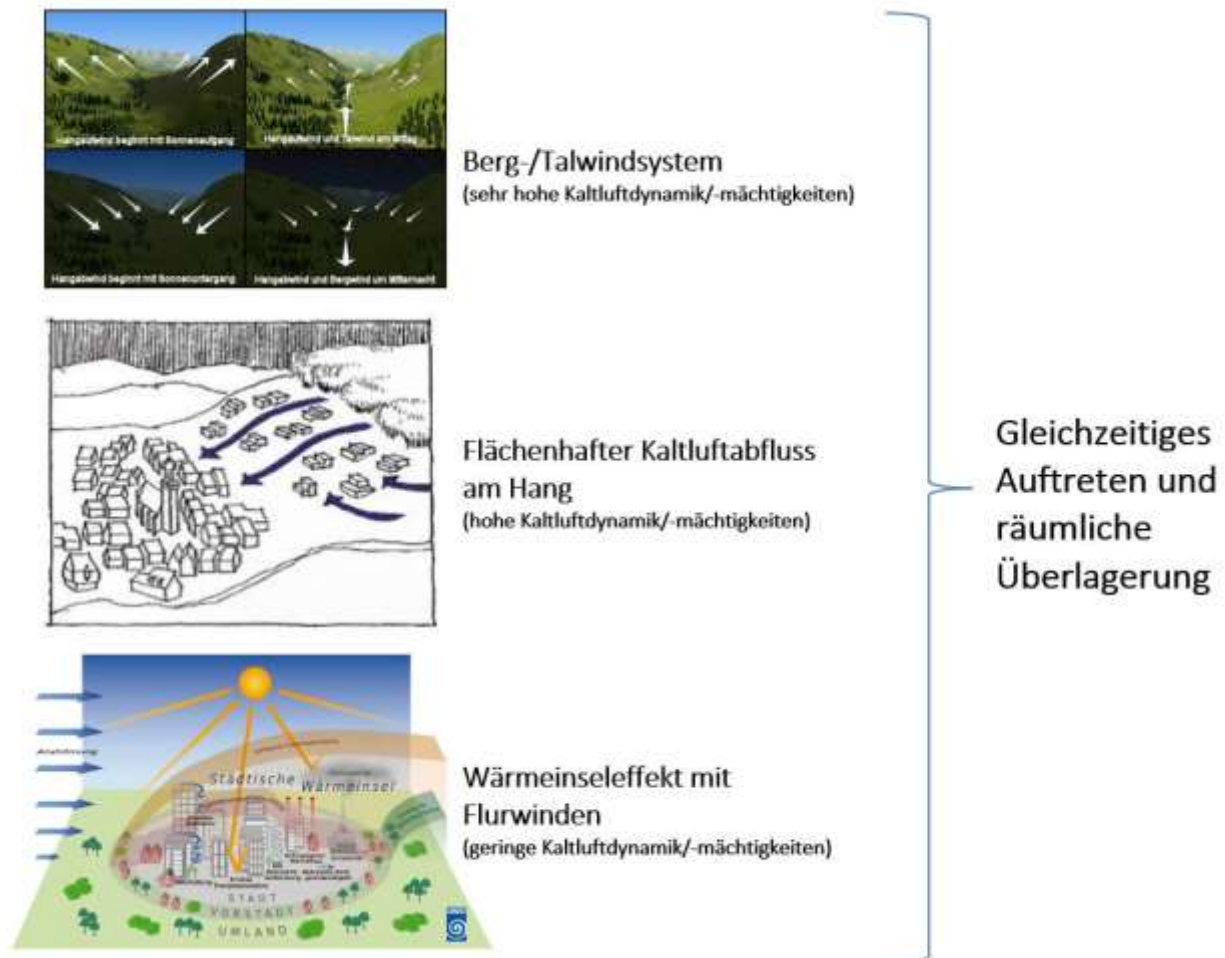


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017(oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

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

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen



und insbesondere Berg-Talwindsystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2\text{ m/s}$ sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindsystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003). Kaltluftproduktionsraten, Kaltluftmächtigkeiten und Kaltluftvolumenströme, die der Ableitung des oben beschriebenen Kaltluftsystems zugrunde liegen, sind relative Größen, die demnach auch in einer klimawandelbedingt wärmeren Atmosphäre der Zukunft unverändert bestehen bleiben (wenn sie nicht durch Flächennutzungsänderungen wie z.B. großflächige Gewerbegebiete oder Siedlungserweiterungen modifiziert werden). Selbiges gilt in der Konsequenz für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen, wobei die Kaltluft im Klimawandel tendenziell wärmer als gegenwärtig ist und damit weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen beiträgt. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnung zu tragen. Bis entsprechende neue Verfahren etabliert sind, entspricht es dem Stand der Technik, die Auswirkungen des Klimawandels vor allem an den thermischen Kenngrößen wie der Lufttemperatur und/oder humanbioklimatischen Indizes wie der PET festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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

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



- VDI 3785 Blatt 1 (2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- VDI 3787 Blatt 2 (2008): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima
- VDI 3787 Blatt 5 (2003): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; Veröffentlichung für 02/2024 angekündigt) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3871, Bl.1 und Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben. Insofern werden die Richtlinien nicht selten von der Dynamik der täglichen Praxis überholt und definieren daher eher einen Mindeststandard und weniger eine im Detail einzuhaltende absolute Norm.

Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Abbildung 7). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).

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.



	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"> • Klimateigenschaften 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)



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

Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 1). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

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

Dabei steigt 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.

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



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

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

3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 8). 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, eine meteorologische Messkampagne sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere der dortigen Projektleitung beim Amt für Umweltschutz und Grünflächen sowie zu speziellen Einzelthemen (vor allem Gewässertemperaturen, Klimaszenarien) zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.

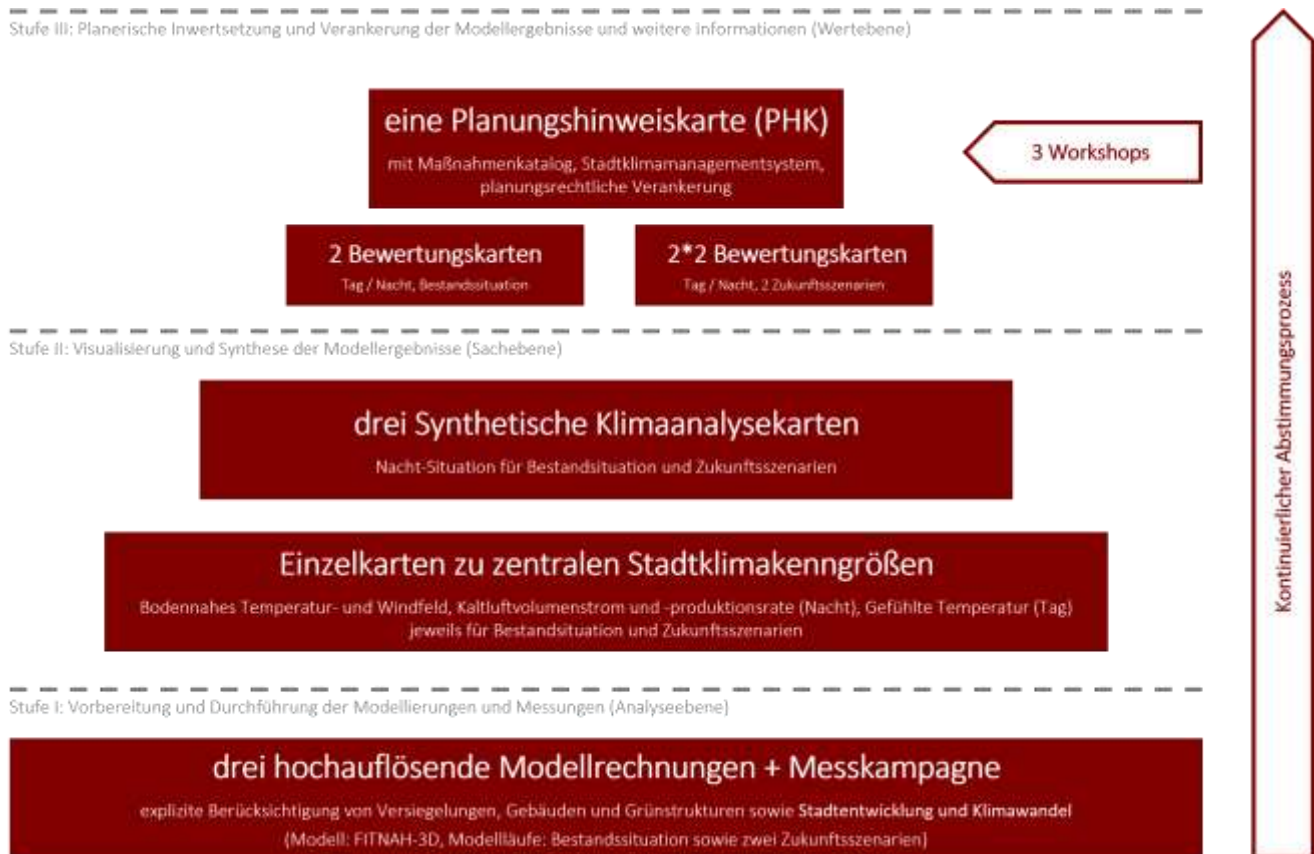


Abbildung 8: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

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 (PHK) 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 umweltschutzplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig ope-

rationalisierten 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 (PAG) andererseits basiert. Die auf diese Weise entstandene Planungshinweiskarte ist damit das Ergebnis eines konsensorientierten Abstimmungs- und Aushandlungsprozesses, der die fehlenden normativen Regelungen weitgehend ersetzt. 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. Die Planungshinweiskarte stellt einen klimafachlichen Beitrag dar, der als einer von zahlreichen Abwägungsbelangen in Planungsprozesse einfließt.

Folgende Institutionen waren regelmäßiges Mitglied der PAG:

- Amt für Umweltschutz und Grünflächen – Klimamanagement
- Stadtplanungsamt
- Amt für Vermessung und Geoinformation
- Straßen- und Brückenbauamt

Insgesamt fanden fünf Sitzungen der PAG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- Abstimmungstermin (Online) am 28.06.2021 zu den Ergebnissen der Ist-Modellierung und Vorbereitung der Zukunftsmodellierungen
- PHK-Workshop 1 (Vor-Ort-Termin) am 10.05.2022 mit umfassender Vorstellung der gesamten Modellierungsergebnisse und vorbereitenden Diskussionen zur PHK
- Vorstellung der Messkampagne (Online) am 15.06.2022 mit abschließender Validierung der Modellergebnisse
- PHK-Workshop 2 (Vor-Ort-Termin) am 06.09.2022 mit Vorstellung und Diskussion der Bewertungskarten Tag & Nacht sowie des Entwurfes der PHK
- PHK-Workshop 3 (Vor-Ort-Termin) am 30.01.2023 mit Diskussion zu Gestaltungsalternativen der PHK und zu den Planungshinweisen

4. Klima und Klimawandel im Raum Paderborn

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Paderborn basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD; 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 Paderborns wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km-Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können.

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

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt¹.

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

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Paderborn ein Modellensemble bestehend aus 39 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien 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.

¹ Homepage: www.euro-cordex.net

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 Klimamolldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamolldaten“ 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 Paderborn am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (ein Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten (vgl. DWD 2020a).

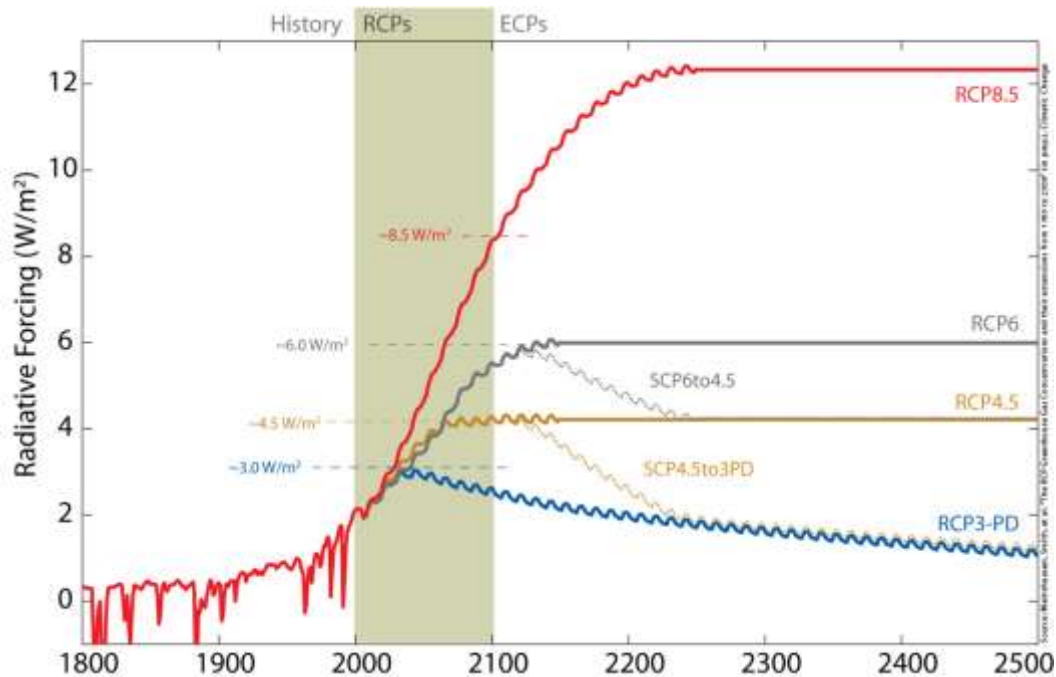


Abbildung 9: Strahlungsantrieb der verschiedenen Representative Concentration Pathways (RCP) und ihre Entwicklung bis 2100. Quelle: IPCC 2014 (ECP = Extended Concentration Pathways, ergänzende Szenarien bis 2300).

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst, die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*; DKRZ 2023). 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 Szenarien²), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten enthalten.

² CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project 6) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms (World Climate Research Programme)

Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in Watt pro Quadratmeter (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. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO_2 -Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO_2 -Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Kapitel zur allgemeinen Beschreibung des Klimawandels sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 können auf Anfrage bei der zuständigen Stelle der Stadtverwaltung zur Verfügung gestellt werden.

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

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

Bei der schwellenwertbasierten Berechnung von Kenntagen können die benannten systematischen Abweichungen jedoch zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Schwellenwerte im Vergleich zu den beobachteten Werten führen. „Ist ein Modell z.B. im Mittel etwas zu warm, so werden in diesem Modell möglicherweise 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 2).

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

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

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

- Referenzperiode: 1971 – 2000
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2021 – 2050
- 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).

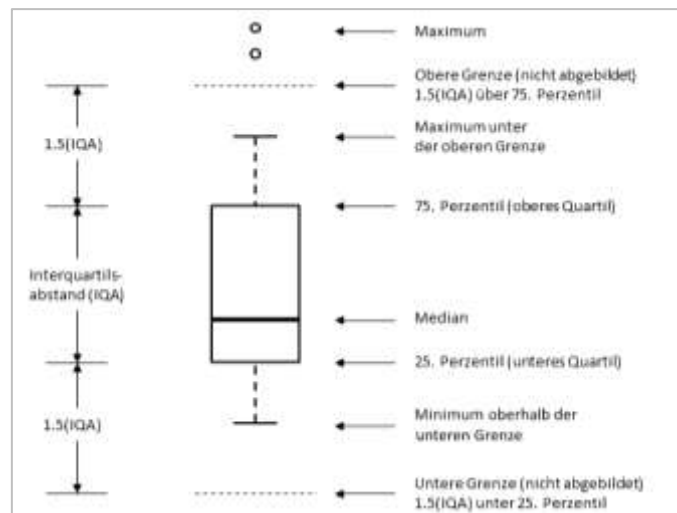


Abbildung 10: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Paderborn war 1971-2000 gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,0 °C (DWD 2020) und eine mittlere Niederschlagssumme von 851 mm/Jahr, wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Sommermonaten & im Dezember auftraten (Abbildung 11). Damit war die Stadt um 0,4 °C wärmer als im damaligen deutschlandweiten Durchschnitt von 8,6 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge lag über dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr.

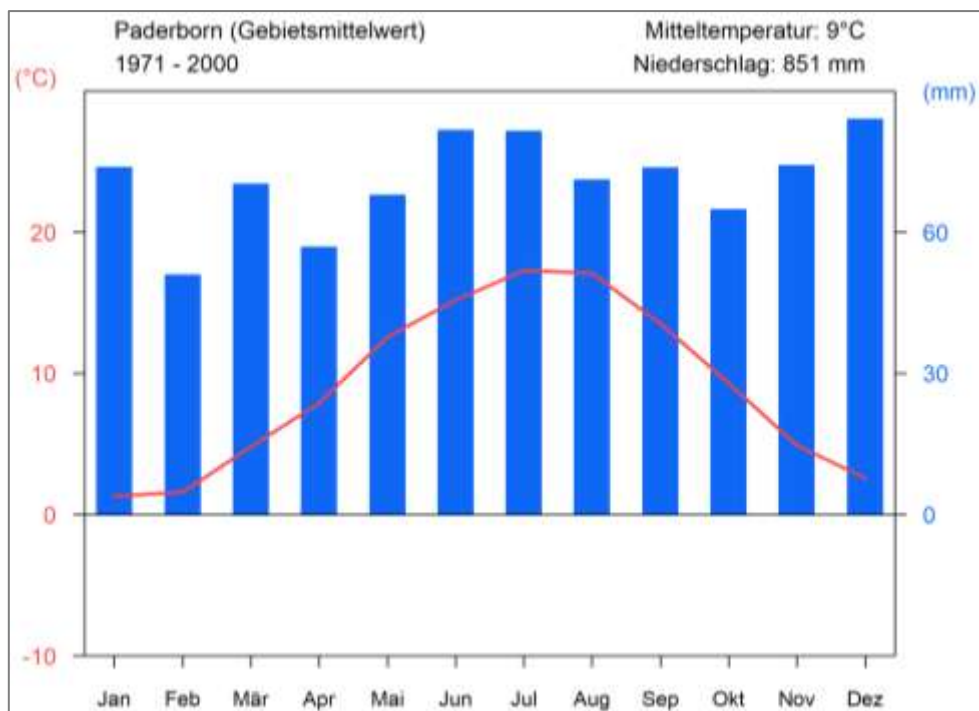


Abbildung 11: Klimadiagramm der Stadt Paderborn für den Zeitraum 1971 – 2000, basierend auf Rasterdaten des DWD (nach DWD 2020)

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Paderborn – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,6 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die

fünf wärmsten Jahre in Paderborn seit 1881 allesamt in den letzten zwei Dekaden aufgetreten – darunter die Top 4 Jahreswerte allein in den letzten sechs Jahren (Abbildung 12).

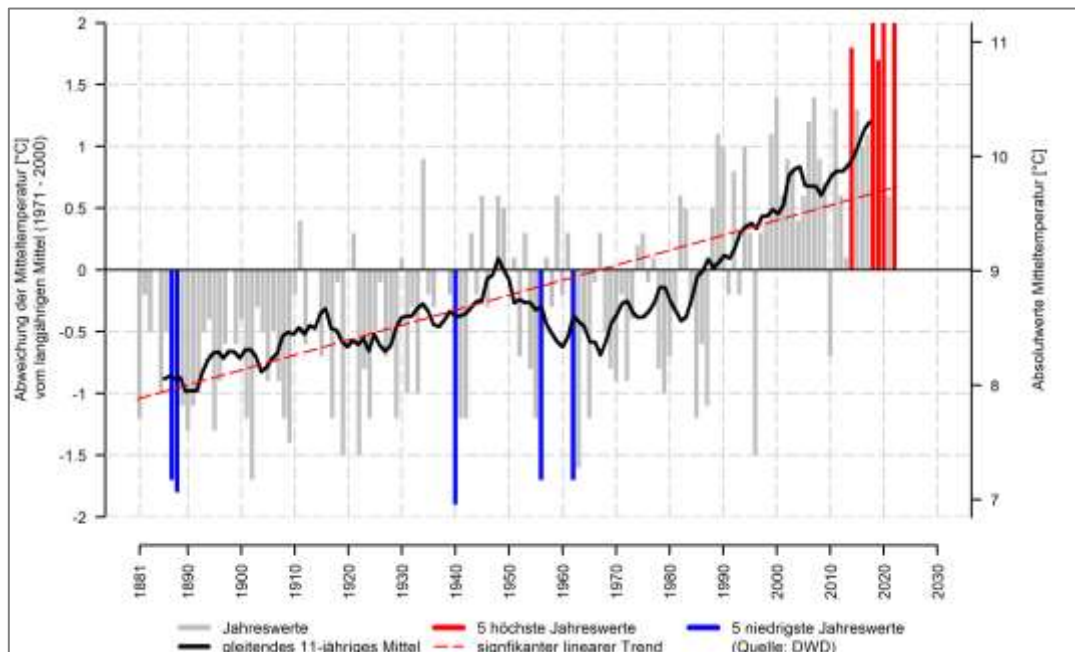


Abbildung 12: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Paderborn im Zeitraum von 1881 bis 2022 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2020)

Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991 - 2020 traten in Paderborn 35 Sommertage und 7 Heiße Tage pro Jahr auf. Die warm-gemäßigte Lage Paderborns zeigt sich in der Anzahl meteorologischer Kenntage im Winter. In den letzten drei Dekaden wurden im Mittel 65 Frosttage und 13 Eistage pro Jahr und damit eine etwas geringere Auftrittshäufigkeit im Vergleich zum deutschlandweiten Mittel registriert.

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Bad Lippspringe dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Paderborn. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 3 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 3,3 m/s am häufigsten auftraten (leichte Brise bis schwacher Wind). In den Nachtstunden gibt es keine dominierende Windrichtung, während tagsüber der Wind am häufigsten aus west-südwestlichen Richtungen weht (Abbildung 13).

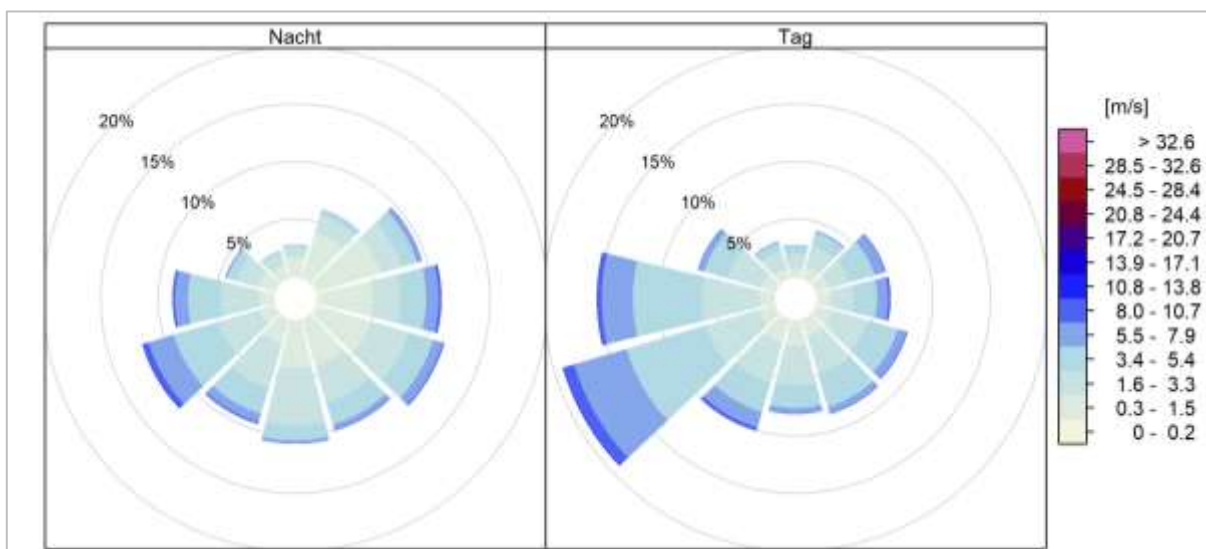


Abbildung 13: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Paderborn für den Zeitraum 1981 – 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Bad Lippspringe (eigene Berechnung nach DWD 2020)

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.

In Bad Lippspringe traten im langjährigen Mittel der letzten 40 Jahre rund 52 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 14). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel knapp 16 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 18 % entspricht – etwas weniger als jede fünfte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen. Für eine Stadt wie Paderborn kann angenommen werden, dass die tatsächlich heutige Anzahl an autochthonen Nächten etwas höher liegt als an dieser ländlich gelegenen Referenzstation.

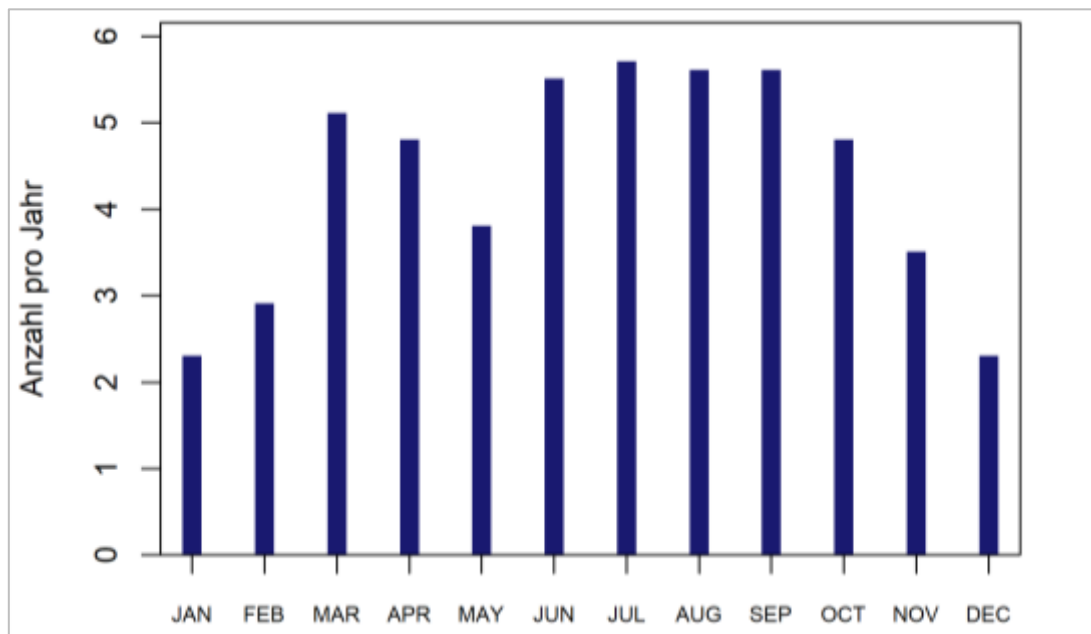


Abbildung 14: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Paderborn (52 pro Jahr) für den Zeitraum 1980 - 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Bad Lippspringe (eigene Berechnung nach DWD 2020)

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Paderborn bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 15 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 Minimumtemperaturen³.

Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am stärksten aus. Dabei tritt in allen drei Zukunftsperioden eine deutliche Zunahme auf, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Im RCP-Szenario 2.6 wird ein moderater Temperaturanstieg und ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts eine

³ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.

Stagnation erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 2.6 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen bemerkbar machen.

Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Paderborn (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
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1	1,6
	RCP 4.5	0,8	1,2	1,5	0,9	1,6	2,3	1,4	2	2,6
	RCP 8.5	0,9	1,4	1,9	1,6	2,3	2,8	2,7	3,6	4,7
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1,6	2,5	3,6	1,7	2,6	3,1	2	2,9	4,4
	RCP 4.5	2,2	3,1	4,6	2,8	4,7	6,4	3,5	4,6	6,7
	RCP 8.5	1,9	3,3	4,9	3	4,4	6,1	6,3	8	10,3
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1	1,5	3	0,8	1,4	3	0,9	1,6	2,7
	RCP 4.5	0,9	1,4	2,3	1,2	1,9	2,9	1,6	2,4	3,7
	RCP 8.5	0,9	1,7	2,4	2,1	3,2	4,1	3,9	5,1	7,2

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 Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 15 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 1971 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

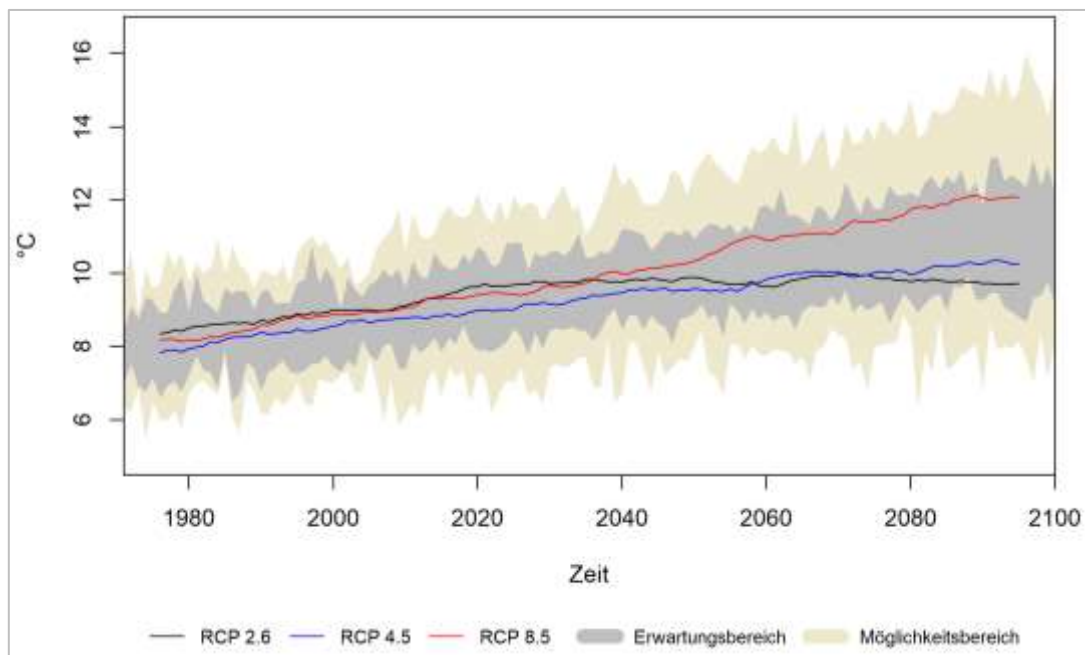


Abbildung 15: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Paderborn (alle RCP-Szenarien)

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Herbst leicht größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Winter (Abbildung 16). 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 (rote Boxen).

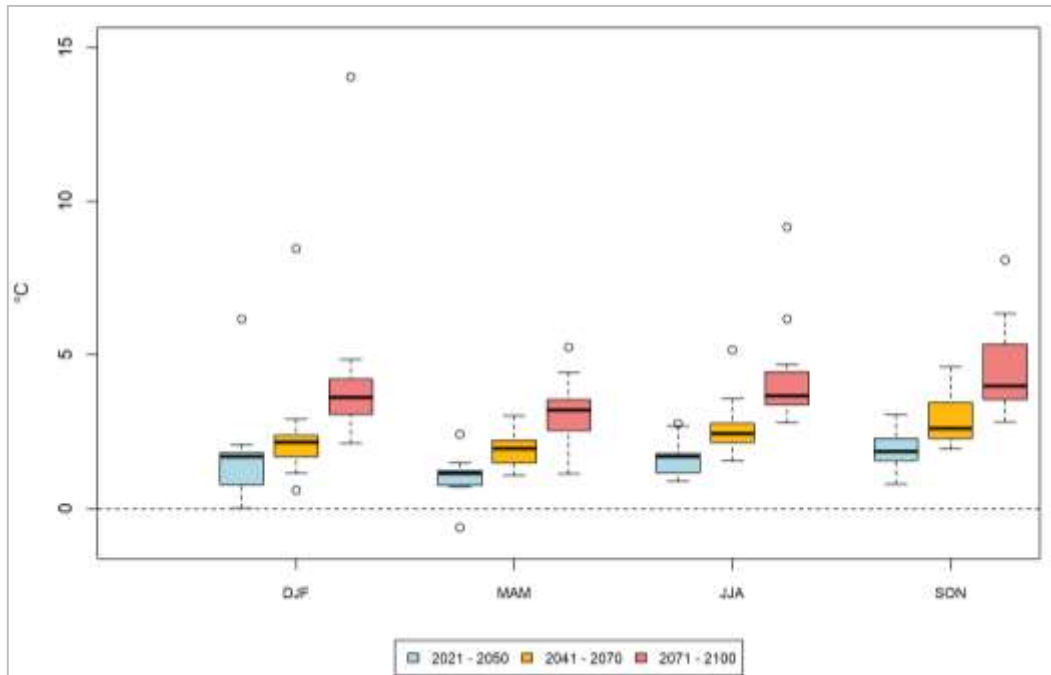


Abbildung 16: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen in Paderborn (RCP 8.5) (DJF = Winter, MAM = Frühling, JJA = Sommer, SON = Herbst)

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen (im RCP 8.5) und Heißen Tagen zukünftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit rund 22 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode nur 5-mal jährlich auftraten (1971 – 2000).

Tropennächte treten in Paderborn derzeit relativ selten auf (im 30-jährigen Mittel weniger als eine Tropennacht pro Jahr). In der nahen Zukunft (2021 – 2050) werden zusätzlich 1 bis 3 Tropennächte pro Jahr erwartet, wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 stagniert bzw. nur leicht steigt, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 3. Zukunftsperiode 10 bis 23 Tropennächte pro Jahr in Paderborn 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 der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Paderborn zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um 1 bis 6 Tage.

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an **Frost- und Eistagen**. In Paderborn werden im langjährigen Mittel 68 Frosttage bzw. 15 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 20 Frosttage bzw. 3 Eistage auftreten.

Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an **Tagen mit Frost- und Tauwechseln** und eine verlängerte **Vegetationsperiode** nach sich ziehen.

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

Kenntag	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	5	9,6	17,9	5,4	9,3	19,4	8,1	9,2	15,6
	RCP 4.5	5,4	10,1	13,3	5,1	16,4	22,3	13	16,2	24,2
	RCP 8.5	6,2	9,9	16,3	14,7	19,7	34,1	30,1	38,3	60,9
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	1,6	2,7	7,3	1,6	3,2	7,2	2,7	4	7,1
	RCP 4.5	2,2	4,1	6,2	4,2	5,4	8,8	5,5	6,8	9,6
	RCP 8.5	2,8	4,5	7	6,3	8,5	12,7	14	16,7	25
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,7	1,5	3,3	0,5	1,8	3,3	1,2	2,3	3,9
	RCP 4.5	1,5	2,4	3,2	2,1	3,4	4,4	3,2	4,6	6,6
	RCP 8.5	1,5	2,8	4	4,3	6,1	8	10,4	17,3	23
Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-20,6	-14	-12,4	-21,5	-18,5	-13,8	-19,7	-17,6	-13,5
	RCP 4.5	-24,2	-19,2	-14,3	-35,5	-25,6	-13,6	-34,5	-32,8	-22,5
	RCP 8.5	-26,1	-23,9	-15,8	-35,7	-32,4	-25	-50,5	-48	-43,6
Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	-6,1	-5,3	-4,2	-6,4	-5,8	-4	-7,5	-6,4	-5,2
	RCP 4.5	-8,3	-6,7	-2,4	-11	-8,5	-2,6	-11,2	-9,2	-6,4
	RCP 8.5	-8,5	-7,5	-2,5	-11,3	-9,3	-6,3	-13,6	-12,2	-12

5. Analysemethoden

5.1 MESSKAMPAGNE

5.1.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE IN PADERBORN IM SOMMER 2021 DURCHGEFÜHRTEN MESSUNGEN

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse Paderborn wurde zusätzlich zur Modellierung mit FITNAH 3D eine umfassende Messkampagne beauftragt. Analog zu den modellgestützten Untersuchungen sollten insbesondere die temporären Messungen möglichst zu hochsommerlichen Belastungssituationen durchgeführt werden, um eine Aussage zur nächtlichen Kaltluftproduktion und zu nachts besonders belasteten Quartieren treffen zu können. Hierfür fanden in zwei Nächten im Sommer 2021 jeweils an einem ruralen und einem urbanen Messstandort im Stadtgebiet Vertikalsondierungen mit Drohnen und in einer weiteren Nacht mobile Messfahrten statt. Zusätzlich wurden im Vorfeld an denselben Standorten stationäre Klimamessstationen installiert. Das Ziel dieser Langzeitmessungen war es, die Hauptwindrichtungen zu autochthonen und nicht-autochthonen Wetterlagen zu ermitteln und Klimakenntagstatistiken des Sommers 2021 anzufertigen. Gleichzeitig ermöglichen die Langzeitmessung die Einbettung der temporären Messkampagnen in einen meteorologischen Rahmen. Der durch sämtliche Messdaten gefütterte Datenpool kann darüber hinaus zur Validierung der Modellsimulationen herangezogen werden. Tabelle 5 zeigt eine genaue Aufstellung der Standorte, Messzeiträume und Instrumentierungen aller im Untersuchungsgebiet durchgeführten Messkampagnen. Die tiefergehende Darstellung der Standorte, Messgeräte und Methodiken erfolgt in den Kapiteln 5.1.2 (Langzeitmessung), 5.1.3 (Messfahrten) und 5.1.4 (Vertikalsondierungen); jene der Ergebnisse aller Messkampagnen in Kapitel 6.1.

Tabelle 5: Standorte, Messzeiträume und Instrumentierung während der im Sommer 2021 im Rahmen der Klimaanalyse Paderborn durchgeführten meteorologischen Messkampagne.

Untersuchung	Standort (Koordinaten)	Auswertzeit- raum	Uhrzeit MESZ	Höhe über Grund	Messgrößen	Auflösung der Messung
Urbane Messstation	Innenstadt (Brachfläche Bahnhof- straße)	23.06.2021- 30.09.2021	-	2 m, 10 m	T ⁴ , rH	1 s intern auf 10 min aggregiert
	(51.714529 °N, 8.742756 °O)			10 m	WS, WD	
Rurale Messstation	Golfplatz Haxterhöhe (Pohlweg)	23.06.2021- 30.09.2021	-	2 m, 10 m	T, rH	1 s intern auf 10 min aggregiert
	(51.6932288 °N, 8.7852373 °O)			10 m	WS, WD	
Messfahrt 1. Nachthälfte	-	24./25.08.2021	21:55 – 00:06	1,5 m	T	1s (ca. 8 m)
Messfahrt 2. Nachthälfte	-	25.08.2021	02:54 – 05:10	1,5 m	T	1s (ca. 8 m)
Vertikalsondierung urban	Innenstadt (Brachfläche Bahnhof- straße)	11./12.08.2021	20:00 – 06:00	bis 300 m	T, rH, WS, WD, Oberfl.-T, Foto	~ 2 m (vertikal)
	(51.71452 °N, 8.742871 °O)					
Vertikalsondierung rural	Golfplatz Haxterhöhe (Pohlweg)	12./13.08.2021	20:00 – 06:00	bis 300 m	T, rH, WS, WD, Oberfl.-T, Foto	~ 2 m (vertikal)
	(51.69326 °N, 8.785324 °O)					

⁴ T = Lufttemperatur, rH = relative Luftfeuchte, WS = wind speed (Windgeschwindigkeit), WD = wind direction (Windrichtung), Oberfl.-T. = Oberflächentemperatur

5.1.2 LANGZEITMESSKAMPAGNE (23.06.-30.09.2021)

STANDORTE DER LANGZEITMESSKAMPAGNE

Für die Langzeitmesskampagne vom 23.06.-30.09.2021 wurden ein urbaner und ein ruraler Standort gewählt, um den Unterschied zwischen Stadt und Umland klimatologisch zu vermessen. Der ca. 116,8 m ü. NHN gelegene urbane Standort befand sich auf einer innerstädtischen Brachfläche der Bahnhofstraße, westlich der Paderborner Altstadt und nördlich des Hauptbahnhofs (s. Abbildung 17). Der Boden rund um die Station bestand aus einem Gemisch aus Kies und Erde und war dicht von Gräsern bewachsen. In unmittelbarer Umgebung grenzten im Westen eine bis zu fünfgeschossige Wohnbebauung und östlich der Messstation die ca. 7000 m² große versiegelte Parkplatzfläche des Parkplatzes Florianstraße an. Etwa 100 m gen Norden folgte auf die rauhgkeitsarme Brachfläche ebenfalls Wohnbebauung.



Abbildung 17: Urbaner Standort der Langzeitmessung auf der Brachfläche an der Bahnhofstraße in Paderborn mit Blickrichtung Süd (links) und als Google Earth-Draufsicht aus 1,5 km Höhe; roter Pin markiert den Standort (rechts).

Die rurale Klimamessstation wurde am südlichen Rand Paderborns inmitten des Golfplatzes Haxterhöhe auf 226,0 m ü. NHN installiert und lag damit beinahe doppelt so hoch wie die urbane Messstation (s. Abbildung 18). Ähnlich wie an der urbanen Station bestand der Untergrund aus einem mit Wiese überwachsenem Schotter-Erd-Gemisch, allerdings zeigte sich das Umfeld – lediglich mit wenigen Buschgewächsen bestanden – deutlich rauhgkeitsärmer. Rund um den 58 ha großen Golfplatz schließen in alle Himmelsrichtungen Agrarflächen an. Die nächsten überbauten Strukturen in der Umgebung wie die Funktionsgebäude des Golfplatzes im Norden oder wenige einzelne Höfe liegen mindestens 600 m vom Messstandort entfernt.



Abbildung 18: Ruraler Standort der Langzeitmessung auf dem Golfplatz Haxterhöhe im Süden Paderborns mit Blickrichtung Nord (links) und als Google Earth-Draufsicht aus 1,5 km Höhe; grüner Pin markiert den Standort (rechts).

MESSGERÄTE UND METHODIK DER LANGZEITMESSKAMPAGNE

Die Instrumentierung der Messstationen erfolgte sowohl am urbanen als am ruralen Standort auf gleiche Weise. Ein mittels dreier Drahtseile abgespannter Mast von 10 Metern Höhe wurde auf 2 m ü. Gr. mit einem Temperatur-Feuchte-Geber der Firma THIES und an der Spitze des Masts auf 10 Metern Höhe mit einer Wetterstation derselben Firma ausgestattet. Neben einer erneuten Temperatur-Feuchte-Messung fanden an der Wetterstation Messungen der Windgeschwindigkeit und -richtung statt. Sämtliche Daten wurden in 1s-Intervallen registriert und aus Gründen der Speicherkapazität und der späteren Auswerteziele geräteintern auf 10-Minutenwerte gemittelt. Die Stromversorgung erfolgte jeweils autark mithilfe eines Solarpanels. Die Zusammenführung der Messwerte geschah mithilfe eines METEO-40S-Datenloggers von Ammonit, der die Möglichkeit einer webbasierten Interaktion mit den Geräten sowie den Download der Messdaten über eine Onlineplattform ermöglichte.

Nach der Installation der beiden Stationen am 21.06.2021 (urban) bzw. 22.06.2021 (rural) standen ab dem 23.06.2021 Messdaten zur Verfügung. Die Demontage erfolgte am 12.10.2021. Die durch coronabedingte Lieferengpässe erst spät durchgeführte Installation der beiden Messstationen, aber auch der insgesamt viel zu feuchte und zu kühle Sommer (vgl. Kapitel 6.1) hatte zur Folge, dass zusätzlich spätsommerliche Messwerte aus dem September in die Untersuchung eingebracht wurden. Somit wurde der Untersuchungszeitraum der sommerlichen Langzeitmessung auf die Zeitspanne vom 23.06.2021 bis 30.09.2021 festgelegt.

REGIONALE KLIMATOLOGIE DES MESSZEITRAUMES

Der Juni war in Nordrhein-Westfalen mit durchschnittlich 18,9 °C um 3,5 K wärmer als das langjährige Mittel von 1961 bis 1990; auch die Sonnenscheindauern waren mit 235 Stunden gegenüber den 184 Stunden der langjährigen Referenz überdurchschnittlich hoch (DWD 2021A). Die Niederschlagsmengen entsprachen mit rund 85 l/m² dagegen nahezu denen der o.g. Klimareferenzperiode (84 l/m²).

Den gegenüber dem klimatologischen Mittel mit 17,8 °C um ca. 0,9 K wärmeren Juli dominierten in NRW extreme, starkregenbedingte Niederschlagssummen, die lokal verheerende Schäden anrichteten (DWD 2021B). So wurde die Monatsniederschlagssumme verglichen mit der Klimareferenz mit 140 l/m² um fast das Doppelte übertroffen (Referenz: 82 l/m²). Mit 155 Sonnenstunden (klimatologisches Mittel: 187 h) wurden in NRW die ortsüblichen Sonnenscheindauern im Juli 2021 unterboten, was das Bundesland in diesem Monat im nationalen Vergleich zum sonnenscheinärmsten werden ließ.

Der Folgemonat August zeigte sich in Nordrhein-Westfalen noch sonnenscheinärmer. Hier wurde mit 135 Stunden das langjährige Mittel um 48 h unterboten (DWD 2021c). Zusätzlich fiel der August mit im Bundesland registrierten 85 l/m² etwas zu feucht aus (Klimareferenz: 73 l/m²) und ging mit einer leicht geringeren Monatsmitteltemperatur von 16,3 °C gegenüber der langjährigen Referenz einher (16,6 °C).

Spätsommerlich zeigte sich der September 2021 in NRW, der die langjährige Monatsmitteltemperatur im Bundesland mit 15,4 °C um 1,9 K übertraf (DWD 2021d). Dabei wurden 170 Sonnenstunden registriert – etwa 35 Stunden mehr als in der 30-jährigen Klimareferenzperiode. Der insgesamt deutlich zu trockene Monat wies lediglich 30 l/m² an Niederschlag auf – weniger als halb so viel, wie üblicherweise zu dieser Jahreszeit in der Region gemessen wird (Klimareferenz: 67 l/m²).

5.1.3 INTENSIVMESSKAMPAGNE: MESSFAHRTEN (24./25.08.2021)

BEFAHRENE ROUTE, MESSGERÄTE UND METHODIK DER MESSFAHRT



Abbildung 19: Mobile Messroute im Stadtgebiet Paderborn (rote Linie) sowie urbane (roter Pin) und rurale (grüner Pin) Messstation.

Bei der Planung der mobilen Messroute stand die Befahrung möglichst aller relevanten Stadtstrukturtypen Paderborns im Fokus. Hierfür wurde eine insgesamt 39,7 km umfassende Messstrecke entwickelt, die an der

urbanen Messstation auf der Brachfläche der Bahnhofstraße begann und endete (s. Abbildung 19) und im Uhrzeigersinn befahren wurde.

Befahrene Stadtstrukturtypen, die größtenteils den urbanen Raum beschreiben sind die stark verdichtete und hochversiegelte Zentrumsbebauung im Innenstadtbereich sowie Industrie- und Gewerbeflächen wie z.B. der Industriepark Alme (Diebold Nixdorf) oder das Gewerbegebiet Döhren. Deutlich entsiegelter, teils auch begrünter ist dagegen der Stadtstrukturtyp der Zeilenbebauung oder der Einzel- und Reihenhausbauung, der beispielsweise „Auf der Lieth“, im Quartier entlang der Warburger Straße oder in Paderborn Nord zu finden ist und den Großteil des Paderborner Siedlungsbereiches beschreibt. Befahren wurden darüber hinaus innerstädtische Grün- und Ausgleichsflächen wie der Westfriedhof, die Heinz-Nixdorf-Aue entlang der Pader und des Padersees oder die Waldbereiche des Parks an den Fischteichen. Als ländlich geprägte Stadtstrukturtypen führte die Messroute entlang der östlich gelegenen Agrarflächen Richtung Benhausen und rundherum um den Golfplatz Haxterhöhe und die dort befindliche rurale temporäre Klimamessstation südlich der Kernstadt.

MESSGERÄTE UND METHODIK DER MESSFAHRTEN

Zur Einordnung klimatologischer Prozesse wie die nächtliche Überwärmung der Stadt gegenüber dem Umland bzw. ruraler Phänomene wie der Entstehung von Kaltluft auf den Grün- und Freiflächen wurden die Messfahrten in der Nacht vom 24. zum 25.08.2021 zu möglichst stabilen atmosphärischen Bedingungen im Sommer angesetzt. Als Messfahrzeug wurde ein Subaru Forester verwendet, der mittels spezieller Halterung am Radkasten in einer seitlichen Entfernung von ca. 50 cm vom Fahrzeug als Träger für ein PT100 Widerstandsthermometer auf ca. 1,5 m Höhe ü. Gr. fungierte (s. Abbildung 20). Das PT100 eignet sich durch seine hohe Ansprechgeschwindigkeit sehr gut für mobile Messungen und zeichnet bei einer Frequenz von 1 s und einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 25 und 30 km/h etwa alle 7-8 m einen Temperaturmesswert auf. Um den zeitlichen Verlauf der Temperaturentwicklung im Stadtgebiet aufzeichnen zu können, wurden insgesamt zwei Messfahrten durchgeführt – von 21:55 Uhr bis 00:06 Uhr Ortszeit in der ersten Nachthälfte und von 02:54 Uhr bis 05:10 Uhr Ortszeit in der zweiten Nachthälfte.



Abbildung 20: Anbringung des Temperatursensors für die Messfahrt am PKW (links), Höhe über Grund (Mitte) und seitlicher Abstand vom Fahrzeug (rechts).

Start- und Endpunkt der Messroute war die Brachfläche an der Bahnhofstraße. An diesem Ort befand sich die urbane Messstation, deren Messwerte dazu verwendet wurden den Tagesgang aus jedem einzelnen Messpunkt der Route herauszurechnen und die Werte dadurch untereinander vergleichbar zu machen. Um darüber hinaus den Vergleich mit dem flächenhaften Temperaturfeld der Modellrechnung zu ermöglichen, erfolgte eine Interpolation aller Temperaturwerte der Befahrung auf den Standardmodellausgabezeitpunkt von 04:00 Uhr sowie auf 23:00 Uhr als Vergleichswert für die erste Nachthälfte.

WETTERSITUATION AM TAG DER MESSFAHRTEN (24./25.08.2021)

Das Phänomen der urbanen Wärmeinsel bildet sich am zuverlässigsten zu sommerlichen, windschwachen Strahlungswetterlagen, den sogenannten autochthonen Wetterlagen aus. Zu diesen Zeiten ist der überlagernde Wind in einem Untersuchungsraum nahezu Null und Belüftungseffekte bilden sich fast ausschließlich aus dem Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland heraus. Diese besondere Wetterlage ist ebenfalls Grundlage der Modellrechnung, daher bietet sich beim Vorhaben eines Vergleichs zwischen Modell und Messung die Durchführung der mobilen Messkampagne zu einer solchen Wettersituation an. Abbildung 21 zeigt die stündlichen Wetterdaten am Tag der Messfahrten (24./25.08.2021).

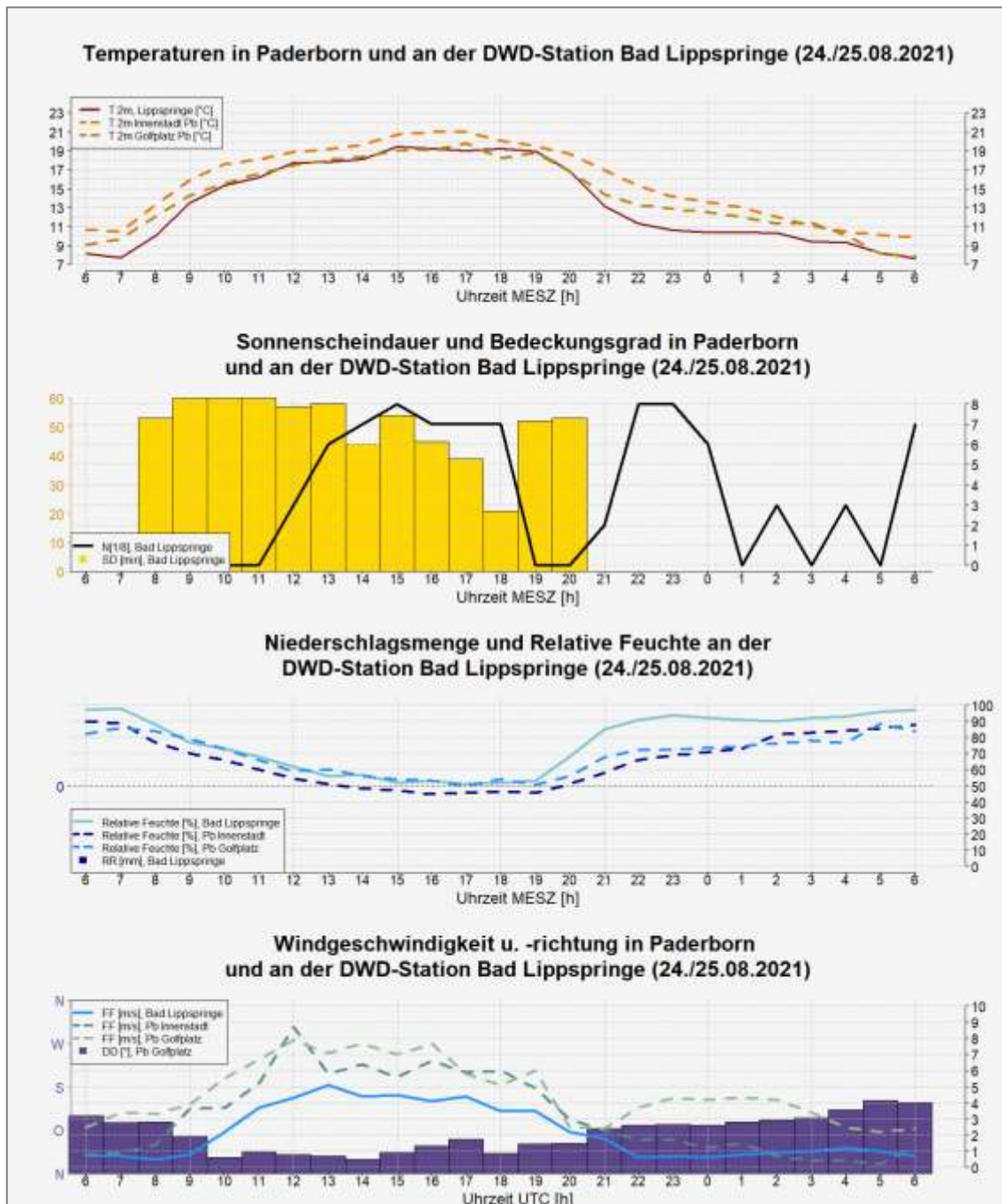


Abbildung 21: Stündliche Wetterdaten der urbanen und ruralen Klimamessstation in Paderborn sowie der DWD-Referenzstation in Bad Lippspringe am Tag der Messfahrten (24./25.08.2021).

Es wird ersichtlich, dass insbesondere in den Nachtstunden sowohl eine geringe Bewölkung von zumeist unter 4 Achtel als auch geringe Windgeschwindigkeiten von größtenteils weniger als 1 m/s vorherrschten. Auch wenn die DWD-Definition einer autochthonen Nacht nach Augter (1997)⁵ knapp verfehlt wird, können die Witterungsverhältnisse in guter Näherung als autochthon bezeichnet werden, da Bedeckungsgrade von mehr als 6/8 mit hoher Cirrus-Bewölkung einhergingen, die noch immer eine gute nächtliche Ausstrahlung gewährleisten. Diese Tatsache ist ebenfalls in den Temperaturkurven der beiden temporären Messstationen, aber auch jener der DWD-Station Bad Lippspringe zu beobachten, die bereits kurz nach Sonnenuntergang (20:29 Uhr MESZ) stetig abzusinken beginnen. Obwohl es tagsüber sonnenscheinreich und niederschlagsfrei war, wurden im Maximum lediglich Temperaturen zwischen 18,5 °C (Bad Lippspringe) und 21 °C (urbane Station Paderborn) erreicht. In der Messnacht gingen die Temperaturen in der Folge bis zum Morgen auf knapp 8 °C am Stadtrand (Bad Lippspringe/ rurale Station) und 10 °C in der Innenstadt (urbane Station Paderborn) zurück.

5.1.4 INTENSIVMESSKAMPAGNE: VERTIKALSONIERUNGEN MIT DROHNEN (11.-13.08.2021)

STANDORTE DER VERTIKALSONDIERUNGEN

Die Vertikalsondierungen fanden in unmittelbarer Nähe zu den beiden Klimamessstationen statt. Am 11./12.08.2021 erfolgte der Aufbau unmittelbar südlich an die urbane Messstation angrenzend, am 12./13.08.2021 wurde der Startpunkt der Vertikalsondierungen wenige Meter südöstlich der ruralen Klimamessstation festgelegt (s. Abbildung 22). Für die Beschreibung der genauen Beschaffenheit der Untergründe an den Standorten und von deren Umgebung wird auf Kapitel 5.1 verwiesen.



Abbildung 22: Standorte der Vertikalsondierung am 11./12.08.2021 an der urbanen Station (links, Blickrichtung Süd) und am 12./13.08.2021 an der ruralen Station (rechts, Blickrichtung West).

⁵ DWD-Definition „autochthone Nacht“ (Augter, 1997): 7 zusammenhängende Stunden zwischen 19 Uhr MESZ und 07 Uhr MESZ mit $\leq 4/8$ Bedeckungsgrad und Windgeschwindigkeiten $\leq 2,7$ m/s oder insgesamt 10 Stunden mit den genannten Wettereigenschaften im angegebenen Zeitraum.

MESSGERÄTE UND METHODIK DER VERTIKALSONDIERUNGEN

Das Messsystem für Vertikalsondierungen meteorologischer Parameter ist eine Kombination aus einem (sechsrorigen) Hexakopter des Typs DJI Flamewheel 550 und einer Radiosonde DFM-06 der Firma GRAW. Zur Minimierung sogenannter Downwash-Effekte der Rotorblätter, die die umgebende Luft 1 m oberhalb und bis zur fünffachen Länge unterhalb und damit auch die Messwerte beeinflussen können, wurde die Radiosonde mittels 5 m langem, reißfestem Faden unter der Drohne angebracht (s. Abbildung 23 a). Die Sonde misst Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftdruck sowie Position (Longitude und Latitude). Windgeschwindigkeit und -richtung werden über die Neigungsdaten des Kopters ermittelt. Um GPS-stabil in der Luft zu stehen, gleicht die Drohne den Wind durch leichte Neigungen in x-, y- und z-Richtungen aus, welche anschließend mittels empirischer Formel in Winddaten umgerechnet werden können (BROSY, 2017). Die Drohne verfügt darüber hinaus über ein Gimble, das mit einer GoPro-Kamera für Fotografien in HD-Auflösung aus der Höhe sowie mit einer FLIR-Infrarotkamera zur Aufnahme von Oberflächentemperaturen ausgestattet werden kann (s. Abbildung 23 b).



Abbildung 23: (a) Messsystem aus Hexakopter DJI Flamewheel 550 mit angehängter Radiosonde DFM-06 von GRAW. (b) Hexakopter Flamewheel 550 Nahansicht mit Aufhängung für Fotokamera der Marke GoPro und Infrarotkamera von FLIR.

In der Regel finden Drohnenaufstiege im Verbund mit der Radiosonde mehrfach pro Nacht jeweils zur vollen Stunde statt, um die zeitliche Entwicklung der genannten meteorologischen Parameter sichtbar zu machen. Bei den Messungen in Paderborn lag am Golfplatz Haxterhöhe die maximale Mächtigkeit der Kaltluftsäule, in der Innenstadt auf der Brachfläche an der Bahnhofstraße die nächtliche städtische Überwärmung im Fokus. Daher wurden die Messungen an beiden Messtagen kurz vor Sonnenuntergang gegen 20 Uhr MESZ gestartet und kurz nach Sonnenaufgang gegen 06 Uhr MESZ beendet. Folglich konnten jeweils 11 Radiosondenaufstiege aufgezeichnet werden.

Ein typischer Aufstieg mit Radiosonde in Paderborn erfolgte derart, dass die Drohne nach dem Start bei gespanntem Faden so lange über der sich am Boden befindlichen Radiosonde verweilte, bis diese eine konstante Lufttemperatur aufzeigte. Anschließend wurde der Aufstieg des Messsystems mit einer Steiggeschwindigkeit

von ca. 2 ms^{-1} eingeleitet, um bei einer Sondenmessfrequenz von etwa 1 Hz exakt einen Messwert pro Höhenmeter zu erhalten. Dabei hielt sich der Kopter (auch gegen vorhandene Horizontalwinde) positionsgetreu über dem Startpunkt (GPS-stabilsierter Modus). Nach Erreichen einer Höhe von 300 m über Grund wurde der erneute Abstieg des Messsystems eingeleitet. Vorsorglich wurde direkt anschließend ein zweiter identisch aufgebauter Messflug durchgeführt, um einen Ersatzdatensatz verfügbar zu haben. Die aktuell vorherrschende Höhe wird barometrisch über den Luftdruck der jeweiligen Messung berechnet und für die Grafiken im Kapitel 6.1.5 verwendet.

Neben den Radiosondenmessungen wurde in den Abendstunden gegen 20:30 Uhr MESZ, kurz vor Mitternacht um 23:30 Uhr und kurz vor Sonnenaufgang gegen 04:30 Uhr jeweils in der Innenstadt und auf dem Golfplatz Haxterhöhe ein einzelner IR-Flug angefertigt. Die zusätzlich je einmalig gegen 20:30 Uhr bei letztem Tageslicht aufgenommenen GoPro-Fotoaufnahmen bieten die Möglichkeit zur nachträglichen Abschätzung des vorherrschenden Wetters und geben Einblick in die Gestalt des umgebenen Geländes. Die FLIR-Infrarotkamera misst, die vom Boden emittierte, und für das Auge nicht sichtbare Infrarotstrahlung (Wärmestrahlung), die in Abhängigkeit mit der Temperatur des beobachteten Objektes steht. Indirekt kann so folglich, je nach objektspezifischem Emissionsgrad eine Aussage über die Oberflächentemperatur getroffen werden. Gegenüberstellungen von Real fotografie und IR-Bildern im nächtlichen Verlauf finden sich ebenfalls in Kapitel 6.1.6 wieder.

WETTERSITUATION BEI DURCHFÜHRUNG DER VERTIKALSONDIERUNGEN (11.-13.08.2021)

Abbildung 24 zeigt die Wetterverhältnisse am Messtag der Vertikalsondierungen im Innenstadtbereich, die in der Nacht vom 11.08. zum 12.08.2021 stattfanden. Die große Zahl an Sonnenstunden bei ab dem Nachmittag geringer werdender Bewölkung führte zu Temperaturmaxima zwischen 23 und 25 °C an den beiden temporären Klimamessstationen und der DWD-Referenzstation Bad Lippspringe, wobei an keiner Station ein Sommertag (Temperaturmaximum $\geq 25 \text{ °C}$) registriert wurde. In den Nachtstunden lagen bei durchweg geringen Windgeschwindigkeiten von weniger als 2,2 m/s und während der Messung eigens erhobenen Bedeckungsgraden von maximal 3/8 in der Innenstadt autochthone Wetterverhältnisse nach Augter (1997) vor. Diese ermöglichten eine in der ersten Nachthälfte rapide und nachfolgend stetige Abkühlung bis in die Morgenstunden bis auf 13-14 °C an den ländlich geprägten Stationen (Paderborn rural und DWD-Referenz Bad Lippspringe) und 16,5 °C an der innerstädtischen Klimamessstation (Paderborn urban). In der trockenen Messnacht wehte der Wind an der Innenstadtstation aus überwiegend nördlichen Richtungen.

In Abbildung 25 sind die Witterungsverhältnisse während der Vertikalsondierungsmesskampagne am 12./13.08.2021 zu erkennen. Wie bereits am Vortag konnte eine hohe Summe an Sonnenminuten und in der ersten Tageshälfte zumeist geringe Bewölkung registriert werden. Diese Umstände führten nochmals zu einer Steigerung der Temperatur an den drei betrachteten Stationen, im Maximum auf Werte zwischen 25 °C und 28 °C, wodurch jeweils ein Sommertag erreicht wurde. So zeigte sich der 12.08. im Vergleich zum Vortag zwar wesentlich wärmer, die darauffolgende Nacht aber weniger autochthon, was an (noch immer geringen) nächtlichen Windgeschwindigkeiten von 2-4 m/s aus vornehmlich Süd und dem Bedeckungsgrad von überwiegend oberhalb von 4/8 zu erkennen ist. Dennoch war eine langsame, aber stetige nächtliche Abkühlung bis auf Tiefstwerte zwischen 14 und 17 °C an den drei Stationen zu erkennen. Der betrachtete 24-stündige Zeitraum blieb niederschlagsfrei.

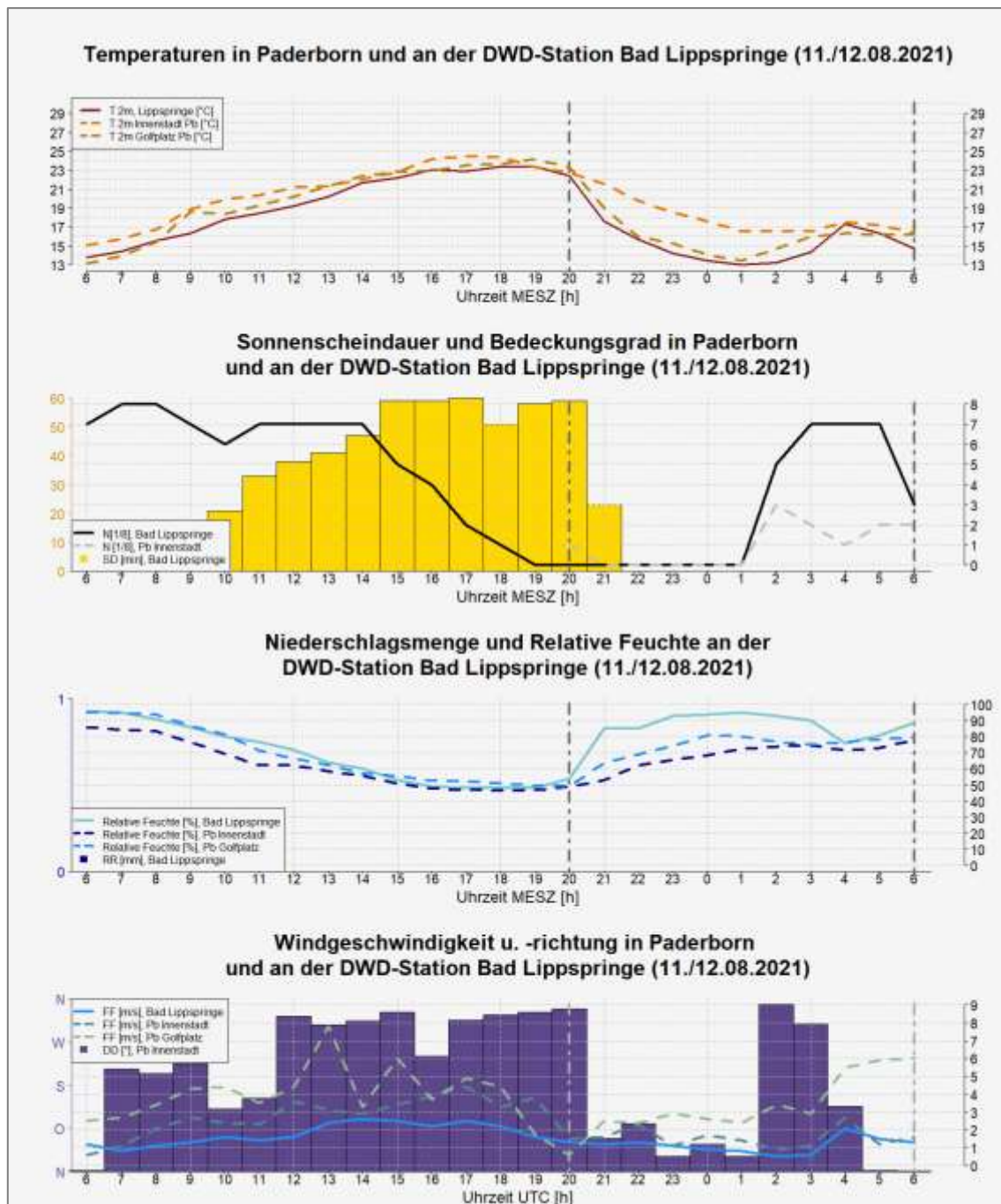


Abbildung 24: Stündliche Wetterdaten der urbanen und ruralen Klimamessstation in Paderborn sowie der DWD-Referenzstation in Bad Lippspringe am Tag der Vertikalsondierung am urbanen Messstandort (11./12.08.2021).

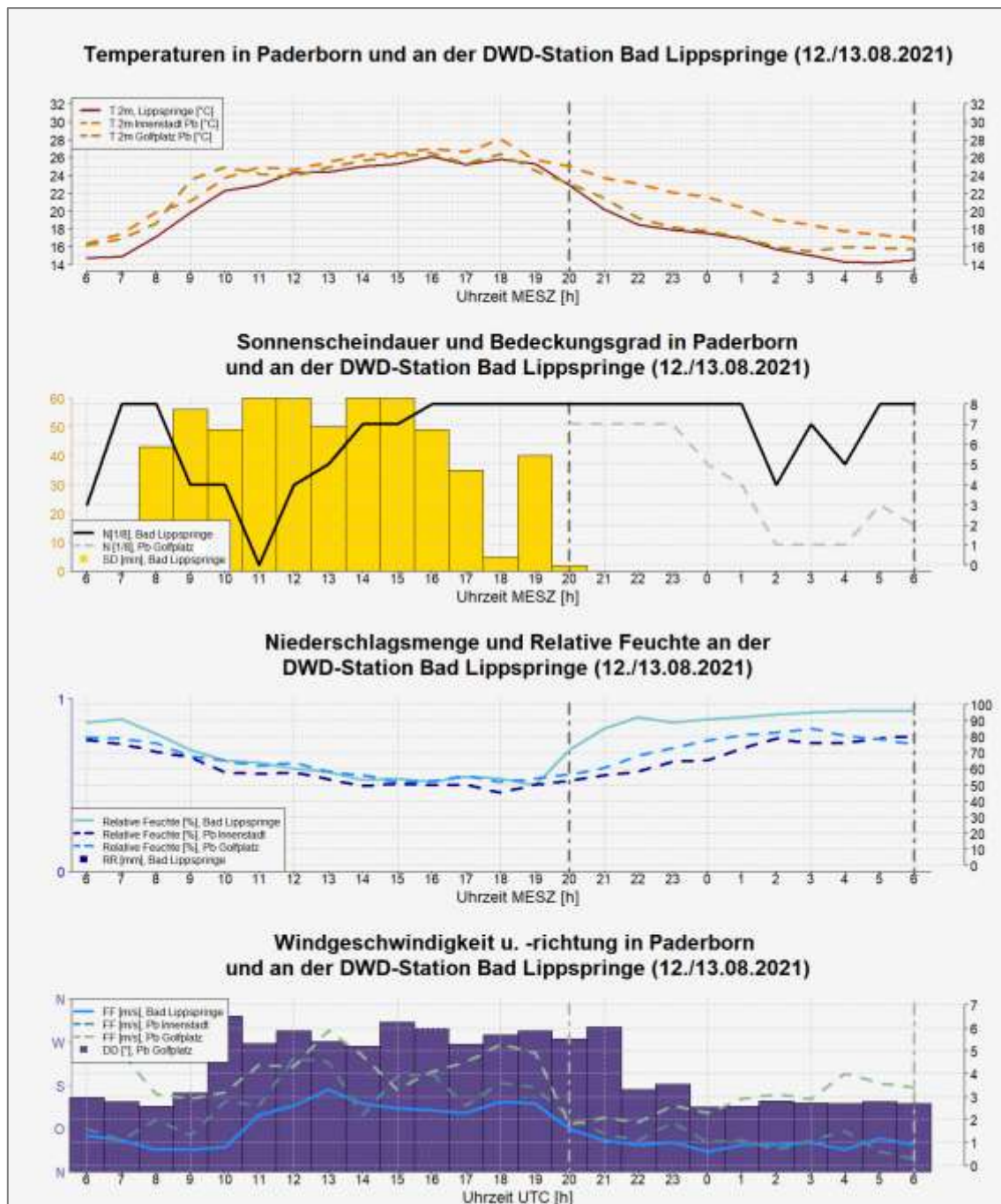


Abbildung 25: Stündliche Wetterdaten der urbanen und ruralen Klimamessstation in Paderborn sowie der DWD-Referenzstation in Bad Lippspringe am Tag der Vertikalsondierung am ruralen Messstandort (12./13.08.2021).

5.2 NUMERISCHE MODELLIERUNG

5.2.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die weiteren Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalyse basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Groß 1992). Seit der Veröffentlichung zum Basismodell in den 1990er Jahren wurde FITNAH in einer Kooperation zwischen Prof. Günter Groß und der GEO-NET Umweltconsulting

GmbH fortlaufend durch neue Funktionen, Module und Auswerteroutinen weiterentwickelt (u.a. Groß 2002, Groß et al. 2002, Groß 2012a, Groß 2012b, Groß 2013, Groß 2017).

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

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

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

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

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2017) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 10 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Paderborn und angrenzendes Umland rd. 3,4 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 100 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 6 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 6: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5-10 m.

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
20	Gebäude	individuell
21	Gebäude mit Gründach	individuell
22	unbebaut versiegelt	0
14	Gewässer	0
7	Gleis	0
9	niedrige Vegetation	0,5
24	Baum über Versiegelung	individuell
25	Baum über Rasen	individuell
23	niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5
26	Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden	individuell

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

Abbildung 26 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbe-

dingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an 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 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 Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin (K) 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.

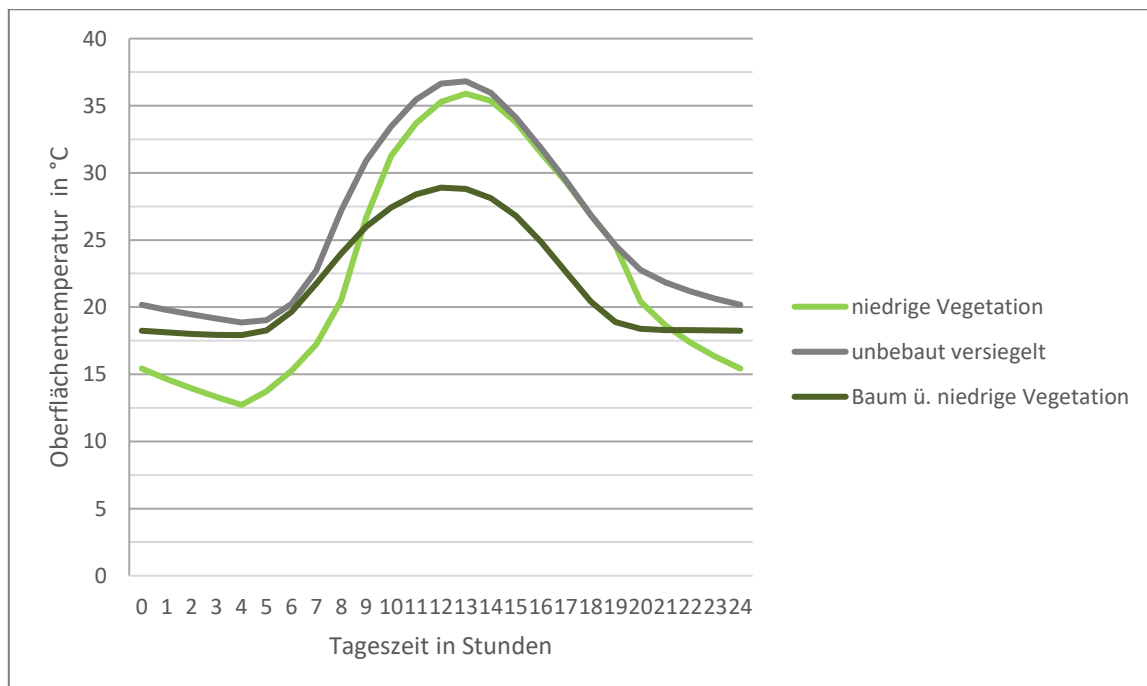


Abbildung 26: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich dies in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird,

sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 27 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen 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.

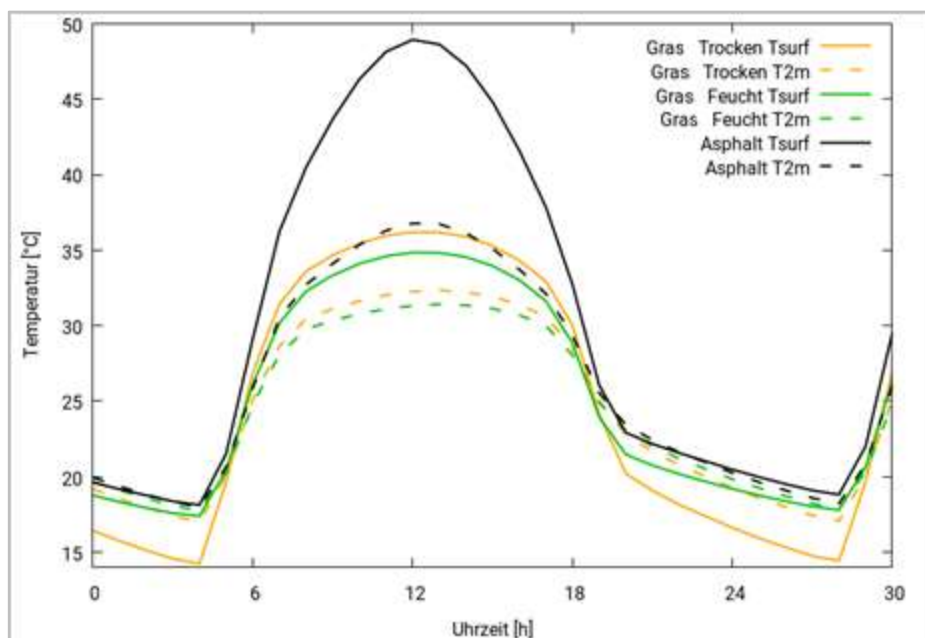


Abbildung 27: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

5.2.2 SZENARIENENTWICKLUNG

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

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (siehe LfU Bayern 2020 oder Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (siehe Stadt Karlsruhe 2014, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

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

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

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

Die Module können je nach spezifischer Fragestellung und zur Verfügung stehender Grundlagen für die Modellierungen individuell zusammengestellt werden. Die konkrete Ausgestaltung im vorliegenden Projekt ist in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Ausgangspunkt der Deltamethode ist stets die Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernen Zukunft zu prognostizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Gegenwart und Zukunft aufmerksam zu machen. Neben der Darstellung, wie eine hypothetische Situation in der Zukunft zustande kommen kann, werden Varianten und Alternativen dargestellt (Abbildung 28, Wilms 2006).

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente - eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmaßnahmen in einem gemeinsamen Szenariotrichter. In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen - hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren

Zukünfte betrachtet, sondern lediglich eine den Analysezielen entsprechende Auswahl zumeist besonders herausfordernder Szenarien.

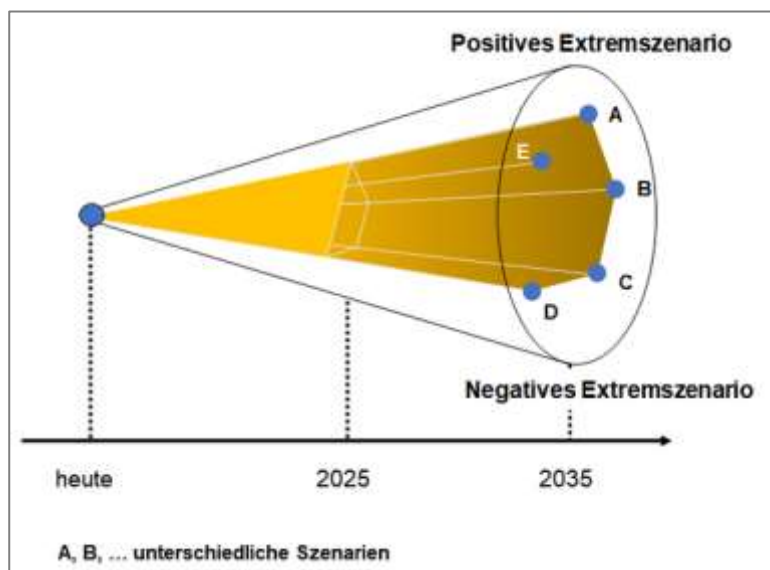


Abbildung 28. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Im vorliegenden Fall fiel die Wahl auf die Analyse der Szenarien „schwacher Klimawandel“ (Synonym: P1 Szenario) und „starker Klimawandel“ (Synonym: P2 Szenario) für die Zieljahre 2030 - 2040. Verglichen werden sollten die Ergebnisse der beiden Szenarien untereinander sowie mit einer Referenzsituation (Synonym: Status Quo), als Repräsentation einer gegenwärtigen Situation.

In beiden Szenarien wurde eine mögliche zukünftige Stadtentwicklung berücksichtigt, in dem auf Basis von Entwicklungsflächen aus dem damals aktuellen Entwurf des Regionalplanes und Flächenreserven (aus Realnutzungs kartierung 2021) unbebaute Flächen mit der Stadt ausgewählt und teilweise ergänzt wurden. Im Szenario „schwacher Klimawandel“ wurde darüber hinaus die Antriebstemperatur der Modellrechnung gegenüber der Referenzsituation um ein Klimasignal von 0,8 K erhöht. Dieses Signal wurde aus einer Reanalyse regionaler Klimamodelle für das Emissionsszenario RCP 2.6 spezifisch für Paderborn abgeleitet und stellt nach dem heutigen Wissenstand ein positives Extremszenario dar.

Für das Szenario „starker Klimawandel“ wurde eine Orientierung am RCP 8.5 gewählt. Daraus ergibt sich ein Klimasignal von 1,9 K. Außerdem ergab sich aus den Analysen, dass in diesem Szenario mit einer zunehmenden Sommertrockenheit und damit mit einer verringerten Bodenfeuchte zu rechnen ist. Im Modell wurde diese daher von 60% auf 30% abgesenkt. Tabelle 7 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.

Tabelle 7: Entwickelte Szenarien für Paderborn und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Referenzsituation / Status Quo	<ul style="list-style-type: none"> ■ Eingangsdaten repräsentieren das Gebiet von Paderborn zum Stand 2021 ■ Einzelne Gebiete mit B-Plänen in Umsetzung u. Ä. wurden ergänzt
Szenario P1	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zusätzlicher Temperaturantrieb von 0,8 K ■ Idealisierte Betrachtung einer möglichen zukünftigen Stadtentwicklung auf ausgewählten Flächen
Szenario P2	<ul style="list-style-type: none"> ■ Zusätzlicher Temperaturantrieb von 1,9 K und eine verringerte Bodenfeuchte von 30 % ■ Stadtentwicklung wie im Szenario P1

5.2.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen. Wie oben beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe

Das Modellgebiet ist dabei für alle durchgeführten Modellläufe identisch. Es beinhaltet das gesamte Gebiet der Stadt Paderborn sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte zunächst nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Um den Rechenaufwand bzw. die Modellierungszeit zu optimieren, wurde das Gebiet im weiteren Projektverlauf verkleinert und die Modellrechnung wurde mit Hilfe der Ergebnisse aus einer übergeordneten Modellrechnung in 1000m Auflösung angetrieben (Offline-Nesting, siehe Seite 12). Das finale Untersuchungsgebiet hat eine Größe von ca. 344 km² (Abbildung 29).



Abbildung 29: Modellgebiet der SKA, zur Orientierung ist ein Luftbild aus dem WMS der Geobasis NRW dargestellt.

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

Da sich relevante Hebungen und Senkungen der Landmassen in geologischen Zeitskalen und nicht in Jahrzehnten abspielen, konnte für alle Modellrechnungen dasselbe Geländemodell zugrunde gelegt werden. Dieses stammt aus einer flugzeuggestützten Lasermessung von 2018 und liegt in 1m Auflösung vor. Die Abbildung 30 zeigt das geneigte Relief Paderborns in einer grafischen Überhöhung.

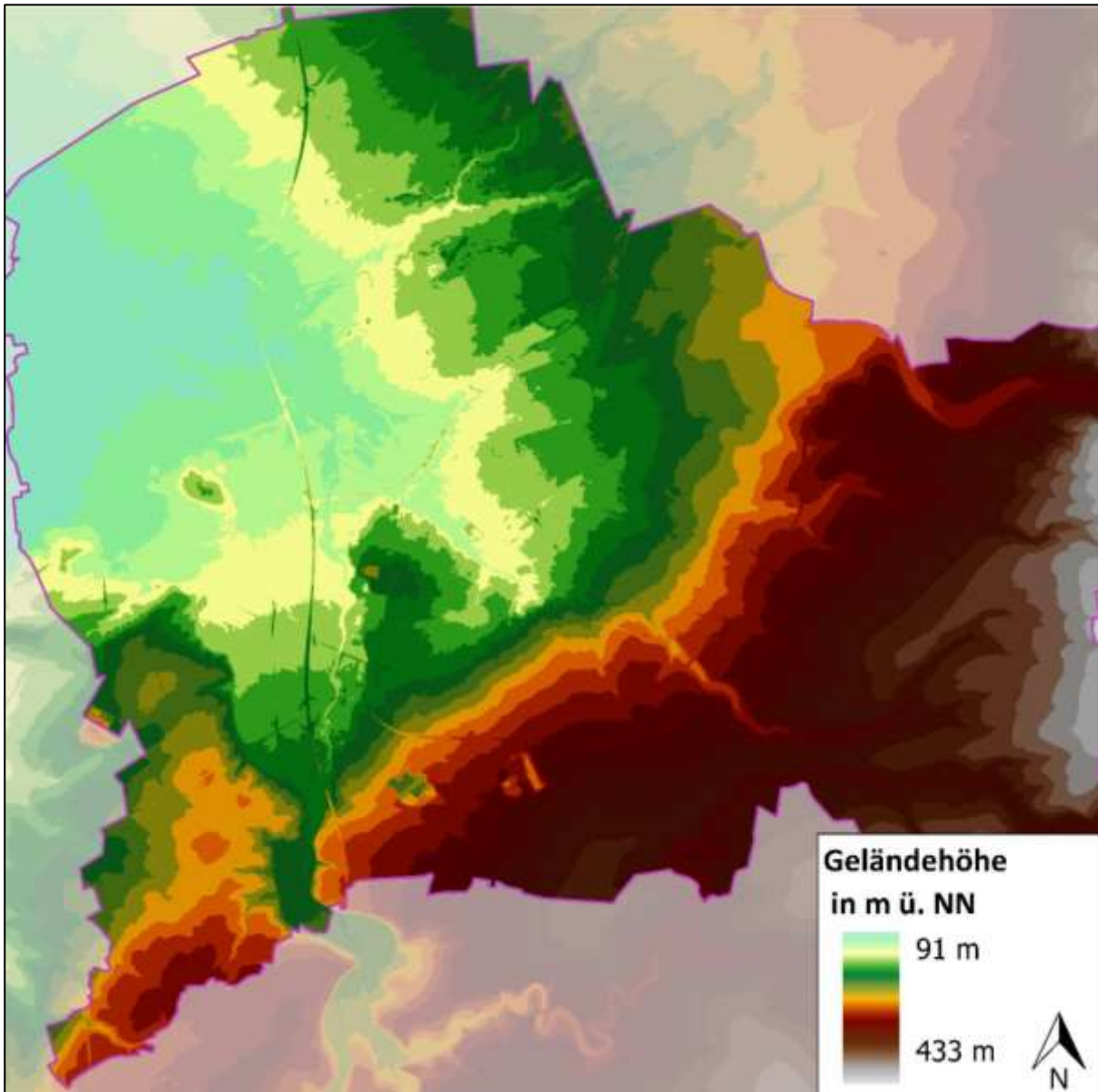


Abbildung 30: Digitales Geländemodell für das Untersuchungsgebiet.

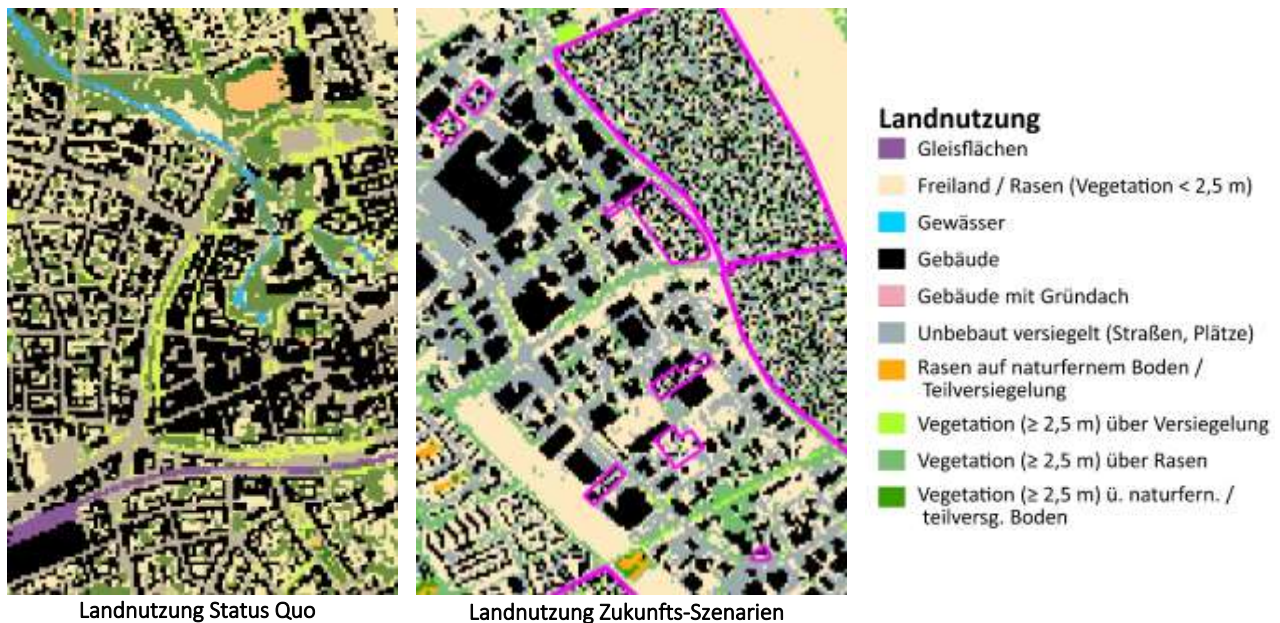


Abbildung 31: Modelleingangsdaten „Landnutzungsklassen“ für den Status Quo in einem Ausschnitt der Paderborner Kernstadt (links) und für die Zukunfts-Szenarien in einem Ausschnitt mit möglichen Entwicklungen im Umfeld vom Gewerbegebiet Benhauser Feld (Mitte).

Ausgangspunkt für die Erstellung der Landnutzungsraster waren ALKIS Daten aus Anfang 2021. Im Unterschied zu den Geländehöhen unterscheidet sich der Eingangsdatensatz zur Landnutzung bzw. zur Stadtstruktur in zwei der drei Modellrechnungen voneinander (Abbildung 31). Hintergrund ist die Berücksichtigung einer zukünftigen Stadtentwicklung in Form von Mischpixeln.

Bei den in Kapitel 5.2.2 beschriebenen möglichen Entwicklungsflächen auf Basis des Regionalplanes und der Reserven kam der **Mischpixelansatz** zum Einsatz. Zur Schaffung einer Annäherung an die Landnutzung dieser Flächen für den Zielhorizont 2023 - 2040 wurden Bestandsflächen im Untersuchungsgebiet definiert, die in unmittelbarer Nachbarschaft zu diesen Flächen liegen und deren siedlungstypologische Ausprägung jener der zukünftig entwickelten Reserveflächen näherungsweise entsprechen könnte. Für diese sog. „Flächenzwillinge“ fand anschließend eine GIS-gestützte Analyse der prozentualen Anteile der vom jeweiligen Flächenzwillings überlagerten Nutzungsinformationen des Status Quo statt. Für jede der Blockflächen der Siedlungsreserve ergaben sich somit eine spezifische Mischpixelklasse, die als eigene Nutzungsklassen in das Modell eingegangen und eng mit der Verteilungsinformation der üblichen FITNAH-Nutzungsinformation verknüpft sind. Gleichzeitig werden für alle Nutzungsklassen, die eine individuelle Höhenangabe benötigen, bspw. Gebäude oder Bäume, für jede Klasse einheitliche Strukturhöhen vorgegeben, die ebenfalls aus den Mittelwerten der Analyse der Flächenzwillinge erhoben wurden. Für die Flächen aus dem Regionalplan wurden vier Klassen (eine Wohn- und 3 Gewerbeklassen) gebildet und jede der Entwicklungsflächen einer dieser vier Klassen zugeordnet.

Im Zukunftsmodelllauf greift das FITNAH-Modul „Randomisator“ bei Aufkommen der neuen Nutzungsklassen (1001 – 6001) auf die Nutzungsverteilungen zu und füllt diese rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften herkömmlichen FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen aus einer Lookup-Tabelle auf. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen. Das Schaubild in Abbildung 32 zeigt exemplarisch die randomisierte Flächenzuweisung für eine Wohn-/Mischbebauung und eine Gewerbeentwicklung.

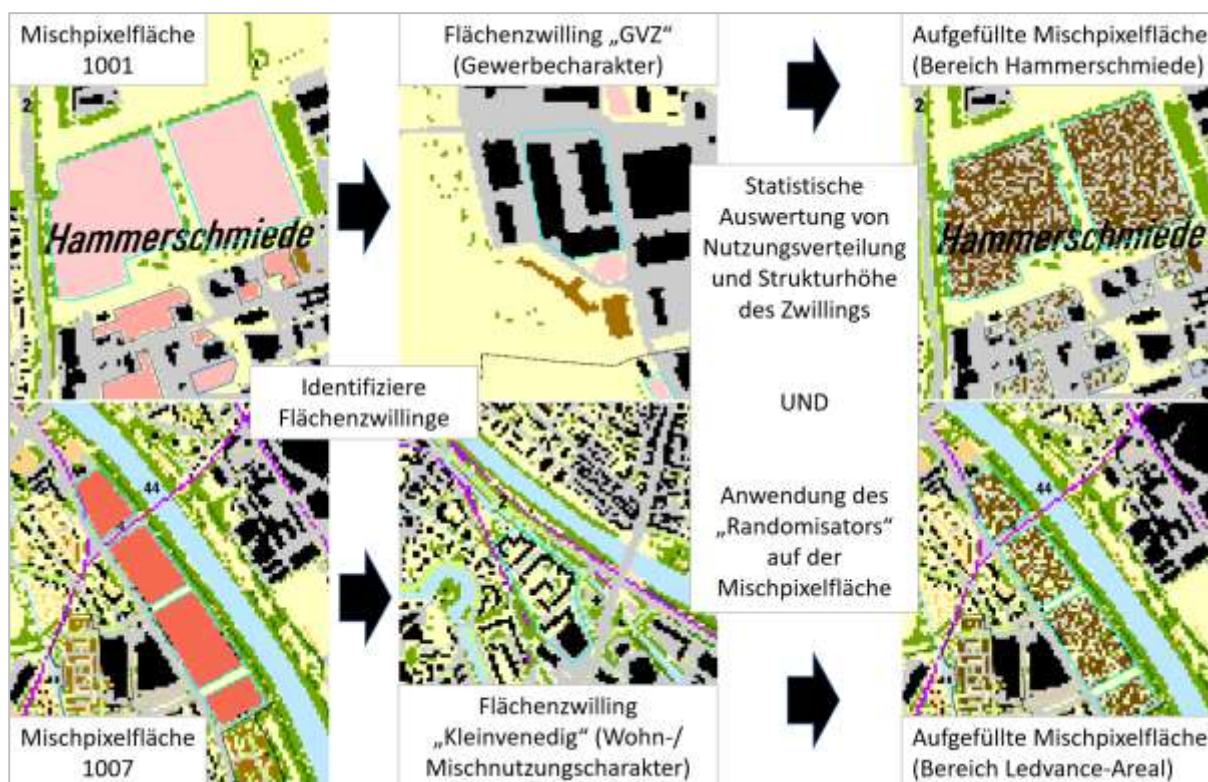


Abbildung 32: Beispielbild zur Identifizierung von Flächenzwillingen zur randomisierten Befüllung von Mischpixelflächen.

Tabelle 8 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Zuweisung der Nutzungsklassen in der Referenzsituation sowie für die Modifikation in den Zukunftsszenarien zusammen. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue vor, so dass es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtische Modellanwendungen sehr hohen Auflösung des Modells zu Generalisierungseffekten kommt. Diese können kleinräumig relevant sein, spielen für gesamtstädtische Fragestellungen aber eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 8: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters in Paderborn als Basis für die Referenzsituation sowie die Zukunftsszenarios

Datenquelle	Erfassungsjahr	Datentyp	Auflösung
Geländehöhe	2018	Raster (DOM)	1 m
Gebäude/-höhen	2021	ALKIS / 3D-Shapes	LOD 1/2
Vegetation	2017	Infrarotluftbilder / NDVI	0,1 m
Versiegelung	2021 / 2017	ALKIS / NDVI	-
Strukturhöhen	2017/2018	Raster (DOM - bdom)	1 m

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie (ALKIS) punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 32). 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 (Stand 2021), die auf Basis von digitalen Orthophotos und aktuellen frei verfügbaren Karten (z. B. OpenStreetMap) 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 Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kap. 6.2), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in den Bewertungskarten in Kap. 8.3.2).

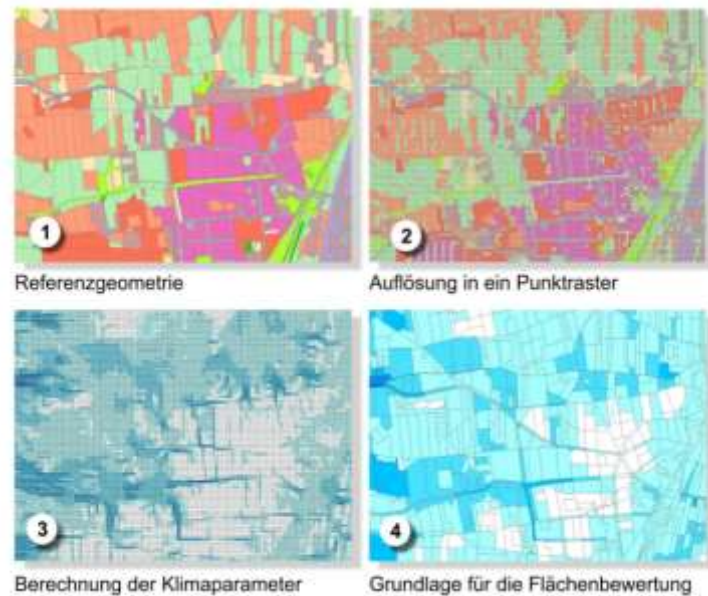


Abbildung 33: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

5.2.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage in Paderborn regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (vgl. Kap. 4.3). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21.06.). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Paderborn besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 2.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 34 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

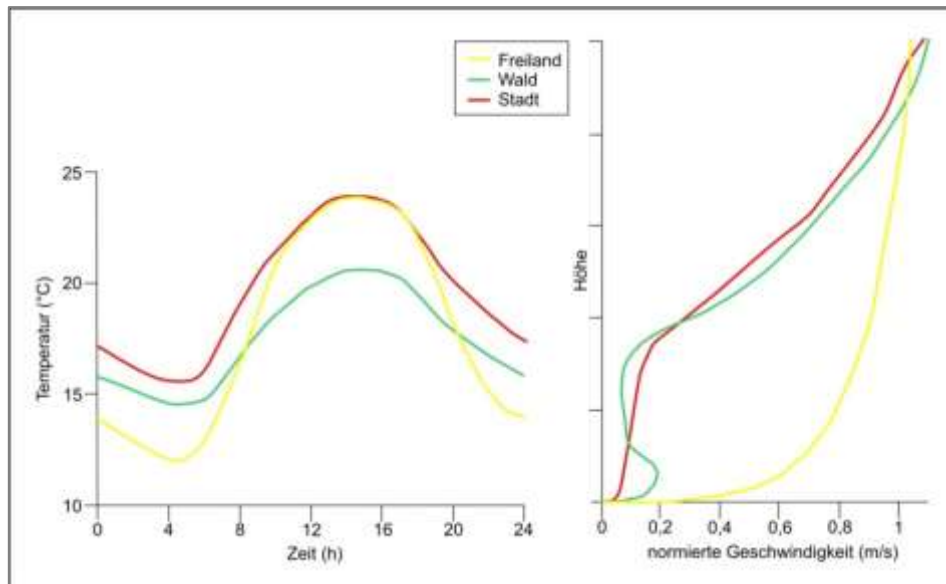


Abbildung 34: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen wird auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes vorgenommen (Schär et al. 1996). Demnach wurden die beiden Modellsimulationen mit einem Delta von 0,8 bzw. 1,9°C angetrieben (siehe Tabelle 7). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert (Abbildung 35). Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21 °C, 21,8 °C bzw. 22,9 °C.

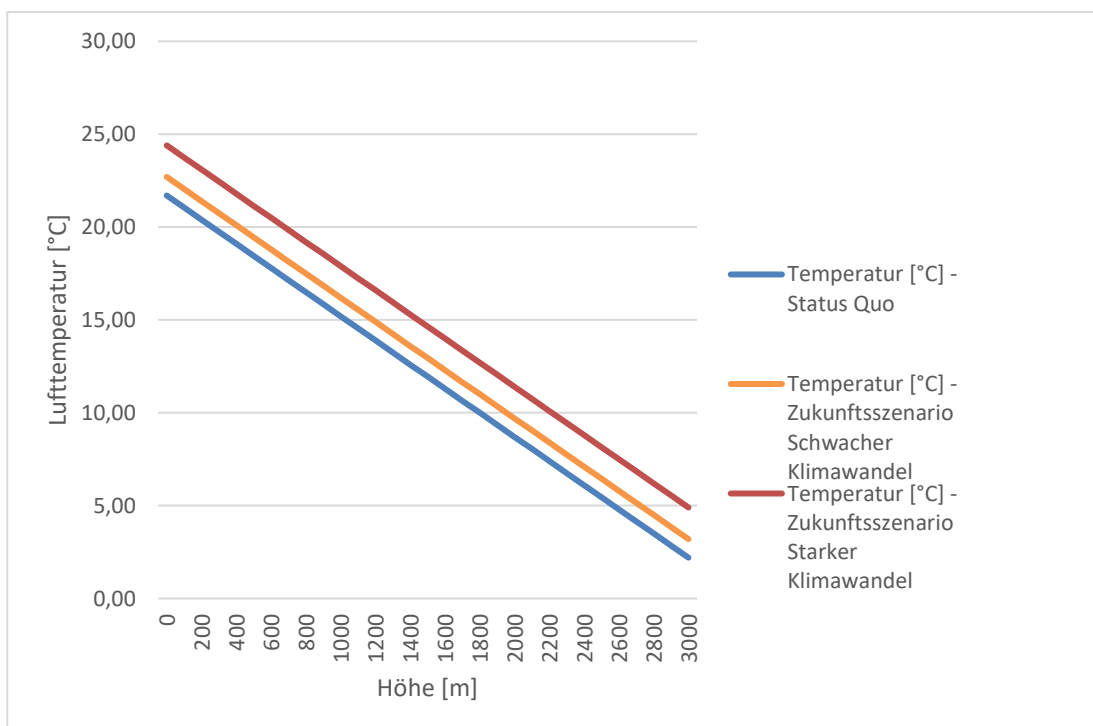


Abbildung 35: Ausgangsprofile der Lufttemperatur für die Bestandssituation (blau) sowie für die Szenarien „schwacher“ (orange) und „starker“ Klimawandel (rot)

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen durch die Vorgabe einer auf 30 % abgesenkten Bodenfeuchte im P2 Szenario berücksichtigt. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, sodass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt. Demgegenüber liegt die Bodenfeuchte sowohl im Status Quo als auch im P1 Szenario bei 60 % und damit deutlich über dem Welkepunkt. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein größeres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (vgl. IPCC 2014).

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren eine zumindest für Teile der Stadt thermisch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch positiv beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um alleine auf der Basis, der in klassischen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden, zu können.

5.2.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

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

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

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
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 o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden

Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 10).

In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt – handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte 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. Die Vorwärtstrajektorien werden in einer Zeitspanne von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang ausgewertet, sind aber eher für Analysen auf Maßstabebene eines Landkreises oder eines Bundeslandes relevant, da es dabei um die überörtliche Ausbreitung der Kaltluft geht. Insgesamt wurde für dieses Projekt eine Auswahl von 6 Parametern näher ausgewertet, die für die Erreichung des in Kapitel 1 erläuterten Projektzieles geeignet sind. Die anderen nicht ausgewerteten Parameter sind entweder eher im Kontext von Projekten mit größeren Maßstab relevant oder im Rahmen von Forschungsarbeiten.

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

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension	Im Projekt ausgewertet
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr	ja
Vorwärtstrajektorien im Ausgleichsraum	[m]	10 m ü.Gr.	21:00 bis 04:00 Uhr	nein
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s*m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftmächtigkeit	[m]	Individuell ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Abkühlungsrate	K/h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Strahlungstemperatur	K	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja

Universal Thermal Comfort Index (UTCI)	keine	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Gefühlte Temperatur (GT)	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein

5.2.6 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschließenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, das bei GEO-NET für komplexere Modellanwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identifizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten dann als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für 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. Die Modellierung des Status Quoes wurde darüber hinaus mit den Ergebnissen der Messkampagne verglichen (Detail siehe Kap. 6.1). Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Demnach durchliefen alle Modellläufe erfolgreich die Qualitätssicherung.

Tabelle 11: Ergebnisse der Qualitätssicherung

Modellauf	Ergebnis der Qualitätssicherung
Status Quo	Nach Änderung des Antriebes & Vergleich zur Klimaanalyse NRW: Qualitätssicherung erfolgreich
P1 Szenario „schwacher Klimawandel“	Nach Korrektur der Startbedingungen: Qualitätssicherung erfolgreich
P2 Szenario „starker Klimawandel“	Ebenfalls nach Korrektur der Startbedingungen: Qualitätssicherung erfolgreich

5.2.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

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

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

Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses 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 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 beispielsweise im sogenannten RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E-Vorhaben ist.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei $\pm 0,1$ bis $0,2$ K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei ± 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

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

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

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 100 m^2 repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 10 m -Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird.

Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

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

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Ein städtischer Geodatenatz ist nicht verfügbar, sodass diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden können. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 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.

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

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und den Szenarien differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die

Unsicherheiten. Kapitel 5.2.3 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen.

Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. Diese Ausführungen lassen sich grundsätzlich auch auf die Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung übertragen. Die Szenarien enthalten zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten 10-20 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen Informationen zu Art und Maß der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher. Darüber hinaus existiert keine groß- oder kleinräumigen Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die Berücksichtigung hätten finden können. Eine gewisse Unsicherheit gilt, in vermutlich deutlich ausgeprägterem Maße, (hoffentlich) auch für die den Szenarien immanente Annahme, dass keine (weiteren) Anpassungsmaßnahmen im Bestand umgesetzt werden. Die skizzierten Umstände sind der Arbeit mit Szenarien jedoch immanent, die per Definition ja die Entscheidung unter Unsicherheit nicht vollends auflösen, sondern diese „nur“ evidenzbasiert unterstützen wollen. Hier muss also mit – gut hergeleiteten und vor allem auch gut abgestimmten – Annahmen gearbeitet werden, was im Projekt über den intensiven Kommunikationsprozess sichergestellt wurde.

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

6.1 MESSUNGEN

6.1.1 AUSWERTUNG VON KLIMAKENNTAGEN IM UNTERSUCHTEN ZEITRAUM (23.06.2021 – 30.09.2021)

Für die Beschreibung der klimatischen Situation an den Messstandorten wurden, wie bereits im Kapitel 4.1 beschrieben, klimatologische Kenntage verwendet (siehe außerdem Tabelle 12).

Tabelle 12: Bezeichnung und Kriterien für klimatologische Kenntage.

Bezeichnung	Kriterium
Sommertag	Tageshöchsttemperatur $\geq 25^{\circ}\text{C}$
Heißer Tag	Tageshöchsttemperatur $\geq 30^{\circ}\text{C}$
Tropennacht	Tagesminimaltemperatur $\geq 20^{\circ}\text{C}$

SOMMERTAGE

Tage, an denen im Untersuchungszeitraum 25°C erreicht oder überschritten wurden, erhielten in Abbildung 36 einen Eintrag als Sommertag. Dabei ist auffällig, dass die größte Zahl an Sommertagen Ende Juni und im Juli registriert wurden – an zwei der drei Monate im Messzeitraum, die sich gegenüber dem langjährigen Temperaturmittel wärmer zeigten (vgl. Kapitel 5.1). Weiterhin weisen die beiden temporären Messstandorte Paderborns mit 23 (rural) und 30 (urban) Tagen eine höhere Zahl an Sommertagen auf als die Referenz-Station des DWD Bad Lippspringe, welche nur 17 Sommertage zu verzeichnen hat. Letztgenannte Anzahl ist gar ein Sommertag weniger als im 15. Perzentil der Referenzperiode von 1971-2000 für Bad Lippspringe, was erneut für einen ungewöhnlich kühlen untersuchten Sommer 2021 spricht.

Hauptverantwortlich für die Unterschiede zwischen den temporären Stationen und der Referenz sind zum einen die ca. 11 km Entfernung zwischen den temporären Paderborner Stationen und der Referenz, die bereits verschiedenartige lokale Austauschprozesse bedingen könnten. Diese können auch durch die unterschiedlichen Stationshöhen bedingt sein, denn die Station Bad Lippspringe liegt mit 157 m ü. NHN ca. 40 m über der urbanen und knapp 60 m unterhalb der ruralen Station. Zum anderen ist aber auch die Tatsache von Relevanz, dass die temporären Wetterstationen nicht nach WMO⁶-Standards aufgebaut wurden, wie bei der DWD-Station der Fall. Der WMO-Standard für klimatologische Messungen schreibt für die Temperatur die Unterbringung der Messgeräte in einen belüfteten Strahlungsschutz über einer kurzgeschnittenen, ebenen Wiesenfläche vor (World Meteorological Organization, 2018). Der Untergrund und das Umfeld in Paderborn wurden absichtlich nicht WMO-konform gewählt, damit die Eigenschaften der realen Umgebung und damit auch die Urbane Wärmeinsel in den Messdaten wiederzufinden sind. Zusätzlich erfolgte die Belüftung der Sensorik lediglich mithilfe von Lamellen auf natürlichem Wege und nicht wie heutzutage häufig beim DWD angewandt durch elektrisch ventilierte Strahlungsschutzgehäuse, die geringere Tagesmaxima und damit weniger Sommertage zur Folge haben.

Die größte Anzahl an Sommertagen weist mit 30 die urbane Messstation auf der Brachfläche an der Bahnhofstraße auf. Trotz seiner innerstädtischen Lage ist der Sensor tagsüber nahezu unverschattet. Die Oberflächen

⁶ WMO = World Meteorological Organization

der nahen Gebäude im Süden und Westen, aber auch die asphaltierten Untergründe der südlich gelegenen Bahnhofstraße und des östlichen angrenzenden Parkplatzes heizen sich tagsüber stark auf und geben zusätzlich zur einfallenden solaren Strahlung kontinuierlich Energie in Form von Wärme an die Umgebungsluft ab. Aus diesem Grund werden hier im Untersuchungszeitraum 7 Sommertage mehr registriert als an der ebenfalls tagsüber unverschatteten, aber ländlich geprägten Station am Golfplatz Haxterhöhe.

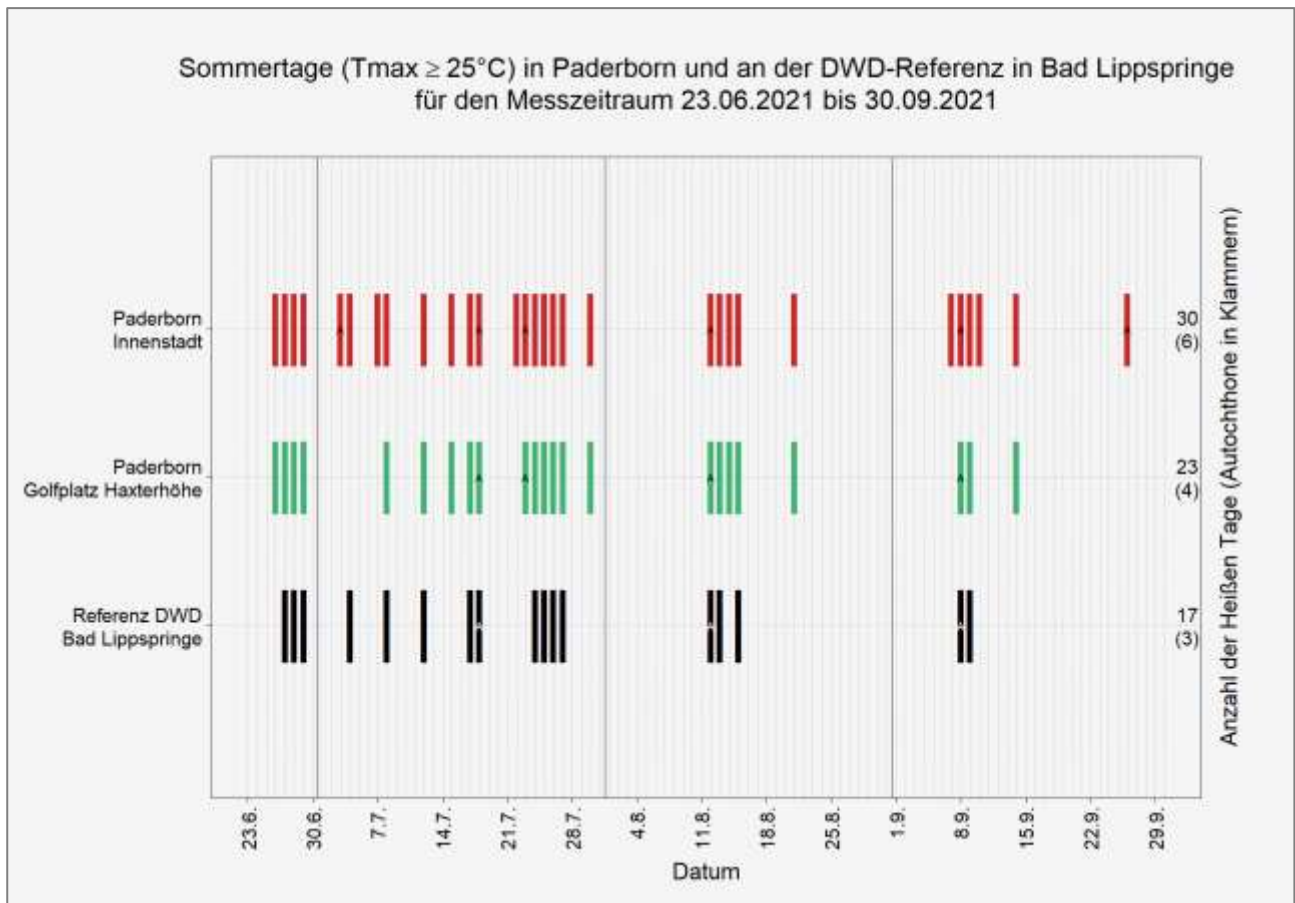


Abbildung 36: Sommertage bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 23.06.2021 bis 30.09.2021 an den temporären Messstationen in der Innenstadt Paderborns, dem Golfplatz Haxterhöhe und an der Referenz-Station des DWD in Bad-Lippspringe.

Sobald ein Sommertag bei autochthonen Bedingungen nach Augter (1997) – bei Bedeckungsgraden $\leq 4/8$ und Schwachwind bis 2,7 m/s – festgestellt wurde, erfolgte in Abbildung 36 eine Markierung durch ein „A“. Der Vergleich von Sommertagen bei autochthonen und nicht-autochthonen Bedingungen zeigt an den drei Standorten einen jeweils ähnlichen Zusammenhang. Sowohl an der DWD-Station als auch an der ruralen Paderborner Klimamessstation sind ca. 17 % der aufgezeichneten Sommertage bei autochthonen Bedingungen aufgetreten. An der urbanen Klimamessstation Paderborn lag dieser Anteil mit 20 % nur geringfügig höher.

HEIßE TAGE UND TROPENNÄCHTE

Der untypische, viel zu nasse und zu kalte Sommer (vgl. Kapitel 5.1) weist sowohl für die beiden temporären Paderborner Klimamessstationen als auch die Referenzstation des DWD in Bad Lippspringe weder Heiße Tage noch Tropennächte auf. Im gesamten Messzeitraum vom 23.06.-30.09.2021 wurde an den betrachteten Stationen folglich weder eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C oder mehr erreicht, noch blieb die Temperatur in einer Nacht bei mindestens 20 °C. Die entsprechenden leeren Grafiken in Anlehnung an der Abbildung 36 für Sommertage sind im Anhang als Abb. A 1 und Abb. A 2 zu finden. Während der Median der Zahl der Tro-

pennächte der Referenzperiode von 1971-2000 ebenfalls keine Tropennächte an der Referenzstation Bad Lippspringe aufzeigt, wären im Median 4 Heiße Tage pro Jahr an der Station Bad Lippspringe üblich. Es ist jedoch auch festzuhalten, dass die Messungen im Juni verspätet starten mussten (vgl. Kapitel 5.1) und damit eine sommerlich warme Periode Anfang des Monats nicht aufgezeichnet werden konnte. Hierbei traten zwischen 17. und 19.06.2021 an der Station Bad Lippspringe immerhin drei aufeinanderfolgende Heiße Tage und am 17.06.2021 sogar eine Tropennacht auf. Die Messdaten, vor allem der Messfahrt, waren trotz dessen geeignet den angestrebten qualitativen Vergleich zu den Ergebnissen der Modellierung anzustellen, da sich die typischen lokalklimatischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Landnutzungstypen trotzdem ausgebildet haben (siehe Kapitel 6.1.4).

6.1.2 AUSARBEITUNG DOMINIERENDER WINDRICHTUNGEN IM UNTERSUCHTEN ZEITRAUM (23.06.2021 – 30.09.2021)

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die während der sommerlichen Messkampagne vom 23.06.-30.09.2021 aufgezeichneten Hauptwindrichtungen an der urbanen und der ruralen Station sowie an der DWD-Referenzstation Bad Lippspringe ausgewertet. Bei der Betrachtung von Abbildung 37, die eine Auswertung aller Stunden des untersuchten Zeitraumes aufzeigt, fällt auf, dass sich die Hauptwindrichtungen der beiden ländlich gelegenen Stationen gleichen. Sowohl in Bad Lippspringe als auch am Golfplatz Haxterhöhe sind westliche Windrichtungen am häufigsten. Am Golfplatz zeigt sich zudem eine zweite vorherrschende Windrichtung aus Südost. Die urbane Station weist dagegen hauptsächlich Winde aus Südwest und Nordwest und ein Minimum aus West auf, was auf die westlich der Station gelegenen Gebäude zurückzuführen ist, die als Hindernis wirken. Auffällig ist zudem, dass die Windgeschwindigkeiten an der urbanen Station mit überwiegend schwachen Windgeschwindigkeiten zwischen 0-2 m/s (Mittelwert: 1,2 m/s) und Windspitzen bis 3,6 m/s deutlich geringer sind, als an den beiden ruhigkeitsarmen, ländlich gelegenen Stationen, bei Mittelwinden zwischen 2,2 m/s (DWD) und 2,8 m/s (rural) und Windböen bis ca. 8,5 m/s (DWD) bzw. 8,3 m/s (rural).

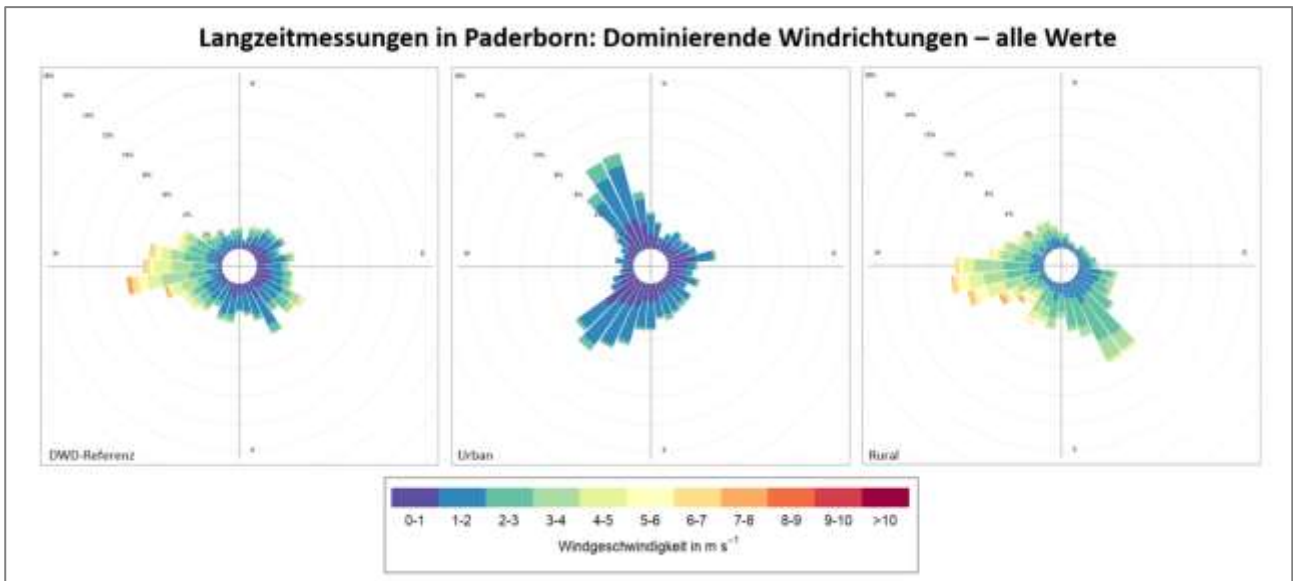


Abbildung 37: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 23.06.2021 – 30.09.2021 für alle Stunden an der DWD-Referenzstation Bad-Lippspringe (links), an der urbanen Klimamessstation Paderborn (Mitte) und an der ruralen Klimamessstation Paderborn (rechts). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.

Abbildung 38 zeigt die vorherrschende Windrichtung innerhalb der Nachtstunden von 19-07 Uhr MESZ des Untersuchungszeitraums. Da hierdurch die am Tage auftretenden Turbulenzeffekte eliminiert werden, sinken allgemein die Windgeschwindigkeiten, wobei die rurale Station am Golfplatz mit 2,5 m/s die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten aufzeigt (vgl. 0,9 m/s in der Innenstadt und 1,7 m/s in Bad Lippspringe). An den beiden ländliche geprägten Stationen hat sich die vorherrschende Windrichtung weiter nach Südost verschoben, während sich bei der Innenstadtstation mit ca. 4,5 % ein weiteres östliches Richtungsmaximum aus 80 ° herausstellt.

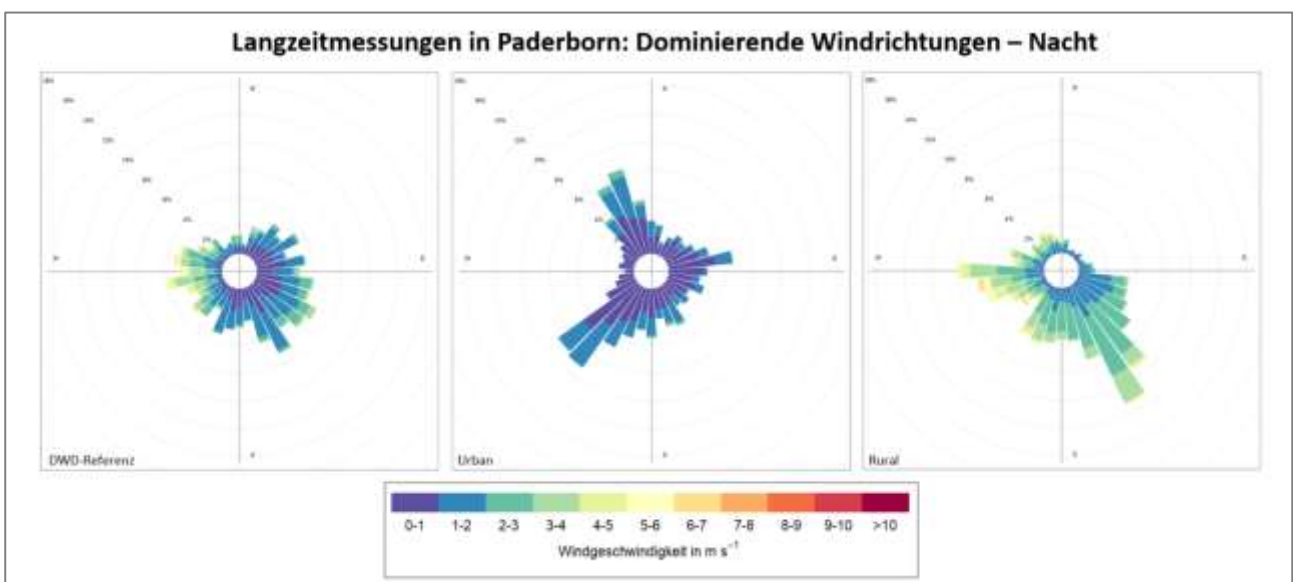


Abbildung 38: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 23.06.2021 – 30.09.2021 für alle Nachtstunden (19-07 Uhr MESZ) an der DWD-Referenzstation Bad-Lippspringe (links), an der urbanen Klimamessstation Paderborn (Mitte) und an der ruralen Klimamessstation Paderborn (rechts). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.

Da in der Modellsimulation eine nächtliche autochthone Wettersituation vorlag, um übergeordnete Windsysteme weitgehend auszuschließen, werden in Abbildung 39 ebenfalls nur autochthone Nachtstunden im sommerlichen Messzeitraum untersucht. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die häufig aus West herannahenden Winde der übergeordneten Strömung an allen drei Stationen weitgehend verschwinden. Zu autochthonen Wetterlagen entstehen Windsysteme weitgehend aufgrund lokaler thermischer Unterschiede zwischen Stadt und Umland, sogenannte Flurwinde, oder durch Reliefunterschiede, z.B. als Hangabwinde. An der DWD-Referenzstation dominieren zu diesen Wetterlagen in der Nacht vor allem östliche Winde, wobei auf 60 ° im Nordosten und auf 150 ° im Südosten zwei Richtungsmaxima mit einer Häufigkeit von je 8 % zu finden sind. An der ruralen Station Paderborn nimmt der gesamte südöstliche Sektor mit rund 68 % den Großteil der vorherrschenden Windrichtungen ein. Dies passt einerseits gut zum vornehmlich von Südost nach Nordwest abfallenden Gelände, zum anderen zur nordwestlich der Messstation gelegenen Stadt, die nachts eine thermische Sogwirkung induziert. Im Zusammenhang mit der geringsten Rauigkeit im Umfeld, sind die zu autochthonen Nächten vorherrschenden Hauptwindrichtungen an der innerstädtischen Station mit Nordwest (340 °, ca. 8 %), Ost (80 °, ca. 8 %) und Südwest (220 °, ca. 5 %) zu finden.

Allgemein betragen gemäß der Definition der autochthonen Wetterlage nach Augter (1997) die Windgeschwindigkeiten an allen Stationen $\leq 2,7$ m/s, wobei an der ruralen Station am Golfplatz mit im Mittel 1,9 m/s die höchsten und im städtischen Bereich mit höheren Rauigkeiten bei im Mittel 0,9 m/s die geringsten Windgeschwindigkeiten auftreten (vgl. 1,2 m/s an der DWD-Referenzstation).

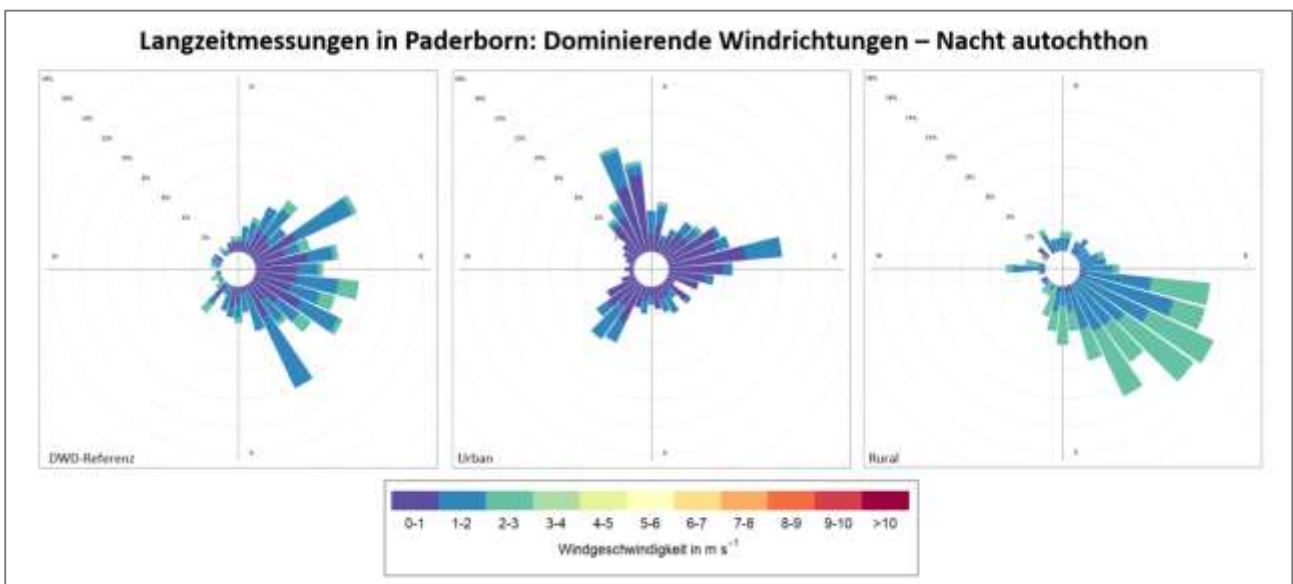


Abbildung 39: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 23.06.2021 – 30.09.2021 für alle autochthonen Nachtstunden (19-07 Uhr MESZ) an der DWD-Referenzstation Bad-Lippspringe (links), an der urbanen Klimamessstation Paderborn (Mitte) und an der ruralen Klimamessstation Paderborn (rechts). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftretshäufigkeit in Prozentschritten an.

In Abbildung 40 ist die modellierte nächtliche Windrichtung und -geschwindigkeit an der urbanen und der ruralen Station für 04 Uhr nachts dargestellt. Diese bietet die Möglichkeit eines Vergleichs mit den Messungen der Sommerkampagne in Paderborn, wenngleich dieser aufgrund der idealisierten Wettersituation im Modell nur qualitativ erfolgen kann. Analog zur Messung zeigen sich aufgrund von Rauigkeitsunterschieden auch in der Modellierung die Windgeschwindigkeiten an der urbanen Station geringer (bis 0,25 m/s) als an der ruralen Station (1 bis 1,25 m/s). Auch bei der modellierten Windrichtung sind große Übereinstimmungen zur Messung festzustellen. Während an der ruralen Station vornehmlich südöstliche Winde modelliert wurden, wird an der urbanen Station mit Nordwestwind einer der drei ermittelten Hauptwindsektoren getroffen.

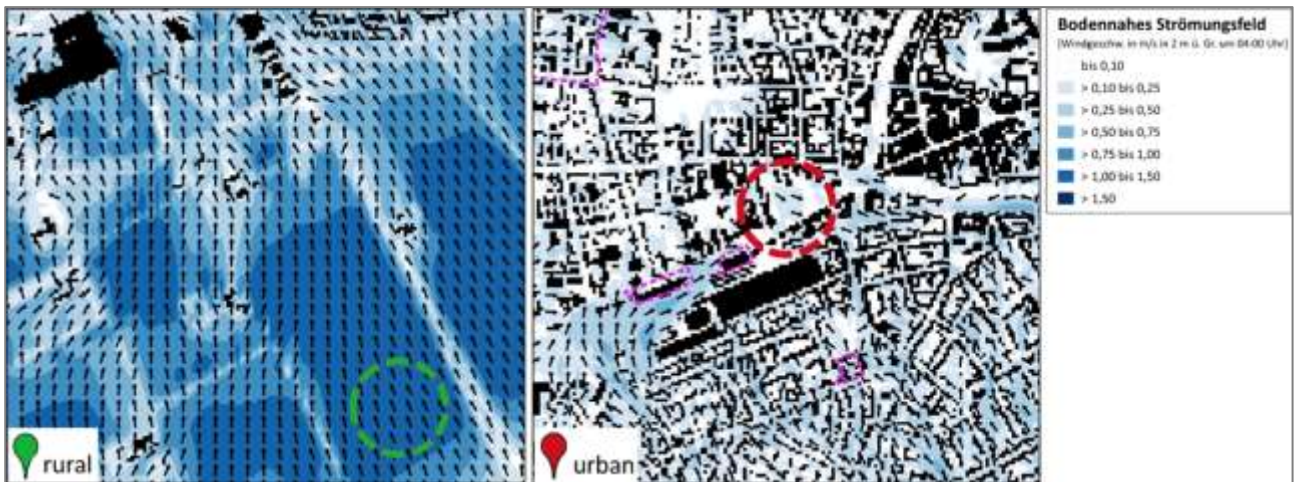


Abbildung 40: Modellierte nächtliche Windrichtung und -geschwindigkeit von 04:00 Uhr am ruralen und urbanen Messstandort zu einer autochthonen Wettersituation.

6.1.3 AUSWERTUNG EINER EXEMPLARISCHEN HITZEPERIODE VOM 11.-13.08.2021

Die Auswertung einer exemplarischen Hitzeperiode ermöglicht die Analyse von Unterschieden im Tagesgang der Messgrößen an den verschiedenen Messstandorten Paderborns. Ausgewählt wurde die für den Sommer 2021 vergleichsweise warme und niederschlagsfreie Phase vom 11. – 13. August, die sich wie an der ca. 11 km entfernten DWD-Station Bad Lippspringe gemessen zusätzlich durch überwiegend hohe Sonnenscheindauern auszeichnete (s. Abbildung 41). Das wolkige Erscheinungsbild mit tagsüber oftmals mehr als 6/8 passt mit der hohen Zahl an Sonnenminuten nur zusammen, wenn es sich bei der vorherrschenden Wolkenart überwiegend um strahlungsdurchlässige Cirrusbewölkung (Schleierwolken) handelte. Da an der DWD-Station Bad Lippspringe heutzutage jedoch keine Augenbeobachtungen mehr stattfinden, kann dies nur vermutet werden. Die Windgeschwindigkeiten verblieben an den drei Stationen auf einem schwachen bis mäßigen Niveau zwischen weniger als 1 bis maximal 6 m/s am Tage und nochmals geringeren Werten in der Nacht (s. Abbildung 42). Dabei zeigten sich die Windgeschwindigkeiten im ruhigkeitsarmen Umland (Golfplatz und Bad Lippspringe) allgemein wieder höher als in der Stadt, teils um bis zu 4 m/s. Der Wind wehte an den drei Stationen während der betrachteten Wärmeperiode tagsüber zumeist aus nördlichen und nordwestlichen Richtungen. In der Nacht wurde im Innenstadtbereich vornehmlich Wind aus nördlichen Richtungen registriert, während analog zu den Untersuchungen in Kapitel 6.1.2 im Umland größtenteils Südostwinde aufgezeichnet wurden.

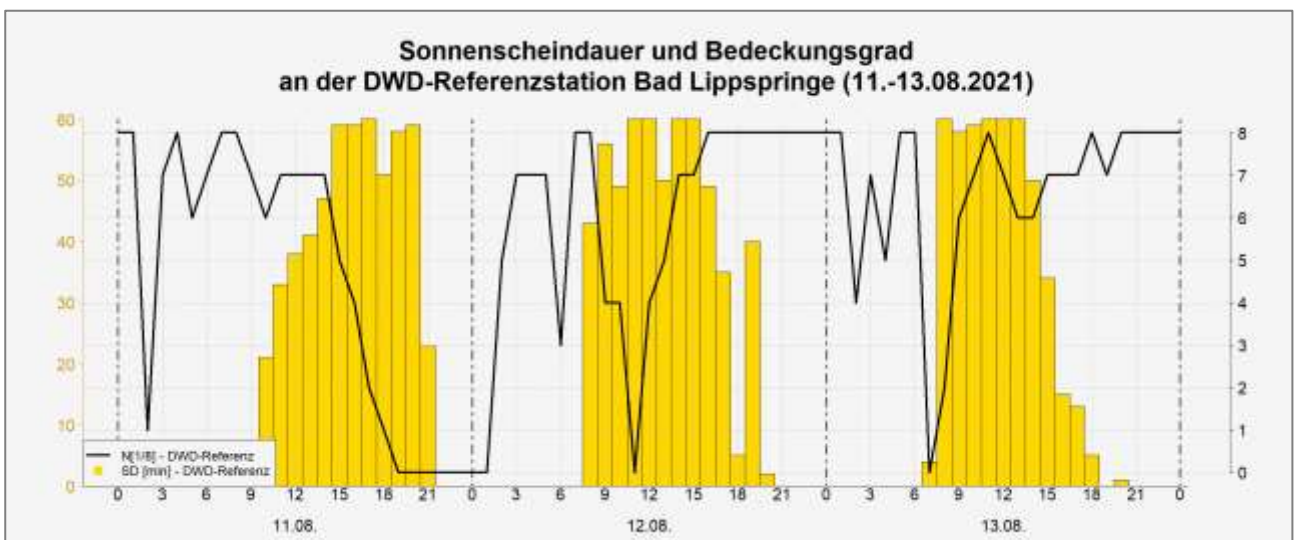


Abbildung 41: Sonnenscheindauer und Bedeckungsgrad zur betrachteten Hitzeperiode von 11.-13.08.2021, ermittelt an der DWD-Station Bad-Lippspringe.

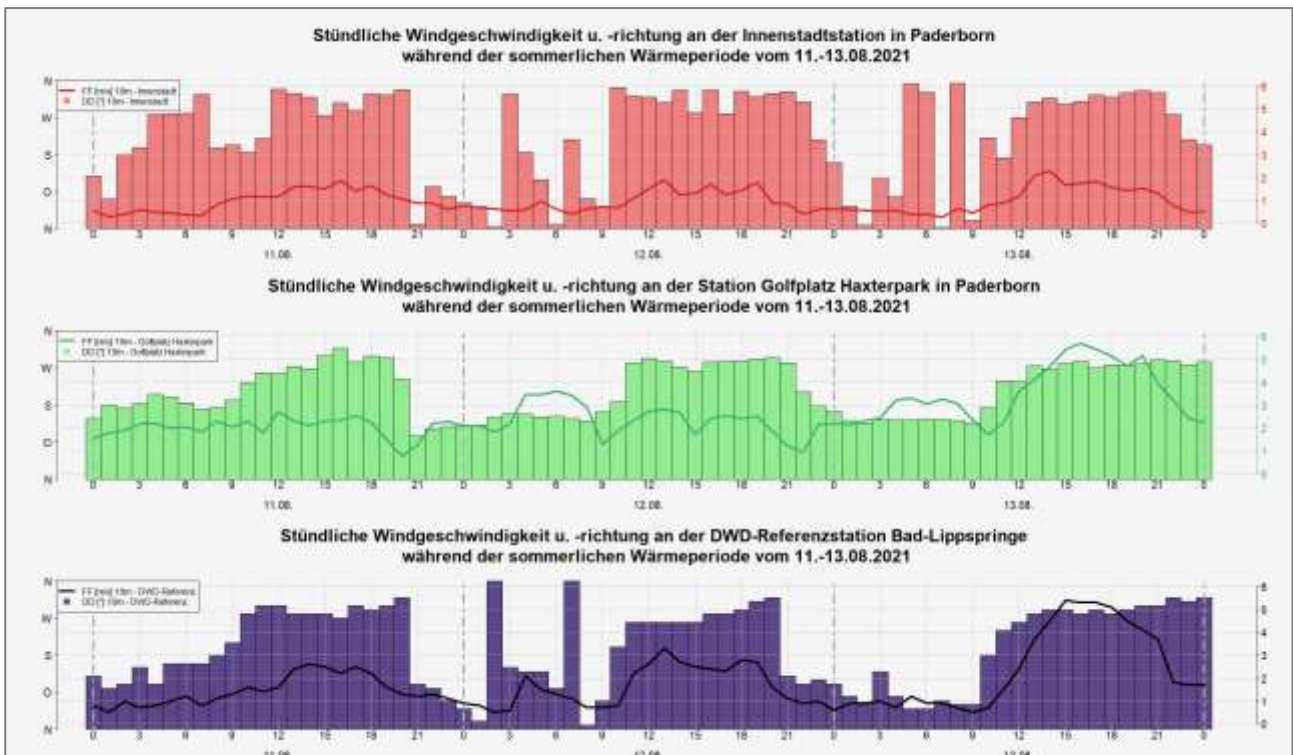


Abbildung 42: Gemessene stündliche Windgeschwindigkeiten und -richtungen auf 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode von 11.-13.08.2021, ermittelt an den temporären Messstationen in der Innenstadt Paderborns, dem Golfplatz Haxterhöhe und an der Referenz-Station des DWD in Bad-Lippspringe.

Abbildung 43 zeigt den Tagesgang der mittleren Temperatur für die zwei temporären Messstandorte Paderborns und den DWD-Referenzstandort während der gewählten Wetterperiode. Dadurch, dass tagsüber jeden Tag mehr Wärme in die Böden und Fassaden eingetragen wird als nachts infolge der nächtlichen Ausstrahlung wieder abgeführt werden kann, wachsen die Temperaturamplituden vom 11.-13.08. an allen Standorten täglich an.

Es wird ersichtlich, dass die Innenstadttemperaturen stets höher sind als jene im Umland, wobei dieser Effekt am Tage mit einer Temperaturdifferenz von ca. 1 K weniger stark zur Geltung kommt als in der Nacht, wo zu manchen Zeiten Unterschiede von 3-4 K registriert werden. Dieser nächtliche Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland wird Wärmeinseleffekt (UHI⁷) genannt. Die Referenzkurve des DWD in Bad Lippspringe ist im gesamten Messzeitraum kühler als die Temperaturmessungen in Paderborn, befindet sich allgemein aber nur wenige Zehntel Kelvin unterhalb der Kurve des ruralen Standorts und ist mit diesem, auch aufgrund der ähnlichen Standortbeschaffenheit, gut vergleichbar.

Zum Sonnenaufgang gegen 6 Uhr MESZ erwärmen sich die Oberflächen in der Stadt und im Umland gleichermaßen stark, jedoch speichert die Vielzahl an dunklen asphaltierten oder betonierte Oberflächen in der Stadt die Energie der Sonne im Tagesverlauf deutlich besser im Material und gibt diese zusätzlich kontinuierlich an die Umgebung ab. Durch die vertikale städtische Bauweise ist die Zahl der Wärme emittierenden Flächen in der Innenstadt größer als im ländlichen Raum, wo wie beispielsweise am Golfplatz Haxterhöhe lediglich vom Boden aus Wärme abgestrahlt wird. Neben dem Material ist auch die Farbe der Oberflächen von Belang: Helle

⁷ UHI = Urban Heat Island

Flächen reflektieren einfallende solare Strahlung und geben direkt einen großen Teil zurück an die Atmosphäre, während dunkle Flächen die kurzwellige Sonnenstrahlung absorbieren und so eine Speicherung im Material erleichtern. Schattenspendende Bäume sind an keinem der untersuchten Standorte zu finden, weshalb die Temperaturmaxima am Tag jeweils noch nah beieinander liegen. Während diese am 11.08. noch unterhalb von 25 °C blieben, wurde am 12. Und 13.08. je ein Sommertag erreicht.

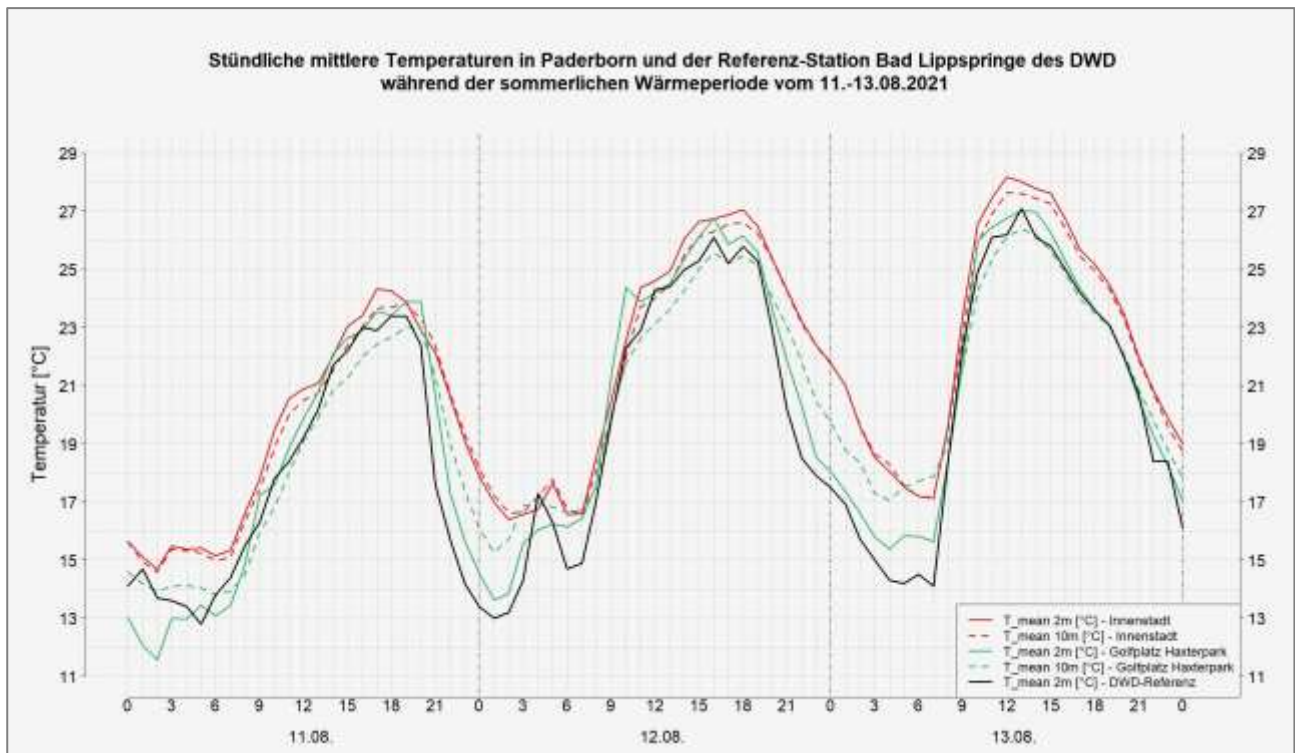


Abbildung 43: Gemessene stündliche Temperaturen auf 2 m und 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode von 11.-13.08.2021, ermittelt an den temporären Messstationen in der Innenstadt Paderborns, dem Golfplatz Haxterhöhe und an der Referenz-Station des DWD in Bad-Lippspringe.

Ab den Abendstunden (Sonnenuntergang gegen 21 Uhr) und in der ersten Nachthälfte fallen die Temperaturen der Stationen im ländlichen Raum rascher ab als in der Stadt, was an den deutlich steileren Kurven zu erkennen, und auf die höheren Wärmekapazitäten im urbanen Raum zurückzuführen ist. Während das Minimum der mittleren 2 m-Temperatur in der Nacht vom 11./12.08. und 12./13.08. am Golfplatz Haxterhöhe bis auf 13,8 °C bzw. 15,5 °C (DWD-Referenz: 13 °C) abfällt, liegen die Temperaturminima des 2 m-Mittels in der Innenstadt Paderborns bei ca. 16,5 °C bzw. 17,2 °C (DWD-Referenz: 14,1 °C).

Die Temperaturwerte der Messung auf 10 m ü. Gr. sind in der Nacht zumeist höher als jene Messung auf 2 m. Am Tag ist das Verhältnis umgekehrt und die Temperatur in 10 m ü. Gr. niedriger. Diese Beobachtung hängt damit zusammen, dass am Tage die bodennahen Luftschichten zügiger durch die emittierte Wärmestrahlung aufgeheizt werden als darüberliegende Schichten. In der Nacht sind Prozesse der Kaltluftentstehung dominierend. Hierbei kühlt der Boden allmählich aus, was die bodennahe Lufttemperatur absenkt. Die Kaltluftsäule dehnt sich erst im Laufe der Nacht vertikal aus, wobei aufgrund der Tatsache, dass die vergleichsweise schwere kalte Luft nach unten absinkt, bodennah stets die geringeren Temperaturwerte registriert werden.

Während der mehr als 3-monatigen Messkampagne wurde an den beiden Standorten neben der Temperatur in °C auch die relative Luftfeuchtigkeit in % aufgezeichnet. Diese Größe bringt eine Temperaturabhängigkeit mit sich und liefert infolgedessen keinen großen Mehrwert gegenüber den gezeigten Temperaturabbildungen. Dennoch zeigt Abbildung 44 exemplarisch die relative Feuchte während der Hitzeperiode vom 11.-13.08.2021.

Wie bereits bei der Temperatur gesehen, liegen auch die Werte der Feuchte am Tage an allen Standorten etwas näher beieinander und fächern nachts weiter auf. Nahezu überall, wo zuvor Temperaturmaxima registriert wurden, zeigt die Feuchte Minima auf und umgekehrt. Am besten ist dies an der Referenzstation des DWD zu beobachten, die zuvor stets das niedrigste Wertespektrum offenbarte, nun jedoch die größten Feuchtemaxima und den insgesamt höchsten Verlauf dieser Größe besitzt.

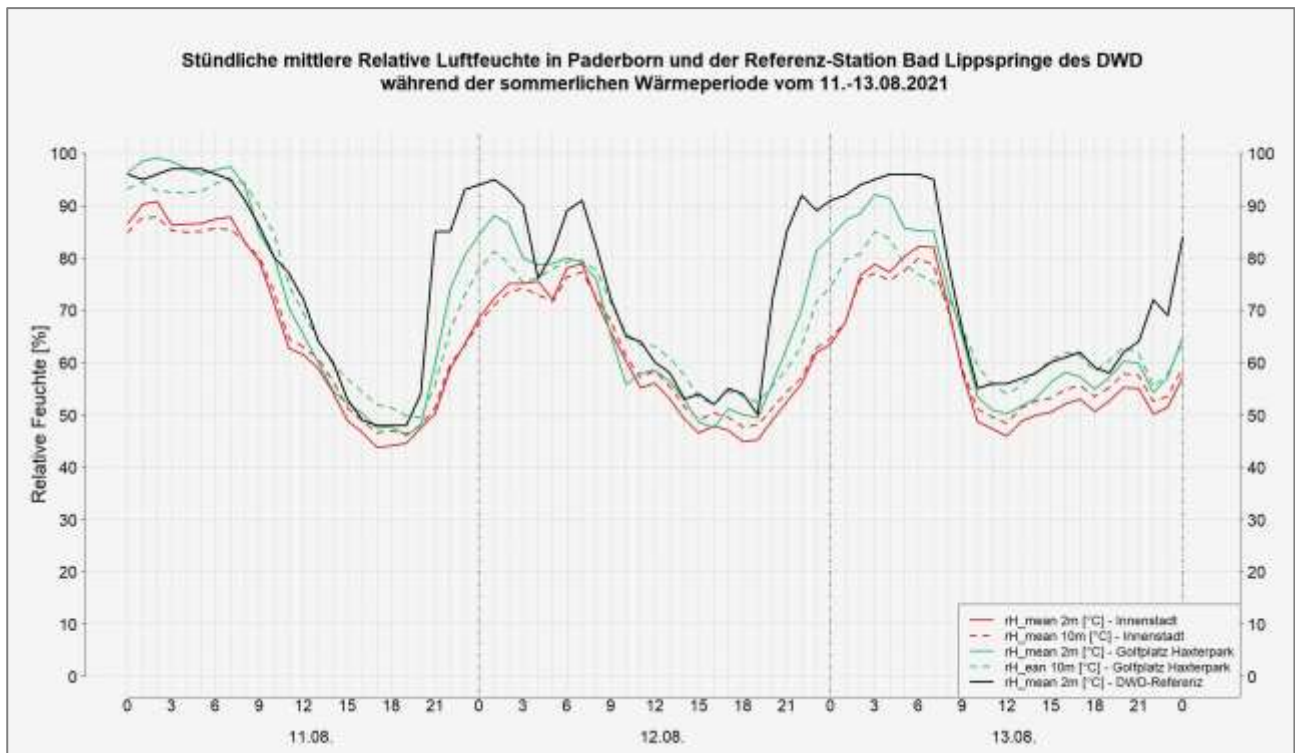


Abbildung 44: Gemessene stündliche relative Luftfeuchtigkeit auf 2 m und 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode von 11.-13.08.2021, ermittelt an den temporären Messstationen in der Innenstadt Paderborns, dem Golfplatz Haxterhöhe und an der Referenz-Station des DWD in Bad-Lippspringe.

6.1.4 ERGEBNISSE DER MESSFAHRTEN

Wie bereits in Kapitel 5.1 geschildert, war die Wettersituation bei der Durchführung der Messfahrten am 24./25.08.2021 zwar in guter Näherung autochthon, jedoch für die eigentlich angestrebten sommerlichen Messbedingungen zu kühl. So standen einer modellierten Temperaturspanne von 15 bis über 21 °C gegen 23 Uhr eine gemessene Spanne von ca. 12-14,5 °C gegenüber. Um 04 Uhr nachts wurden etwa 14,5-20 °C modelliert und ca. 8-10,5 °C gemessen. Da bei solch großen Temperaturunterschieden eine statistische Angleichung der Messwerte an die Modellierung zu großen Unsicherheiten geführt hätte, wurde für gemeinsame Darstellungen in einer Karte die Farbskala der Messung an die der Modellierung angeglichen. Auf diese Weise können qualitative Aussagen zu den räumlichen Mustern beim Vergleich von modellierten und gemessenen Wärme- und Kältespots im Stadtgebiet getroffen werden.

ERSTE NACHTHÄLFTE – AUSWERTEZEIT 23 UHR

Die Ergebnisse der Messfahrt der ersten Nachthälfte vom 24.08.2021 21:55 Uhr MESZ bis 25.08.2021 00:06 Uhr MESZ, interpoliert auf 23 Uhr, sind in Abbildung 45 aufgetragen. Im Hintergrund der Karte befindet sich das flächenhaft modellierte Temperaturfeld in einer horizontalen Auflösung von 10 m für 23 Uhr.

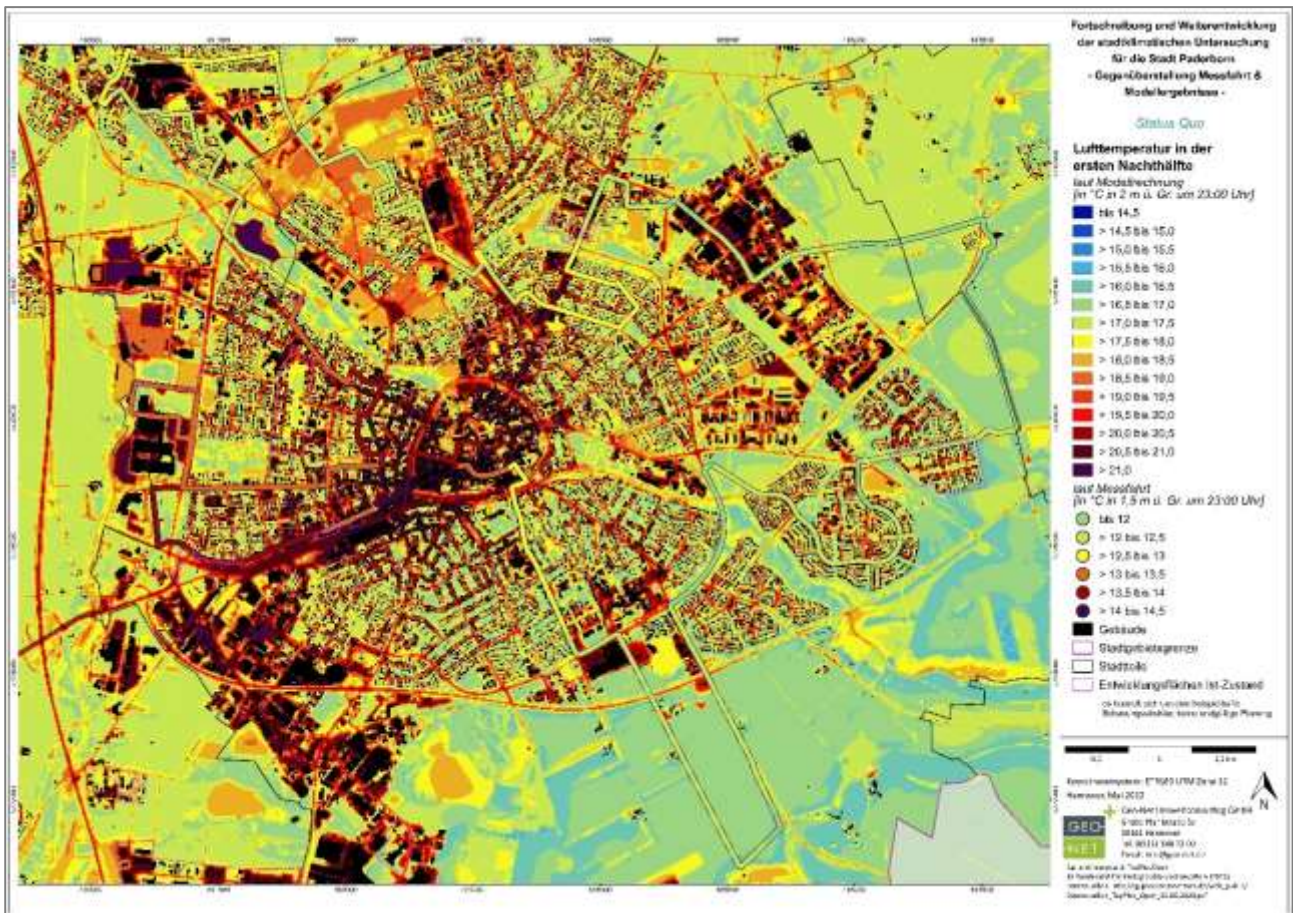


Abbildung 45: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt der ersten Nachhälfte (auf 23 Uhr normiert) und dem FITNAH-Modelllauf von 23 Uhr.

Insgesamt ähneln sich die Positionen der Temperaturextrema zwischen Modell und Messung im Stadtgebiet stark. Sowohl bei der Messfahrt als auch im Modell treten die niedrigsten Temperaturen auf den umliegenden Ackerflächen am Stadtrand auf, wobei das Minimum der Messung auf den Agrarflächen westlich des Stadtgebietes im Bereich der Benhauser Str. registriert wurde. Auch der Bereich des Golfplatzes Haxterhöhe zeigt sich in Messung und Modell vergleichsweise kühl, was die Güte des gewählten Standorts als rurale Messstation noch einmal bestätigt.

Am wärmsten treten in Modell und Messung die Innenstadtbereiche der Altstadt und rund um die Bahnhofstraße hervor, aber auch die Gewerbegebiete im Stadtgebiet. Exemplarisch ist hierbei der Industriepark Alme (Diebold Nixdorf) zu nennen, wo die skalierte Farbgebung der Messung im orangen und roten Bereich gut zur überwärmten Flächendarstellung des Modells passt. Weniger übereinstimmend zeigt sich dagegen die Messung entlang des Gewerbegebietes Dören zu den modellierten Temperaturwerten. Während im Modell Maxima im dunkelroten und violetten Bereich ermittelt wurden, zeigt die Messung eher Farbgebungen am unteren Ende der Skala. Mögliche Ursachen könnten hierbei in Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten liegen. Bei einer Auflösung von 10 m finden beispielsweise mancherorts Bäume keine Berücksichtigung, die die solare Einstrahlung am Tage auf die Oberflächen des Gewerbegebietes durch ihre Schattenwirkung abschwächen könnten. Wahrscheinlicher scheint jedoch die wenig warme Wetterlage während der Messungen als Ursache. Diese ermöglichte zwar eine flächendeckende Erwärmung im urbanen Raum, verhinderte aber nicht die noch immer gute Durchlüftung der Gewerbegebiete am Stadtrand, welche in einer größeren Hitzestresssituation ggf. nicht mehr gegeben gewesen wäre.

Ebenfalls mäßige Übereinstimmungen sind im Waldbereich des Parks an den Fischteichen zu beobachten, wo das Modell die Reduktion der nächtlichen Ausstrahlung infolge der Kronendächer der Bäume ggf. geringfügig überschätzt. Wahrscheinlicher ist jedoch, dass die Oberflächen in diesem Bereich während der kühlen Wetterlage tagsüber nicht auf das Niveau aufgeheizt wurden, was im Modell angenommen wurde. Infolgedessen sind diese bereits frühzeitig ausgekühlt und weisen daher in der Messung gegen 23 Uhr ein deutlich geringeres Temperaturniveau auf als im Modell.

Weitere gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messung finden sich derweil in Übergangsbereichen zwischen urbanen und ländlich geprägteren Strukturen bzw. innerstädtischen Ausgleichsräumen wieder. Bei der Ausfahrt aus dem Siedlungsraum entlang der Neuhäuser Straße in Richtung der Heinz-Nixdorf-Aue und der Pader sowie des Padersees sind sowohl in der Messung als auch im Modell Temperaturabnahmen sichtbar.

ZWEITE NACHTHÄLFTE – AUSWERTEZEITPUNKT 04 UHR

Analog zur Abbildung von 23 Uhr zeigt die Abbildung 46 die auf das modellierte 04 Uhr-Temperaturraster aufgetragene und auf denselben Zeitpunkt interpolierte Temperaturmessung der Messfahrt für die zweite Nachthälfte. Im Vergleich zu Abbildung 45 wird die strahlungsbedingte Abkühlung von der ersten zur zweiten Nachthälfte sowohl im Modell als auch in der Messung durch ein insgesamt abgesenktes Temperaturniveau sichtbar. Im Gegensatz zum Analysezeitpunkt 23:00 Uhr ist das Kaltluftprozessgeschehen um 04:00 Uhr infolge der während der zweiten Nachthälfte vollständig ausgeprägten Flur- und Hangabwindssysteme maximiert.

Auch um 04 Uhr stimmen die modellierten und gemessenen Temperaturextrema erneut gut überein. Während die kühlest Bereiche wiederum im Osten des Untersuchungsgebietes gemessen wurden, zeigt sich die Innenstadt wie bereits gegen 23 Uhr am wärmsten. Gewerbegebiete, die im Modell ebenfalls vergleichsweise hohe Temperaturen vorweisen, erscheinen in der Messung immerhin auf einem mittleren Temperaturniveau. Anders als um 23 Uhr zeigen die beiden Gewerbeareale im Osten (Dören) und Westen (Alme) der Stadt diesmal keine nennenswerten Unterschiede, was in der zweiten Nachthälfte für eine gute Durchlüftung im gesamten Außenbereich der Stadt spricht. Wie bereits 23 Uhr treten auch die Übergangsbereiche zwischen urbanen Strukturen und Ausgleichsflächen wieder durch Abkühlungseffekte entlang der Strecke in Erscheinung, z.B. im Bereich der Pader. Auch das Waldgebiet am Park an den Fischteichen zeigt in Modell und Messung nun eine ähnlichere, vergleichsweise kühle Farbgebung und weniger große Differenzen wie noch gegen 23 Uhr.

Etwas weniger gut als noch zu 23 Uhr passen auf den ersten Blick einige befahrene Siedlungsbereiche zur Modellierung. Hierbei ist beispielsweise der Bereich „An der Springbeke“ östlich des Paderborner Nordbahnhofs zu nennen. Dieser fällt mit der orangen Farbgebung der Messung im Vergleich zur blau eingefärbten Umgebung der Modellierung unterschiedlich aus. Da die Befahrung aber im Straßenraum stattfand, wo versiegelte Oberflächen auch um 04 Uhr morgens noch Wärme emittieren, sind Unterschiede dieser Größenordnung im Vergleich zu den weitgehend versiegelungsarmen und teils begrünten Innenhöfen im Umfeld nicht verwunderlich.

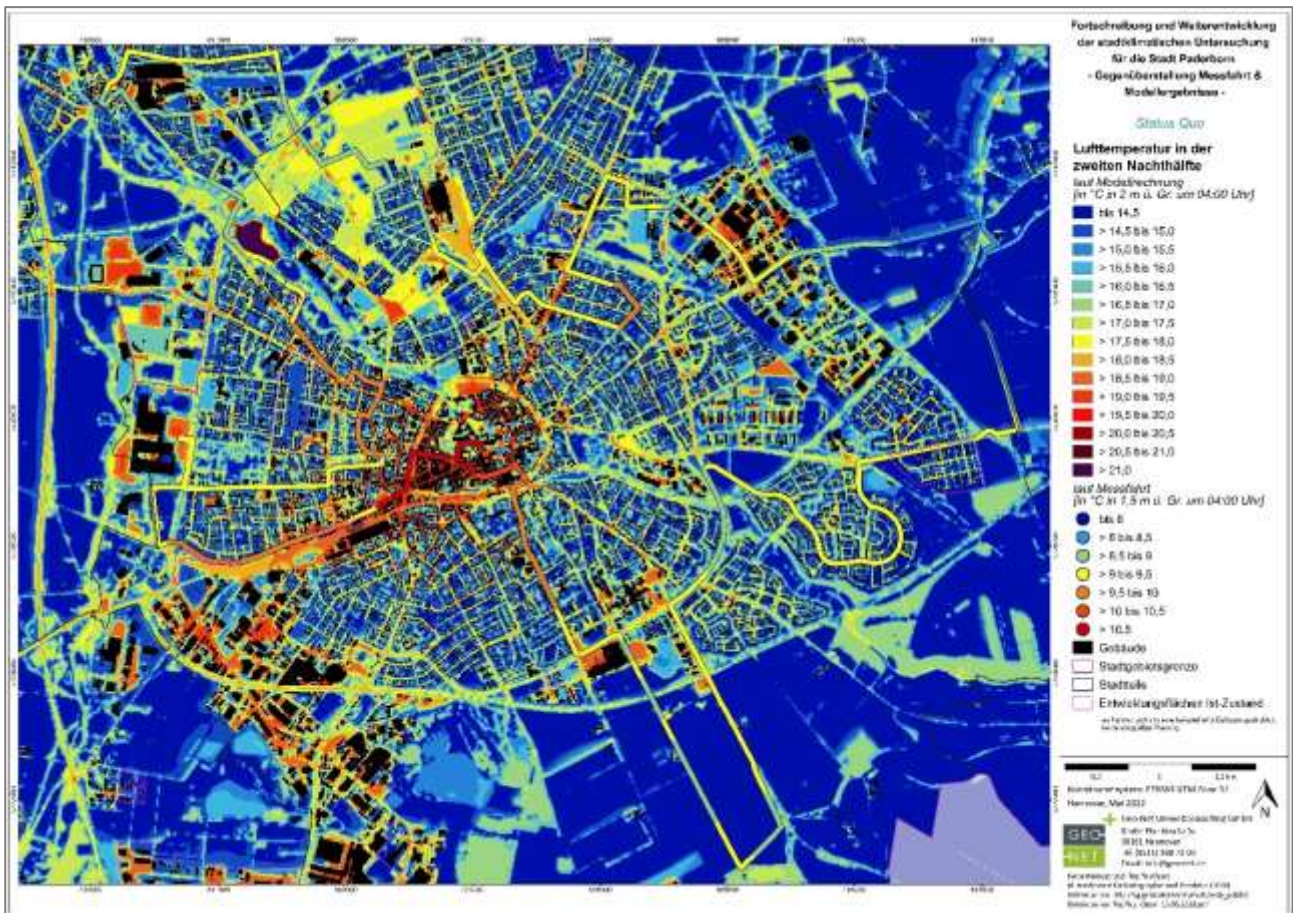


Abbildung 46: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt der zweiten Nachthälfte (auf 04 Uhr normiert) und dem FITNAH-Modelllauf von 04 Uhr.

6.1.5 ERGEBNISSE DER VERTIKALSONDIERUNGEN

In der Nacht vom 11./12.08.2021 fanden von 20 Uhr bis 06 Uhr MESZ Vertikalsondierungen mit einer Drohne an der Station in der Innenstadt statt, in der Folgenacht an der ruralen Station am Golfplatz Haxterhöhe. In den folgenden beiden Kapiteln wird zuerst die Messung meteorologischer Parameter an der ruralen, nachfolgend jene an der urbanen Klimamessstation vorgestellt. Im Anschluss erfolgt die Präsentation der Ergebnisse der Infrarotaufnahmen mithilfe der Drohne.

AUSWERTUNG DER AUFSTIEGE AM STADTRAND (12./13.08.2021)

Die grafische Darstellung der mittels drohnenbasierter Vertikalsondierung erhobenen Temperatur zu vier nächtlichen Zeitpunkten ist für die Messung in der ruralen Umgebung Paderborns in Abbildung 47 aufgetragen. Auch wenn die Wettersituation nur annähernd autochthon war (vgl. Kapitel 5.1), gibt diese Abbildung einen Einblick in die Kaltluftentstehung im Umland. Zu allen Aufstiegsstunden sind bodennahe Inversionsschichten zu beobachten. Bei einer Inversion, auch stabile Schichtung genannt, nimmt die Temperatur mit der Höhe zu, statt ab. Bis zu dem Punkt, an dem sich die Temperatur nur noch wenig ändert bzw. sie sich wieder mit der Höhe verringert, ist Kaltluft vorhanden. Diese Stelle wird jeweils durch eine blaue horizontale Linie markiert. Im konkreten Fall von 22 Uhr verfügt die Kaltluft folglich über eine Mächtigkeit von ungefähr 35 m. In der betrachteten Messnacht steigt die Kaltluftssäule noch weiter bis auf etwa 70-80 m an und bleibt bis zu den Morgenstunden ungefähr konstant auf diesem Niveau. Bei der Definition von verfügbarer Kaltluft ist jedoch zu beachten, wie hoch die Temperatur der umliegenden Siedlungsflächen ist. „Kalt“-Luft aus der Höhe, die nominell wärmer als die Luft innerhalb besiedelter Umgebungsflächen ist, wird nicht zur Abkühlung ebendieser beitragen können.

Bodennah zeigt sich bei der Messung mit der Drohne eine Abkühlung der Lufttemperatur von ca. 17,7 °C gegen 22 Uhr bis auf etwa 14,8 °C gegen 04 Uhr morgens. Diese Differenz von 2,9 K ist deutlich größer als jene in der Höhe, wo zwischen beiden Zeitpunkten kein Temperaturunterschied zu ermitteln war. Auch die beiden anderen untersuchten Stunden 00 Uhr und 02 Uhr weichen am Oberrand der Messung auf ca. 300 m nur um ca. 0,4 K von 22 und 04 Uhr ab. Die Abb. A 3 zur relativen Luftfeuchtigkeit befindet sich im Anhang. Die relative Luftfeuchtigkeit ist eine Funktion der Temperatur und verhält sich nahezu konträr zu dieser. Somit sind Zeiten, in denen die höchsten Temperaturen erreicht werden, ebenfalls die trockensten.

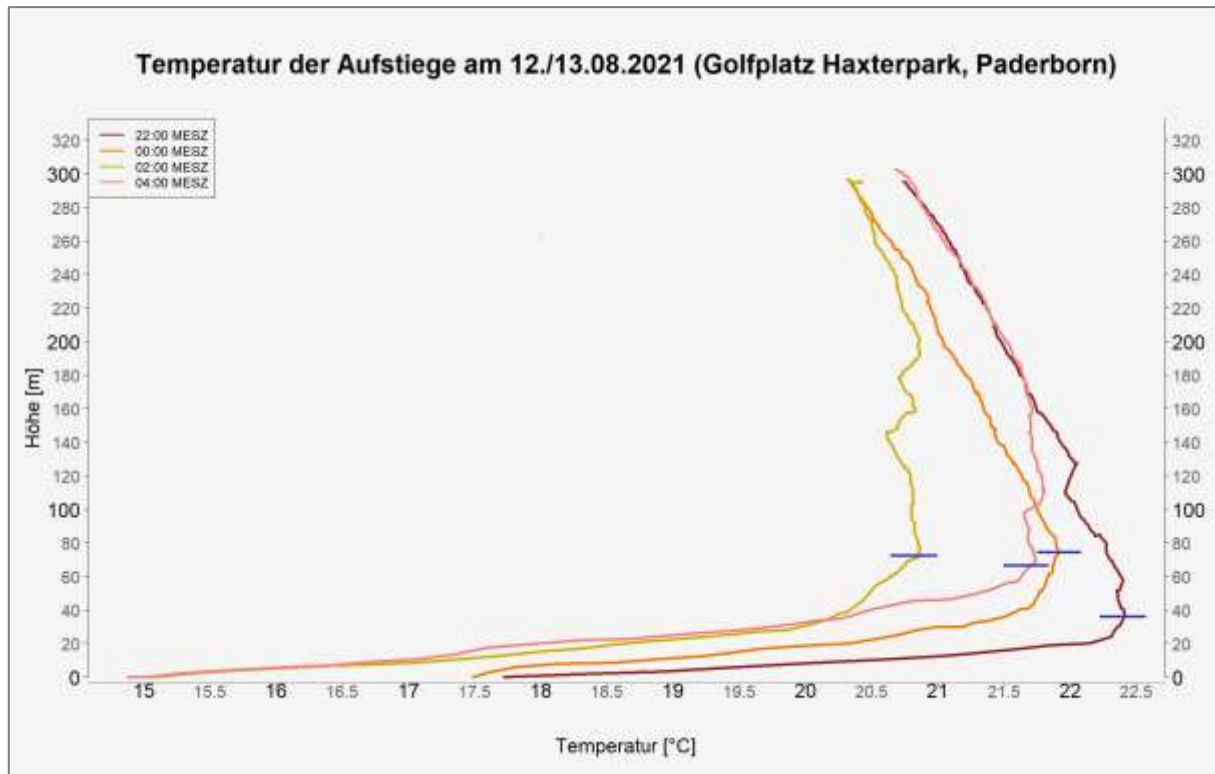


Abbildung 47: Vergleich der Vertikalprofile der Temperatur zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 12./13.08.2021 am ruralen Standort. Die blauen horizontalen Linien deuten die abgeschätzte Höhe der Kaltluftschicht an.

Gemäß der gewünschten autochthonen Wetterlage wurden am Messtag bodennah vornehmlich schwache Winde $\leq 2,7$ m/s, überwiegend gar < 2 m/s gemessen (Abbildung 48). Auch in der Höhe nahm die Windgeschwindigkeit bis zum Oberrand der Messung nur geringfügig zu, bis maximal auf 3,7 m/s. Der Wind drehte vom Boden bis auf 300 m von südlichen Richtungen auf Nordwest und mit den späteren Nachtstunden auf Südwest (Abbildung 49). Gleichzeitig ist eine bodennahe Winddrehung von Südwest auf Südost zu beobachten, die ein Anzeichen für die in der zweiten Nachthälfte einsetzenden Flurwinde stadteinwärts darstellt.

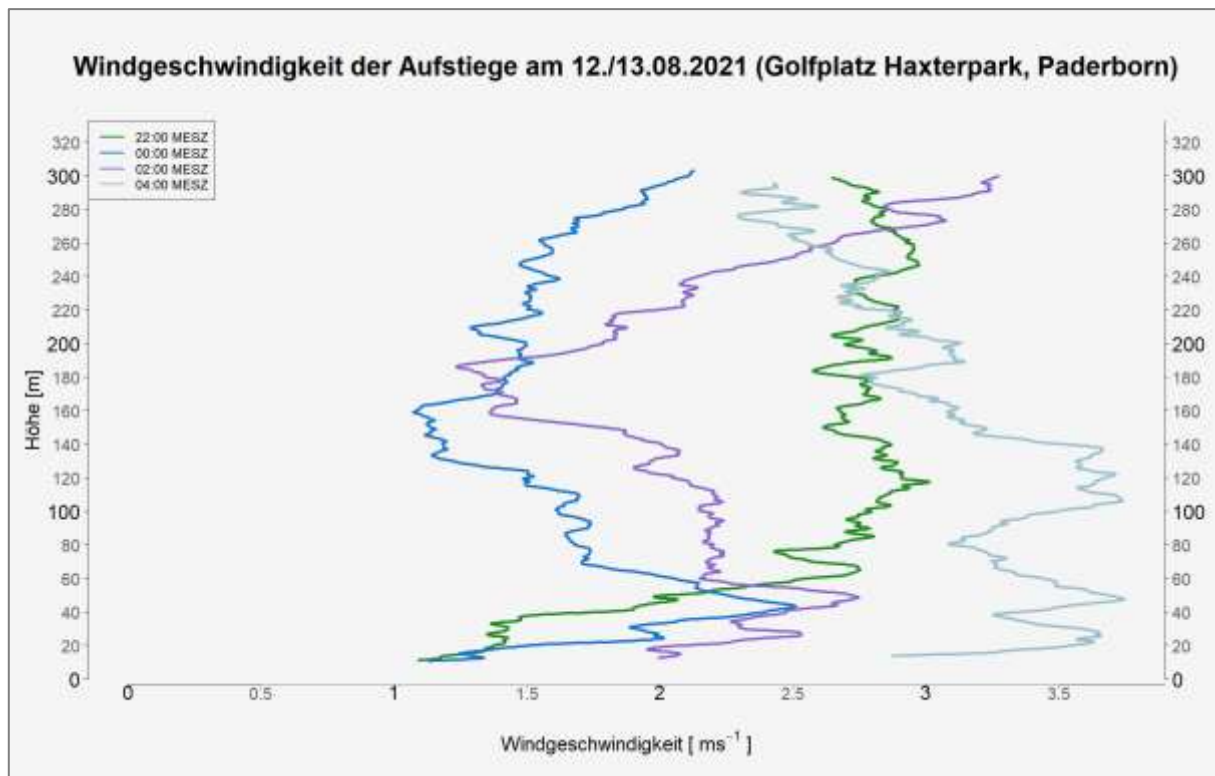


Abbildung 48: Vergleich der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 12./13.08.2021 am ruralen Standort.

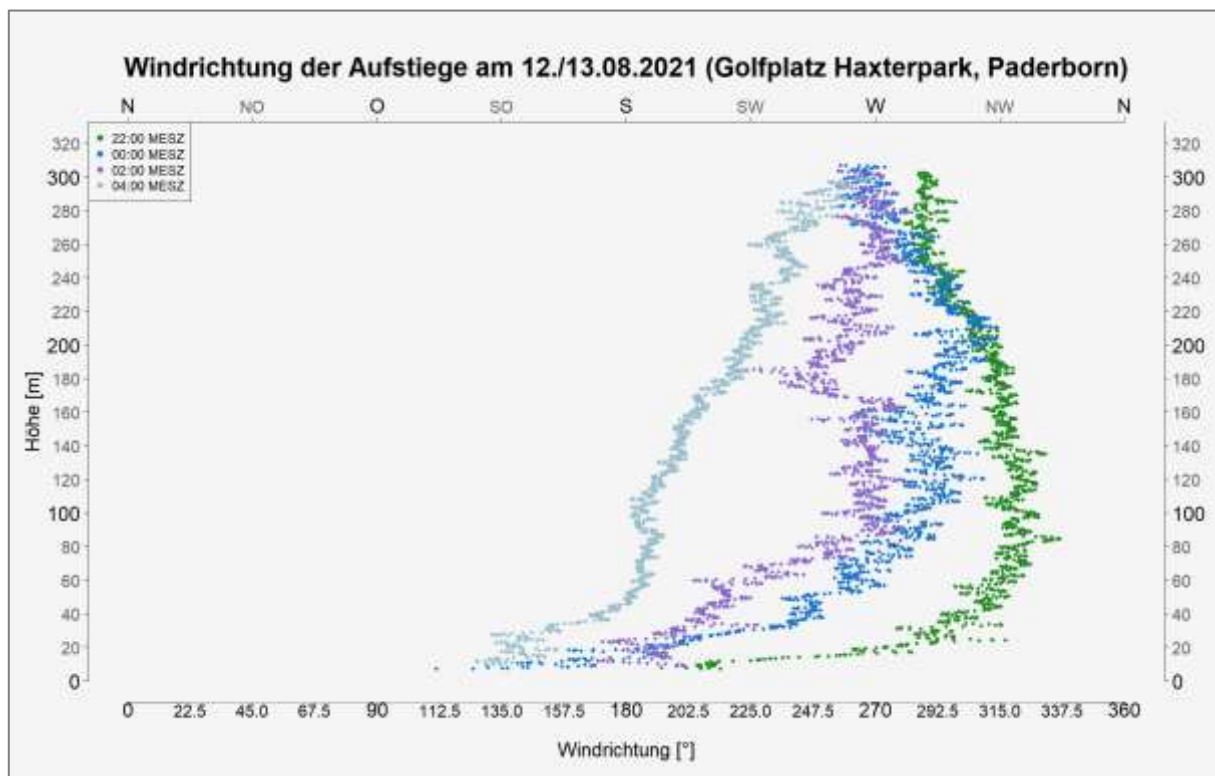


Abbildung 49: Vergleich der Vertikalprofile der Windrichtung zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 12./13.08.2021 am ruralen Standort.

AUSWERTUNG DER AUFSTIEGE IN DER INNENSTADT (11./12.08.2021)

Abbildung 50 stellt die Vertikalsondierung der Temperatur zu vier Zeitpunkten der Messung vom 11./12.08.2021 in der Innenstadt Paderborn dar. Die Abbildung zeigt abermals sehr anschaulich, wie sich der Standort im Verlauf der Nacht bodennah abkühlt, von ca. 19,8 °C gegen 22 Uhr bis ca. 16,7 °C um 02 Uhr. Aufgrund der Bewölkungszunahme in der zweiten Nachthälfte war die nächtliche langwellige Ausstrahlung in der Folge beeinträchtigt, weshalb die bodennahe Temperatur gegen 04 Uhr wieder leicht bis auf 17,9 °C zunahm. Obwohl der 11.08. im Vergleich zum 12.08., an dem die Messung an der ruralen Station stattfand, kühler war, sind die bodennahen nächtlichen Temperaturen in der Innenstadt höher als am Golfplatz Haxterhöhe. Der Grund dafür ist die große Energiemenge, die die urbanen Oberflächen und Baukörper aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften tagsüber durch die Sonne speichern und in Wärme umwandeln. Diese warme Luft steigt nach Sonnenuntergang im Zuge der langwelligen Ausstrahlung in Richtung der Atmosphäre auf. Die städtischen, weitgehend versiegelten Oberflächen sind im Vergleich zum ländlich geprägten Golfplatz in den späten Nachtstunden noch immer nicht gänzlich ausgekühlt, weshalb das Kaltluftprozessgeschehen im urbanen Raum gestört ist. Dies ist auch an den Temperaturwerten in der Höhe zu beobachten, die in der weitgehend autochthonen Messnacht keine Inversionsschicht, also keine Zunahme der Temperatur mit der Höhe, am Boden aufzeigen. Vielmehr stagniert die Temperatur auf den ersten ca. 60 Höhenmetern bei konstanten Werten. Erst darüber ist eine Temperaturzunahme mit steigender Höhe zu beobachten, eine sogenannte Höheninversion. Kaltluftproduktion, die dem Siedlungsraum zugutekommen könnte, ist im Innenstadtbereich nicht zu beobachten.

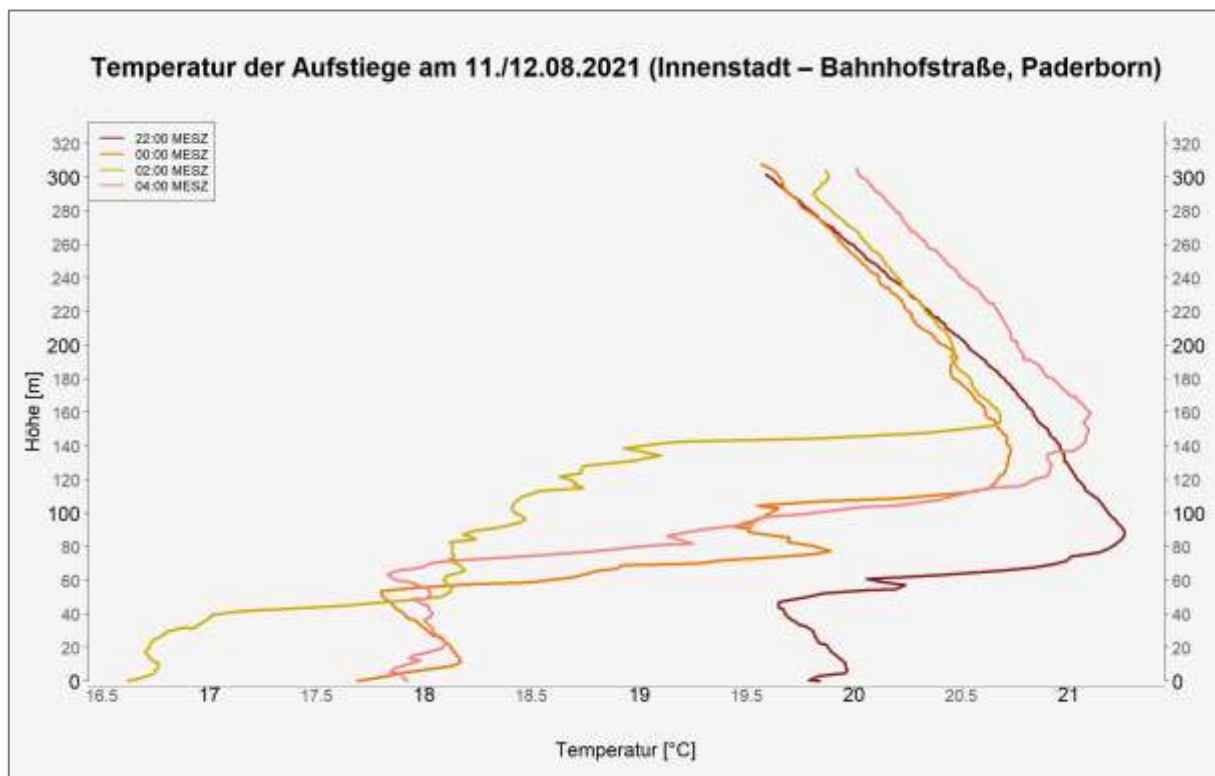


Abbildung 50: Vergleich der Vertikalprofile der Temperatur zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 11./12.08.2021 am urbanen Standort.

In Abbildung 51 ist wiederum ersichtlich, dass bei geringen bodennahe Windgeschwindigkeiten um 2 m/s gemessen wurde, passend zu den von Augter (1997) definierten maximalen Windgeschwindigkeiten für autochthone Wettersituationen von 2,7 m/s. Der gegen 22 Uhr auch in der Höhe noch schwache Wind bis ca. 4,5 m/s frischte im Verlauf der Nacht ab 150 Höhenmetern noch einmal auf teils mäßige Verhältnisse von bis zu 7,3 m/s auf. Bodennah wehte der Wind bedingt durch die große Rauigkeit der westlich angrenzenden Gebäude vornehmlich aus östlichen Richtungen (s. Abbildung 52). In der Höhe drehte der Wind im Verlaufe der Messnacht von Ost nach Süd.

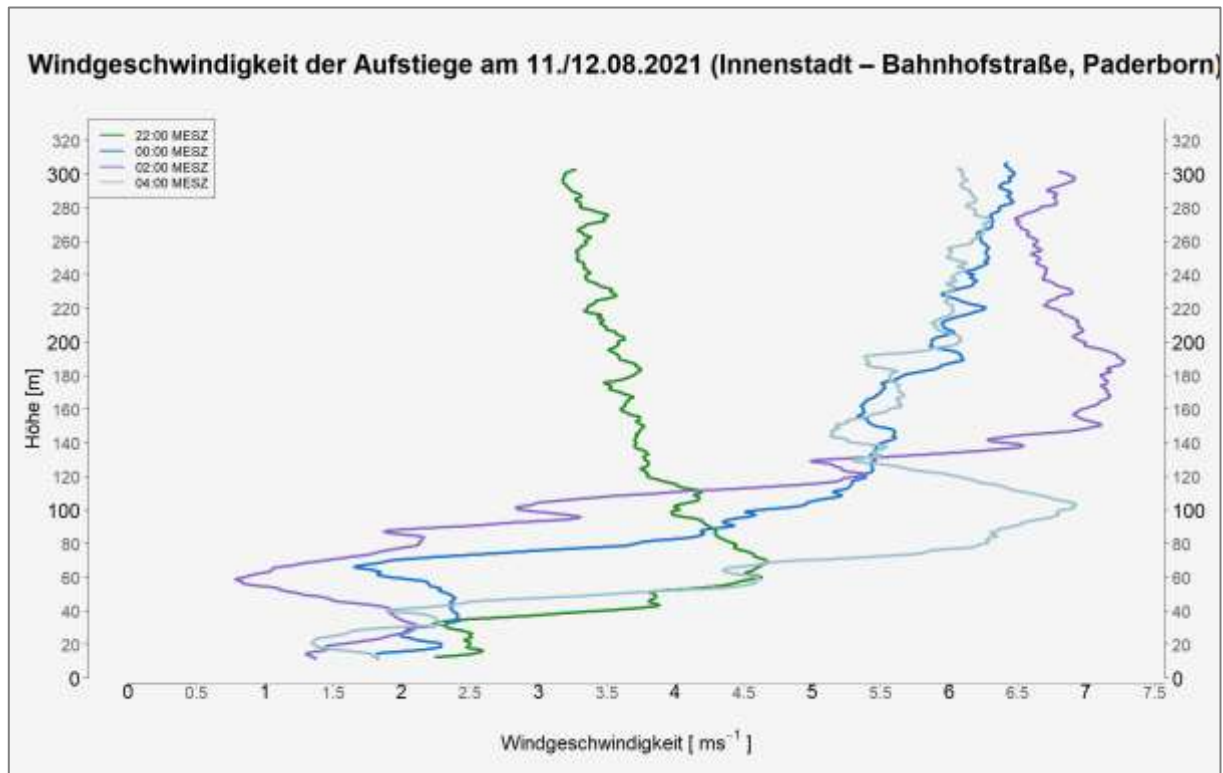


Abbildung 51: Vergleich der Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 11./12.08.2021 am urbanen Standort.

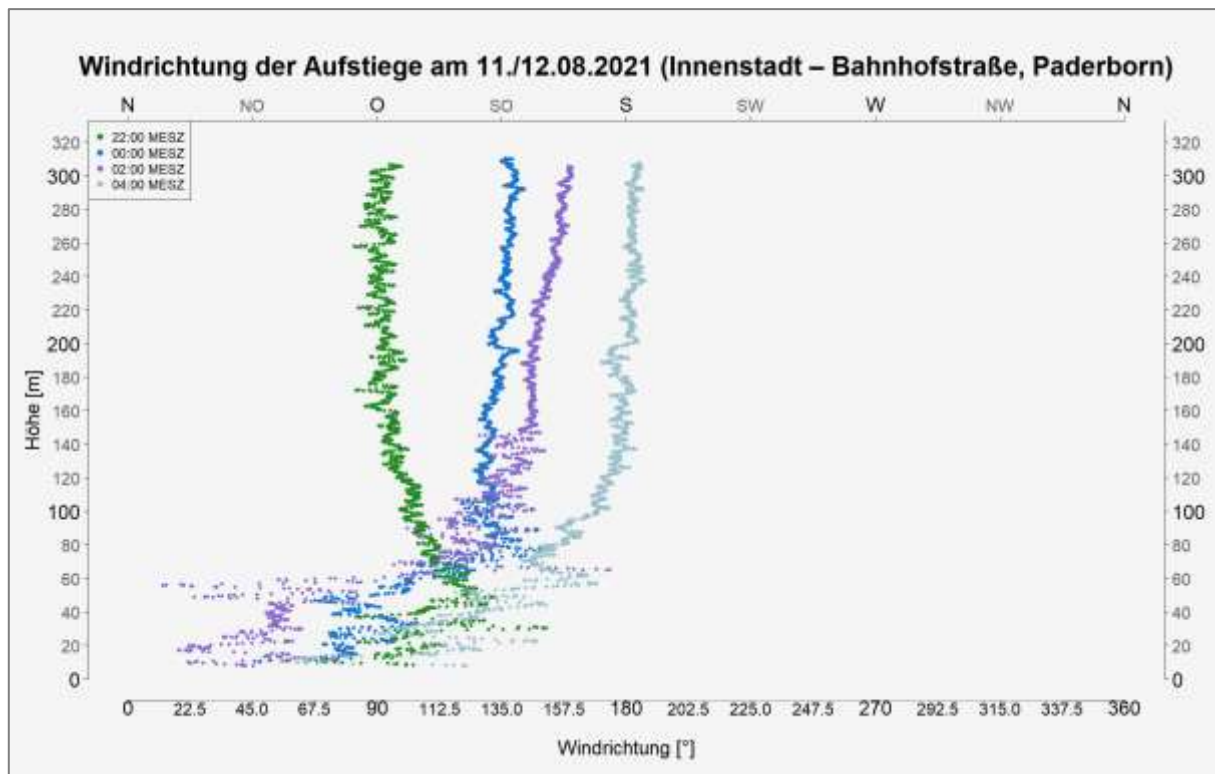


Abbildung 52: Vergleich der Vertikalprofile der Windrichtung zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 11./12.08.2021 am urbanen Standort.

6.1.6 AUSWERTUNG VON INFRAROT-AUFNAHMEN

Abbildung 53 zeigt eine Gegenüberstellung von Foto- und Infrarotaufnahmen zu ausgewählten Tageszeiten des 11./12.08.2021 an der urbanen Klimamessstation und verbildlicht die nächtliche, langwellige Ausstrahlung verschiedener Oberflächen anhand der Abnahme der Oberflächentemperatur.

So werden gegen 20:30 Uhr auf den stark versiegelten Oberflächen wie dem Asphalt der Bahnhofstraße (SP1) oder der Parkplatzfläche des Parkplatzes an der Florianstraße (SP2) noch ca. 27,4 °C bzw. 29,7 °C erreicht – bis ca. 2 Stunden vor Sonnenaufgang gegen 04:30 Uhr kühlen sich diese Flächen in der Folge um mehr als 12 K ab. Die vegetationsbestandene Brachfläche (SP3) oder das Straßenbegleitgrün (SP5) bleiben dagegen stets kühler als die beiden anderen genannten (21,3 °C bzw. 21,4 °C im Maximum; 12,5 °C bzw. 13,0 °C im Minimum), da unversiegelte Böden schneller auskühlen als versiegelte. Klar ersichtlich ist darüber hinaus die Schattenwirkung der westlich angrenzenden Gebäude, die den Wärmeeintrag in den Boden an dieser Stelle über den Tag hinweg stark verringerte. Dies führt dazu, dass sich der Punkt SP4 auf der Brachfläche gegen 20:30 Uhr ca. 2,5 K kühler hält als der unverschattete Standort SP3. Im weiteren Verlauf der Nacht macht sich dies gegen 23:30 Uhr noch immer mit einer um 1,8 K und gegen 04:30 Uhr mit einer um 1,2 K kühleren Oberflächentemperatur bemerkbar.

Kurz vor Sonnenaufgang gegen 04:30 Uhr sind die Unterschiede zwischen den fünf betrachteten Oberflächen nur noch gering, bei einer Differenz von 3,9 K zwischen dem wärmsten Punkt SP1 auf der Straße und dem kühlestem Punkt SP4 östlich des Gebäudes – am Abend gegen 20:30 Uhr betrug diese Differenz noch 11 K (zwischen SP2 und SP4).

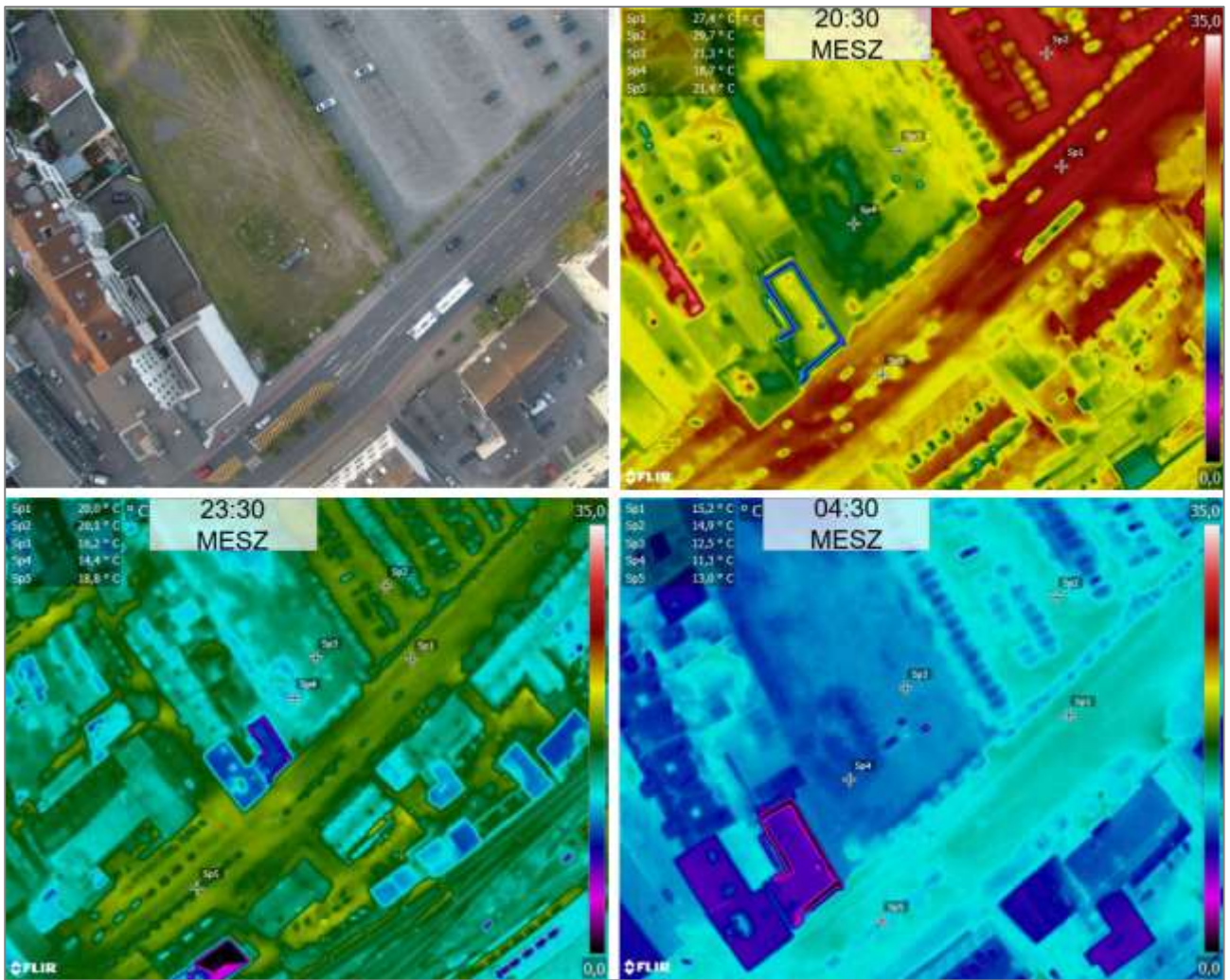


Abbildung 53: Orthogonal zum Erdboden gerichtete Foto- und Infrarotaufnahmen verschiedener Zeiten am urbanen Standort in Paderborn am 11./12.08.2021.

In Abbildung 54 sind Foto- und Infrarotaufnahmen des Messtages vom 12./13.08.2021 auf dem Golfplatz Haxterhöhe für drei verschiedene Tageszeiten gegenübergestellt. Aufgrund insgesamt ähnlicher Oberflächenbeschaffenheiten auf dem Golfplatz und kaum vollversiegelter Flächen zeigt sich das Feld der Oberflächentemperatur bereits am Abend gegen 20:30 Uhr deutlich homogener als in der Innenstadt. Die Differenz zwischen der asphaltierten Straße im Nordosten (SP1) und Punkt SP4 auf der ungemähten Wiese liegt hier bei lediglich 6,2 K (Vgl. 11 K zwischen wärmster und kältester Oberfläche in der Innenstadt). Während eine Schotterfläche (SP2) am Abend bei 24,8 °C liegt, ist eine Sandfläche SP3 mit 23,0 °C nochmals etwas kühler. Der kurzgemähte Rasen SP5 zeigte sich in dieser Untersuchung um 0,7 K kühler als die ungemähte Wiese SP4. In der Nacht kühlen die Oberflächen im ruralen Raum deutlich schneller aus, wobei die Differenz zwischen wärmster und kühler Oberfläche gegen 23:30 Uhr nur noch 3,9 K (zwischen SP1 und SP4) und gegen 04:30 Uhr morgens nur noch 2,6 K (zwischen SP1 und SP3) beträgt.

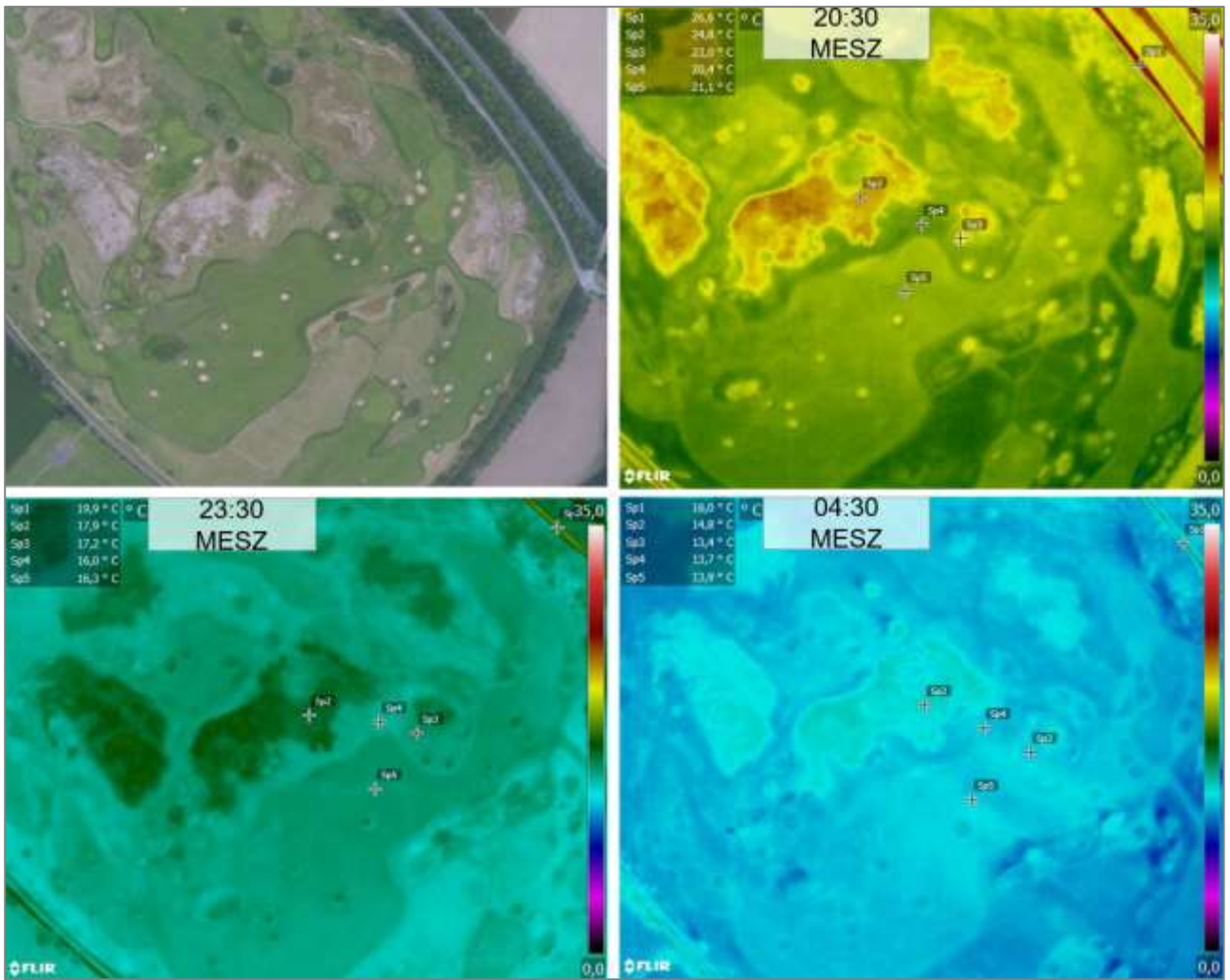


Abbildung 54: Orthogonal zum Erdboden gerichtete Foto- und Infrarotaufnahmen verschiedener Zeiten am ruralen Standort in Paderborn am 12./13.08.2021.

6.2 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt wurden in gelayouteten Karten als QGIS Projekte visualisiert und inkl. Legenden sowie als hochauflösende .pdf und jpg. Dokumente übergeben (vgl. Kap. 8.6). Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug: ETRS 1989 UTM Zone 33N. Die einzelnen Karten werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben.

Tabelle 13: im Projekt Stadtklimaanalyse Paderborn erzeugte Karten

Lf. Nr.	Kurzbeschreibung
Karte 1	<p>Status Quo - Lufttemperatur in der Nacht</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Lufttemperatur im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für den Ist-Zustand.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p>
Karte 2	<p>Szenario schwacher Klimawandel 2035 - Lufttemperatur in der Nacht</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Lufttemperatur im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Zukunftsszenario schwacher Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 3	<p>Szenario starker Klimawandel 2035 - Lufttemperatur in der Nacht</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Lufttemperatur im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Zukunftsszenario starker Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 4	<p>Status Quo – Bodennahes Strömungsfeld</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Windgeschwindigkeit im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für die Referenzsituation. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 50m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p>
Karte 5	<p>Szenario schwacher Klimawandel 2035 - Bodennahes Strömungsfeld</p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Windgeschwindigkeit im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Szenario schwacher Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 50m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>

Karte 6	<p><i>Szenario starker Klimawandel 2035 - Bodennahe Strömungsfeld</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Windgeschwindigkeit im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Szenario starker Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 50m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 7	<p><i>Status Quo – Wärmebelastung am Tage</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber in 1,1 m über Grund um 14:00 am Tage während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für die Referenzsituation.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p>
Karte 8	<p><i>Szenario schwacher Klimawandel 2035 – Wärmebelastung am Tage</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber im Stadtaußenraum in 1,1 m über Grund um 14:00 am Tage während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Zukunftsszenario schwacher Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 9	<p><i>Szenario starker Klimawandel 2035 – Wärmebelastung am Tage</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) tagsüber im Stadtaußenraum in 1,1m über Grund um 14:00 am Tage während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Zukunftsszenario starker Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 10	<p><i>Status Quo – Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftvolumenstromdichte im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für die Referenzsituation. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 100m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p>
Karte 11	<p><i>Szenario schwacher Klimawandel 2035 – Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftvolumenstromdichte im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Szenario schwacher Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 100m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>

Karte 12	<p><i>Szenario starker Klimawandel 2035 – Nächlicher Kaltluftvolumenstrom</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftvolumenstromdichte im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Szenario starker Klimawandel. Überlagert sind Pfeile, die die Strömungsrichtung anzeigen, diese wurden auf eine Rasterauflösung von 100m aggregiert.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 13	<p><i>Status Quo – Kaltluftproduktionsrate</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftproduktionsrate im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für die Referenzsituation.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p>
Karte 14	<p><i>Szenario schwacher Klimawandel 2035 – Kaltluftproduktionsrate</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftproduktionsrate im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Szenario schwacher Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>
Karte 15	<p><i>Szenario starker Klimawandel 2035 – Kaltluftproduktionsrate</i></p> <p>Dargestellt ist die modellierte, klassifizierte bodennahe Kaltluftproduktionsrate im Stadtaußenraum in 2m über Grund um 04:00 morgens während einer hochsommerlichen Strahlungswetterlage in Paderborn für das Szenario starker Klimawandel.</p> <p>Datentyp: Raster</p> <p>Gebäuderasterpunkte sind mit „no data“ belegt.</p> <p>Räumliche Auflösung: 10 m (Die Daten sind bilinear interpoliert)</p> <p>Hervorhebung der Mischpixel-/Stadtentwicklungsflächen</p>

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status Quo und die beiden Zukunfts-Szenarien beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kap. 5.2.4). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltbereich 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.

6.2.1 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 im Status Quo von ca. 12 °C über siedlungsfernen Freiflächen in höheren Lagen bis ca. 22 °C über den großen Stillgewässern und umfasst in Paderborn damit eine Spannweite von rund 10 °C (Abbildung 55). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 15,3 °C.

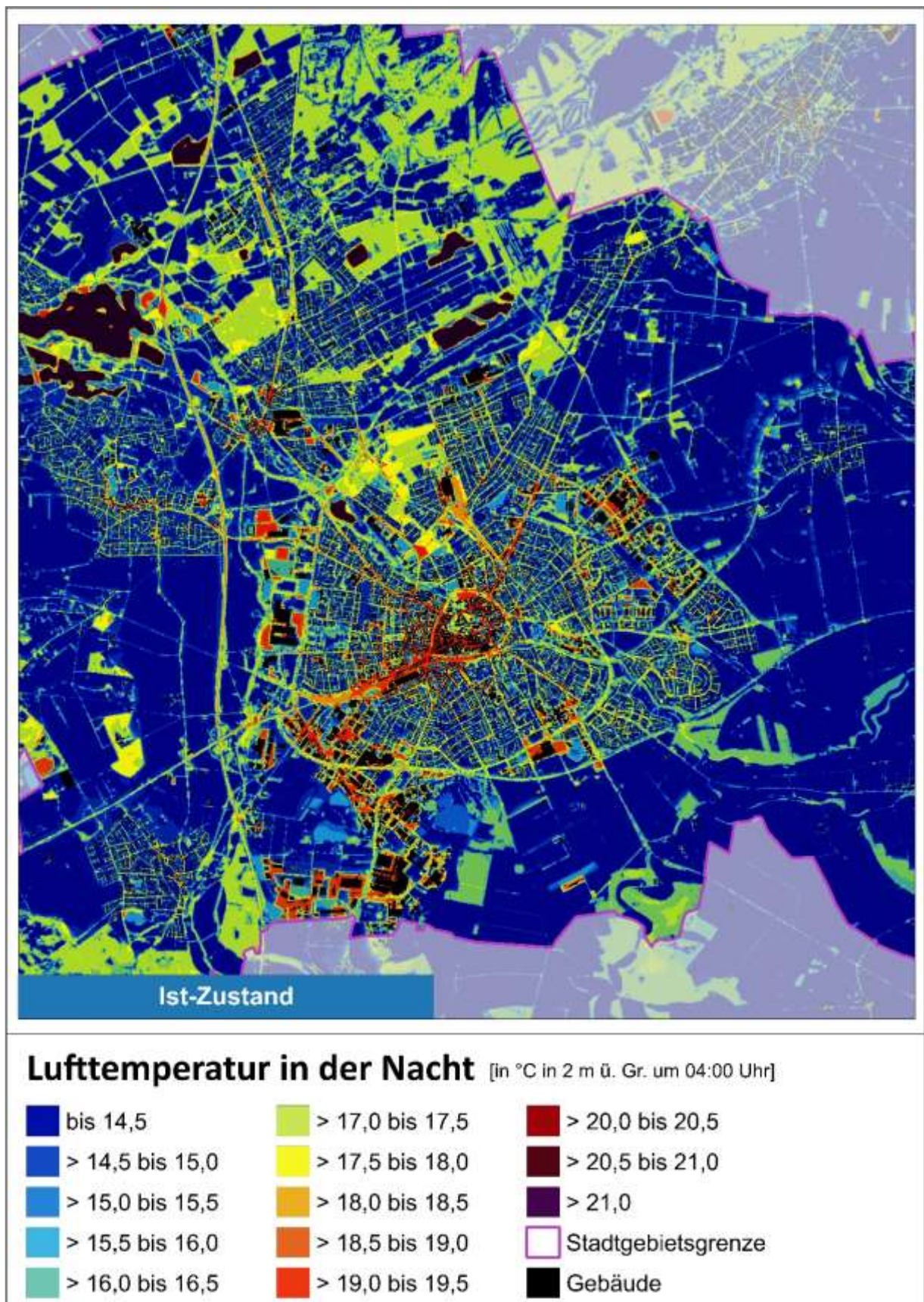


Abbildung 55: Karte 1: Bodennahe nächtl. Lufttemperatur im Status Quo in Paderborn (verkürzte Legende).

Die höchsten nächtlichen Belastungen im Siedlungsgebiet (von über 19 °C) treten vorwiegend in der Innenstadt von Paderborn, rund um den Hauptbahnhof und in Teilen der Gewerbegebiete (z.B. Industriegebiet Mönkeloh) auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum mit Werten bis 14,5°C finden sich insbesondere in den Siedlungen Dahl, Neuenbeken & Benhausen (nicht im Kartenausschnitt dargestellt). In der vorliegenden Modellierung des heutigen Zustandes zeigen sich nur in wenigen Wohngebieten 04 Uhr-Lufttemperaturen von mehr als 15 °C.

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 12 und 14,5°C auf. In Wäldern bzw. dicht mit Bäumen bestandenen Flächen mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit die Auskühlung der Oberfläche, sodass im (hier betrachteten) bodennahen Bereich Werte zwischen 16 und 17,5 °C erreicht werden (z.B. im Paderborner Stadtwald). Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrünten Siedlungsräumen bedeutet, nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden. Zudem sind Waldgebiete am Tage wichtige Ausgleichsräume (siehe Kap. 6.2.3).

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbarem Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können, was bei einem Großteil der Stillgewässer, z. B. dem Padersee (mehr als 21 °C) zutrifft.

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 56). 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.

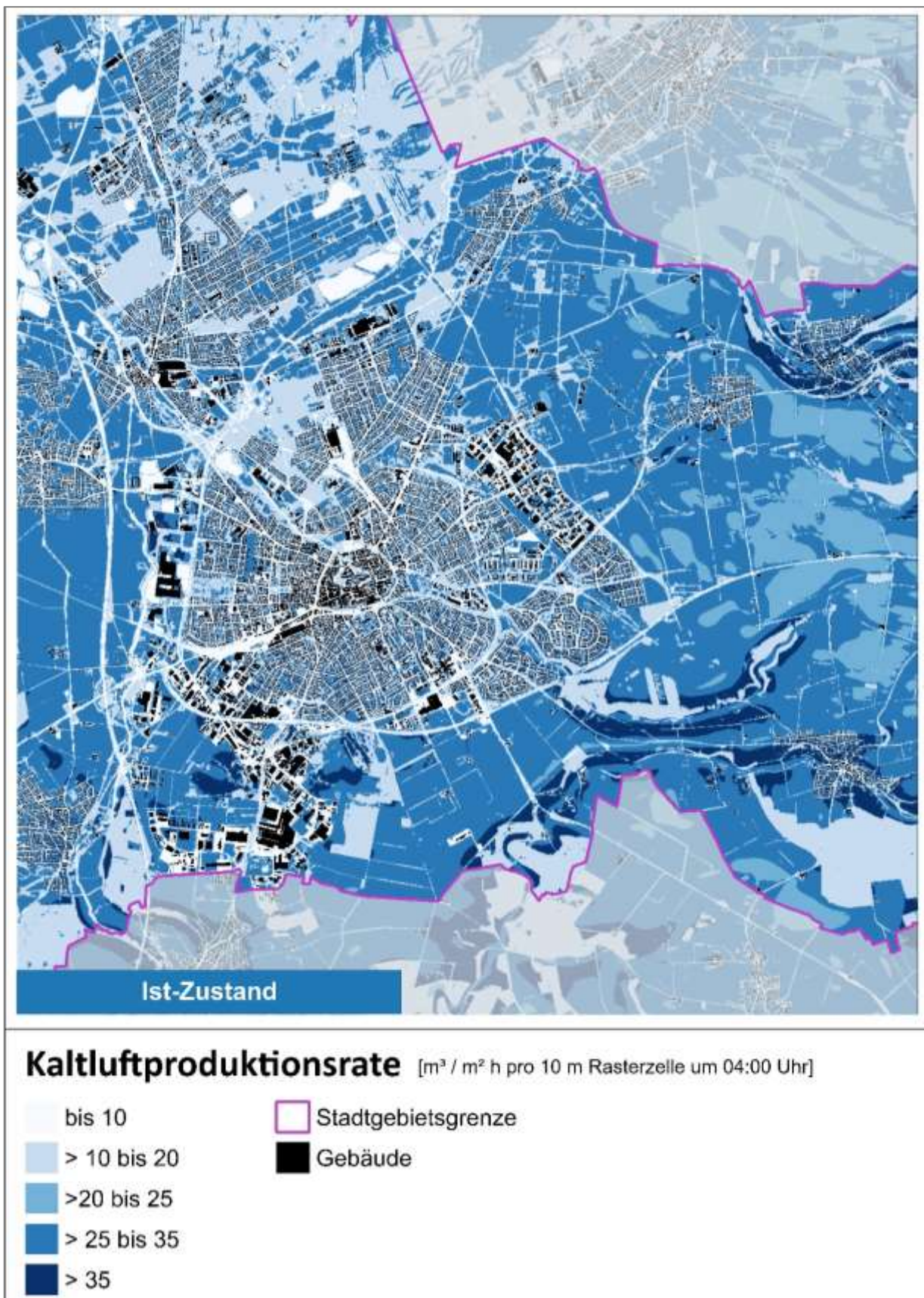


Abbildung 56: Karte 13: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Status Quo in Paderborn (verkürzte Legende).

In den beiden Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine flächendeckende Erwärmung Paderborns (Abbildung 57). Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben bestehen und damit bleibt auch der Wärmeinseleffekt auf einem vergleichbaren Niveau erhalten. Die Siedlungskerne sind nach wie vor die am stärksten überwärmten Bereiche und im Szenario Starker Klimawandel werden dort nächtliche Temperaturen über 21 °C erreicht. Begrünte Innenhöfe sowie die aufgelockert bebauten Stadtränder stellen dagegen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren) und siedlungsferne Freiflächen in höheren Lagen kühlen am stärksten aus. Die Kaltluftproduktionsrate wird nach dem derzeitigen Stand des Wissens nicht signifikant durch den Klimawandel beeinflusst, sondern nur durch Landnutzungswandel, weshalb auf eine ausführliche Beschreibung der Modellergebnisse an dieser Stelle verzichtet wird (siehe Abbildung A 5 & Abbildung A 6 im Anhang).

Gesondert müssen die möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen betrachtet werden (grau umrandete Flächen in den Karten 2 und 3, Abbildung 57). Durch die Entwicklung einer bisherigen Freifläche nimmt die Lufttemperatur zusätzlich zum Klimawandelsignal infolge der Überbauung zu, wie bspw. auf den möglichen Entwicklungsflächen östlich des Gewerbegebietes Benhauser Feld zu erkennen ist. In der Regel fällt dabei die Temperaturzunahme durch die Bautätigkeit stärker aus als durch den Klimawandel, wobei erstgenanntes durch die Ausgestaltung der Bebauung (Dichte, Versiegelungsgrad, Grünanteil) gesteuert werden kann. Im Zuge von städtebaulichen Sanierungen ist auch der umgekehrte Fall möglich: Die Umwandlung einer Gewerbebebauung in ein urbanes Wohngebiet würde die thermische Belastung in diesem Areal senken – und mit einiger Wahrscheinlichkeit sogar das Klimawandelsignal kompensieren. Auf die stadtklimatische Bewertung der Entwicklungsflächen wird bei der Beschreibung der Bewertungskarten eingegangen, auch wenn die Zukunftsszenarien nicht in die Planungshinweiskarte eingeflossen sind.

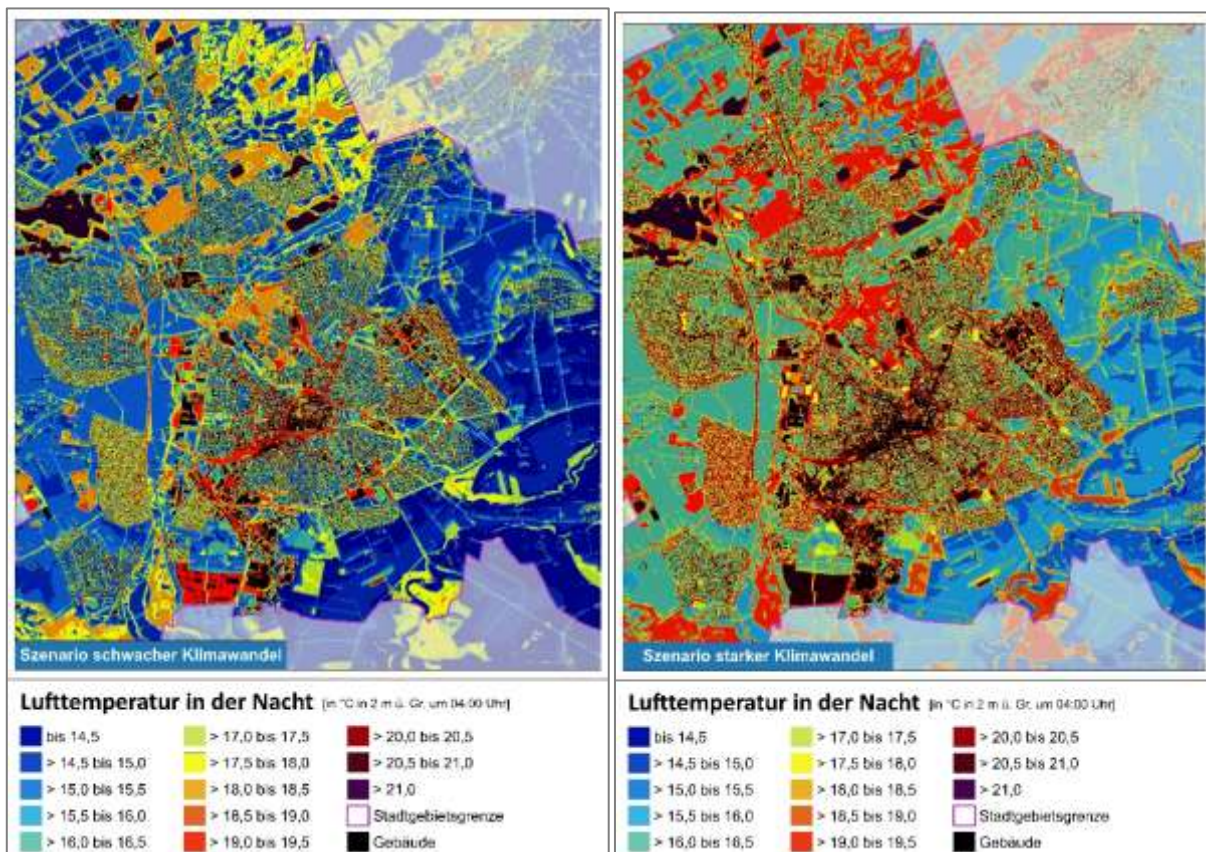


Abbildung 57: Karten 2 & 3: Bodennahe nächtl. Lufttemperatur in den Szenarien Schwacher Klimawandel (links) und Starker Klimawandel (rechts) in einem Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

6.2.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird in Paderborn wesentlich durch das Relief bestimmt, zeigt eine mittlere Variabilität und reicht von sehr geringen bis zu maximalen Werten über $60 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$.

Durch die Lage westlich des Eggegebirges werden große Teile des Siedlungsraumes in Paderborn vergleichsweise gut von Kaltluft durchströmt. In den Modellergebnissen zeigen sich hohe Kaltluftabflüsse insbesondere aus dem Osten und Süden von Paderborns Umland (Abbildung 58). Die für den Paderborner-Siedlungsraum besonders relevant befundenen Kaltluftprozesse, werden in der Klimaanalysekarte in Form von Kaltluftleitbahnen, flächenhaften Kaltluftabflüssen und Kaltluftentstehungsgebieten hervorgehoben (Kap. 7).

Die Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht auf, sodass in vielen Bereichen auch bodennah eine Durchströmung mit Kaltluft stattfindet. In Abbildung 59 ist die Strömungsrichtung der bodennahen Kaltluftströmung über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 500 m aggregiert wurden. 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 (Abbildung 60).

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in den Waldflächen in Paderborn sehr gering ausfällt (Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs, z. B. an den Fischteichen). Auch der Kaltluftvolumenstrom im Baumbestand ist im Vergleich zu Freiflächen reduziert, doch ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern (z.B. beim Paderborner Stadtwald).

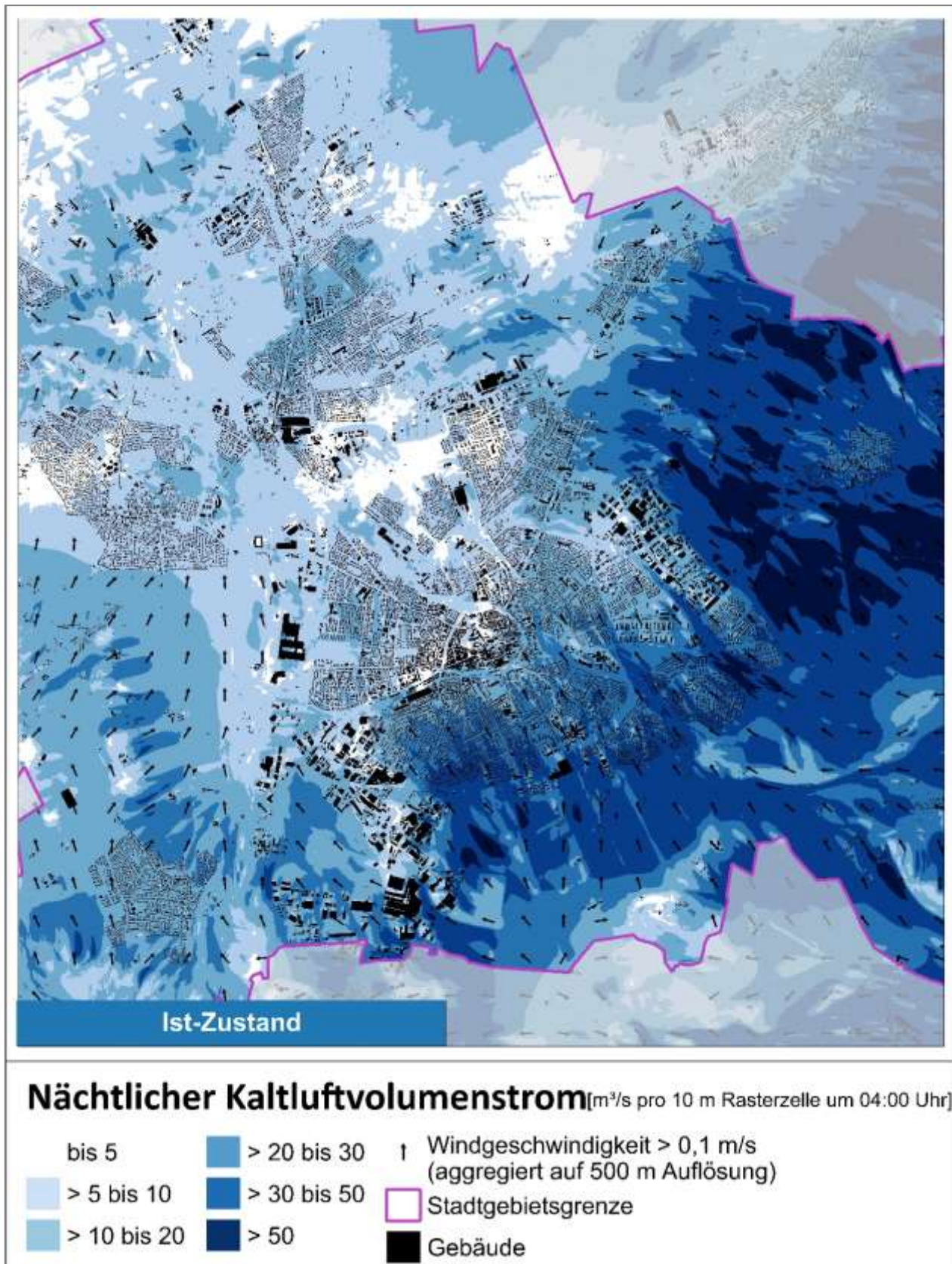


Abbildung 58: Karte 10: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status Quo in Paderborn (verkürzte Legende).

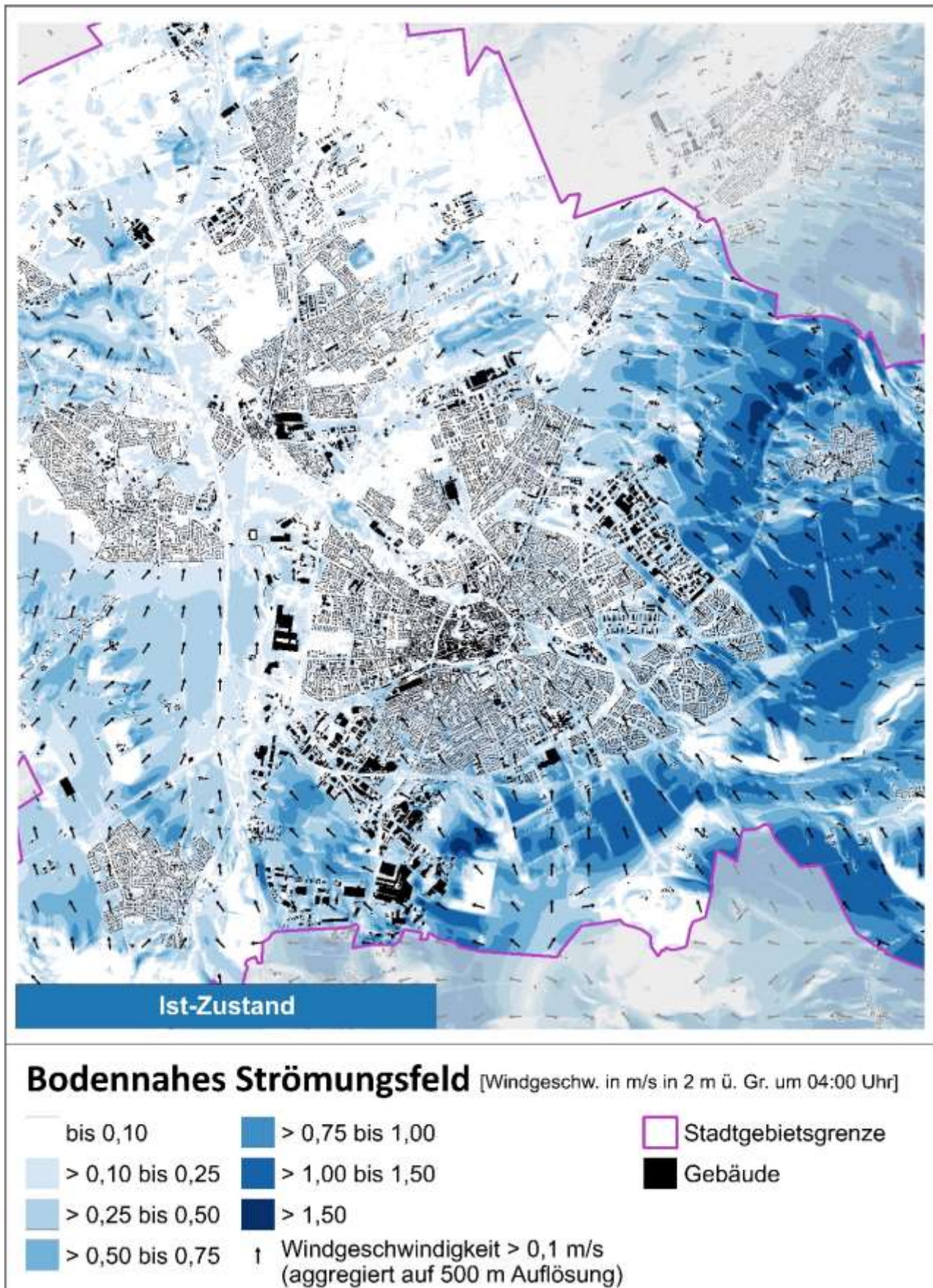


Abbildung 59: Karte 4: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status Quo in Paderborn, Windpfeile aggregiert auf 500m Auflösung (verkürzte Legende).

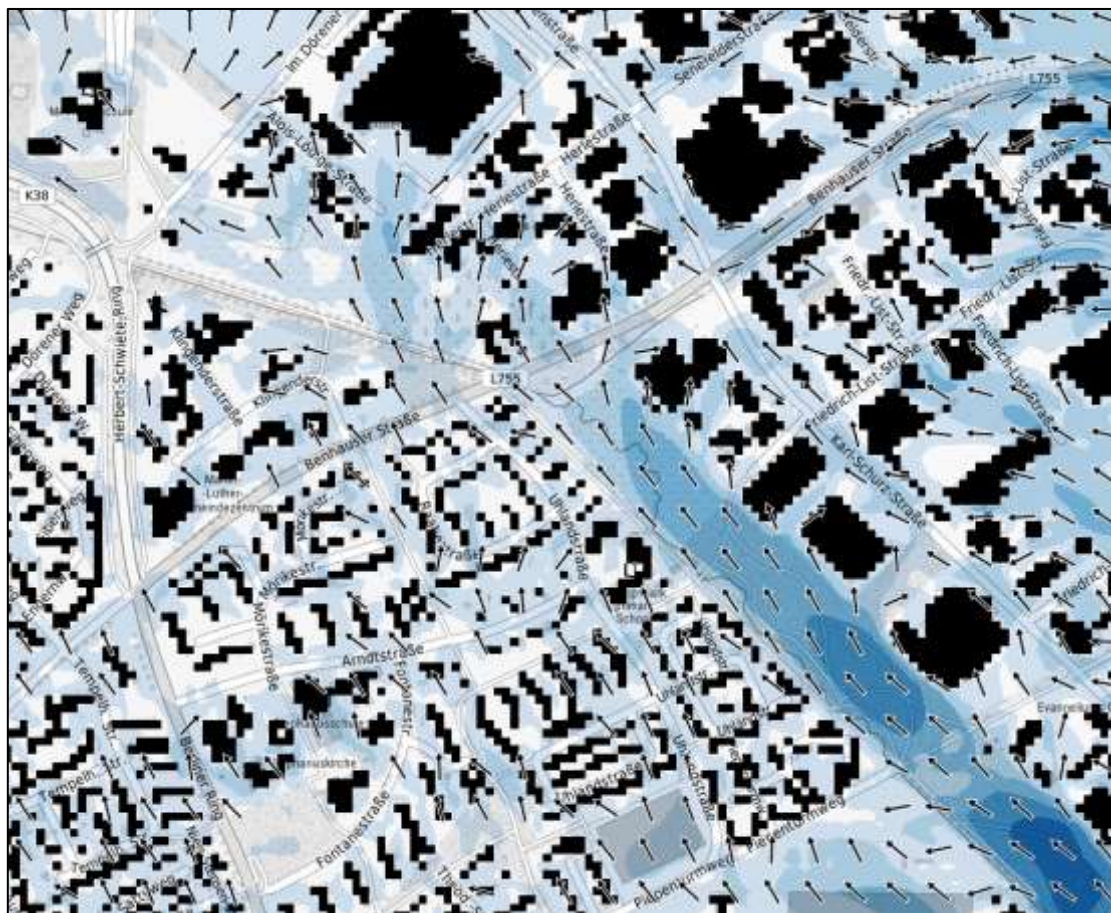


Abbildung 60: Ausschnitt: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status Quo in Paderborn rund um die Benhauser Straße (Windpfeile aggregiert auf 50m Auflösung).

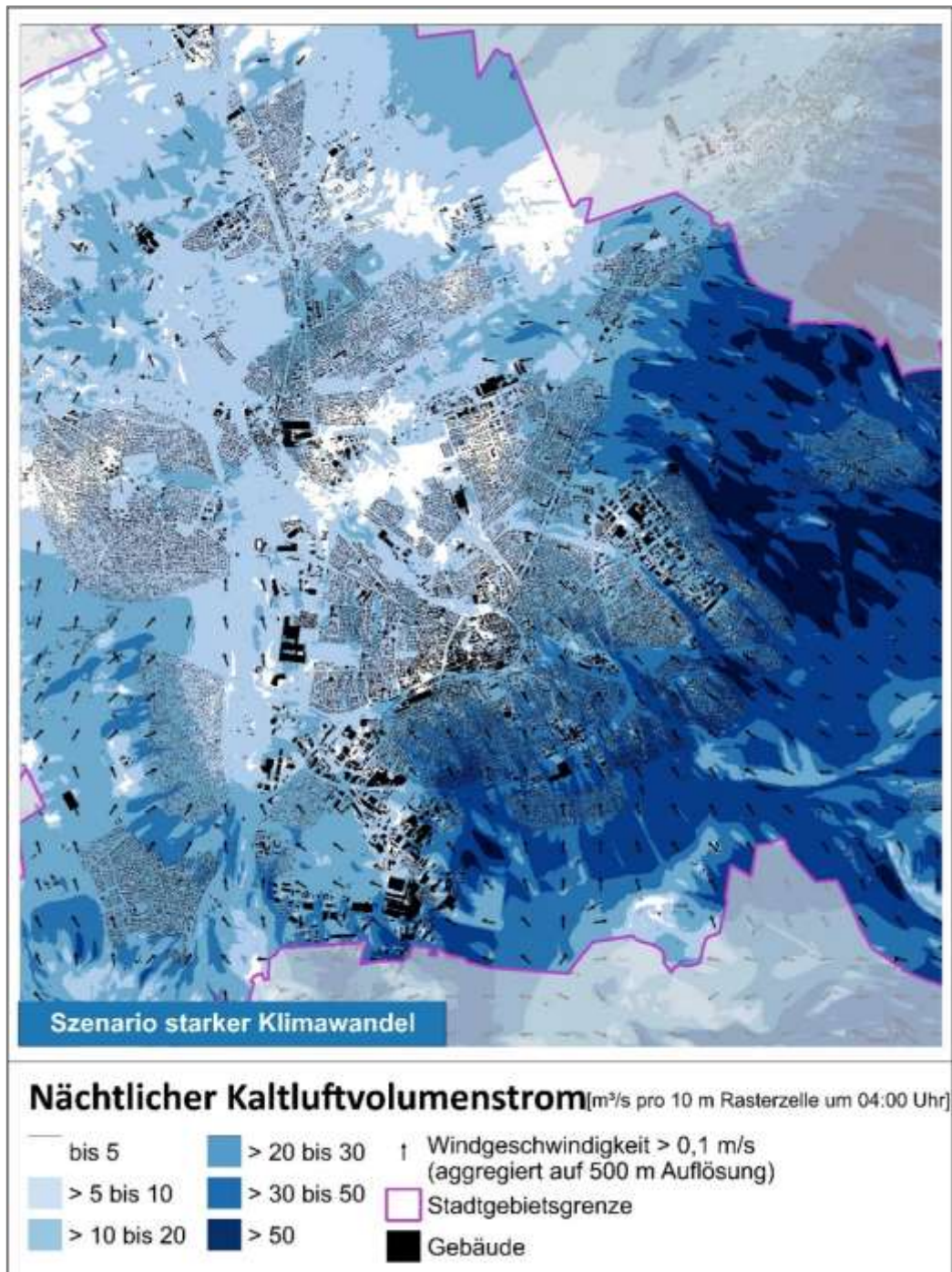


Abbildung 61: Karte 12: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Szenario Starker Klimawandel in Paderborn (verkürzte Legende).

Infolge des Klimawandels ergeben sich keine nennenswerten Änderungen des Kaltluftprozessgeschehens, da das Relief als wesentlicher Antrieb unverändert ist und die Temperatur flächendeckend in einem ähnlichen Ausmaß steigt, sodass sich keine neuen temperaturinduzierten Flurwinde ausbilden. Eine Bebauung in den möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen kann sich dagegen auf das Kaltluftströmungsfeld auswirken. Bestehende Kaltluftströmungen werden durch die Überbauung der Flächen in der Regel gemindert wie bspw. im Bereich rund um Benhausen zu erkennen ist (siehe Abbildung 61 bzw. Karten 10 - 12), wobei sich das Ausmaß der Minderung über eine an das Strömungsfeld angepasste Bebauung steuern lässt. Kleinräumig können sich zudem neue Ausgleichsströmungen im Umfeld der Entwicklungsflächen ergeben, insbesondere wenn es sich um großflächige Vorhaben mit einer starken zu erwartenden Überwärmung handelt.

6.2.3 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 um 23 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; siehe 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. im Waldpark Haxtergrund; Abbildung 62). Auch Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass z. B. die Grünflächen rund um den Lippesee höchstens eine mäßige Wärmebelastung aufweisen.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten kleinräumig über versiegelten Bereichen mit geringer Verschattung auf, wie sie z.B. rundum den Hauptbahnhof und in den Gewerbegebieten zu finden sind. Auffällig ist, dass eine Wärmebelastung von über 40° C in den Wohnsiedlungsgebieten fast aller Stadtteile festgestellt werden konnte (z.B. in Elsen). 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 z. B. in Dahl, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 10 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend sein kann, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Innerhalb der innerstädtischen Bereiche 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 Paderquellen, der Westfriedhof und der Bürgerpark).

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend in Paderborn, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann. Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst im Szenario Starker Klimawandel gibt es noch viele Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen (siehe Abbildung 63 & Karten 8 - 9).

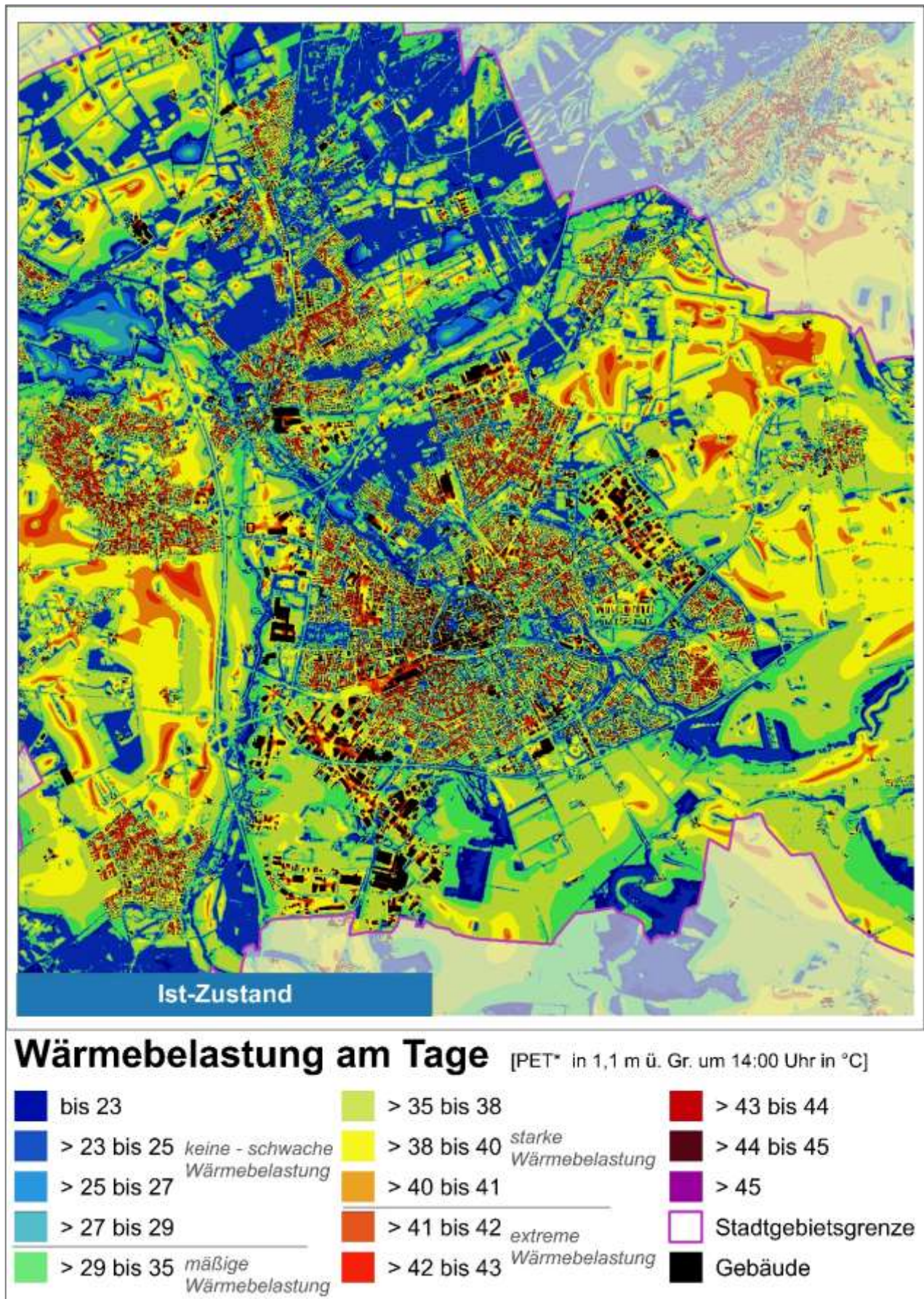


Abbildung 62: Karte 7: Wärmebelastung am Tag (PET) im Status Quo in Paderborn (verkürzte Legende).

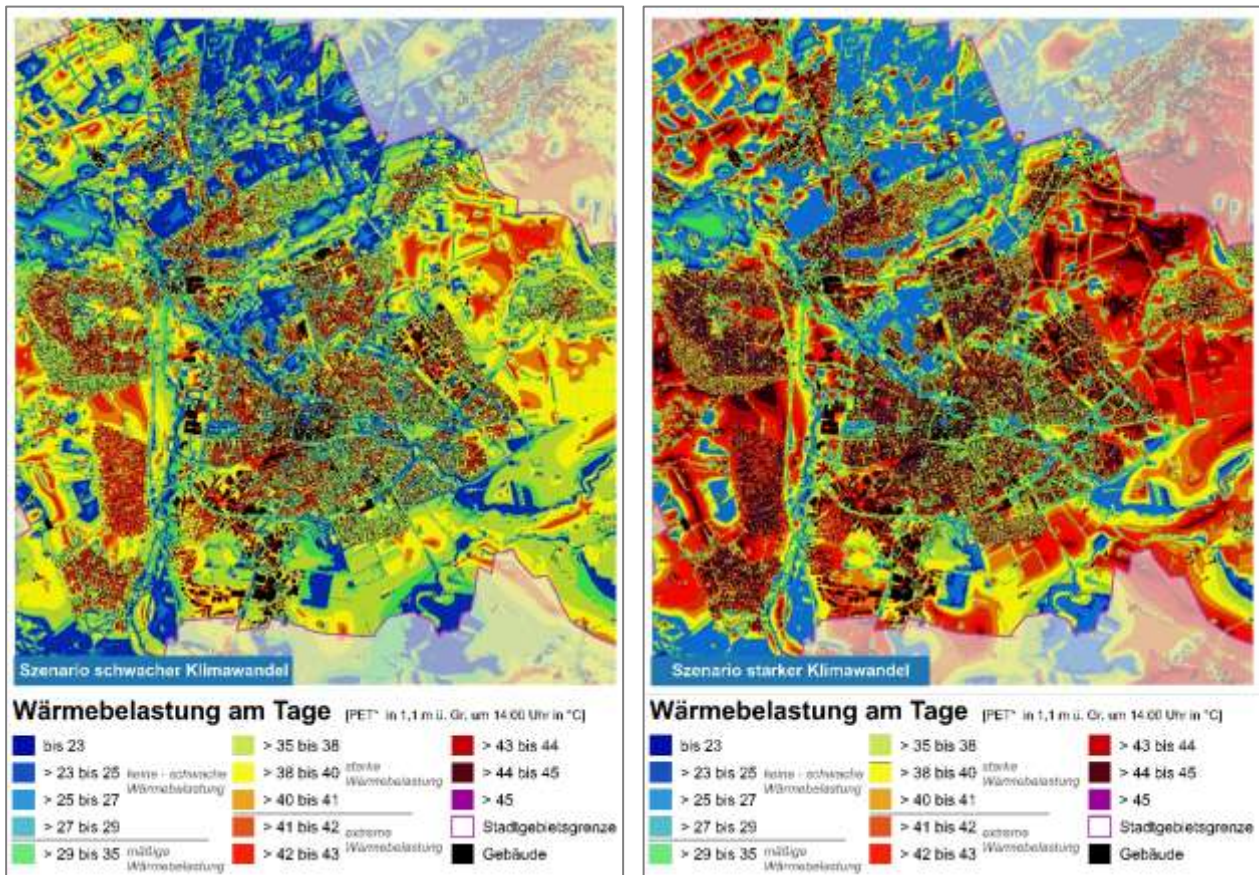


Abbildung 63: Karten 8 & 9: Wärmebelastung am Tag (PET) in den Szenarien Schwacher Klimawandel (links) und Starker Klimawandel (rechts) in einem Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

7. Klimaanalysekarten

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [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. Es gibt für die untersuchten Parameter, wie z. B. die Lufttemperatur, keine Grenz- oder Richtwerte mit Hilfe derer die absoluten Werte einer Bedeutung, wie z. B. „zu heiß“, „zu kalt“, „gesundheitsgefährden“ und damit „zulässig oder unzulässig“ zugeordnet werden könnten. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Projekt über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap. 8). Mit diesem Verständnis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario „schwacher Klimawandel (2035)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2035)“

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der drei Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 64). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁸ (10 m x 10 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.



⁸ Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier naheliegendsten Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte.

Abbildung 64: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 14). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 500 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 Kaltluftproduktionsflächen gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen von mindestens einem Hektar und einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 28,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$.

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

Tabelle 14: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten.

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 500 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Kaltluftproduktionsfläche	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 28,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
Kaltluftleitbahn (linear)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Kaltluftaustauschbereich (flächenhaft)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abb. 65 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich Auf der Lieth einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

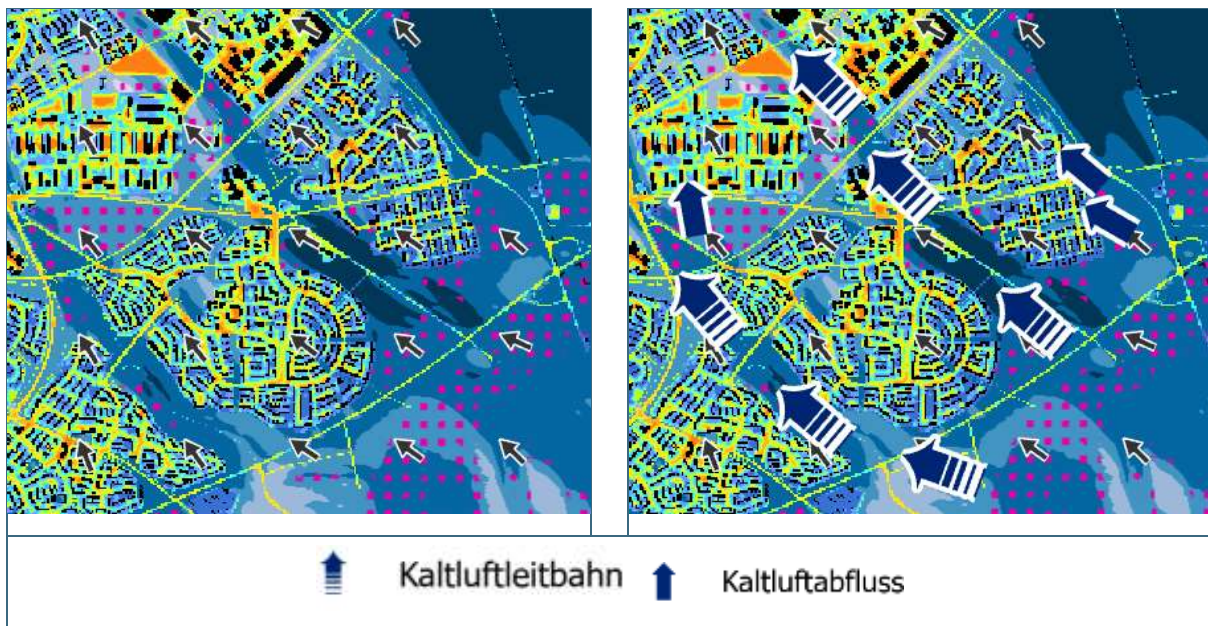


Abb. 65: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftabflüssen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung)

Es ist für die Ausweisungen der Kaltluftprozesse in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere thermische Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können Flächen vergleichsweise wenig thermisch belastet sein, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen. Andere Flächen mit höherer thermischer Belastung sind dagegen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen und eine Zunahme der thermischen Belastung bei Wegfall der Kaltluftprozesse ist sehr wahrscheinlich. Darüber hinaus erfolgt die Ausweisung der Kaltluftprozesse unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung (z. B. Wohnen, Gewerbe, Verkehr) im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte. In den Klimaanalysekarten zu den Zukunftsszenarien wurde darüber hinaus gekennzeichnet, wenn ein im Status Quo gekennzeichneter Kaltluftprozess durch eine der modellierten möglichen zukünftigen Bebauungen negativ beeinträchtigt wurde (lilafarbener Pfeil in Abbildung 67 & Abbildung 68). Wie bereits im Kap. 6.2.2 beschrieben, werden die Kaltluftprozesse durch die zu erwartende Erwärmung eines voranschreitenden Klimawandels nicht signifikant modifiziert. Daher sind die Kaltluftsignaturen in den Klimaanalysekarten zum Status Quo und zu den beiden Zukunftsszenarien, bis auf die lilafarbene Kennzeichnung einiger Pfeile, deckungsgleich in Anzahl, Lage und Ausrichtung. Es kommen in der modellierten Zukunft aber durch die angenommene Siedlungsentwicklung neue wichtige Prozesse hinzu.

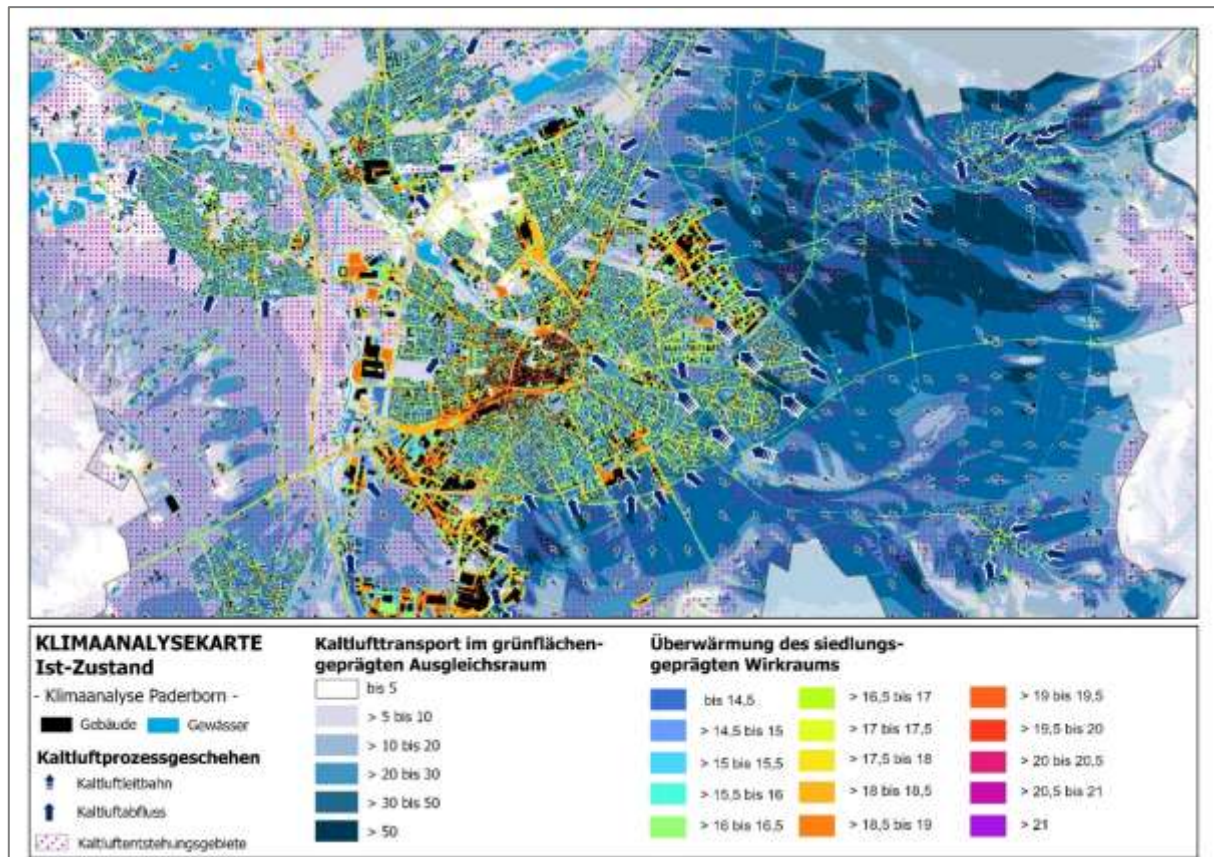


Abbildung 66: Karte 16: Klimaanalysekarte (Ist-Zustand) für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

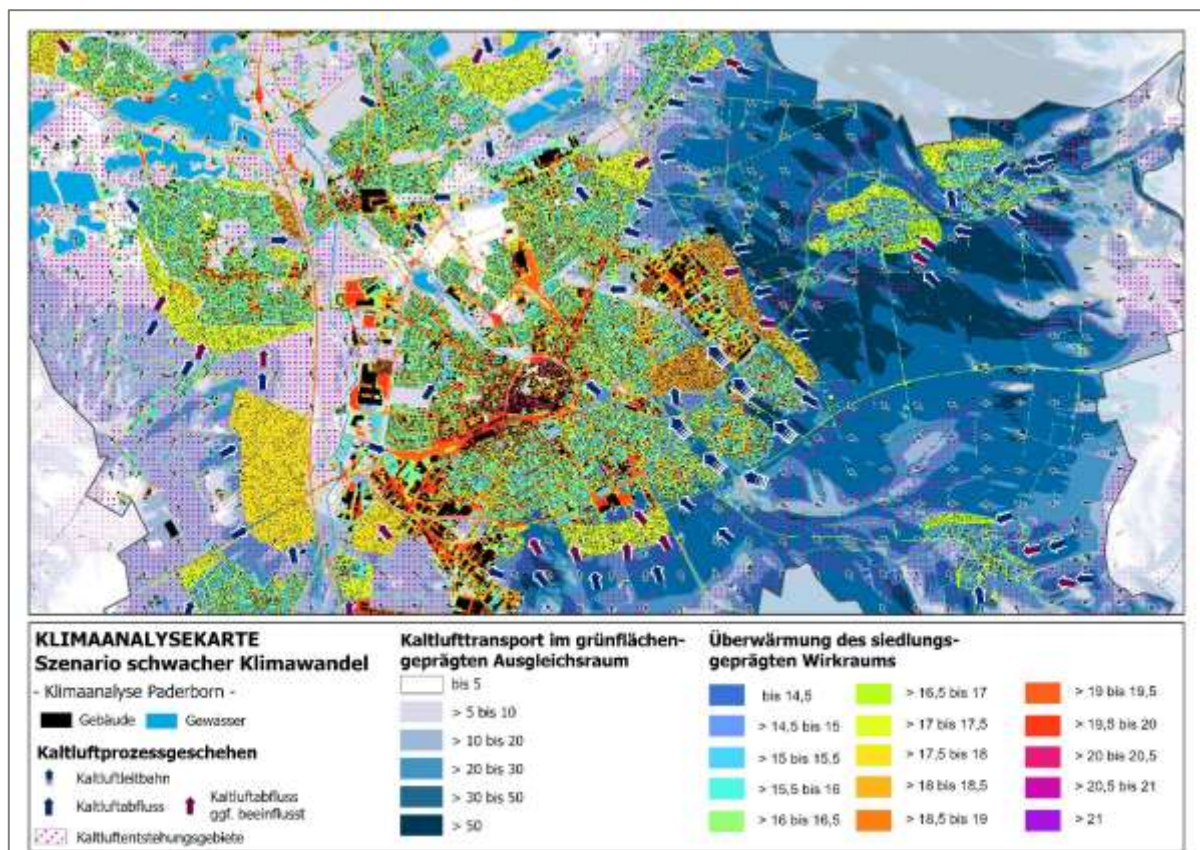


Abbildung 67: Karte 17: Klimaanalysekarte (Szenario Schwacher Klimawandel) für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

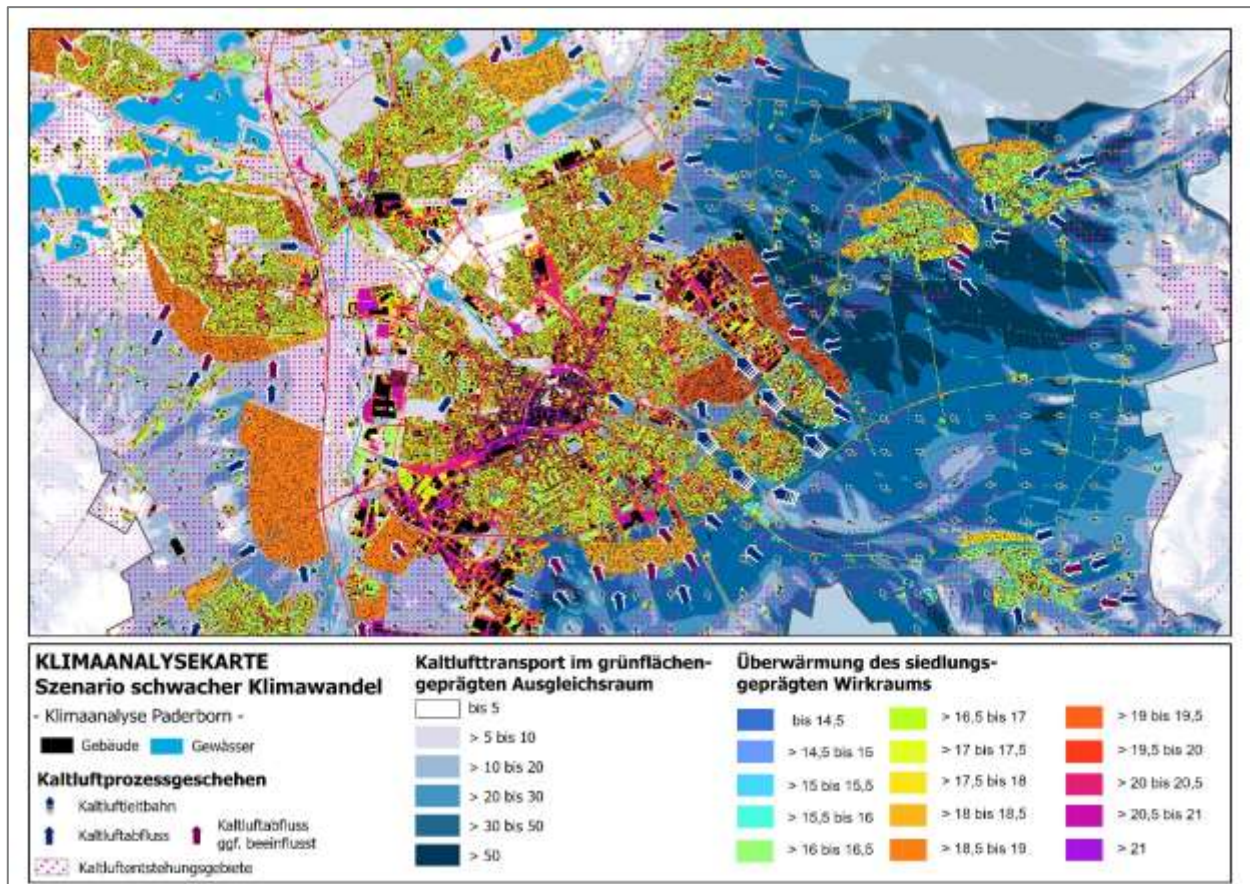


Abbildung 68: Karte 18: Klimaanalysekarte (Szenario Starker Klimawandel) für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

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 Klimanalysekarte 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 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 Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan) übernommen werden. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap.6.2) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadt-raum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen
- möglichst aktuell sein und einer standardisierten Fortschreibung unterliegen
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben

- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyseansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler in der Regel nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch die 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. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 100 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 69).

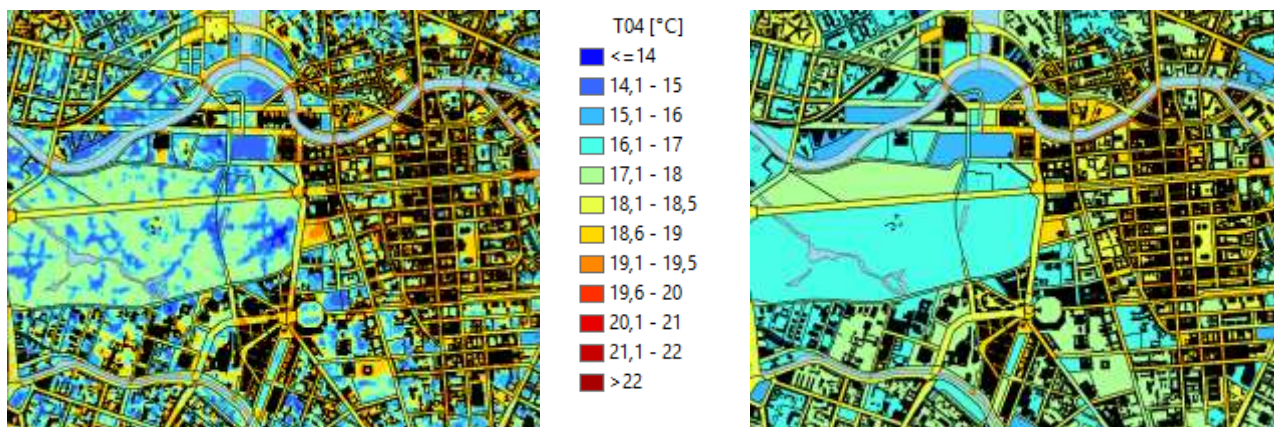


Abbildung 69: Beispiel: links ein Ausgangsraster und rechts das Ergebnis einer räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie

8.3 BEWERTUNGSKARTEN

8.3.1 WIRKRAUM

Aus den Darstellungen der absoluten Werte sowie der Differenzen zwischen den Szenarien und im Vergleich zur Referenzsituation können erste grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden (vgl. Kapitel 6.2). Um deren Konsequenzen für die Planung effektiv nutzbar zu machen, bedurfte es in einem weiteren Analyseschritt einer objektivierten, allgemeinverständlichen sowie reproduzierbaren Bewertung der Flächen.

Im Folgenden wird die Herleitung der Bewertungsklassen für die beiden Tageszeiten geschildert.

Wertgebend sind dabei die PET um 14:00 für die Tagsituation sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.2.5). Bei den der Basisgeometrie mithilfe der oben beschriebenen Methode aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb Temperaturniveau gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch

deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – fachlich verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive sowie negative Standardabweichungen davon als obere und untere S1-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 70).

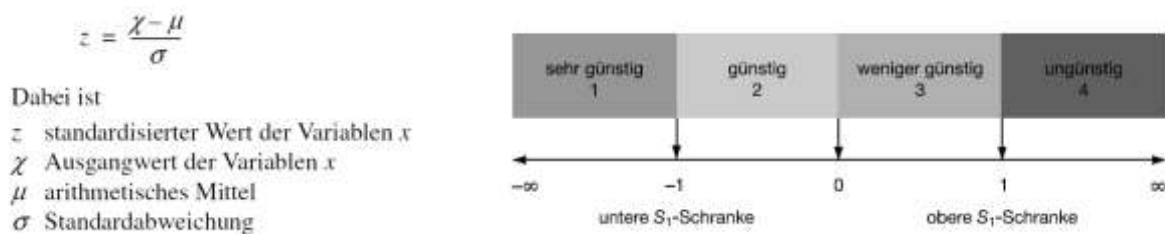


Abbildung 70: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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 vorliegend von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein (vgl. hierzu Kap. 4). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten oder in kalten Klimaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Die Methode ist jedoch optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei zu betrachtenden Situationen (Ist-Zustand, schwacher und starker Klimawandel) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken der beiden Extremsituationen der Referenzsituation (als kühls Situation) und P2-Szenario (als im Flächenmittel wärmste Situation) miteinander verknüpft und aus dieser neuen Grundgesamtheit einheitlich zu verwendende Variablenausprägungen zur Berechnung der z-Werte abgeleitet. Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen, da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieses Möglichkeitskorridors auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen. Ein Beispiel hierfür ist das P1- Szenario, das keinen Einfluss auf die Berechnung der z-Statistik hatte, dessen Temperaturfelder dank der

skizzierten Vorgehensweise aber dennoch mit derselben Methode bewertet werden können wie die Bestands-situation und das P2-Szenario. Auf dieser Basis können, die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für alle drei betrachteten Situationen mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden.

Tabelle 15: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Methode	Relevant für
Tagsituation	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	PET 14:00 Uhr z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und $\leq -0,33$ z-Wert > -0,33 und $\leq 0,33$ z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Wirkraum 1 („Industrie/Gewerbe“ & „Wohnflächen“) Wirkraum 2 („Verkehrsfläche“)
Tagsituation	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 5 = sehr hoch 4 = hoch 3 = mittel 2 = gering 1 = sehr gering	PET 14:00 Uhr z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und $\leq -0,33$ z-Wert > -0,33 und $\leq 0,33$ z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Ausgleichsraum („Wald“ & „Freifläche“)
Nachtsituation	In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1 1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = mittel 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	Luft-Temp. 04:00 Uhr z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und $\leq -0,33$ z-Wert > -0,33 und $\leq 0,33$ z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Wirkraum („Wohnflächen“)
Nachtsituation	Eigene Einteilung 5 = Sehr hoch 4 = Hoch 3 = Mittel 2 = Gering 1 = Sehr gering	Ableitung anhand eines Bewertungsbaumes Abhängig von: Rolle der Grünfläche im Kaltlufthaushalt; Lage der Grünfläche; Art der Grünfläche (Wald / kein Wald)	Ausgleichsraum („Wald“ & „Freifläche“)

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 im Wirkraum in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen. Sowohl für den Status Quo als auch die Zukunftsszenarien wurden hierbei jeweils dieselben Methodiken angewandt.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüssen stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion), eine hohe Bedeutung, wenn sich in deren direktem Luv befanden (Sekundärfunktion) und eine mittlere Bedeutung, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet) (Abbildung 71). Auch bei den weiteren Grünflächen spielen der Siedlungsbezug und die Funktion des Kaltlufthaushalts eine wichtige

Rolle. Eine Grünfläche, die eine angrenzende Siedlungsfläche mit hoher thermischer Belastung mit Kaltluft versorgt, bekommt beispielsweise die höchste bioklimatische Bedeutung zugewiesen.

Die folgende Abbildung 71 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Kaltluftfunktion:
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 20,9 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ⁹ oder
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,43 \text{ m/s}$ oder
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate $\geq 30,7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen¹⁰

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 auf → Sie besitzt eine sehr hohe bioklimatische Bedeutung.
- Die Fläche weist keine Kaltluftfunktion auf → Sie besitzt eine mittlere bioklimatische Bedeutung.

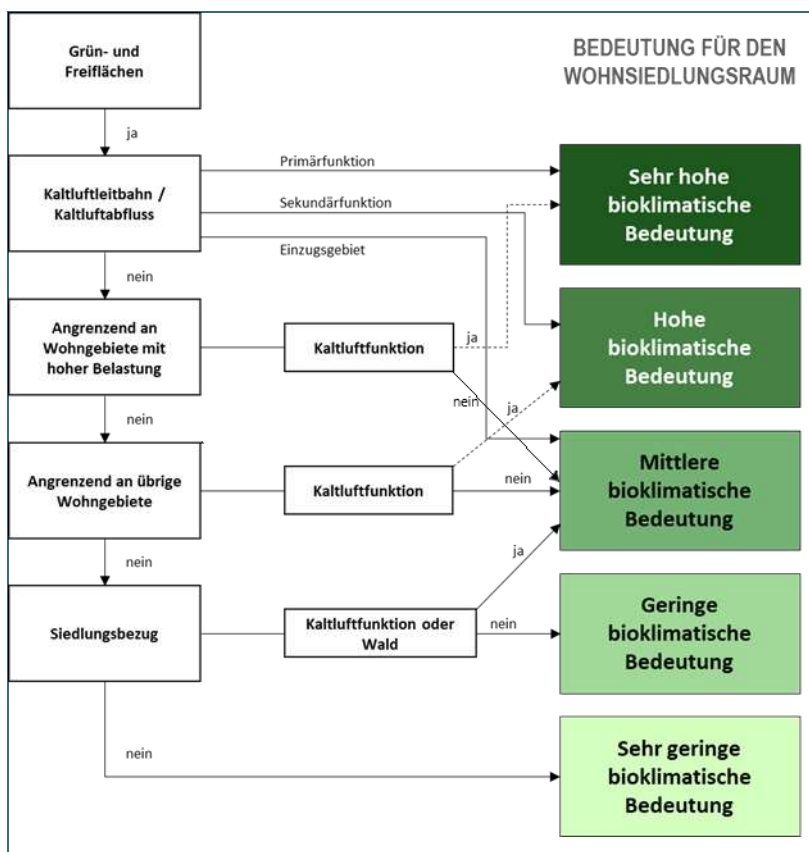


Abbildung 71:
5-stufige Bewertungsskala für
den Ausgleichsraum in der Be-
wertungskarte Nacht

⁹ Angegeben sind die jeweiligen Mittelwerte (MW) des Ist-Zustandes, da dieser Zustand auch in Zukunft zu schützen ist, wurde dieser MW auch als Grenzwert für die Beurteilung der Zukunftsszenarien angesetzt.

¹⁰ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

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 (siehe Tabelle 15).

8.3.1 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 66, Abbildung 67 & Abbildung 68) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen und -abflüsse aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine pinke Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (Kapitel 7).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen werden in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum weitere Informationen zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Der Kaltlufteinwirkungsbereich in blauer, rasterbasierter Schraffur zeigt an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (Abbildung 72).



Abbildung 72: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von $14,26 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von $0,18 \text{ m/s}$ erreichen oder überschreiten. Wenn mehr als 50 % der Fläche eines Baublocks im Kaltlufteinwirkungsbereich liegt, wird dieser als Fläche mit „Klimafunktion“ markiert (Abbildung 72). Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichsströmungen in den Siedlungskörper hinein.

8.3.2 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN VON STATUS QUO UND ZUKUNFTSSZENARIO

8.3.2.1 NACHTSITUATION

Abbildung 73 auf Seite 106 zeigt einen Ausschnitt der Bewertungskarte der Nachtsituation für Paderborn im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** (ohne Gewerbegebiete) hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 17 % der Wohnflächen Paderborns sind im Ist-Zustand durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen an den Siedlungsrandern dieser Kategorie an. Diese weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt.

Gleichmäßig über alle Stadtteile verteilt zählen aktuell mehr als die Hälfte der Flächen (61,6 %) zu den Wirkräumen 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. Bei manchen der Flächen sorgen 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.

17,8 % der Wohnflächen weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Gebiete im Übergangsbereich von Innenstadt und weiter außen gelegenen Stadtteilen. Nur 3 % der Wohnflächen Paderborns gehören im Status Quo der Klasse der Flächen mit ungünstiger thermischer Situation an. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt, verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Mit ca. 0,4 % der Wohnflächen ist derzeit nur ein verschwindend geringer Teil der Siedlungen nachts 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 Nacht zeigt im Status Quo, dass einzelne Innenstadtbereiche von Paderborn und manche wohnlich genutzten Bereiche im Umfeld von gewerblich genutzten Flächen in einer autochthonen sommerlichen Wetterlage von einer sehr ungünstigen thermischen Situation betroffen sind.

Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand für den Status Quo eine Ausweisung von nur 0,9 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche (Primärfunktion) der Kaltluftleitbahnen.

Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich zu 7,1 % innerhalb der Stadtgrenzen von Paderborn wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Peripherie der Kaltluftleitbahnen oder im Umfeld der flächenhaften Kaltluftabflüsse (Sekundärfunktion). Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Sportplätze oder an den Siedlungsraum anschließende Agrarflächen. Zusätzlich gehören ein paar innerstädtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an, wie z. B. Teile des Ostfriedhofes

Mit 37,4 % entfällt der größte Teil 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 siedlungsnahen Agrarflächen rund um die einzelnen Ortschaften in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit geringer human-bioklimatischer Bedeutung in der Nacht nimmt mit 34,0 % einen vergleichbar großen Anteil aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Ackerflächen sowie Waldbereiche, die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen. Den letzten Anteil der Ausgleichsflächen bilden mit 20,7 % all jene Grün- und Freiflächen, die keinen nennenswerten Beitrag zum heutigen Kaltluftprozessgeschehen leisten.

Im Wirkraum ändert sich die Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen, die bereits im Status Quo existierten, in Abhängigkeit zur Stärke des Klimawandelsignals. Die deutlichsten Veränderungen sind bei den beiden Randklassen (also „sehr günstig“ und „sehr ungünstig“) erkennbar. Im Szenario schwacher Klimawandel sinkt der Anteil der Wirkraumflächen mit sehr günstigen Bedingungen von etwa 17 auf ca. 1 % ab, für das Szenario des starken Klimawandels konnten keine Flächen mehr als „sehr günstig“ eingestuft werden. Für die Klasse „sehr ungünstig“ zeigt sich ein diametral entgegengesetztes Bild: waren solche Flächen im Status Quo quasi nicht vertreten steigt der Anteil im Szenario P1 auf 2,6 % und im Szenario P2 sogar auf mehr als ein Viertel (26,9 %). Durch die angenommene Flächenentwicklung¹¹ bis 2035 erhöht sich zusätzlich die Größe des bebauten Areals in Paderborn von ca. 2.940 ha auf 3368 ha und damit um rund 14%. Diese neuen Wirkraumflächen erhielten im Rahmen der nächtlichen Bewertungskarten für die Zukunftssituation nun ebenfalls eine Beurteilung, wobei sich locker und weitgehend versiegelungsarme und ggf. am Stadtrand befindliche Siedlungsbereiche eher in den günstigeren bis mittleren Bewertungsklassen wiederfanden, großflächig versiegelte Flächen, hingegen eher in den ungünstigeren. Aber auch hier ist der Einfluss des Klimawandelsignals erkennbar, so gut wie jede Entwicklungsfläche ist im Szenario P2 eine Klasse schlechter bewertet als im Szenario P1.

Anders als im Wirkraum haben sich in den Zukunftsszenarien im Ausgleichsraum nur wenige Bestandsflächen im Vergleich zum Status Quo verändert, da deren Funktionen eng mit der Nähe zum (belasteten) Siedlungsraum verwoben sind. Auch im Bereich vieler Kaltluftabflüsse, die direkt auf Siedlungsagglomerationen hindeuten und künftig vom Ausgleichs- zum Wirkraum transformiert werden, geschieht eine Bedeutungsaufwertung der luvwärts vorgelagerten Grün- und Freiflächen infolge der Abflussverschiebungen. Im Vergleich des Status Quo mit dem P1 Szenario ändern sich die Klassenverteilungen nur minimal. Nur im Szenario starker Klimawandel zeigt sich eine Zunahme der Ausgleichsräume mit sehr hoher Bedeutung von 0,9 auf 5,5 %.

¹¹ Hinweis: die angenommene Flächenentwicklung stellt nur Potenziale mit Stand 2021 dar, teilweise hat sich dieses Potenzial durch den neuen Regionalplan überholt.

Tabelle 16: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Status Quo und im Zukunftsszenario.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen in Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1	Flächenanteil im Status Quo [%]	Flächenanteil im P1 Szenario [%]	Flächenanteil im P2 Szenario [%]
Nachtsituation	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	23,0	2,3	0
		2= günstig	47,6	44,8	1,0
		3= mittel	17,7	31,2	32,0
		4= ungünstig	11,3	15,6	40,8
		5= sehr ungünstig	0,3	6,0	26,2
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	5,1	5,6	10,0
		4= hoch	17,0	16,3	11,8
		3= mittel	24,5	25,7	25,7
		2= gering	41,4	40,8	40,3
		1= sehr gering	12,0	11,5	12,2
Tagsituation	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	11,3	7,1	1,0
		2= günstig	35,7	25,9	6,5
		3= mittel	46,9	51,9	28,3
		4= ungünstig	6,1	15,1	56,9
		5= sehr ungünstig	0	0,1	7,4
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	16,8	12,3	4,9
		2= günstig	29,4	22,8	9,0
		3= mittel	39,9	41,5	23,4
		4= ungünstig	13,8	22,5	46,5
		5= sehr ungünstig	0,1	0,9	16,2
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	31,7	30,3	16,3
		4= hoch	5,6	5,5	17,1
		3= mittel	32,7	24,9	4,7
		2= gering	29,5	37,7	31,9
		1= sehr gering	0,4	1,6	30,0

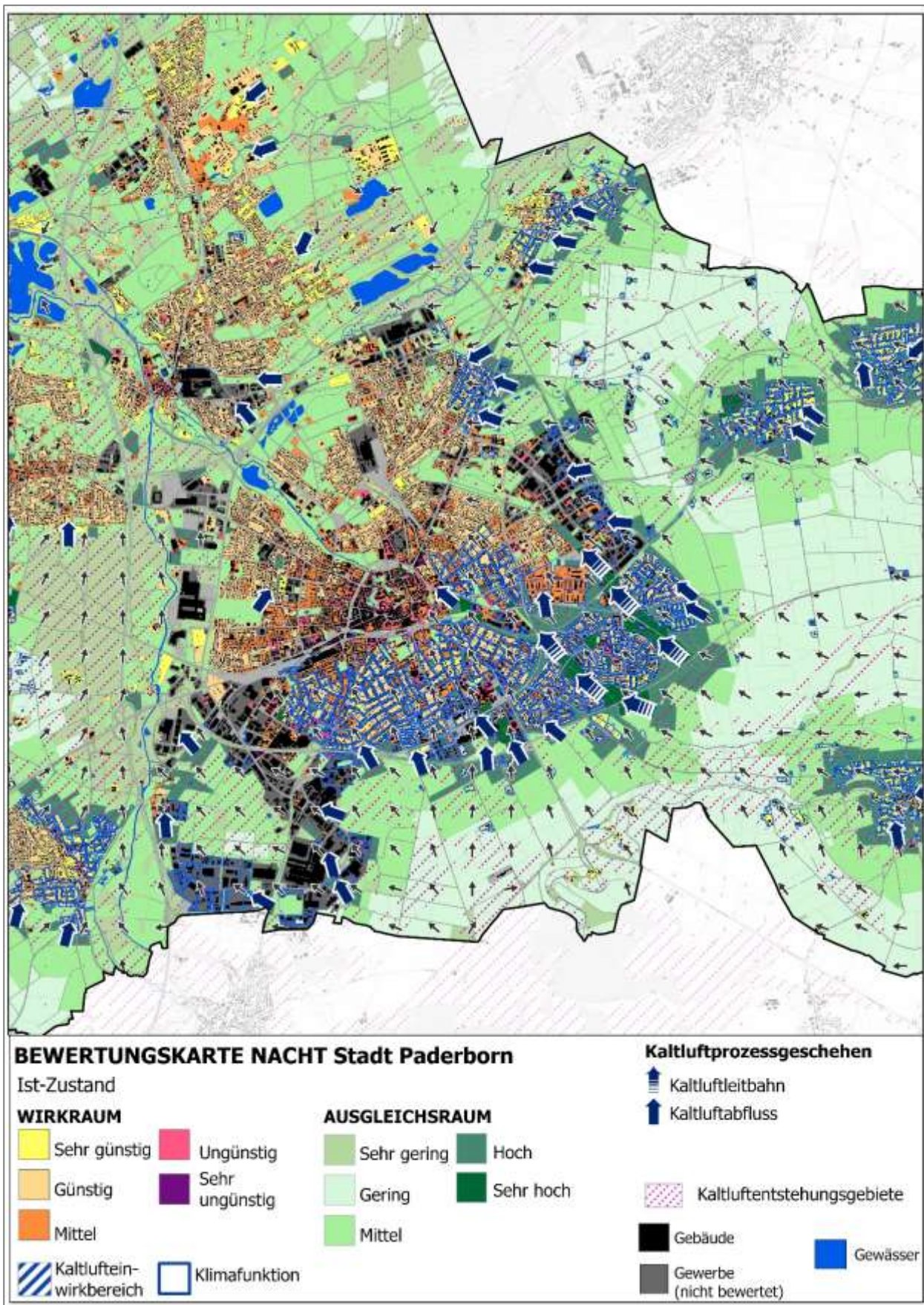


Abbildung 73: Karte 19: Bewertungskarte der Nachtsituation im Ist-Zustand für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

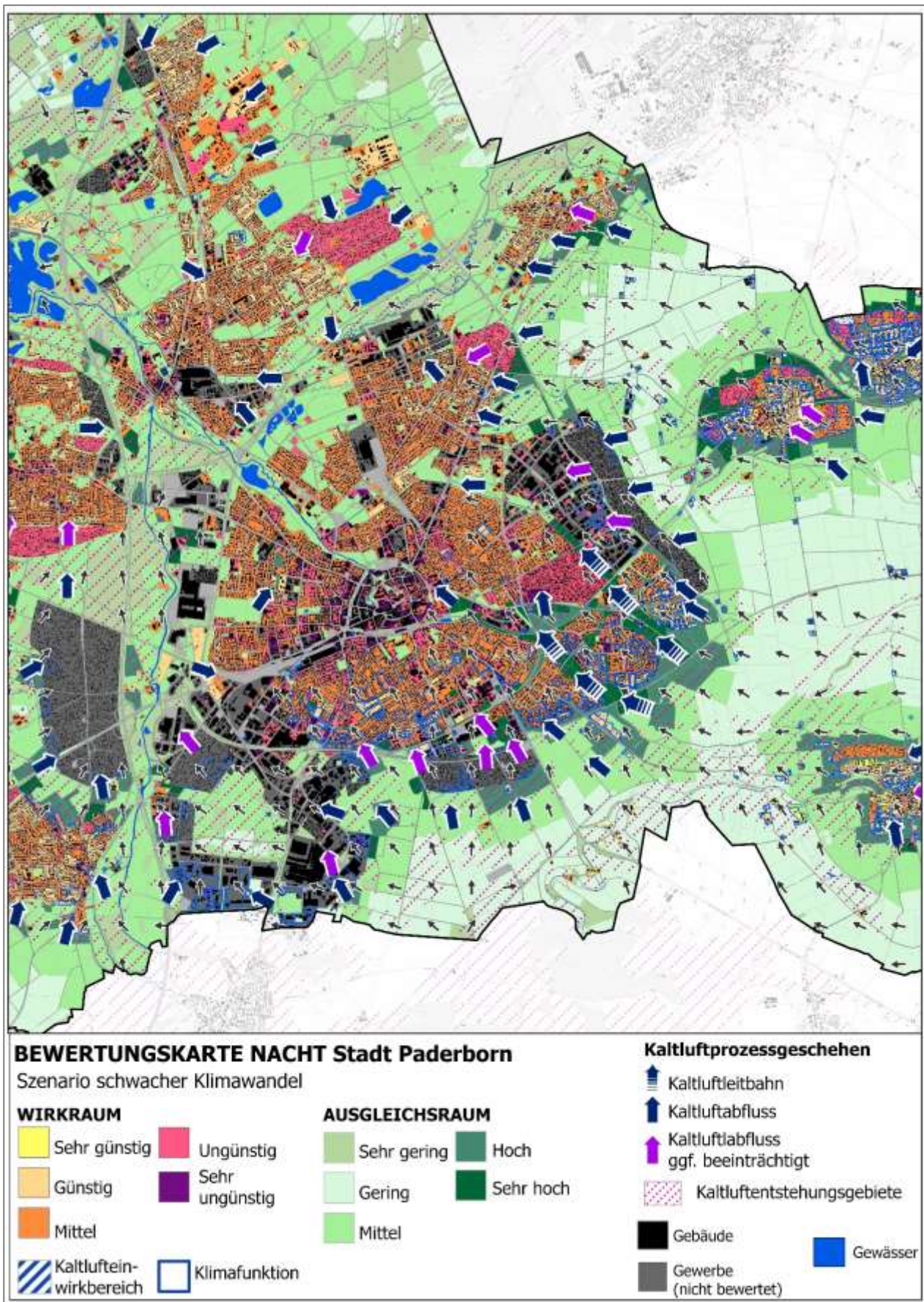


Abbildung 74: Karte 20: Bewertungskarte der Nachtsituation im Szenario P1 für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

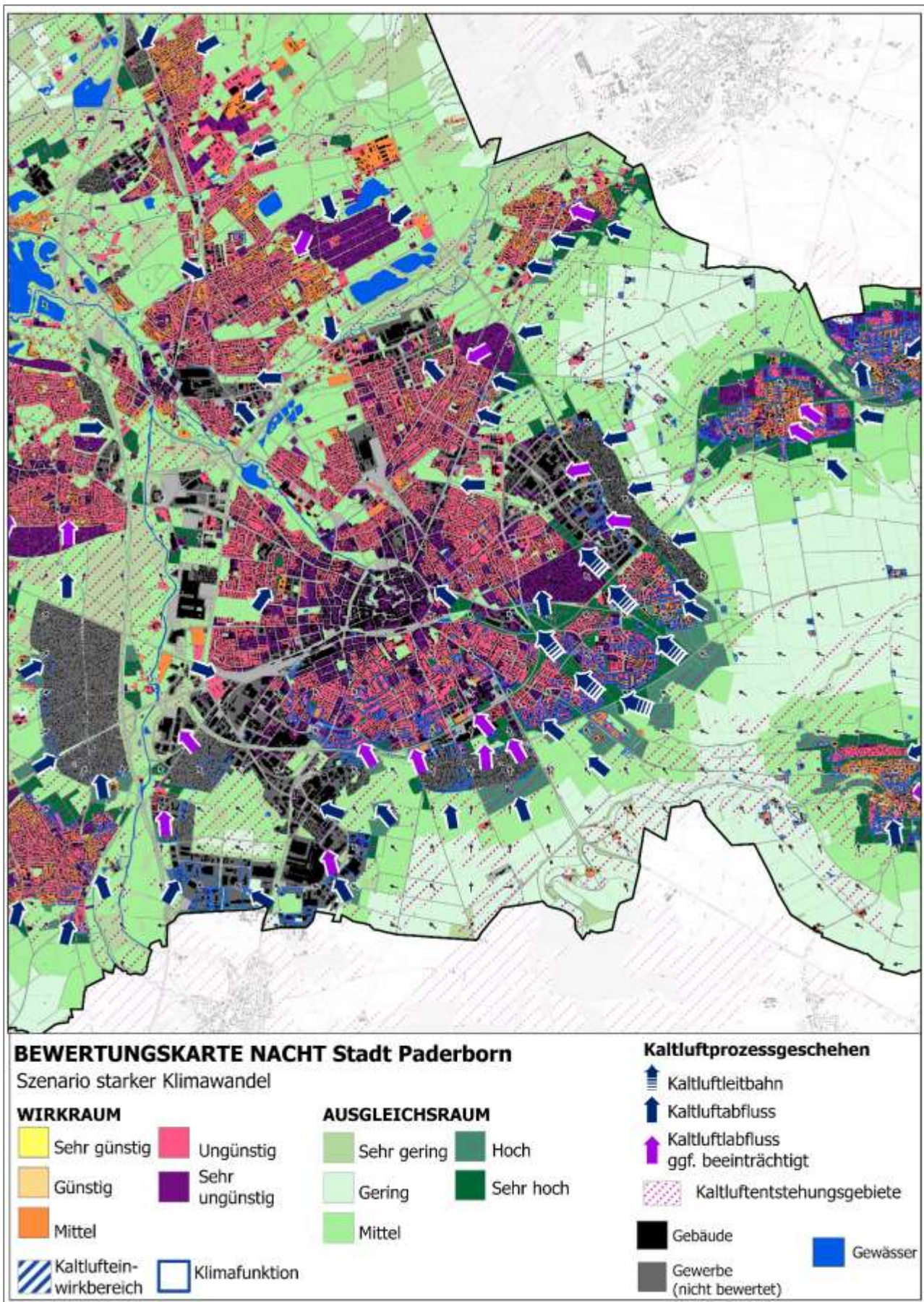


Abbildung 75: Karte 21: Bewertungskarte der Nachtsituation im Szenario P2 für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

8.3.2.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Paderborn, die im Ist-Zustand in Abbildung 76 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 Paderborn sind 10,4 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 19,3 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation am Tage gekennzeichnet. Vor allem die durchgrüneten, zumeist wald- oder gewässernahen Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbauung gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün- (und insbesondere Baum-)anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum.

29,4 % der Wohn- und Gewerbeflächen Paderborns wurden der Kategorie der günstigen human-bioklimatischen Situation zugeordnet. Diese vergleichsweise noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Bei den Verkehrsflächen weisen 21,9 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf.

Mit 50,1 % ist die Hälfte der Wohn- und Gewerbeflächen, aber auch ein Drittel der Verkehrsflächen (33,3 %) aktuell mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt sowohl Wohngebiete als auch Gewerbegebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Die Großzahl an Flächen in den Innenstädten und Kernbereichen der Ortschaften sind mit dieser Klassifizierung belegt. Obwohl die Grünausstattung in den Innenstädten oftmals gering ausfällt, erzeugt ggf. enge Gassenbauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen.

Mit gerade einmal 10 % der Wohn- und Gewerbeflächen und 25 % der Verkehrsflächen sind nur geringe Teile der Wirkraumflächenkulisse im Status Quo am Tage durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Oft fehlen in den betroffenen Wohnflächen großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 10 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten¹². Die Klasse der Flächen mit sehr ungünstiger thermischer Situation beinhaltet im Ist-Zustand nur einige wenige Flächen, die für Wohnen, Gewerbe und Verkehr jeweils weniger als 0,5 % der Flächen ausmachen.

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 (26,8 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese höchste Bewertungsklasse fallen für den Status Quo etwa die Waldareale.

Nur rund 7,6 % der Ausgleichsflächen sind 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 innenstadtnah gibt es hoch bewertete Ausgleichsflächen (z.B. Grünanlagen), die einen idealen Rückzugsort für die Bewohner darstellen.

¹² Siehe Beschreibung der Unsicherheiten (Kap. 5.2.7, S. 53)

Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (33,9 % der Grünflächen) sind überall über die Stadtteile 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 Wegebeziehungen, die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit geringer (31,3 %) oder sehr geringer (0,4 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen in Paderborn ausmachen.

Die Bewertungskarte des Tages für das Szenario schwacher Klimawandel ist ausschnittsweise in Abbildung 77 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier das Klimawandelsignal schwache, aber erkennbare eigene Auswirkungen auf die Klassifizierung hat, da es auf allen Flächen (egal ob Wirk- oder Ausgleichsraum) stattfindet. Viele der neu hinzugefügten, durch den Mischpixelansatz approximierten und teils großflächigen Siedlungspotenzialflächen sind zukünftig in der Wirkraumkategorie der ungünstigen Aufenthaltsqualität am Tage eingeordnet. Dies hat im Szenario starker Klimawandel zur Folge, dass diese Klasse künftig mit 52,3 % den größten Anteil stellt (siehe Abbildung 78). Unter den neu hinzugefügten Flächen¹³ waren einige Industrie- und Gewerbeflächen mit hohem Versiegelungsgrad, was zum Teil den Anstieg des Flächenanteils mit ungünstiger Aufenthaltsqualität erklärt. Bezüglich der verwendeten Methode ist jedoch auch bekannt, dass die Annäherung über den Mischpixelansatz allgemein eine Temperaturüberschätzung mit sich bringt und somit auch dadurch eine Verschiebung der Flächenverteilung hin zu ungünstigeren Situationen möglich ist.

¹³ Aus dem Regionalplan, den Flächenreserven und weiteren Unterlagen abgeleitete mögliche Bauentwicklungsflächen für Wohnen und Gewerbe, siehe Kapitel 5.2.3

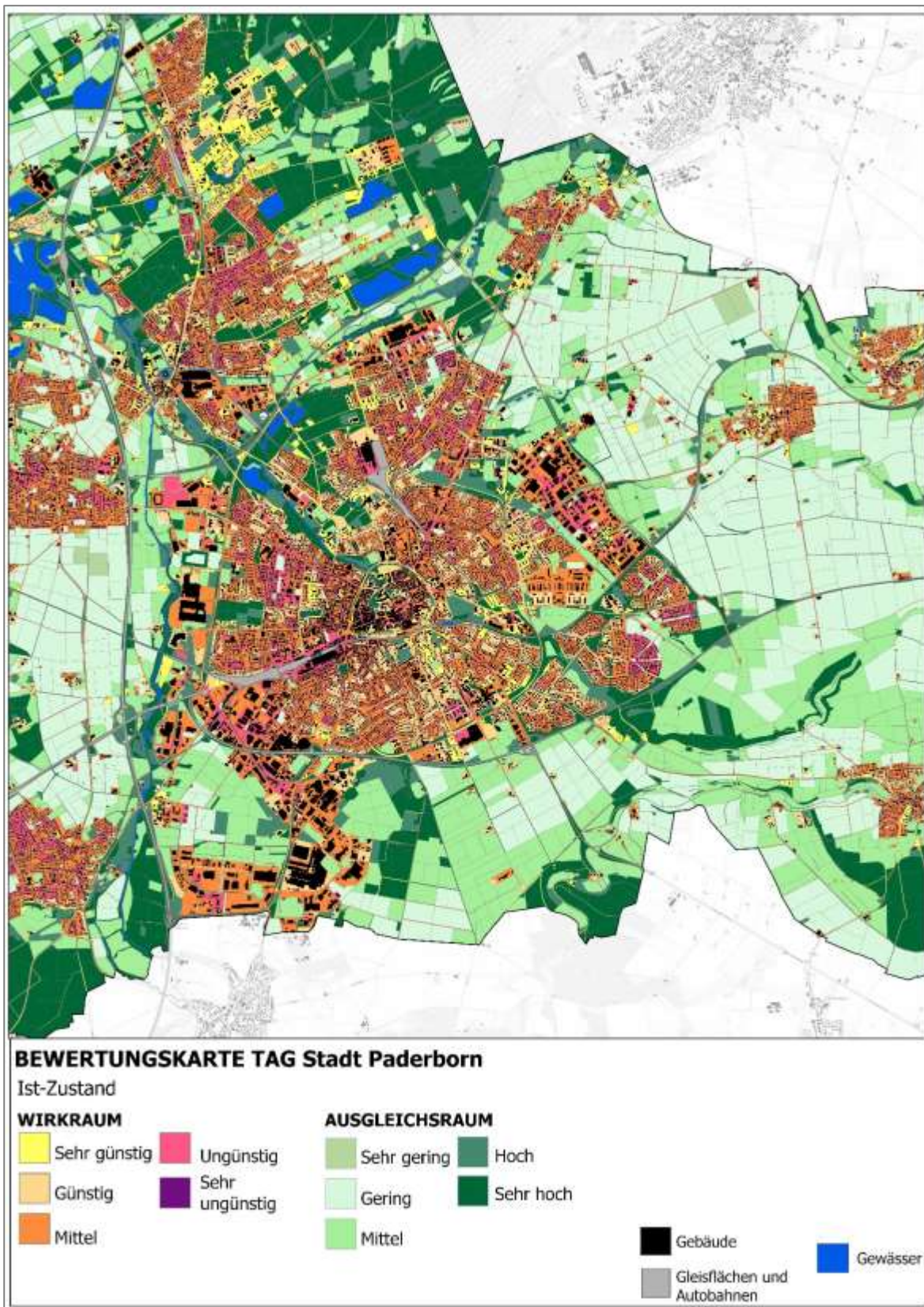


Abbildung 76: Karte 22: Bewertungskarte der Tagsituation im Ist-Zustand für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

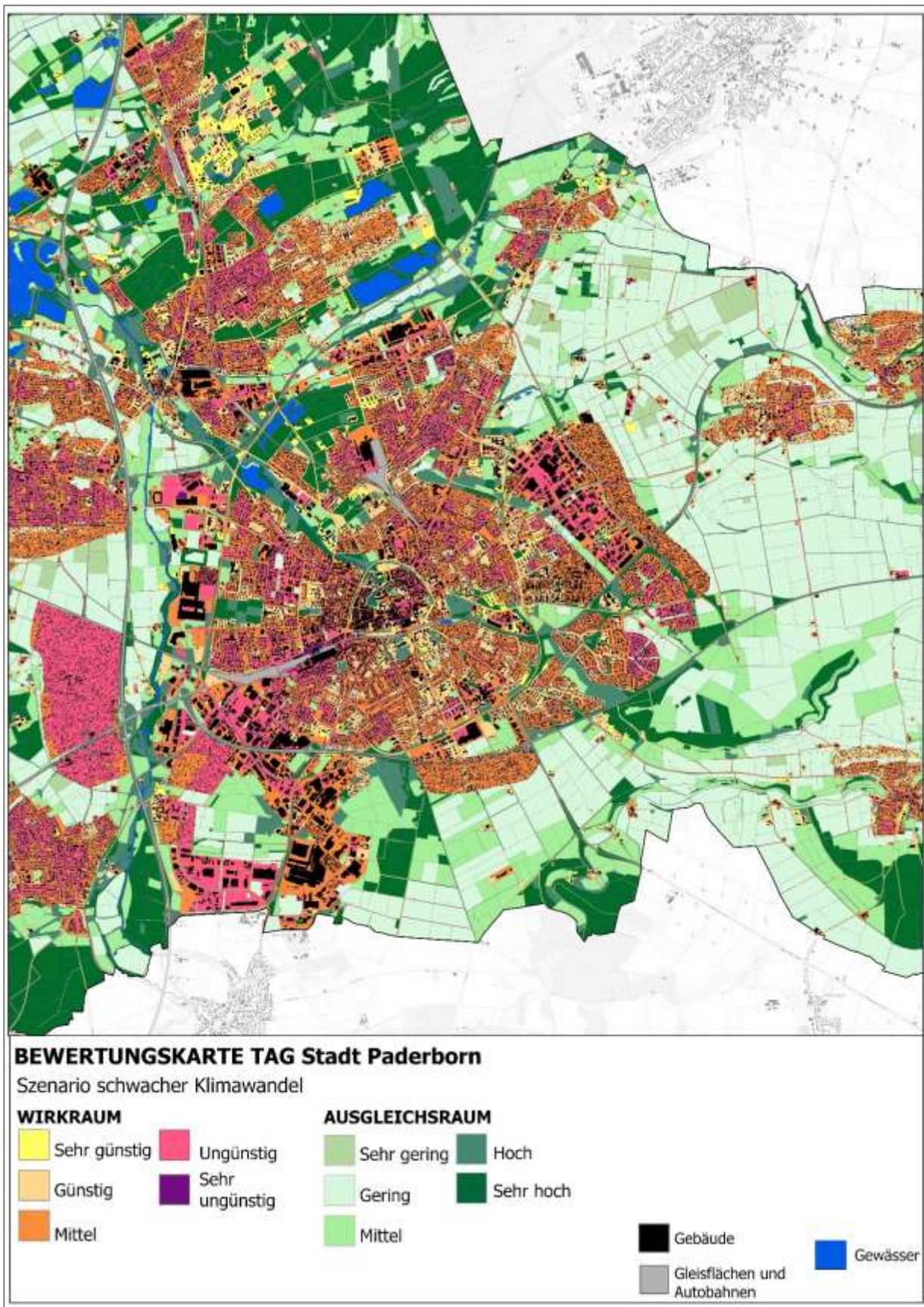


Abbildung 77: Karte 23: Bewertungskarte der Tagsituation im Szenario P1 für einen Ausschnitt Paderborns (verkürzte Legende).

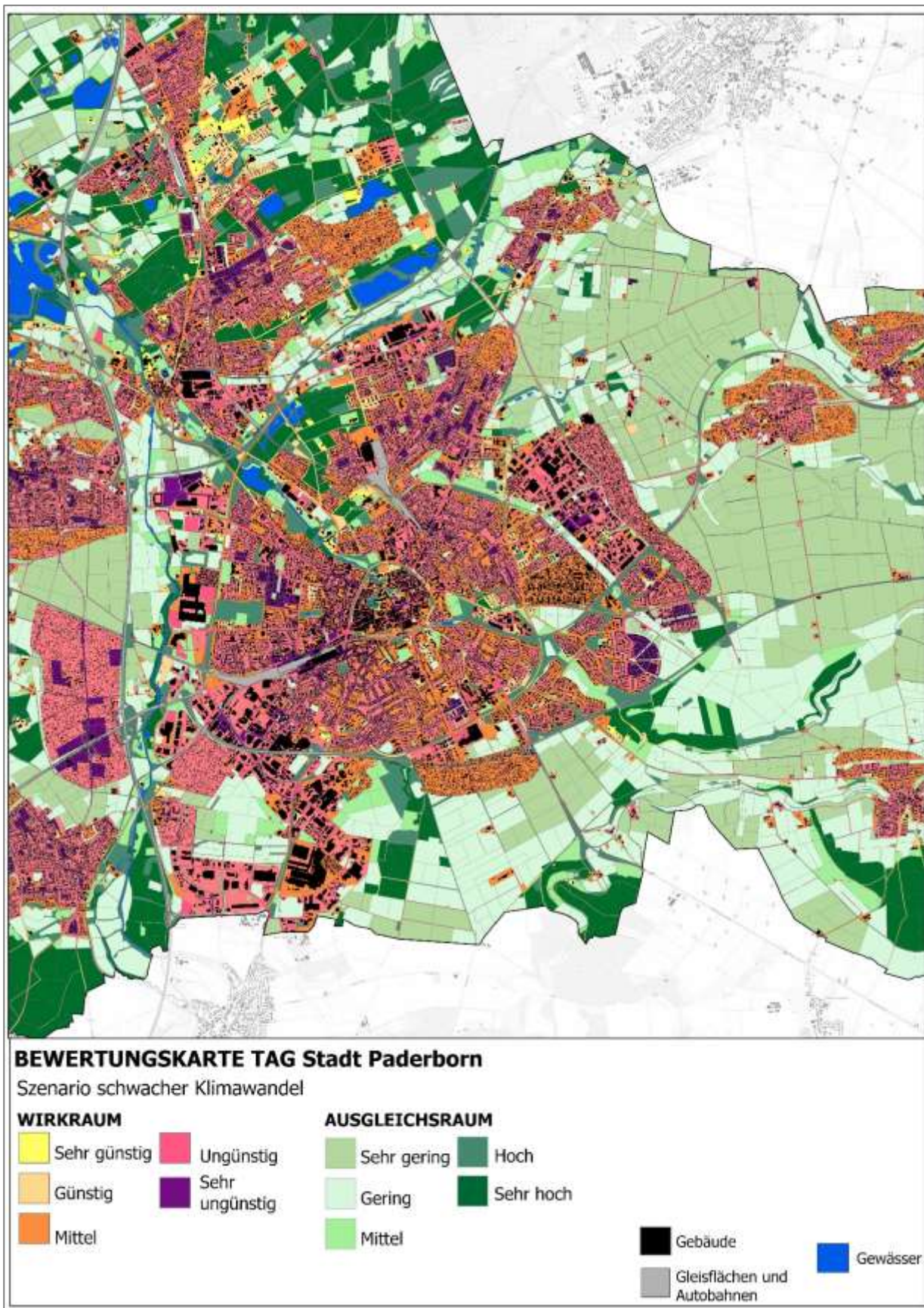


Abbildung 78: Karte 24: Bewertungskarte der Tagsituation im Szenario P2 für einen Ausschnitt Paderborns(verkürzte Legende).

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der zwei Bewertungskarten „Ist-Zustand Nacht“ und „Ist-Zustand Tag“ (siehe Kapitel 8.3) in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen eine hohe stadtklimatische Bedeutung haben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine stadtklimatische Belastung vorliegt. Die zugrunde gelegte Flächenkulisse ist die des Istzustandes der Bebauung innerhalb der Stadtgrenzen zum Zeitpunkt der Studie. Neben der abschließenden Bewertung der einzelnen Flächen (inklusive einer Abwägung der Tag- gegen die Nachtsituation) und der Verknüpfung mit einem Planungshinweis, erfüllt die PHK auch die Funktion einer Aufmerksamkeitskarte. Über die Karte sollen erste Einschätzungen bzgl. des Handlungsbedarfes und der -potentiale zum Thema Stadtklima und Anpassung an Hitzebelastungen ermöglicht werden. Für genauere Analysen und als Abwägungshilfe z.B. im Fall der Fragestellung einer möglichen Entwicklung dienen dann die digitale geodatenbasierte Variante der PHK und die weiteren Geodaten zu den Modellergebnissen und abgeleiteten Produkten.

8.4.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird der **stadtklimatische Handlungsbedarf** dargestellt. Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), das heißt, dass diese in der Bewertungsmatrix stärker gewichtet wurden (Tabelle 17). Die Bewertungsgrundlage wurde aus den Klassenzuweisungen der Bewertungskarten des Tages und der Nacht extrahiert und im Rahmen einer Bewertungsmatrix gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5 für den Status Quo (siehe Tabelle 17).

Tabelle 17: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für Wohn- und Gewerbebaum.

Wohnsiedlung: (Nacht stärker gewichtet)						
Bioklimatische Situation am Tag	Bioklimatische Situation Nacht					
		sehr günstig	günstig	mittel	ungünstig	sehr ungünstig
	sehr günstig	1	2	3	3	4
	günstig	1	2	3	4	4
	mittel	2	3	3	4	5
	ungünstig	3	3	4	4	5
	sehr ungünstig	3	4	4	5	5
Belastung: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch						

Je nachdem, wie stark für die Tag-Nacht-Kombination eine Wirkraumbelastung vorherrscht, wurden Handlungsbedarfe vergeben. Da der Verkehrsraum und der Gewerbebaum nur für die Tagsituation ausgewertet wurden, konnten die Bewertungskennzahlen hier direkt in Handlungsbedarfe überführt werden (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Aus Bewertungskarten abgeleitete Belastungen für den Wirkraum.

Wirkraumbewertung aus der Matrix Wohnen (Bewertungskarten)	Wirkraumbewertung des Gewerbe- und Verkehrsraums (Bewertungskarten)	Stadtklimatischer Handlungsbe- darf in der PHK im Wirkraum
5= sehr hoch oder 4= hoch	5= sehr hoch oder 4= hoch	1= hoher
3= mittel	3= mittel	2= mittlerer
2= gering	2= gering	3= niedriger

1= sehr gering	1= sehr gering	4= kein
----------------	----------------	---------

Grün- und Freiflächen sowie landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt die **bioklimatische Bedeutung** 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 (siehe Tabelle 19).

Tabelle 19: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Grünflächen						
Schritt 1		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Aufenthalts- qualität Tag Entlastungs- raum	3	3	3	4	4	5
	4	4	4	4	5	5
	5	5	5	5	5	5
		Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste				
Schritt 2		Bewertung in der Nacht				
		1	2	3	4	5
Aufenthalts- qualität Tag kein Entlastungs- raum	1	1	2	3	4	5
	2	1	2	3	4	5
	3	2	2	3	4	5
	4	3	3	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
		Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste				

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), potenziell öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder von mindestens mittlerer Bedeutung am Tage (Ausgleichsraumklasse der Bewertungskarte ≥ 3).

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. Die daraus resultierenden Bedeutungen und Planungshinweise sind in Tabelle 20 aufgeführt.

Tabelle 20: Aus Bewertungskarten abgeleitete Bedeutungen für den Ausgleichsraum.

Ausgleichsaumbewertung aus der Matrix Grünflächen (Bewertungskarten)	Bedeutung in der PHK im Ausgleichsraum
5= höchste	1 = hohe
4= sehr hoch	2= mittlere

3= hoch	3= niedrige
2= mittel oder 1= gering	4= Keine

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte des Status Quo übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftleitbahnen und -abflüssen sowie Paderborner Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden, Gleisflächen und Schnellstraßen im Außenraum (nicht bewertet) sowie Hinweise zu Flächenentwicklungen. Ergänzend ist eine Markierung zu Hitzesensiblen Nutzungen enthalten, die in Kapitel 8.5 näher beschrieben werden.

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE (PHK) STADTKLIMA

Das finale Produkt der Stadtklimaanalyse für Paderborn, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 80 ausschnittsweise aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Belastungen und Bedeutungen aus.

Die **stadtklimatischen Handlungsbedarfe des Wirkraums** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, auf 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 (siehe Tabelle 22).

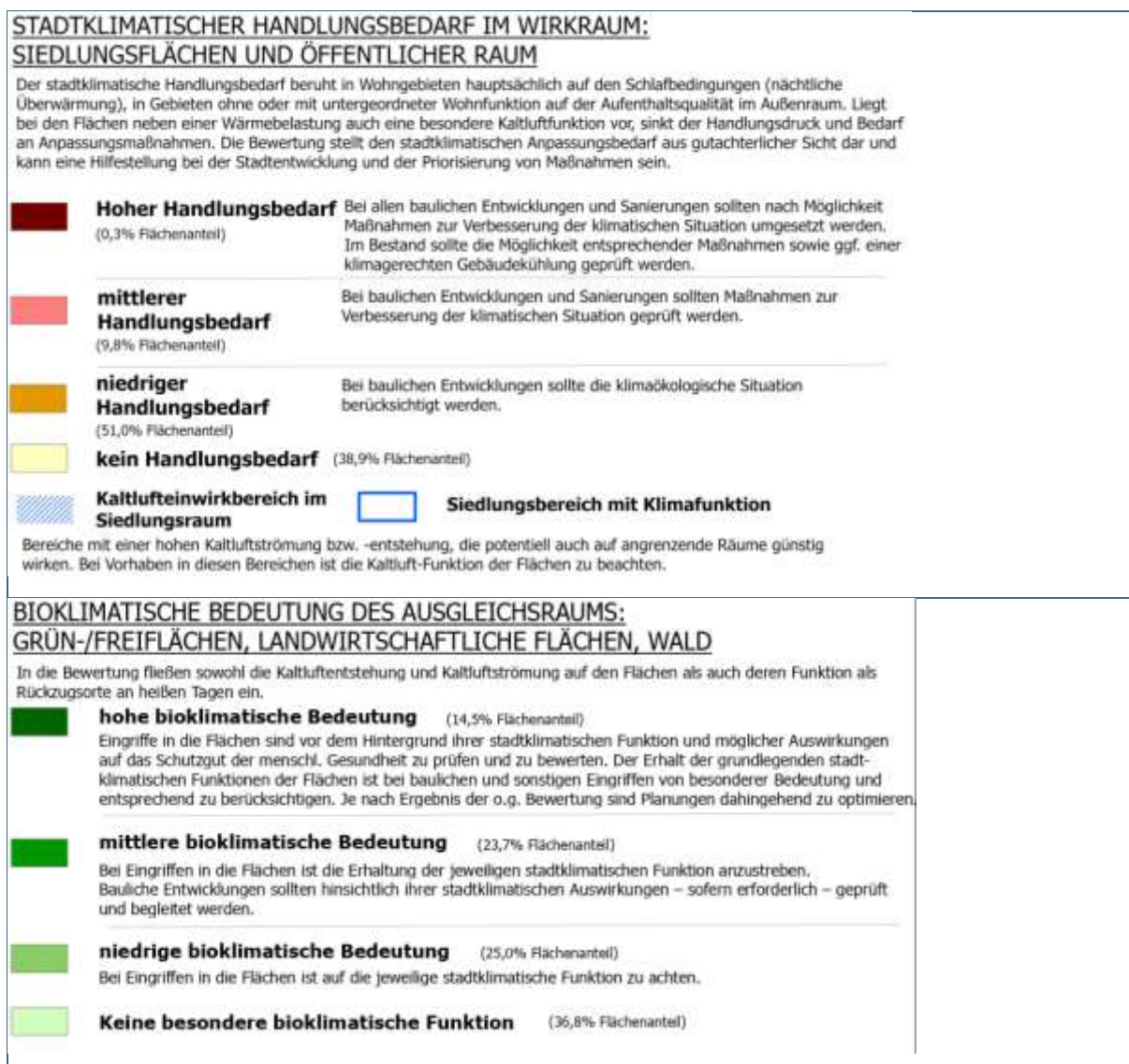




Abbildung 79: Legdenelemente der Planungshinweiskarte

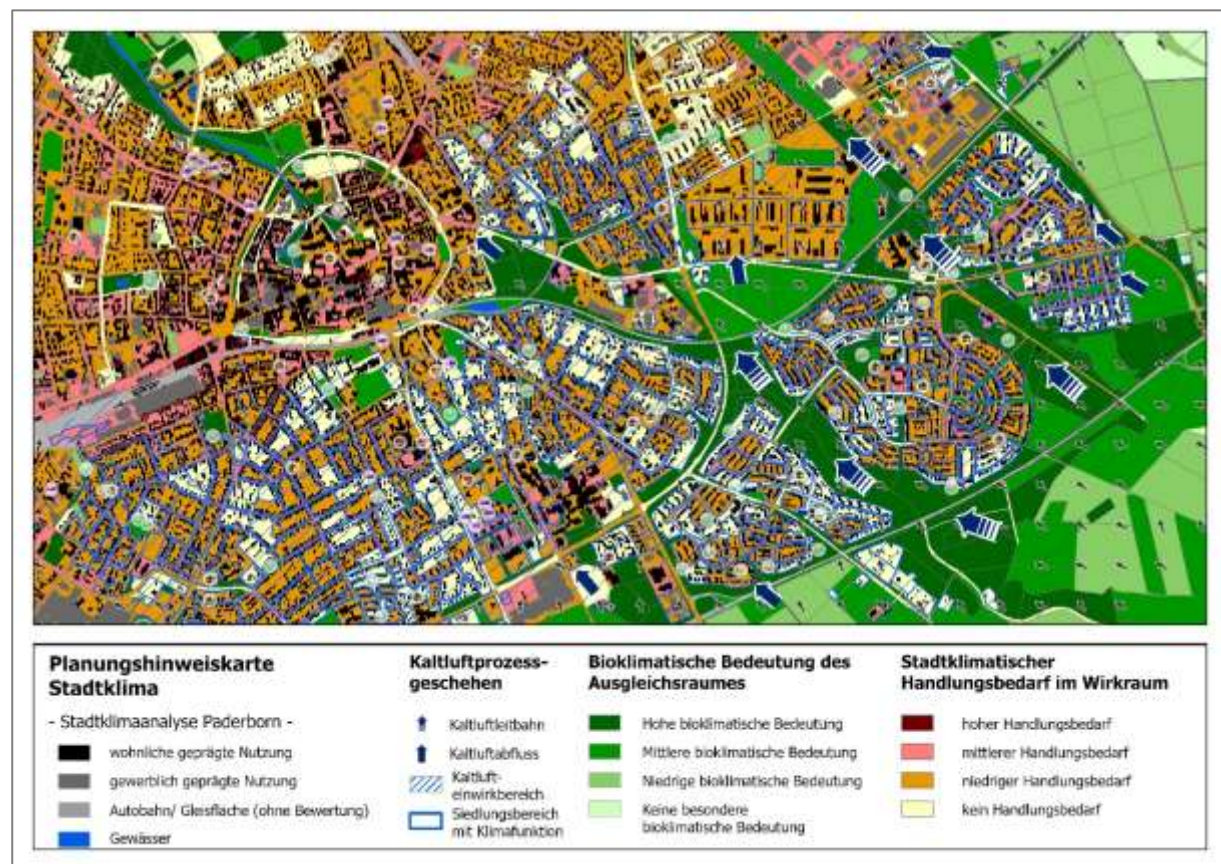


Abbildung 80: Karte 25: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte für Paderborn (verkürzte Legende).

Tabelle 21: Flächenanteile der stadtklimatischen Handlungsbedarfe im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Handlungsbedarf in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
hoher	0,3	Bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen sollten nach Möglichkeit Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation umgesetzt werden. Im Bestand sollte die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen sowie ggf. einer klimagerechten Gebäudekühlung geprüft werden.
mittlerer	9,8	Bei baulichen Entwicklungen und Sanierungen sollten Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation geprüft werden.
niedriger	51,0	Bei baulichen Entwicklungen sollte die klimaökologische Situation berücksichtigt werden.
kein	38,9	-

Mit dem *Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes bei der Entwicklung in den Städten und Gemeinden* im Jahr 2011 sind die Belange von Klimaschutz und Klimaanpassung in der Bauleitplanung gestärkt (Novellierung des Baugesetzbuchs (BauGB)) und nun ausdrücklich zu einer Aufgabe der Bauleitplanung nach § 1 (5) BauGB erklärt worden: „Die Bauleitpläne sollen [...] dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern, die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln sowie den **Klimaschutz und die Klimaanpassung**, insbesondere auch in der Stadtentwicklung, zu fördern [...].“ Zusätzlich heißt es in § 1a (5) BauGB: „Den Erfordernissen des Klimaschutzes soll sowohl durch Maßnahmen, die dem **Klimawandel** entgegenwirken, als auch durch solche, die der **Anpassung an den Klimawandel** dienen, Rechnung getragen werden.“

Die in der PHK enthaltenen Planungshinweise geben eine Hilfestellung in welchem Maße in den bewerteten Gebieten ein Bedarf zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen besteht (vgl. Tabelle 21). Mit 0,3 % ist der höchste Handlungsbedarf zuallererst 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 Handlungsbedarfe gegeben. Bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen in diesen Flächen sollten nach Möglichkeit Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation umgesetzt werden (z. B. durch Entsiegelung und Verschattung). Im Bestand sollte die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen (z. B. Berieselung mit oder Vernebelung von Wasser in betroffenen Gebieten) sowie ggf. eine klimagerechte Gebäudekühlung geprüft werden.

Die Klasse der mittleren Belastung macht mit insgesamt 9,8 % der Flächen weniger als ein Zehntel des Wirkraumes aus, trotzdem sollten bei baulichen Entwicklungen und Sanierungen Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation geprüft werden. Die Hälfte der Wirkraumflächen (Wohnen, Gewerbe und Verkehr) in Paderborn ist durch einen niedrigen Handlungsbedarf gekennzeichnet. Bei baulichen Entwicklungen sollte die klimaökologische Situation auch hinsichtlich der oben beschriebenen Anforderungen laut BauGB berücksichtigt werden. Die Bewertungskarten der Zukunftsszenarien liefern Hinweise, welche dieser Flächen in Zukunft durch eine erhöhte Belastung bedroht, sein könnten. Durch eine Umsetzung von Maßnahmen, die für die jeweilige Fläche individuell ausgewählt werden, und somit eine geeignete Klimaanpassung in den betrachteten Flächen, kann es gelingen, in den Bereich „kein Handlungsbedarf“ vorzudringen, deren Flächenkategorie in der vorliegenden Analyse 38,9 % ausmacht. Flächen, die die Kategorie „kein Handlungsbedarf“ erreichen, sind auch gegenüber klimawandelbedingten Änderungen bis mindestens zur Mitte des Jahrhunderts resilient und erhalten ihre gute Aufenthaltsqualität am Tage und/oder in der Nacht.

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 ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$) darstellen, sind in der PHK durch eine entsprechende bioklimatische Bedeutung ausgewiesen. Tabelle 22 stellt den Bedeutungen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Klasse. Mit einem Anteil von 14,5 % besitzt weniger als ein Fünftel des Paderborner Ausgleichsraums eine hohe stadtklimatische Bedeutung. Hierzu zählen vorrangig die Freiflächen, die mit den primären Funktionen der Leitbahnen assoziiert sind, aber auch Waldflächen wie jene am Ziegenberg bei Wewer. Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche mit ihren jeweils sehr hohen Bedeutungen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, zu der die Flächen ihre Funktion entfalten, ist deren Bedeutung in der hohen Kategorie bei Eingriffen stets zu berücksichtigen. Eingriffe in die Flächen sind vor dem Hintergrund ihrer stadtklimatischen Funktion und möglicher Auswirkungen auf das Schutzgut der menschl. Gesundheit zu prüfen und zu bewerten. Der Erhalt der grundlegenden stadtklimatischen Funktionen der Flächen ist bei baulichen und sonstigen Eingriffen von besonderer Bedeutung und entsprechend zu berücksichtigen. Je nach Ergebnis der o.g. Bewertung sind Planungen dahingehend zu optimieren. Dies kann beispielsweise durch eine Anpassung der Gebäudestellung, die Ausweisung von Grünachsen und den Erhalt von Baumbeständen erfolgen.

Auch der Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse der mittleren bioklimatischen Bedeutung, die immerhin knapp ein Viertel aller Ausgleichsflächen betrifft (23,7 %), ist anzustreben und Klimabelange sind bei Umsetzung des Planvorhabens aufmerksam zu berücksichtigen. Bauliche Entwicklungen sollten hinsichtlich ihrer stadtklimatischen Auswirkungen – sofern erforderlich – geprüft und begleitet werden. Etwa ein weiteres Viertel (25,0 %) der Grün- und Freiflächen weisen eine niedrige bioklimatische Bedeutung auf. Hierzu zählen vorrangig die an den Rändern der kleineren Siedlungen gelegenen 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) die jeweilige stadtklimatische Funktion zu achten und eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten.

Abschließend weisen rund 37% der Ausgleichsflächen für den heutigen Wirkraum keine bioklimatische Bedeutung auf. Die Bewertungskarten der Zukunftsszenarien geben auch hier Hinweise, welche der Flächen im Zusammenhang mit einem voranschreitenden Klimawandel in Zukunft von Bedeutung sein werden. Darüber hinaus besitzen einige der Flächen ohne stadtklimatische Bedeutung das Potential über entsprechende Maßnahmen zu einem wichtigen Ausgleichsraum zu werden, sei es über eine verbesserte Aufenthaltsqualität am Tage (z. B. durch Aufforstung) oder eine Optimierung für Kaltluftprozesse in der Nacht (z. B. durch Entsiegelung von ungenutzten versiegelten Bereichen).

Tabelle 22: Flächenanteile der bioklimatischen Bedeutung im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Bedeutung in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
hoch	14,5	Eingriffe in die Flächen sind vor dem Hintergrund ihrer stadtklimatischen Funktion und möglicher Auswirkungen auf das Schutzgut der menschl. Gesundheit zu prüfen und zu bewerten. Der Erhalt der grundlegenden stadtklimatischen Funktionen der Flächen ist bei baulichen und sonstigen Eingriffen von besonderer Bedeutung und entsprechend zu berücksichtigen. Je nach Ergebnis der o.g. Bewertung sind Planungen dahingehend zu optimieren.

Mittel	23,7	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion anzustreben. Bauliche Entwicklungen sollten hinsichtlich ihrer stadtklimatischen Auswirkungen – sofern erforderlich – geprüft und begleitet werden.
Niedrig	25,0	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die jeweilige stadtklimatische Funktion zu achten.
Keine	36,8	-

8.5 ERGÄNZENDE ENDPRODUKTE

Als zusätzliche Informationsebene für die Planungshinweiskarte wurde eine Übersicht hitzesensibler Nutzungen in Paderborn erstellt. Dazu gehören Krankenhäuser & Notfallambulanzen, Kitas & Krippen, Einrichtungen für Pflege & betreutes Wohnen, aber auch Bolz- & Spielplätze. Da sich an diesen Orten überdurchschnittlich viele Personen aufhalten, die gegenüber Hitzebelastungen besonders verletzlich sind, sollten diese Bereiche besonders geschützt werden. Deshalb wird in der Planungshinweiskarte empfohlen, die zu den Einrichtungen gehörigen Flächen hinsichtlich ihres stadtklimatischen Handlungsbedarfes oder ihrer bioklimatischen Bedeutung prioritär zu behandeln. Die Punktinformationen zur Lage der Einrichtungen wurden von der Stadt Paderborn bereitgestellt und statistisch ausgewertet (Abbildung 81).

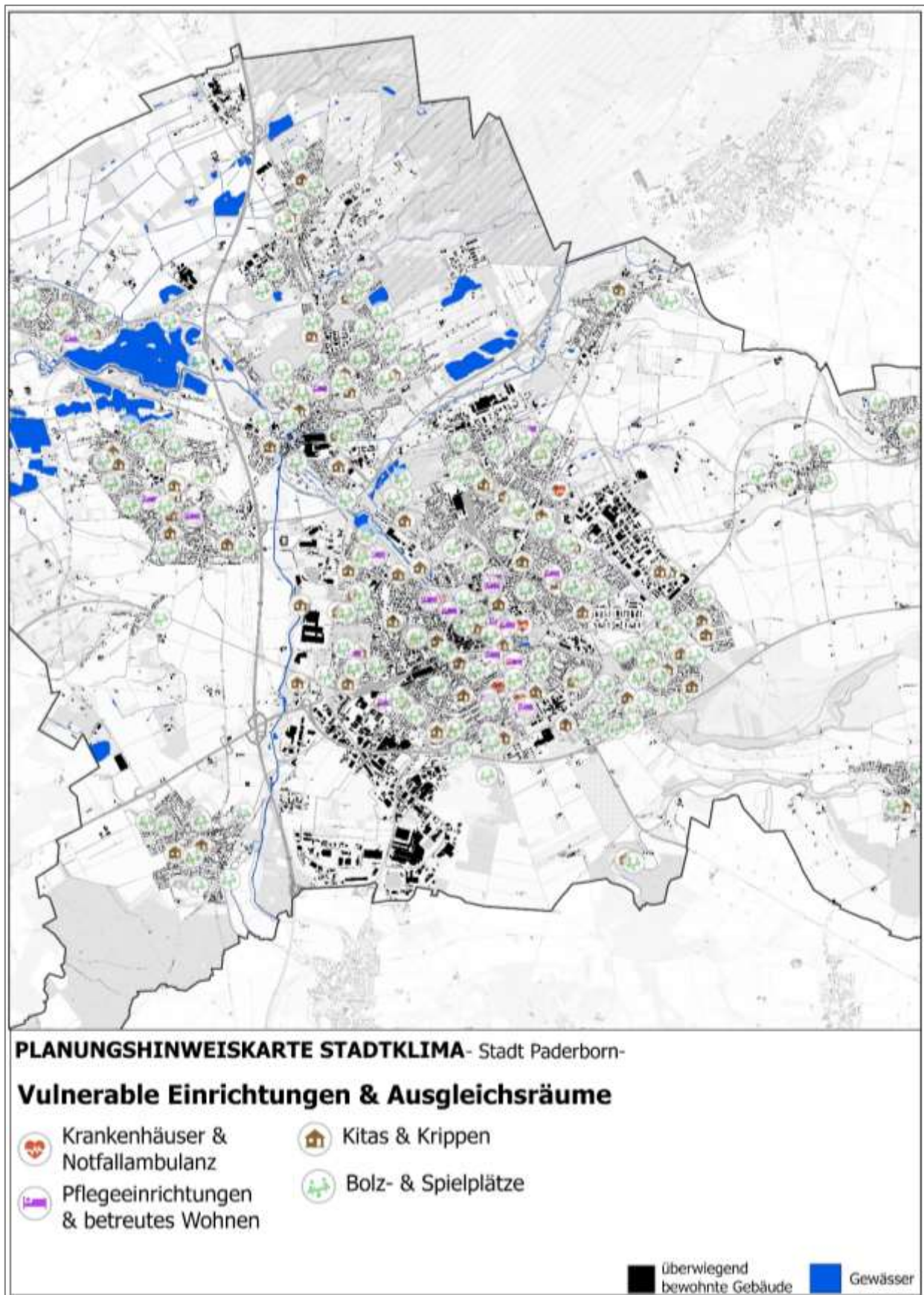


Abbildung 81 Ergänzungslayer für die Planungshinweiskarte mit vulnerablen Einrichtungen und Ausgleichsräumen in Paderborn.

Von den rund 200 untersuchten Orten mit erhöhter Vulnerabilität in Paderborn ist im heutigen Klima noch keiner der Orte so stark bioklimatisch belastet, dass hier ein hoher Handlungsbedarf bestünde (Abbildung 82). Mit insgesamt 11 Orten besteht bei rund 5 % ein mittlerer Handlungsbedarf. Diese Einrichtungen und öffentlichen Räume sollten im Sinne der Klimawandelanpassung im Laufe der kommenden Jahre auf ihre Resilienz gegenüber einem voranschreitenden Klimawandel überprüft werden. Bei einem Großteil der Pflegeeinrichtungen, Krankenhäuser, Spielplätze und Kitas besteht ein niedriger Handlungsbedarf. Allerdings sollte nur bei den Orten, die in Gebieten mit keinem besonderen Stadtklimatischen Handlungsbedarf liegen von einer längerfristigen Resilienz gegenüber den Folgen des Klimawandels ausgegangen werden. 78 der untersuchten Bolz- und Spielplätze liegen in überwiegend wohnlich genutzten Gebieten, so dass diese hinsichtlich ihres Handlungsbedarfes bewertet wurden. Weitere 86 dieser Flächen lagen hingegen in Bereichen, die überwiegend als Ausgleichsräume für thermische Belastungen dienen können (Abbildung 83). Daher wurde für diese Flächen die bioklimatische Bedeutung analysiert. Bei einem Großteil der analysierten Orte wurde den Flächen eine hohe oder mittlere bioklimatische Bedeutung zugeordnet. Dies bedeutet, dass im ersten Schritt angenommen werden darf, dass diese Plätze auch für vulnerable Gruppen hinsichtlich von thermischen Belastungen erholsame Ausgleichsräume darstellen. Allerdings ist hier noch ein zweiter Analyseschritt von Nöten: die hohe Bedeutung der Flächen in der PHK kann durch die günstige Situation in der Nacht begründet sein. Alle Bolz- und Spielplätze sollten hinsichtlich ihrer Bewertung in der Bewertungskarte Tag geprüft werden. Hieraus könnte sich ein Handlungsbedarf für die klimaökologische Optimierung dieser Flächen ergeben.

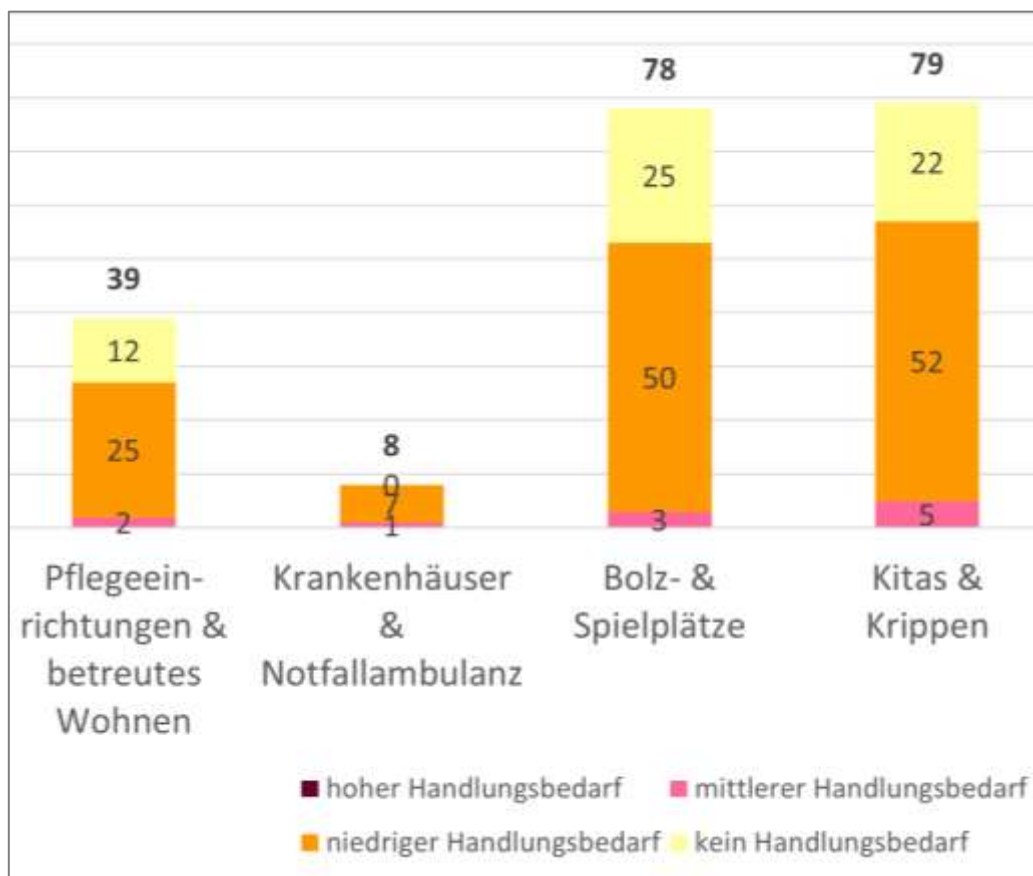


Abbildung 82 Verteilung der Handlungsbedarfe innerhalb der Orte mit hoher Vulnerabilität

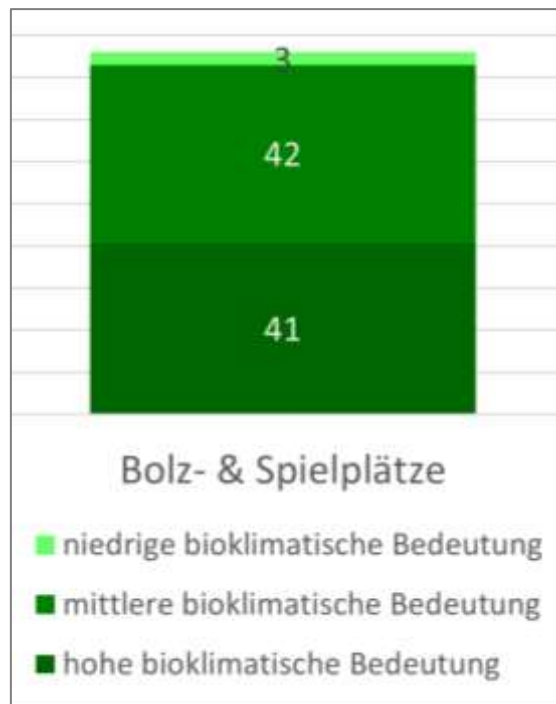


Abbildung 83 Verteilung der bioklimatischen Bedeutung innerhalb der Orte mit hoher Vulnerabilität

8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

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

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der knapp 15.000 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 20 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen für den Status Quo, 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 (siehe Abbildung 84).

Mit Hilfe des Super-Shapes können innerhalb kurzer Zeit verschiedene Fragestellungen beantwortet werden. Zum Beispiel: Warum herrscht auf dieser Fläche eine hohe stadtklimatische Belastung? Liegt es an einer problematischen Situation in der Nacht, am Tage oder zu beiden Zeiten? Ist diese Fläche nebenan mit einem besonderen Kaltluftprozess assoziiert? Wodurch ist dieser Prozess charakterisiert (hohe Kaltluftproduktion, großer Volumenstrom, hohe Windgeschwindigkeit)? Der Vorteil dieses Datenformates liegt darin, dass über einen Zugriff auf eine Attributtabelle viele zusammenhängende Informationen abgerufen werden können, anstatt diese Informationen über mehrere Dateien einzeln zusammenstellen zu müssen.

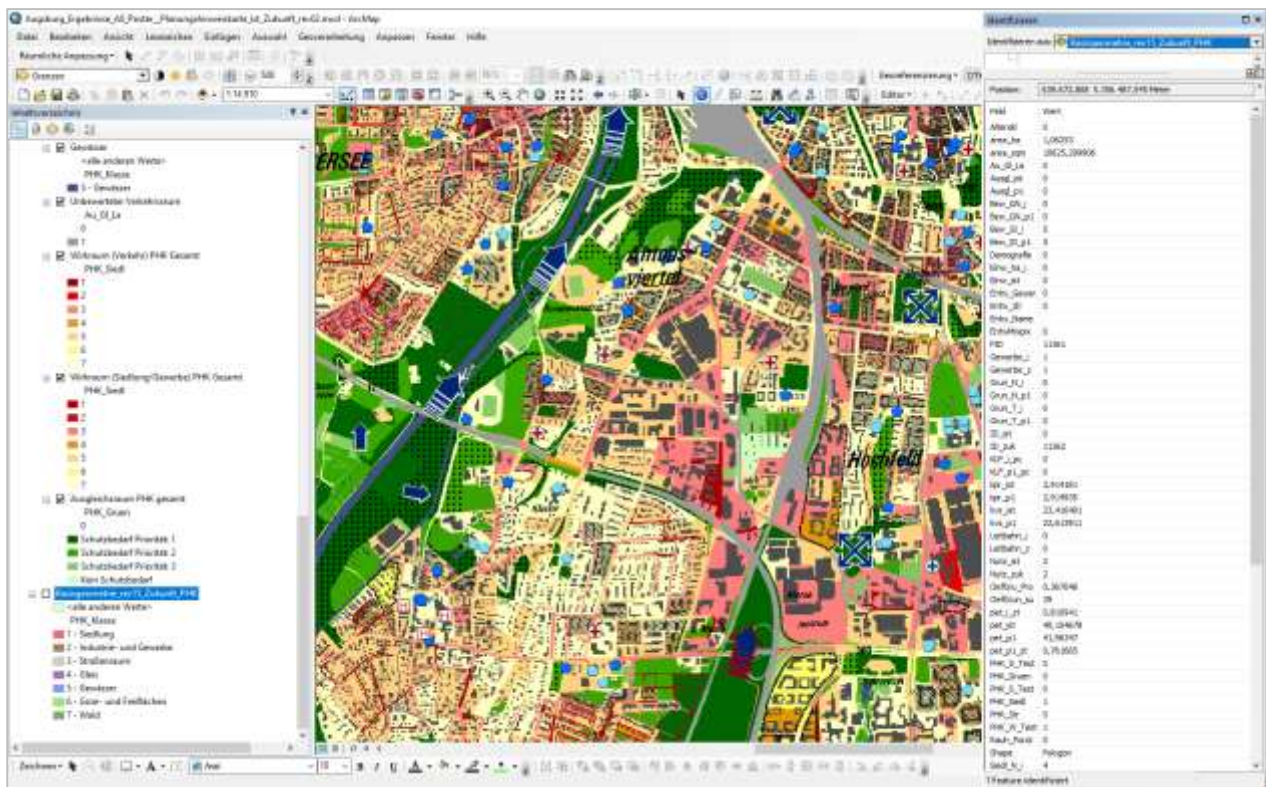


Abbildung 84: Beispielbild einer digitalen Planungshinweiserteil innerhalb eines Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.

9. Zusammenfassung & Ausblick

Mit der in diesem Bericht dokumentierten Klimaanalyse liegt die erste hochaufgelöste Analyse des Paderborner Stadtklimas nach heutigem Stand der Technik vor. Im Fokus standen dabei insbesondere der städtische Kaltlufthaushalt sowie die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht (Schutzgut der „Menschlichen Gesundheit“). Methodisches Herzstück der Analyse waren eine hochaufgelöste computergestützte Modellierung einer typischen belastenden sommerlichen Wetterlage im heutigen und zwei Modellierungen eines möglichen zukünftigen Klimas.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte. Das Kartenwerk macht zum einen den abgestuften Handlungsbedarf zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkungsraum“) der Paderborner Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht sichtbar. Zum anderen weist die Planungshinweiskarte aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) eine Wertigkeit hinsichtlich der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu.

Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarte im Speziellen ist somit die Bereitstellung von detailliertem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann neben der vorbereitenden erstmalig auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Damit sind auch valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf seitens 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 Grünflächenentwicklung, die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, sowie teil- oder gesamstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Paderborner Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5-10 Jahren anzustreben. Dabei könnte dann auch die explizite Berücksichtigung weiterer Themen wie die Auswirkungen der zukünftig zu erwartenden Stadtentwicklung sowie der politischen Zieldefinition in Verbindung mit passgenauen gesamstädtischen Maßnahmenzenarien anvisiert werden.

Quellenverzeichnis

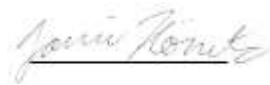
- An der Heiden, M.; Muthers, S.; Niemann, H.; Buchholz, U.; Grabenhenrich, L.; Matzarakis, A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt 62, Heft 5, S. 571-579.
- Augter, G. (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst; interne Ausarbeitung (unveröffentlicht)
- Bangert, H. (1990): Klimaanalyse Stadt Paderborn. Im Auftrag des Planungsamtes der Stadt Paderborn.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. Climate Risk Management, Volume 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- 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.
- Broisy C., Krampf K., Zeeman M., Wolf B., Junkermann W., Schäfer K., Emeis S., Kunstmann H. (2017): Simultaneous multi-copter-based air sampling and sensing of meteorological variables. Atmos. Meas. Tech., 10, 2773–2784, <https://doi.org/10.5194/amt-10-2773-2017>
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- DKRZ - Deutsche Klimarechenzentrum (2023): Die SSP-Szenarien. Online: <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien>
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2020b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD (2021a): Deutschlandwetter im Juni 2021. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2021/20210629_deutschlandwetter_juni2021_news.html; besucht: 29.11.2021
- DWD (2021b): Deutschlandwetter im Juli 2021. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2021/20210730_deutschlandwetter_juli2021_news.html; besucht: 29.11.2021
- DWD (2021c): Deutschlandwetter im August 2021. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2021/20210830_deutschlandwetter_august2021_news.html; besucht: 29.11.2021
- DWD (2021d): Deutschlandwetter im September 2021. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2021/20210929_deutschlandwetter_september2021_news.html; besucht: 29.11.2021
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.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. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 38, 315-337.
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002) DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Groß, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Groß G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- HLNUG (Hg.) (2022): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf, zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – In Vorbereitung*.
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf

- Kaspar F., Müller-Westermeier G. Penda E., Mächel H., Zimmermann K., Kaiser-Weiss A., Deutschländer T.: Monitoring of climatechange in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. Adv. Sci. Res., 10, 99–106, 2013
- LANUV (2018): Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen. Schriftenreihe: LANUV-Fachbericht 86.
- Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: PLOS Medicine.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamolldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamolldaten“, Potsdam.
- Maronga et al. (2020): Review of the PALM model system 6.0, Geosci. Model Dev., 13, 1335-1372.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (2012): HANDBUCH STADTKLIMA. MAßNAHMEN UND HANDLUNGSKONZEPTE FÜR STÄDTE UND BALLUNGSRÄUME ZUR ANPASSUNG AN DEN KLIMAWANDEL.
- MLW - MINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND WOHNEN BADEN-WÜRTTEMBERG (2011): STÄDTEBAULICHE KLIMAFIBEL ONLINE. HINWEISE FÜR DIE BAULEITPLANUNG. ONLINE ZULETZT ABGERUFEN 19.12.2023: [HTTPS://WWW.STAEDTEBAULICHE-KLIMAFIBEL.DE/?P=2&P2=1.#:~:TEXT=GESETZ%20ZUR%20F%C3%B6RDERUNG%20DES%20KLIMASCHUTZES,DIE%20RECHNUNG%20GETRAGEN%20WERDEN%20SOLL.](https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/?p=2&p2=1.#:~:text=GESETZ%20ZUR%20F%C3%B6RDERUNG%20DES%20KLIMASCHUTZES,DIE%20RECHNUNG%20GETRAGEN%20WERDEN%20SOLL.)
- Moore, G. E. (1903): Principia Ethica. Ditzingen: REKLAM.
- 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.
- Oke (2017): Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2013): 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
- ReKliEs-De (2017): Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland - Nutzerhandbuch. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch.
- SANTHOLZ und SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. UNU Workingpaper.
- Schär, Ch., Ch. Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. Geophys. Res. Lett. 23, 669-672.
- Schwalm, Christopher & Glendon, Spencer & Duffy, Philip. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO 2 emissions. Proceedings of the National Academy of Sciences. 117.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- STACHOWIAK, H. (1973): ALLGEMEINE MODELLTHEORIE. WIEN: SPRINGER.
- Stadt Karlsruhe (2014): Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung. <https://www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de>
- STADT ZÜRICH (2020): FACHPLANUNG HITZEMINDERUNG. [HTTPS://WWW.STADT-ZUERICH.CH/TED/DE/INDEX/GSZ/PLANUNG-UND-BAU/FACHPLANUNG-HITZEMINDERUNG.HTML](https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html)

- Thiemeßl M.J., Gobiet A., Leuprecht A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *Int J Climatol* 31(10):1530–1544.
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteiaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- UBA (2005): GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.
- UBA (2019): Handbuch für Emissionsfaktoren für Straßenverkehr (HBEFA). Umweltbundesamt.
- UBA (2019A): UNTERSUCHUNG DER POTENTIALE FÜR DIE NUTZUNG VON REGENWASSER ZUR VERDUNSTUNGSKÜHLUNG IN STÄDTEN. UBA-TEXTE.
- UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>
- UBA – Umweltbundesamt (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>
- UBA – Umweltbundesamt (2022c): Indikator: Heiße Tage. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>
- Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322.
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.
- VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2008a) VDI-Richtlinie 3785, Bl.2: Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung - Teil I: Klima.
- VDI (2015): VDI-Richtlinie 3787, Bl.1: Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen.
- VDI (2017): VDI-richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.
- VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4: Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.
- VDI (2020a): VDI-Richtlinie 3787, Bl.8: Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel.
- Wilms, Falko E. P. (2006): Szenariotechnik: Vom Umgang mit der Zukunft
- World Meteorological Organization (2018): Guide to Instruments and Methods of Observation. Measurement of Meteorological Variables. (WMO-No. 8), Vol. 1

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 04.12.2024



Erstellt von: -----
Janine Könitz (M. Sc. Umweltnaturwissenschaften)

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Die Stadtklimaanalyse 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
≥ 2,0	sehr stark zunehmend
≥ 1,5 und < 2,0	stark zunehmend
≥ 1,0 und < 1,5	schwach zunehmend
< 1,0 und > -1,0	kein Trend
≤ -1,0 und > -1,5	schwach abnehmend
≤ -1,5 und > -2,0	stark abnehmend
≤ -2,0	sehr stark abnehmend

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

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

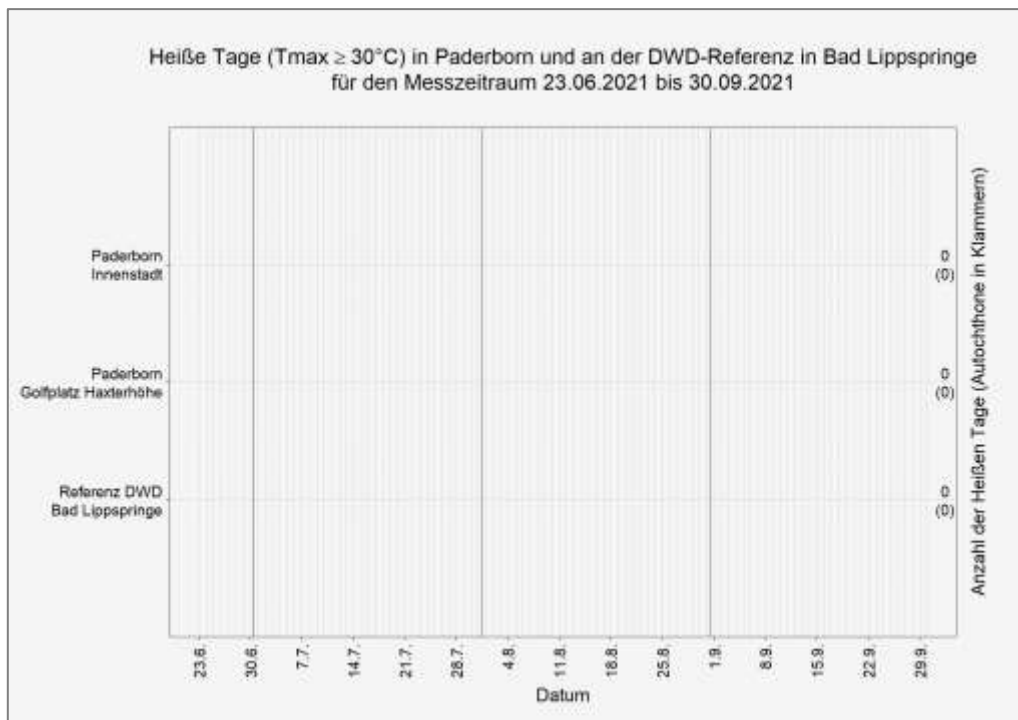


Abb. A 1 Heiße Tage bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 23.06.2021 bis 30.09.2021 an den temporären Messstationen in der Innenstadt Paderborns, dem Golfplatz Haxterhöhe und an der Referenz-Station des DWD in Bad-Lippspringe.

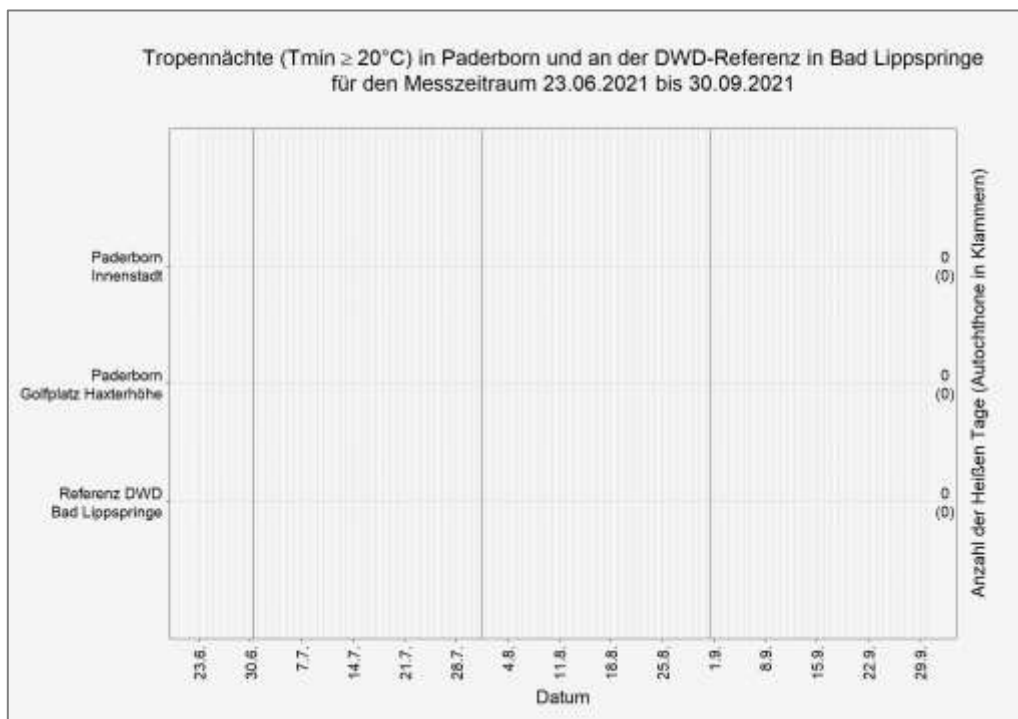


Abb. A 2 Tropennächte bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 23.06.2021 bis 30.09.2021 an den temporären Messstationen in der Innenstadt Paderborns, dem Golfplatz Haxterhöhe und an der Referenz-Station des DWD in Bad-Lippspringe.

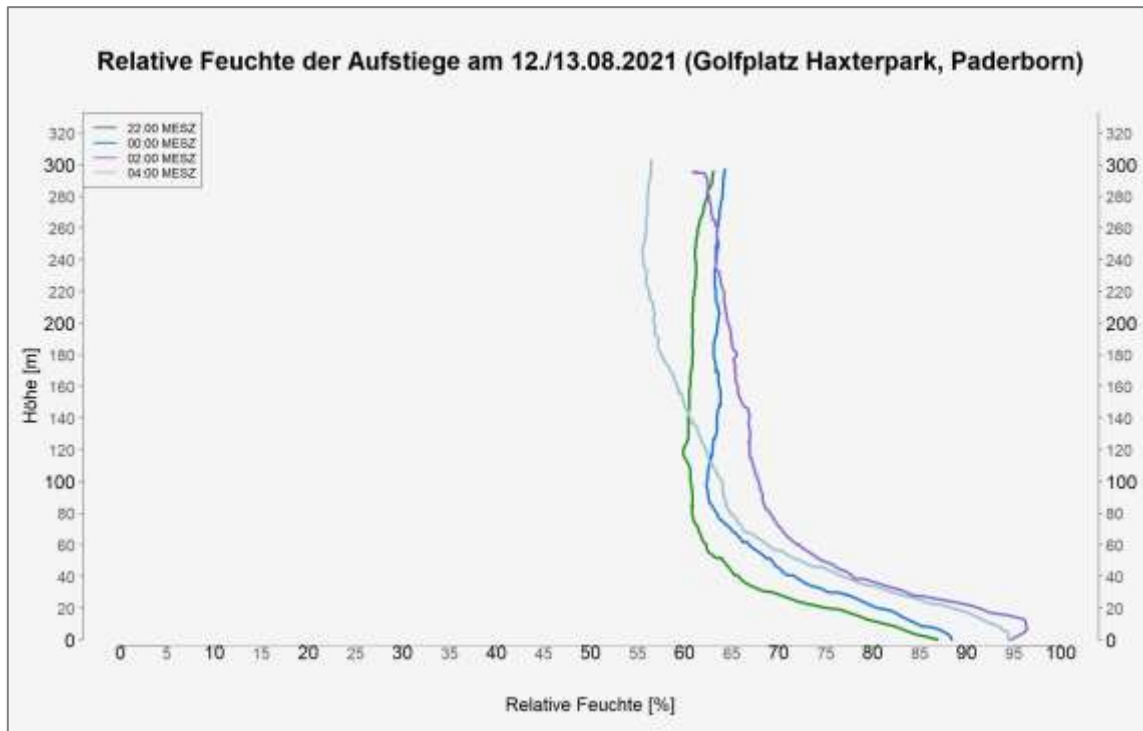


Abb. A 3 Vergleich der Vertikalprofile der relativen Luftfeuchtigkeit zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 12./13.08.2021 am ruralen Standort.

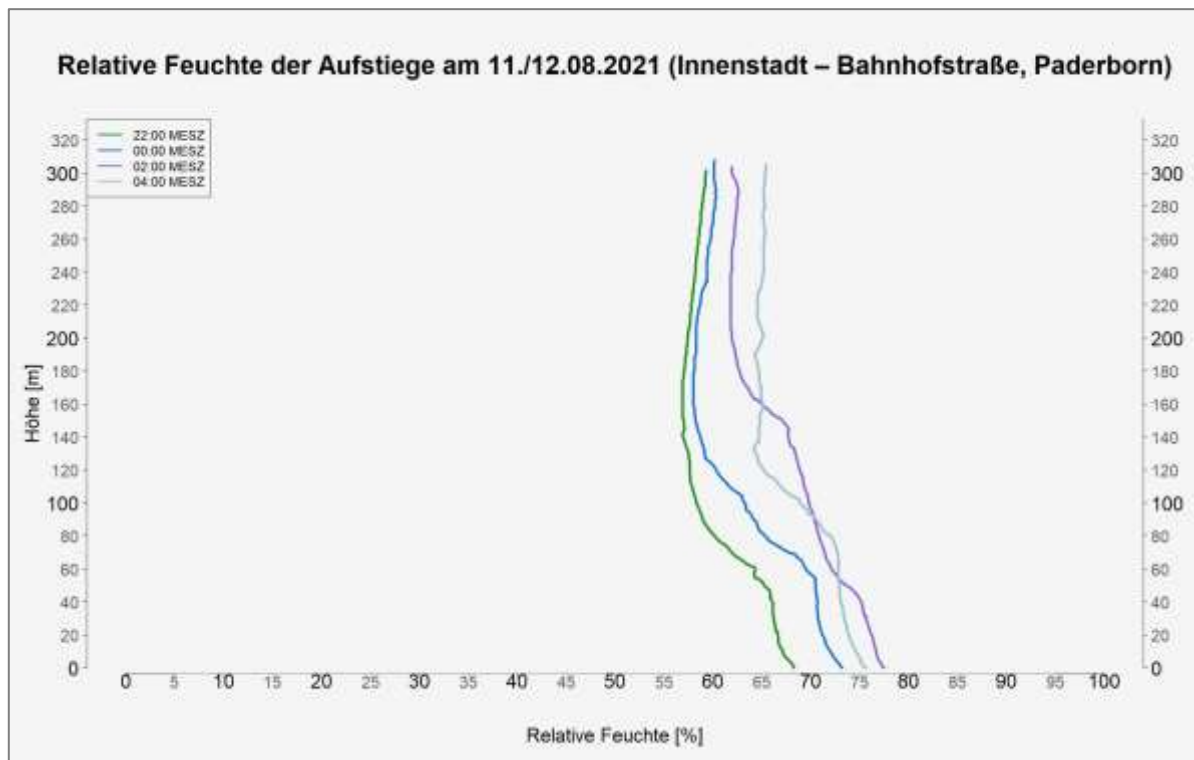


Abb. A 4 Vergleich der Vertikalprofile der relativen Luftfeuchtigkeit zu vier nächtlichen Aufstiegsstunden des 11./12.08.2021 am urbanen Standort.

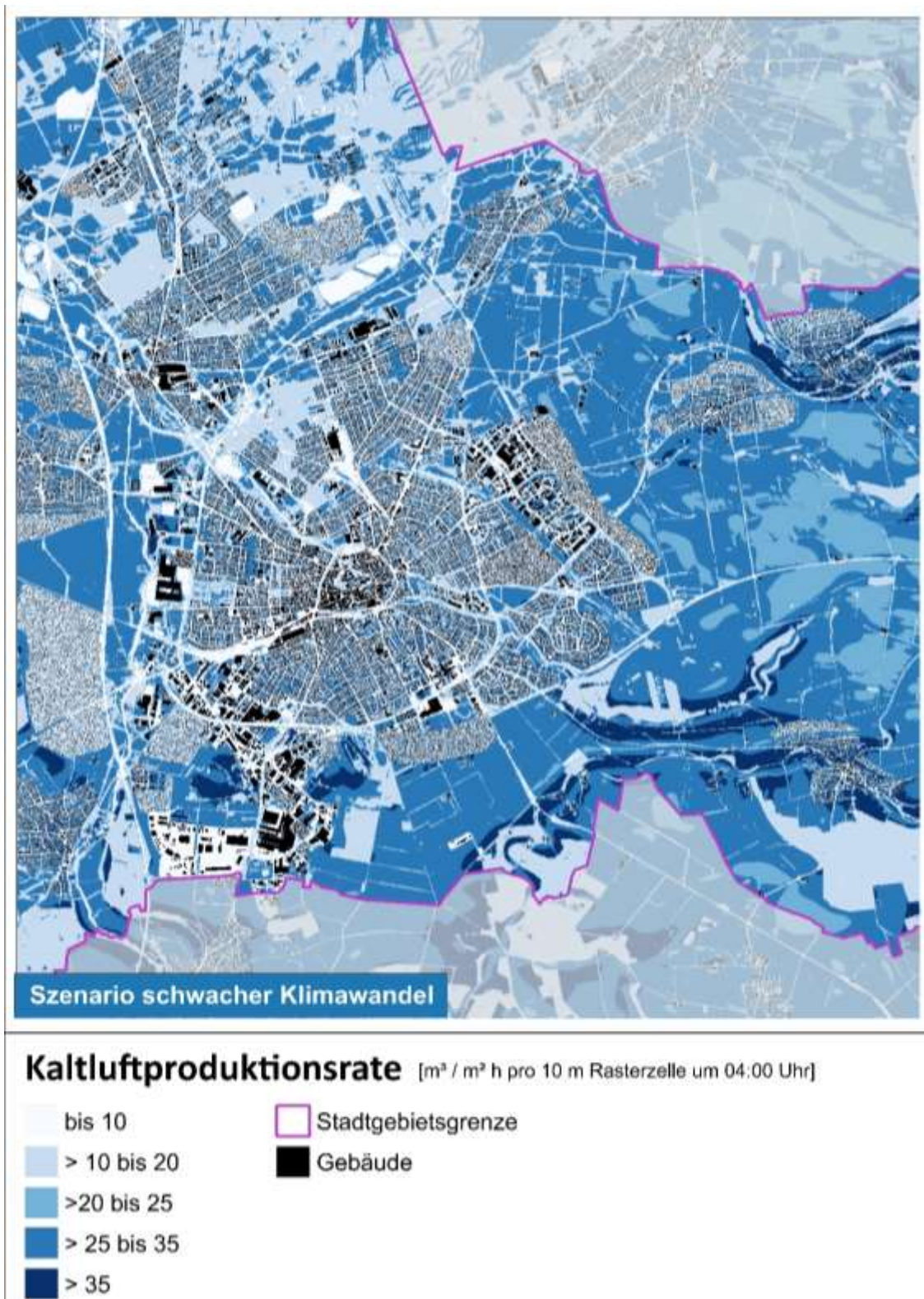


Abbildung A 5: Karte 14: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario P1 in Paderborn (verkürzte Legende).

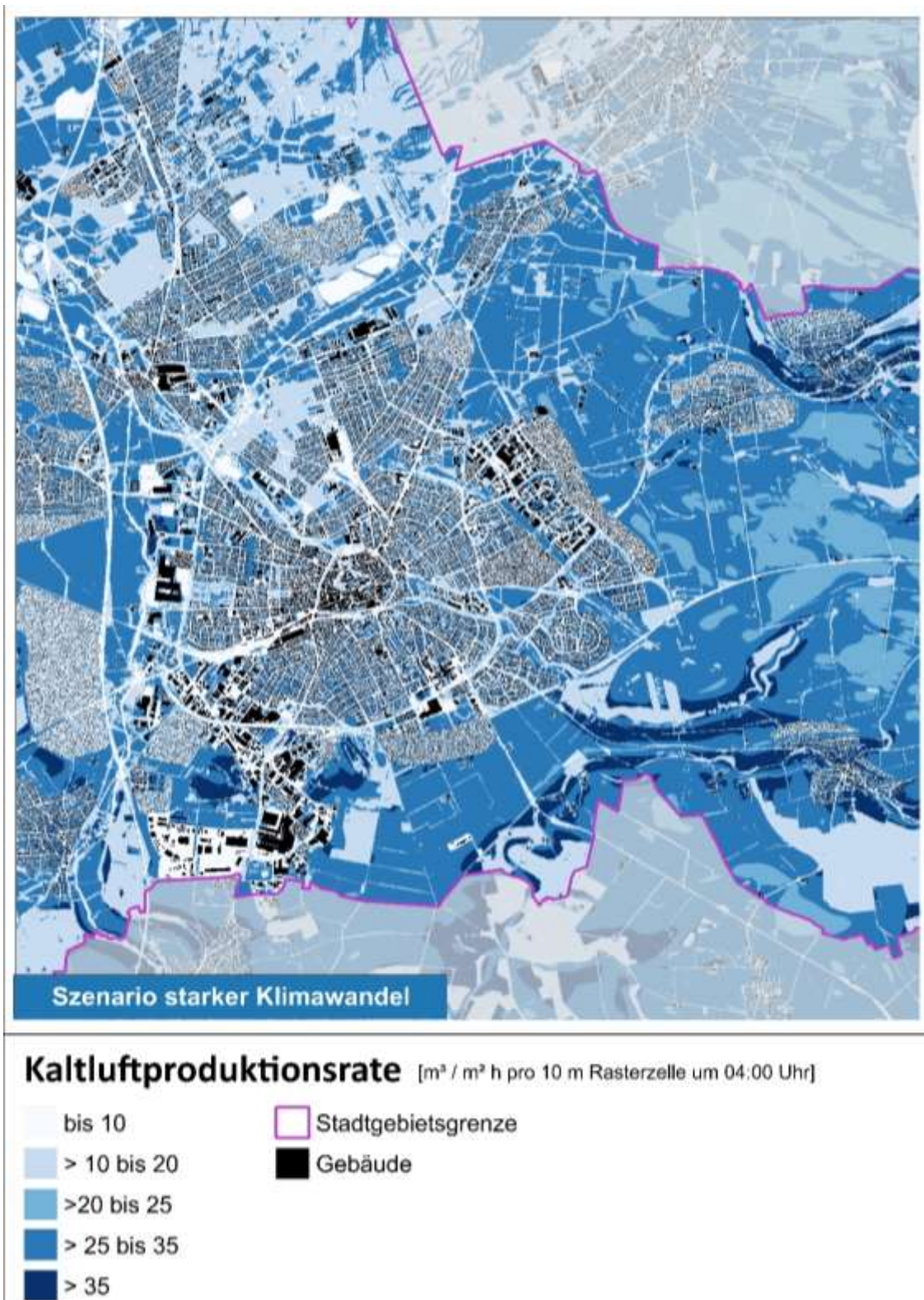


Abbildung A 6: Karte 15: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Szenario P2 in Paderborn (verkürzte Legende).

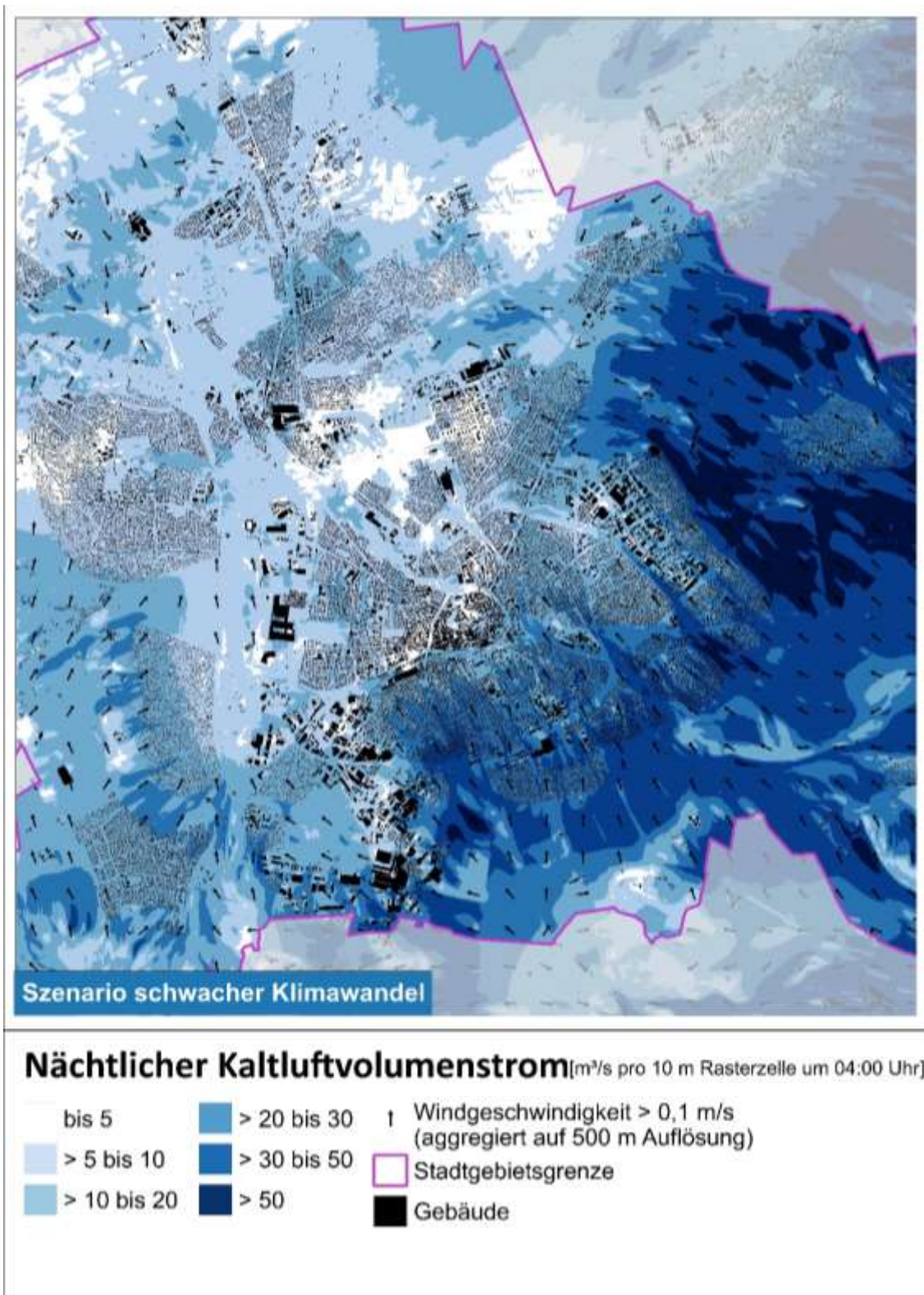


Abbildung A 7: Karte 5: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Szenario P1 in Paderborn (verkürzte Legende).