

Klimaanalyse der Stadt Münster



Methodik und Ergebnisse

Erstellt von:
GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover



Im Auftrag der
Stadt Münster
Stabsstelle Klima

April 25

Impressum

Auftraggeber:

Stadt Münster |

Stabsstelle Klima |

Klemensstraße 10

48143 Münster

Ansprechpartner: Veit Muddemann



Auftragnehmer:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover

Tel.: 0511/ 388 7200

www.geo-net.de

Dr. Björn Büter

M.Sc. Janine Könitz





Inhaltsverzeichnis

Impressum	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis.....	X
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
Glossar	XIV
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.....	12
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	15
4. Klima und Klimawandel im Raum Münster	18
4.1 Datengrundlage und Methodik	18
4.2 Gegenwärtiges Klima	21
4.3 Autochthone Wetterlagen.....	25
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen	26
5. Analysemethoden	30
5.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	30
5.2 Szenarienentwicklung.....	34
5.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten.....	38
5.4 Rahmen- und Randbedingungen	44
5.5 Modellausgabegrößen.....	46
5.6 Qualitätssicherung.....	48
5.7 Unsicherheiten und Herausforderungen	48
5.8 Messkampagne.....	50
6. Analyseergebnisse.....	60
6.1 Numerische Modellierungen	60
6.2 Messkampagne.....	78
7. Zwischenprodukte.....	102
7.1 Klimaanalysekarte.....	102
7.2 Sensitivitätsanalyse.....	107



8.	Endprodukte.....	114
8.1	Grundlagen.....	114
8.2	Geometrische Basis	114
8.3	Bewertungskarten	115
8.4	Planungshinweiskarte.....	127
8.5	Maßnahmen	135
8.6	Stadtklimamanagementsystem	151
9.	Zusammenfassung & Ausblick.....	152
	Quellenverzeichnis.....	153
	Anhang I: Steckbriefe der Stadtbezirke.....	164
	Stadtbezirk 1: Münster Mitte.....	166
	Stadtbezirk 2: Münster West	167
	Stadtbezirk 3: Münster Nord	168
	Stadtbezirk 4: Münster Ost	169
	Stadtbezirk 5: Münster Südost.....	170
	Stadtbezirk 6: Münster Hilstrup	171
	Anhang II: Klimawandel in Münster	172
	Beobachtete Klimaveränderungen	172
	Temperaturzunahme und Hitze.....	173
	Niederschlagsverschiebung	174
	Trockenheit.....	175
	Starkniederschläge: Starker Niederschlag ($N \geq 10$ mm/d)	176
	Starkniederschläge: Stärkerer Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d).....	176
	Starkniederschläge: StarkNiederschlag ($N \geq 30$ mm/d)	177
	Sturm	177
	Anhang III: Sonstiges.....	178
	ergänzende Karten.....	178
	ergänzende Tabellen.....	180

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH: VDI 3787, BLATT 4, 2020)	3
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (QUELLE: DWD, 2025)	4
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN ET AL., 2021)	5
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ & 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: LINE, 2017, OBEN), (MVI 2012, MITTE), (DWD, 2023, UNTEN).....	8
ABBILDUNG 7: ILLUSTRATION DES MITTÄGLICHEN ENERGIEAUSTAUSCHS. UNTER DER ANNAHME, DASS DIE EINTREFFENDE ENERGIE VON DER SONNE GLEICH HOCH IST, WIRD DER ÜBERGANG VON (A) EINEM BEWACHSENEN ÖKOSYSTEM ZU (B) EINER PHOTOVOLTAIK (PV)-KRAFTWERKSANLAGE DIE ENERGIEFLUSSDICHTE EINES GEBIETES VERÄNDERN; WÄRMEAUFAHME- UND SPEICHERUNG (ORANGEFARBENER PFEIL), WÄRMEABGEBENDE LATENTE ENERGIESTRÖME BEI ÜBERGANG VON WASSER ZU WASSERDAMPF IN DIE ATMOSPHERE DURCH EVAPOTRANSPIRATION UND VERDUNSTUNG (BLAUE PFEILE), FÜHLBARER WÄRMESTROM (ROTE PFEILE), ENERGIERÜCKSTRAHLUNG VON PV-PANEELN (BRAUNE PFEILE), IN ELEKTRIZITÄT UMGEWANDELTE ENERGIE (VIOLETT PFEIL) (BARRON-GAFFORD ET AL., 2016).....	9
ABBILDUNG 8: TAGESZEITLICHE DIFFERENZEN IN DER BODENTEMPERATUR SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR IM BEREICH DER REFERENZSTATION (BLAU; „CONTROL“), DER STATION ZWISCHEN DEN MODULEN (ROT; „GAP“) UND DER STATION UNTER DEN MODULEN (GRÜN, „UNDER“); (QUELLE: ARMSTRONG ET AL., 2016)	11
ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG, 2022, S. 18)	13
ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE.....	15
ABBILDUNG 11: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCP) UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100. (QUELLE: MEINSHAUSEN ET AL., 2011).....	19
ABBILDUNG 12: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS (EIGENE DARSTELLUNG).....	21
ABBILDUNG 13: KLIMADIAGRAMM DER STADT MÜNSTER FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DEN RASTERDATENPRODUKTEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (NACH DWD, 2024B).....	22
ABBILDUNG 14: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN MÜNSTER IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2024 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B)	22
ABBILDUNG 15: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE (TMAX ≥ 30 °C) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN MÜNSTER (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B)	23
ABBILDUNG 16: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER SAISONALEN MITTELWERTE DER BODENFEUCHTE IN MÜNSTER IM ZEITRAUM 1991 BIS 2024 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B).....	24
ABBILDUNG 17: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN MÜNSTER FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION MÜNSTER-OSNABRÜCK (DWD, 2024A).....	24
ABBILDUNG 18: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN MÜNSTER (CA. 76 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN GEEIGNETEN DWD-STATION MÜNSTER-OSNABRÜCK (DWD, 2024A)	25
ABBILDUNG 19: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN MÜNSTER (AUSGEWÄHLTE RCP-SZENARIEN, EIGENE BERECHNUNG NACH EURO-CORDEX-DATEN DES DWD, 2024C).	26

ABBILDUNG 20: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN IN MÜNSTER IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 – 2000 (BEZOGEN AUF DAS SZENARIO RCP 8.5). DIE X-ACHSE GIBT DIE ABKÜRZUNGEN FÜR DIE MONATE BZW. JAHRESZEITEN AUS (BSPW. JJA = JUNI-JULI-AUGUST).	27
ABBILDUNG 21: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN DEN DREI ZUKUNFTSPERIODEN FÜR MÜNSTER (RCP 8.5). DIE X-ACHSE GIBT DIE ABKÜRZUNGEN FÜR DIE MONATE BZW. JAHRESZEITEN AUS (BSPW. JJA = JUNI-JULI-AUGUST).....	29
ABBILDUNG 22: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	32
ABBILDUNG 23: 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 STRALUNGSTAGES.....	33
ABBILDUNG 24: DER SZENARIO-TRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN 2023)	34
ABBILDUNG 25: ABGELEITETE BODENFEUCHTE (IN % NFK) FÜR DAS ZUKUNFTSSZENARIO 2045 FÜR DIE NUTZUNGSKLASSEN FREIFLÄCHE UND BAUM ÜBER FREIFLÄCHE.	36
ABBILDUNG 26: STADTGRENZE (PINKE LINIE); HINTERGRUND: LUFTBILD MAI / JUNI 2024 (GEOBASIS NRW).	38
ABBILDUNG 27: DIGITALES GELÄNDEMOMODELL FÜR MÜNSTER UND UMGEBUNG.	40
ABBILDUNG 28: KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG / STADTSTRUKTUR DER BESTANDSSITUATION IN MÜNSTER UND UMGEBUNG.	41
ABBILDUNG 29: BEISPIELHAFT ARBEITSSCHRITTE ZUR IDENTIFIKATION VON BAUMSTANDORTEN ANHAND VON NDVI-WERTEN UND STRUKTURHÖHEN.....	42
ABBILDUNG 30: BEISPIELHAFT ÜBERFÜHRUNG DER INFORMATIONEN EINES B-PLANS UND EINES STÄDTEBAULICHEN ENTWURFS IN DAS FITNAH-NUTZUNGSRASTER.	42
ABBILDUNG 31: ZWEI BEISPIELE FÜR MIT DEM MISCHPIXELANSATZ GEFÜLLTE ENTWICKLUNGSFLÄCHEN: LINKS WOHNBEBAUUNG, RECHTS GEWERBEGEBIET.....	44
ABBILDUNG 32: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROSS, 1992).....	45
ABBILDUNG 33: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER 21-UHR-TEMPERATUR WÄHREND AUSTAUSCHARMER WETTERLAGEN IN DEN SOMMERMONATEN (JJA) AN SOMMERTAGEN ($T_{MAX} \geq 25 \text{ °C}$) AN DER STATION MÜNSTER OSNABRÜCK (ANZAHL: 298) FÜR DIE JAHRE 1991 - 2020 (EIGENE DARSTELLUNG NACH DWD, 2024A).....	46
ABBILDUNG 34: URBANER STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AUF DEM PARKPLATZ AN DER HÖRSTERSTRASSE IN MÜNSTER ALS SCHRÄGAUFNAHME MIT BLICKRICHTUNG OST AUS 100 M HÖHE; PINKER KREIS MARKIERT DEN STANDORT (LINKS) UND AUFBAU DES MESSMASTEN MIT BLICKRICHTUNG NORD (RECHTS) (BILDQUELLEN: GEO-NET).....	52
ABBILDUNG 35: RURALER STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AM ZOO IM SÜDWESTEN VON MÜNSTER ALS SCHRÄGAUFNAHME MIT BLICKRICHTUNG NORD, AUFGENOMMEN AUS 100 M HÖHE; GRÜNER KREIS MARKIERT DEN STANDORT (LINKS) UND AUFBAU DES MESSMASTEN MIT BLICKRICHTUNG NORDOST (RECHTS) (BILDQUELLEN: GEO-NET).	53
ABBILDUNG 36: STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AM HAFENPLATZ ALS LUFTBILDAUFNAHME (BILDQUELLE: GEOBASIS NRW); ORANGENER KREIS MARKIERT DEN STANDORT (LINKS) UND STANDORT DES MESSMASTEN MIT BLICKRICHTUNG OST (RECHTS, BILDQUELLE: GEO-NET).....	54
ABBILDUNG 37: STANDORT DER LANGZEITMESSUNG IM BEREICH DER STEINFURTER STRASSE IM NORDEN VON MÜNSTER ALS LUFTBILDAUFNAHME (BILDQUELLE: GEOBASIS NRW); BLAUER KREIS MARKIERT DEN STANDORT (LINKS) UND STANDORT DES MESSMASTEN MIT BLICKRICHTUNG SÜD (RECHTS, BILDQUELLE: ANNA BÖTTGER UND ELEONORE HENELY (UNIVERSITÄT MÜNSTER)).....	54
ABBILDUNG 38: MOBILE MESSROUTE IM STADTGEBIET VON MÜNSTER (ROTE LINIE), DIE MESSSTATIONEN DES URBANEN (PINKER PUNKT) UND RURALEN STANDORTS (GRÜNER PUNKT) SOWIE DIE MESSSTATIONEN DER UNIVERSITÄT MÜNSTER AM HAFENPLATZ (ORANGER PUNKT) UND AN DER STEINFURTER STRASSE (BLAUER PUNKT). LUFTBILDQUELLE: GEOBASIS NRW.	56
ABBILDUNG 39: ANBRINGUNG DES TEMPERATURSENSORS FÜR DIE MESSFAHRT AM PKW (LINKS), HÖHE ÜBER GRUND (MITTE) UND SEITLICHER ABSTAND VOM FAHRZEUG (RECHTS).....	57

ABBILDUNG 40: STANDORTE DER VERTIKALSONDIERUNG AM 25./26.06.2024 AN DER URBANEN STATION (LINKS, BLICKRICHTUNG NORD) UND AN DER RURALEN STATION (RECHTS, BLICKRICHTUNG NORDOST).	58
ABBILDUNG 41: DJI MAVIC 3T IN NAHANSICHT MIT DER RADIOSONDE IMET-XQ2 (OBEN) UND IM AUFSTIEG AN DER MESSSTATION (UNTEN) (BILDQUELLEN: GEO-NET).	59
ABBILDUNG 42: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS STADTGEBIET MÜNSTER.	61
ABBILDUNG 43: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIET MÜNSTER FÜR ALLE DREI SZENARIEN (OBEN = IST; MITTE = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045).	63
ABBILDUNG 44: ÄNDERUNG DES NÄCHTLICHEN BODENNAHEN TEMPERATURFELDS VON 04 UHR IM VERGLEICH ZUM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES MÜNSTERANER STADTGEBIETS (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045).	64
ABBILDUNG 45: PRINZIPSKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM.	65
ABBILDUNG 46: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR DAS STADTGEBIET MÜNSTER.	67
ABBILDUNG 47: ÄNDERUNG DES NÄCHTLICHEN KALTLUFTVOLUMENSTROMS IM VERGLEICH ZUM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045).	68
ABBILDUNG 48: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	70
ABBILDUNG 49: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	72
ABBILDUNG 50: WÄRMEBELASTUNG UM 14 UHR AM TAGE IM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	74
ABBILDUNG 51: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DER KERNSTADT VON MÜNSTER. OBEN: IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO 2035, UNTEN RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO 2045.	75
ABBILDUNG 52: ÄNDERUNG DER WÄRMEBELASTUNG AM TAGE IM VERGLEICH ZUM IST-ZUSTAND FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045).	76
ABBILDUNG 53: SOMMERTAGE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2024 BIS 31.08.2024 AN DEN UNTERSUCHTEN MESSSTATIONEN IM STADTGEBIET VON MÜNSTER UND DER REFERENZ-STATION DES DWD AM FLUGHAFEN MÜNSTER-OSNABRÜCK.	79
ABBILDUNG 54 HEIÙE TAGE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2024 BIS 31.08.2024 AN DEN UNTERSUCHTEN MESSSTATIONEN IM STADTGEBIET VON MÜNSTER UND DER REFERENZ-STATION DES DWD AM FLUGHAFEN MÜNSTER-OSNABRÜCK.	80
ABBILDUNG 55: TROPENNÄCHTE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2024 BIS 31.08.2024 AN DEN UNTERSUCHTEN MESSSTATIONEN IM STADTGEBIET VON MÜNSTER UND DER REFERENZ-STATION DES DWD AM FLUGHAFEN MÜNSTER-OSNABRÜCK.	81
ABBILDUNG 56: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2024 – 31.08.2024 FÜR ALLE STUNDEN AN DEN UNTERSUCHTEN KLIMAMESSTATIONEN. DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUÙEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN.	83
ABBILDUNG 57: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2024 – 31.08.2024 FÜR ALLE NACHTSTUNDEN (19-07 UHR MESZ) AN DEN UNTERSUCHTEN KLIMAMESSTATIONEN. DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUÙEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN.	85
ABBILDUNG 58: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2024 – 31.08.2024 FÜR ALLE AUTOCHTHONEN NACHTSTUNDEN (19-07 UHR MESZ) AN DEN UNTERSUCHTEN KLIMAMESSTATIONEN. DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUÙEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN.	86
ABBILDUNG 59: MODELLIERTE NÄCHTLICHE WINDRICHTUNG UND -GESCHWINDIGKEIT VON 04:00 UHR AN DEN RURALEN UND URBANEN MESSSTANDORTEN ZU EINER AUTOCHTHONEN WETTERSITUATION.	88
ABBILDUNG 60: SONNENSCHINDAUER (SD) UND BEDECKUNGSGRAD (N) ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 24.-27.06.2024, ERMITTELT AN DER DWD-STATION FMO.	89

ABBILDUNG 61: GEMESSENE STÜNDLICHE WINDGESCHWINDIGKEITEN (FF) UND -RICHTUNGEN (DD) AUF 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 24.-27.06.2024, ERMITTELT AN DEN MESSSTATIONEN IN MÜNSTER UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD AM FLUGHAFEN MÜNSTER-OSNABRÜCK.....	89
ABBILDUNG 62: GEMESSENE STÜNDLICHE TEMPERATUREN AUF 2 M UND 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 24.-27.06.2024, ERMITTELT AN DEN MESSSTATIONEN IN MÜNSTER UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD FLUGHAFEN MÜNSTER-OSNABRÜCK.	90
ABBILDUNG 63: GEMESSENE STÜNDLICHE RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT (RH) AUF 2 M UND 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 24.-27.06.2024, ERMITTELT AN DEN MESSSTATIONEN IN MÜNSTER UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD FLUGHAFEN MÜNSTER-OSNABRÜCK.	92
ABBILDUNG 64: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT DER ZWEITEN NACHHÄLFTE (AUF 04 UHR NORMIERT) UND DEM FITNAH-MODELLLAUF VON 04 UHR. INKLUSIVE DETAILBLICK AUF DEN BEREICH SCHLOSSGARTEN.....	94
ABBILDUNG 65: VERTIKALPROFILE DER LUFTTEMPERATUR AM URBANEN STANDORT AN DER HÖRSTERSTRASSE (LINKS) UND AM RURALEN STANDORT AM ZOO (RECHTS) AM NACHMITTAG DES 25.06.2024 UM 13:24 (URBAN) BZW. 14:49 UHR (RURAL).	95
ABBILDUNG 66: VERTIKALPROFILE DER LUFTTEMPERATUR AM URBANEN STANDORT AN DER HÖRSTERSTRASSE (LINKS) UND AM RURALEN STANDORT AM ZOO (RECHTS) IN DER NACHT AM 26.06.2024 UM 03:40 UHR (URBAN) BZW. 04:37 UHR (RURAL). DIE BLAUE HORIZONTALE LINIE DEUTET DIE ABGESCHÄTZTE HÖHE DER KALTLUFTSCHICHT AN.	96
ABBILDUNG 67: ORTHOGONAL ZUM ERDBODEN GERICHTETE FOTO- UND INFRAROTAUFNAHMEN VERSCHIEDENER ZEITEN AM URBANEN STANDORT IN MÜNSTER AM 25./26.06.2024.	98
ABBILDUNG 68: ORTHOGONAL ZUM ERDBODEN GERICHTETE FOTO- UND INFRAROTAUFNAHMEN VERSCHIEDENER ZEITEN AM RURALEN STANDORT IN MÜNSTER AM 25./26.06.2024.	99
ABBILDUNG 69: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAAANALYSEKARTEN FÜR ALLE DREI SZENARIEN	102
ABBILDUNG 70: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS OHNE UND RECHTS MIT ENTSPRECHENDER AUSWEISUNG).....	104
ABBILDUNG 71: KLIMAAANALYSEKARTE DER NACHT IM IST-ZUSTAND FÜR DAS STADTGEBIET VON MÜNSTER.	106
ABBILDUNG 72: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DEN KLIMAAANALYSEKARTEN ZU DEN ZUKUNFTSSZENARIEN MIT POTENZIELLEN AUSWIRKUNGEN VON SIEDLUNGSENTWICKLUNGEN AUF KALTLUFTABFLÜSSE (LINKS 2035 UND RECHTS 2045).	107
ABBILDUNG 73: VERTEILUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG INNERHALB DER ORTE MIT HOHER VULNERABILITÄT	109
ABBILDUNG 74: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON HOCHALTRIGEN (OBEN), KINDERN BIS 6 JAHREN (MITTE) UND SGB II EMPFANGENDEN (UNTEN) IN EINEM AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	110
ABBILDUNG 75 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER	112
ABBILDUNG 76: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	115
ABBILDUNG 77: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 3785, BLATT 1, 2008)	116
ABBILDUNG 78: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION.	119
ABBILDUNG 79: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.	120
ABBILDUNG 80: BEWERTUNGSKARTE FÜR DEN IST-ZUSTAND DER NACHTSITUATION DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	121
ABBILDUNG 81: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO 2035, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO 2045). VERKÜRZTE LEGENDE... ..	123
ABBILDUNG 82: BEWERTUNGSKARTE FÜR DEN IST-ZUSTAND DER TAGSITUATION DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	125
ABBILDUNG 83: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO 2035, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO 2045). VERKÜRZTE LEGENDE, DIE PINKE LINIE KENNZEICHNET DEN BEREICH DES MMQ 2 BUSO-PEUS-STRASSE.	126

ABBILDUNG 84: SYMBOLOGIE FÜR GEBIETE MIT SENSITIVEN BEVÖLKERUNGSANTEILEN.	129
ABBILDUNG 85: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR EINEN AUSSCHNITT DES STADTGEBIETS VON MÜNSTER.	132
ABBILDUNG 86: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR MÜNSTER (VERKÜRZTE LEGENDE).....	133
ABBILDUNG 87: EFFEKTE DER BLUEGREENSTREETS-ELEMENTE FÜR UNTERSCHIEDLICHE ELEMENTDICHTEN. WENIG BESCHREIBT EINE NIEDRIGE ELEMENTDICHTE, MITTEL EINE MITTLERE ELEMENTDICHTE, VIEL STEHT FÜR EINE HOHE ELEMENTDICHTE. A) ZEIGT DIE EFFEKTE WÄHREND DER TAGSITUATION ANHAND DES PARAMETERS PET. DIE EFFEKTE WÄHREND DER NACHT WERDEN IN B) ANHAND DER LUFTTEMPERATUR BESCHRIEBEN. DIE EFFEKTE DER ELEMENTE AUF DIE THERMISCHE SITUATION FALLEN TAGSÜBER DEUTLICH GRÖßER AUS ALS WÄHREND DER NACHT, DAHER WERDEN SIE DURCH UNTERSCHIEDLICHE X-ACHSEN DARGESTELLT (BLUEGREENSTREETS, 2022A).	136
ABBILDUNG 88: BEISPIELBILD AUS EINER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB EINES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	151
ABB. A 1: LAGE DER 6 STADTBEZIRKE VON MÜNSTER.....	165
ABB. A 2: ENTWICKLUNG DES NIEDERSCHLAGS IN MÜNSTER 1881 -2024 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B).....	172
ABB. A 3: ZEITLICHER TREND DER TÄGLICHEN MINIMUMTEMPERATUREN (LINKS) BZW. MAXIMUMTEMPERATUREN (RECHTS) IN MÜNSTER (AUSGEWÄHLTE RCP-SZENARIEN, EIGENE BERECHNUNG NACH EURO-CORDEX-DATEN DES DWD, 2024C).....	173
ABB. A 4: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN (LINKS) UND MITTLEREN SAISONALEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN (RECHTS) IN MÜNSTER FÜR DAS RCP 2.6 (DWD, 2024C).....	173
ABB. A 5: ÄNDERUNG DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN (AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT TMAX \geq 30 °C) IN MÜNSTER IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 2.6 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	174
ABB. A 6: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMME IN MÜNSTER IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 2.6 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	174
ABB. A 7: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN MÜNSTER FÜR DAS RCP 2.6 (DWD, 2024C)	175
ABB. A 8: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN ANZAHL EXTREMER TROCKENPERIODEN (MEHR ALS 28 AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT < 1 MM NIEDERSCHLAG) INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN MÜNSTER IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 2.6 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C)	175
ABB. A 9: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 10$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN MÜNSTER IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 2.6 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C).....	176
ABB. A 10: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 20$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN MÜNSTER IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DIE RCP-SZENARIEN 2.6 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C).....	176
ABB. A 11: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON NIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 30$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN MÜNSTER IN DEN ZUKUNFTSPERIODEN FÜR DAS RCP-SZENARIO 2.6 (LINKS) UND 8.5 (RECHTS) (DWD, 2024C).....	177
ABB. A 12 BODENNAHES STRÖMUNGSFELD VON 4 UHR FÜR DAS STADTGEBIET MÜNSTER FÜR DIE ZUKUNFTS- SZENARIEN (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045.	178
ABB. A 13 KALTLUFTPRODUKTIONSRATE VON 4 UHR FÜR DAS STADTGEBIET MÜNSTER FÜR DIE ZUKUNFTS-SZENARIEN (OBEN = SZENARIO 2035; UNTEN = SZENARIO 2045.	179



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN...	14
TABELLE 2: LANGJÄHRIGE MITTLERE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUREN, DES NIEDERSCHLAGS SOWIE VON METEOROLOGISCHEN KENNTAGEN IN MÜNSTER (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024B).....	23
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN MÜNSTER (P 0 / 100 = MINIMUM/MAXIMUM, P 50 = MEDIAN).	27
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN MÜNSTER (P 0 / 100 = MINIMUM / MAXIMUM, P 50 = MEDIAN).....	28
TABELLE 5: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	31
TABELLE 6: PROJIZIERTE ZUNAHME DER MITTLEREN TEMPERATUR IN DEN SOMMERMONATEN (J/J/A) FÜR VERSCHIEDENE ZIELJAHRE GEGENÜBER 1971-2000 FÜR DEN RAUM MÜNSTER.	35
TABELLE 7: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE	37
TABELLE 8: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER FITNAH-NUTZUNGSKLASSEN FÜR DIE JEWEILIGEN POTENZIELLEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN IM ZUKUNFTSSZENARIO.....	43
TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	46
TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	47
TABELLE 11: STANDORTE, MESSZEITRÄUME UND INSTRUMENTIERUNG WÄHREND DER IM SOMMER 2024 IM RAHMEN DER KLIMAAANALYSE MÜNSTER DURCHGEFÜHRTEN METEOROLOGISCHEN MESSKAMPAGNE.	51
TABELLE 12: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (VDI 3787, BLATT 2, 2022).....	73
TABELLE 13: BEZEICHNUNG UND KRITERIEN FÜR KLIMATOLOGISCHE KENNTAGE.....	78
TABELLE 14: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAAANALYSEKARTEN.	103
TABELLE 15: KLASSIFIZIERUNG DER SENSITIVITÄT DER BEVÖLKERUNG.....	111
TABELLE 16: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IM WIRKRAUM (WOHNEN, GEWERBE & VERKEHRSRAUM) AM TAG.	117
TABELLE 17: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER HUMANBIOKLIMATISCHEN SITUATION IM WIRKRAUM (WOHNEN & GEWERBE) IN DER NACHT.....	117
TABELLE 18: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG (IN ANLEHNUNG AN VDI 3785, BL.1).....	119
TABELLE 19: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER HUMANBIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045).....	122
TABELLE 20: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER HUMANBIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG FÜR DEN SIEDLUNGSRAUM IN DER NACHT, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045).....	122
TABELLE 21: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER AUFENTHALTSQUALITÄT IM AUßENRAUM DES SIEDLUNGSGEBIETES AM TAGE, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045).....	124
TABELLE 22: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE POTENZIELLE ERHOLUNGSFUNKTION AM TAGE, JE MODELLIERUNGSSZENARIO (IST, 2035 ODER 2045).....	127
TABELLE 23: BEWERTUNGSMATRIX DER BELASTUNGSKLASSEN FÜR DEN WIRKRAUM. DIE SCHWARZE UMRANDUNG KENNZEICHNET EINE ABWEICHENDE BEWERTUNG VON IST-ZUSTAND UND DEN ZUKUNFTSSZENARIEN.....	128
TABELLE 24: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN BELASTUNGSKLASSEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.	128
TABELLE 25: BEWERTUNGSMATRIX DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSPAUM.	129



TABELLE 26: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARFS UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSRRAUMS.	129
TABELLE 27: MIT DEN BELASTUNGEN IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	130
TABELLE 28: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	131
TABELLE 29: BEWERTUNGSGRUNDLAGEN DER STADTKLIMATISCHEN VERTRÄGLICHKEIT DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN	134
TABELLE 30: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT MÜNSTER.	140
TABELLE 31: LISTE DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN (TYP: W = WOHNEN; G = GEWERBE)	180



Abkürzungsverzeichnis

ALKIS *Amtliche Liegenschaftskatasterinformationssystem*

ArbStättV *Arbeitsstättenverordnung*

BIM *Building Information Modeling*

BImSchG *Bundes-Immissionsschutzgesetz*

BLP *Baulandprogramm*

CMIP6 *Coupled Model Intercomparison Project 6*

CO₂ *Kohlenstoffdioxid*

DOM *Digitales Oberflächenmodell*

DWD *Deutscher Wetter Dienst*

ELWAS *elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem*

EURO-CORDEX *Coordinated Downscaling Experiment - European Domain*

EWO *Einwohner*

FITNAH *Flow over Irregular Terrain with Natural and Anthropogenic Heat sources*

G *Gewerbe*

GFEK *Gewerbeflächenentwicklungskonzept*

HLNUG *Hessischen Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie*

IFM *Integriertes Flächen-management Münster*

IPCC *Intergovernmental Panel on Climate Change*

ISO *Internationale Organisation für Normung*

KAK *Klimaanalysekarte*

KI *Künstliche Intelligenz*

KPR *Kaltluftproduktionsrate*

LANUV *Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen*

LES *Large eddy simulation*

LOD1 *Level of Detail; deutsch: Detaillierungsgrad*

MESZ *Mitteleuropäische Sommerzeit*

NDVI *Normalized Difference Vegetation Index*

nFK *nutzbare Feldkapazität*

PAG *projektbegleitende Arbeitsgruppe*

PET *Physiologisch Äquivalente Temperatur*

PHK *Planungshinweiskarte*



PMV *Predicted Mean Vote*
PV *Photovoltaik*
QGIS *Software: Quantum GIS*
RANS *Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen*
RCP *Representative Concentration Pathway*
ReKliEs-De *Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland*
RGBI *Rot-Grün-Blau-Nahes Infrarot*
rH *relative Luftfeuchte*
S1 *Szenario 2035*
S2 *Szenario 2045*
SKA *Stadtklimaanalyse*
SRES *Special Report on Emissions Scenarios*
SSP *Shared Socioeconomic Pathways*
T *Lufttemperatur*
T04 *nächtliche bodennahe Lufttemperatur um 4 Uhr*
 T_{\max} *Maximum der Lufttemperatur eines Tages*
 T_{\min} *Minimum der Lufttemperatur eines Tages*
 T_{surf} *Oberflächentemperatur*
ü. NN *über Normal Null*
UBA *Umweltbundesamt*
UTCI *Universal Thermal Climate Index*
VDI *Verein Deutscher Ingenieure*
W *Wohnen*
WD *wind direction; deutsch: Windrichtung*
WMO *World Meteorological Organisation*
WS *wind speed; deutsch: Windgeschwindigkeit*



Glossar

Albedo: Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.

Allochthone Wetterlage: Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur →*autochthonen Wetterlage*.

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen →*Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über →*Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über funktionsfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Wärmebelastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.

Austauscharme Wetterlage: →*Autochthone Wetterlage*

Autochthone Wetterlage: Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagernde Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.

Bioklima: Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).

Flurwind: Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).

Grünfläche: Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 3787, Blatt 5, 2003).



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

Kaltluftleitbahnen: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkungsräume*) miteinander und sind mit ihren hohen → *Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.

Kaltluftproduktionsrate: Das Volumen an Kaltluft (in m³), das über einer Fläche pro Stunde und m² gebildet wird.

Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der → *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m³/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an → *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer → *Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit m³/(s*m)). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

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

PET (Physiological Equivalent Temperature / Physiologisch äquivalente Temperatur): Humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell abgeleitet wird.

Planungshinweiskarte: Bewertung der bioklimatischen Belastung in Siedlungsflächen im Stadtgebiet (→ *Wirkungsräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als → *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 bzw. RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m² bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, unbebauten Umland aufgrund des anthropogenen Einflusses (u.a. hoher Versiegelungs- und geringer Vegetationsgrad, Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalt) ein modifiziertes Klima auf, das im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen führt. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet.

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*



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

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

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

z-Transformation: Umrechnung zur Standardisierung einer Variablen, sodass der arithmetische Mittelwert der transformierten Variable den Wert Null und ihre Standardabweichung den Wert Eins annimmt. Dies wird erreicht, indem von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und anschließend durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Dadurch nehmen Abweichungen unterhalb des Gebietsmittels negative und Abweichungen oberhalb des Gebietsmittels positive Werte an, die in Vielfachen der Standardabweichung vorliegen. Die Form der Verteilung bleibt dabei unverändert.



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 bisher existierende Stadtklimaanalyse (SKA) für Münster aus dem Jahr 1992 entspricht den heutigen Anforderungen nicht mehr und wird sowohl dem heutigen Stadtbild als auch den Vorstellungen der zukünftigen Stadtentwicklung nicht gerecht (Stadt Münster, 1992). Im Rahmen des Klimaanpassungskonzeptes (Stand 2015) wurde diese Stadtklimaanalyse mit einer Modellierung zu Kaltluftabflüssen mit Hilfe des Modells KLAM_21 aktualisiert. Wie in Tabelle 1 in Kapitel 2.3 dargestellt, kann mit diesem Modell allerdings nur ein vereinfachter Kaltlufthaushalt betrachtet werden und die räumliche Auflösung kann maximal bis auf 20m verfeinert werden. Auch die geostatistische Modellierung auf Basis von Daten aus Messfahrten zur städtischen Wärmeinsel war damals eine Erweiterung zur SKA von 1992. Die vorliegende Stadtklimaanalyse, angefertigt nach dem aktuellen Stand der Technik, stellt eine Aktualisierung hinsichtlich der Verbesserung der räumlichen Auflösung und der Abbildung der heutigen Stadtstruktur dar.

Der Umgang mit „Hitze in der Stadt“ ist eines der relevanten Themen für Münster, da in Teilen des Stadtgebietes 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 Münster, die mit der vorliegenden Klimaanalyse gegeben werden. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insbesondere die Kaltluftprozesse getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Münsteraner Stadtklimas. Ergänzend wurde eine begleitende sommerliche Messkampagne durchgeführt, um die Modellierung mit Messdaten in Beziehung setzen zu können. Primäres 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 ggf. 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 Münster erfolgt im Kapitel zum Thema Klima und Klimawandel (Kap. 4). Danach wird die Methodik der Modellierungen und der Messkampagne für die Stadtklimaanalyse (Kap. 5) erläutert. Die Ergebnisse der Modellrechnung und der Messkampagne werden im anschließenden Kapitel dargestellt (Kap. 5.8). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, sodass die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des



Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer „Klimaanalysekarte“ zusammengefasst wurden (Kap. 7.1). Außerdem wird die parallel angefertigte Sensitivitätsanalyse anhand aktueller Bevölkerungsdaten erläutert (Kap. 7.2). Um aus allen Ergebnissen planerische Konsequenzen ableiten zu können ist eine zusammenfassende Betrachtung von z. B. Tag- und Nachtsituation, aber auch aller Szenarien auf der sog. „Wertebene“ und eine Verknüpfung mit Maßnahmenpotentialen notwendig (Kap. 8). Kapitel 9 fasst die vorliegende Klimaanalyse allgemein zusammen. Im Anhang befinden sich zum einen klimaökologische Steckbriefe für jeden Stadtbezirk. Zum anderen sind dort ergänzende Informationen zu unterschiedlichen Kapiteln enthalten.



2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse¹ 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. 4) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

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

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

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

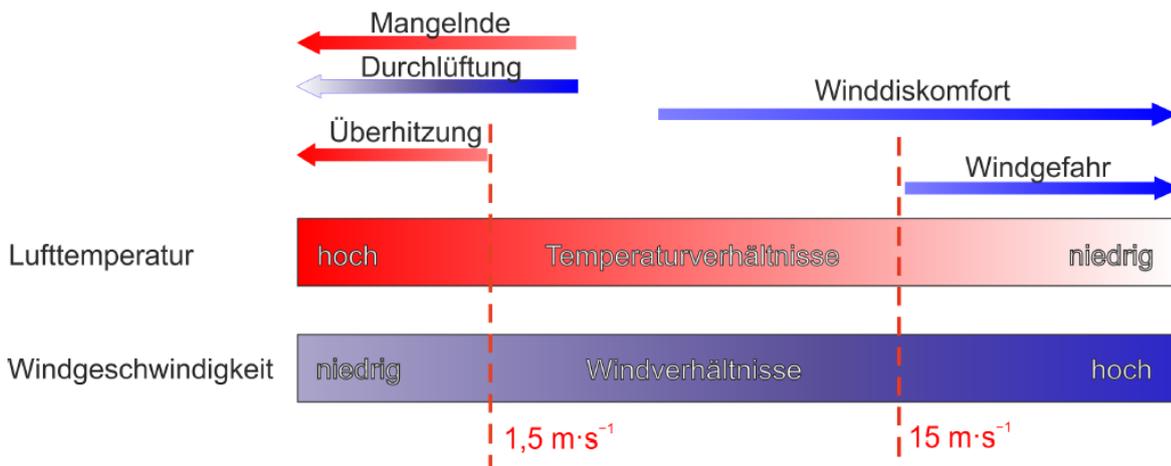


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach: VDI 3787, Blatt 4, 2020)

¹ Synonyme Verwendung der Stadtklimaanalyse zu Klimaanalyse der Stadt Münster

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 (Mayer & Höppe, 1987). International gebräuchlich ist darüber hinaus der „Universal Thermal Climate Index“ (UTCI, Jendritzky et al., 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, 2022). 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 3785, Blatt 1, 2008, S. 24). Die Arbeitsstättenverordnung (Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV), 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26°C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 ArbStättV definierte Verpflichtung des Arbeitgebers, eine Gefährdung für Leben und Gesundheit seiner Angestellten möglichst zu vermeiden bzw. verbleibende Gefährdungen gering zu halten. Übersteigt die Raumtemperatur diesen Wert, muss der Arbeitgeber geeignete Schutzmaßnahmen ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung jedoch nicht ableiten.

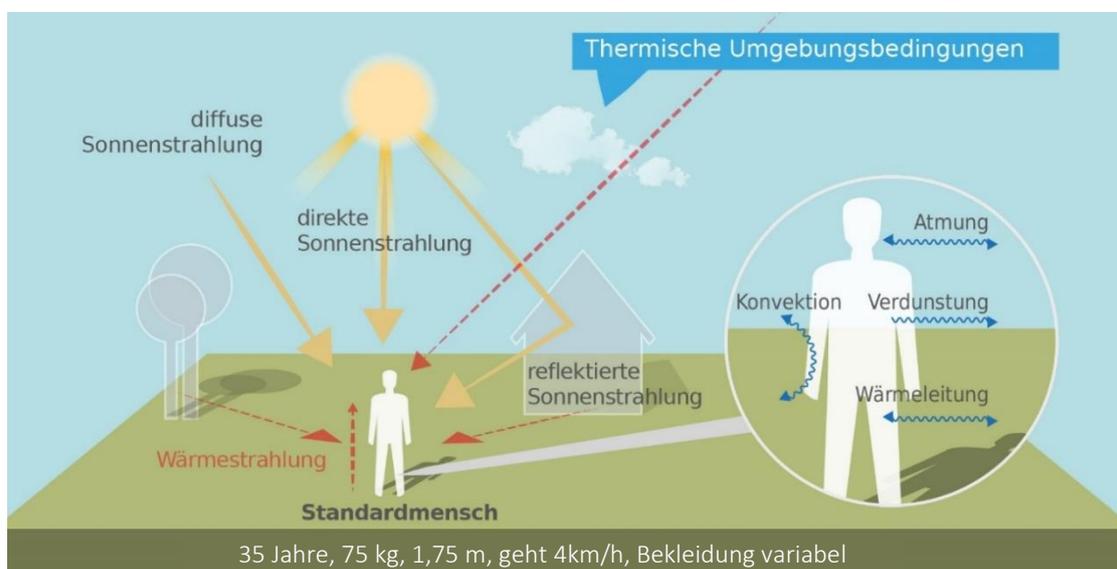


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (Quelle: DWD, 2025)

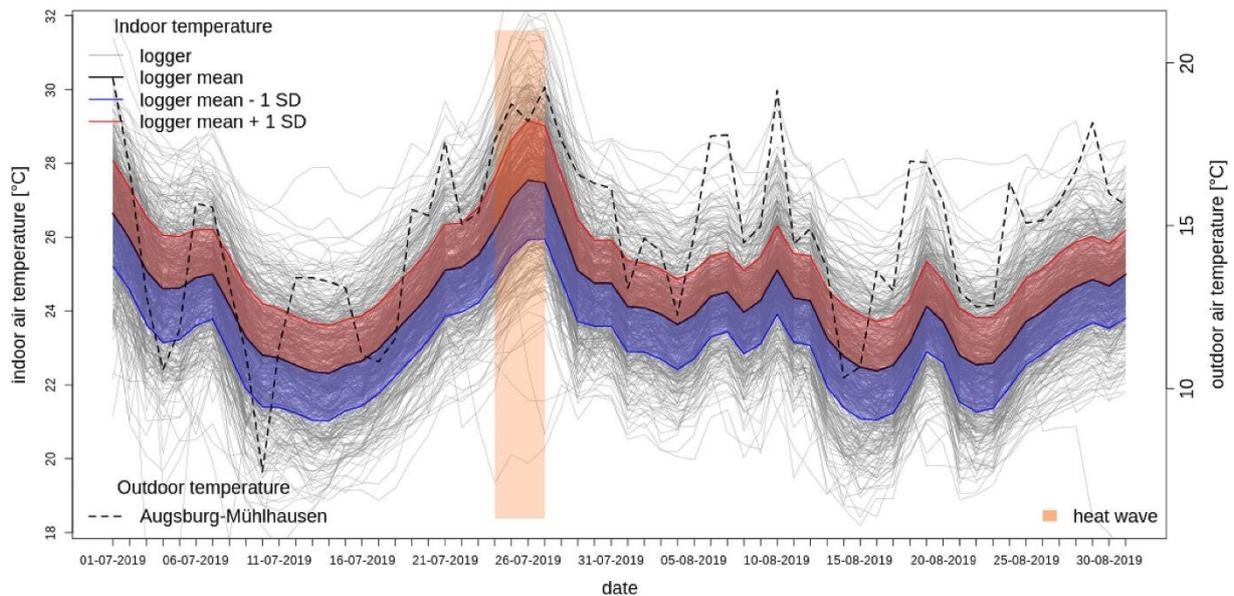


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann et al., 2021)

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 3785, Blatt 1, 2008, S. 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 et al., 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, 2017). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steininger, 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10–15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Cedeño Laurent et al., 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund



einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Seniorinnen und Senioren 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 °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, 2024a).

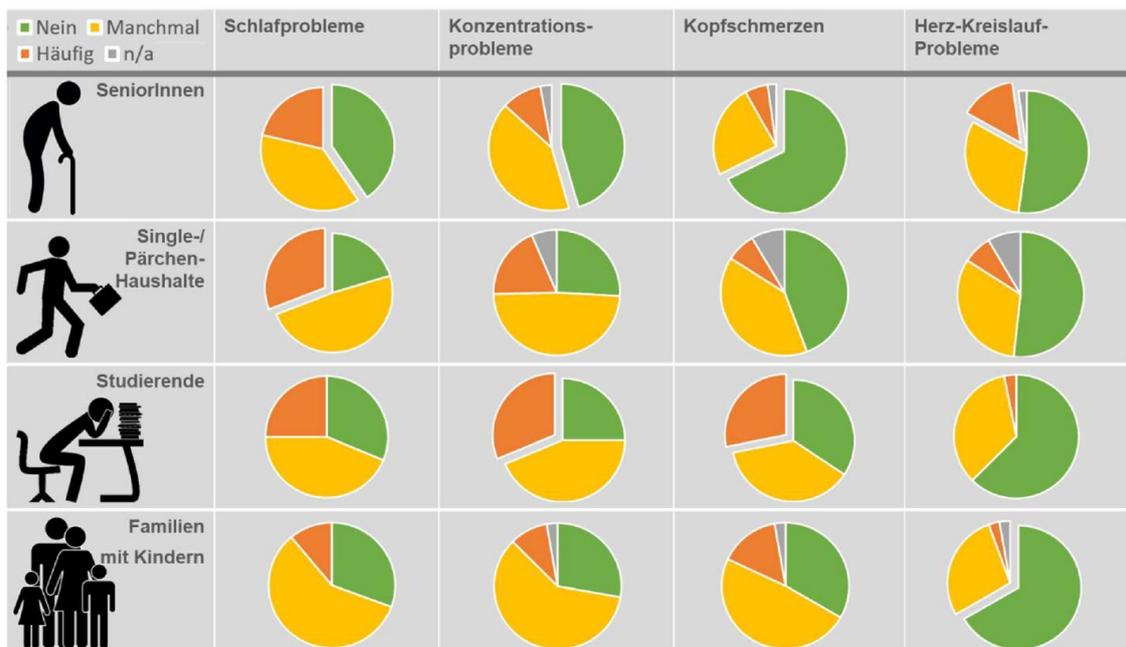


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz & Sett, 2019)

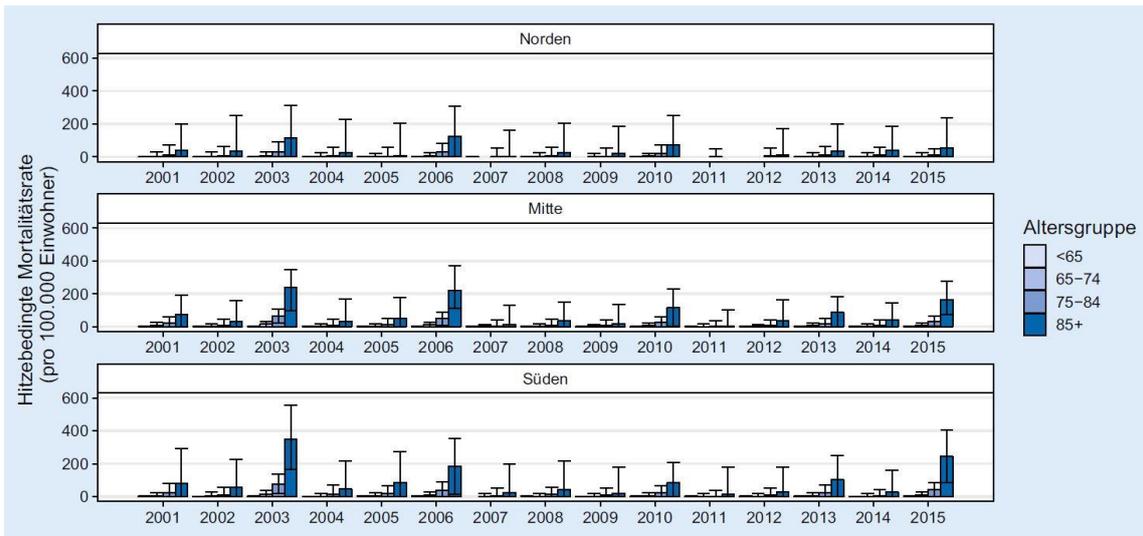


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An Der Heiden et al., 2019).

2.2 WÄRMEINSELEFFEXT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das 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 (Gross, 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 (2024; 2003) benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen.

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmende Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (vgl. DWD, 2023). 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: Line, 2017, oben), (MVI 2012, Mitte), (DWD, 2023, unten)

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

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

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

Alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen können durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 3787, Blatt 5 - Entwurf, 2024; VDI 3787, Blatt 5, 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.

2.2.1 EINFLUSS VON FREIFLÄCHENPHOTOVOLTAIKANLAGEN

Die Errichtung von Photovoltaik-Anlagen auf Freiflächen stellt eine Landnutzungsänderung dar. Diese gehen in der Regel mit einer Veränderung des Energie- und Strahlungshaushaltes einher. Durch die mit Modulen beschattete Bodenoberfläche verringert sich die Hintergrundalbedo. Dies führt zu einer Veränderung der Energiebilanz hinsichtlich Absorption sowie Speicherung und Abgabe von kurz- und langwelliger Strahlung (Abbildung 7).

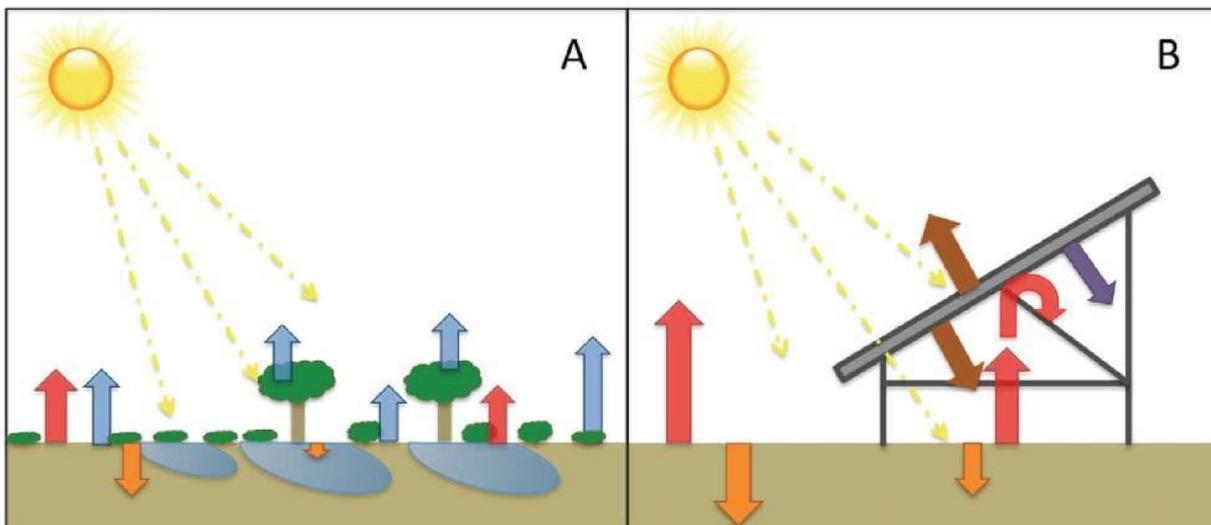


Abbildung 7: Illustration des mittäglichen Energieaustauschs. Unter der Annahme, dass die eintreffende Energie von der Sonne gleich hoch ist, wird der Übergang von (A) einem bewachsenen Ökosystem zu (B) einer Photovoltaik (PV)-Kraftwerksanlage die Energieflussdichte eines Gebietes verändern; Wärmeaufnahme- und -speicherung (orangefarbener Pfeil), wärmeabgebende latente Energieströme bei Übergang von Wasser zu Wasserdampf in die Atmosphäre durch Evapotranspiration und Verdunstung (blaue Pfeile), fühlbarer Wärmestrom (rote Pfeile), Energieerückstrahlung von PV-Paneelen (braune Pfeile), in Elektrizität umgewandelte Energie (violetter Pfeil) (Barron-Gafford et al., 2016)



In natürlichen und auch agrarisch geprägten Ökosystemen wird die einfallende Sonnenenergie entweder zurück in die Atmosphäre reflektiert oder absorbiert, gespeichert und später in Form von latenter oder fühlbarer Wärme wieder abgestrahlt. Reduziert wird die Wärmefangnahme – und Speicherung im Boden durch die Vegetation, indem sie eine Oberflächenbeschattung erzeugt. Dieser Teil der aufgenommenen Energie kann im Laufe des Tages als latente Wärme beim Übergang von flüssigem Wasser zu Wasserdampf (Verdunstung & Transpiration) wieder in die Atmosphäre freigesetzt werden. Dies führt allgemein zu einem Kühlungsprozess. Wenn die Vegetation unter den Modulen fehlt, wird der wärmeabgebende latente Energieaustausch deutlich reduziert, was potenziell zu einer größeren Wärmeabsorption durch Böden in PV-Anlagen führen kann und wiederum die Bodentemperatur erhöhen und zu einem größeren Abfluss von fühlbarer Wärme aus dem Boden in Form von Strahlung und Konvektion führen kann. Additiv führt die dunkle Oberfläche der Solarpaneele zu einer geringeren Albedo, was zur Folge hat, dass mehr Sonneneinstrahlung absorbiert wird. Davon wird, abhängig vom jeweiligen Wirkungsgrad, ein gewisser Teil in nutzbare Elektrizität umgewandelt. Der größte Teil dieser Energie wird als langwellige, fühlbare Wärme zurückgestrahlt. Ein anderer Teil wird von den Modulen durchgelassen, was zu einer größeren Wärmefangnahme des Bodens und schließlich zu einem größeren Abfluss fühlbarer Wärme führen kann, welche unter den Modulen eingeschlossen sein kann (Barron-Gafford et al., 2016).

Ein in dem Kontext immer stärker in den Fokus rückendes Thema in Bezug auf die Entwicklung von Freiflächen-Photovoltaik sind die Auswirkungen auf den menschlichen thermischen Komfort. Durch den in der Literatur mehrfach erwähnten Photovoltaischen-Wärmeinseleffekt (PVHI) kann es unter bestimmten Bedingungen zu einem nächtlichen „Wärmefeld“ über der Anlage kommen. Konkret bezieht sich dieser Begriff auf eine nachweisbare Zunahme des fühlbaren Wärmeflusses (atmosphärische Erwärmung), die sich aus der Veränderung des Gleichgewichts von ein- und ausgehenden Energieflüssen aufgrund von Landschaftsumwandlungen ergibt. In diesem Zusammenhang sind in der Literatur Werte angegeben, dass PV-Module 20 Kelvin (K) und wärmer als die Umgebungstemperaturen sein können und durch die geringe Wärmekapazität pro Flächeneinheit diese Wärmestrahlung sowohl nach unten als auch nach oben emittiert wird. Weiterhin wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass durch die Reflexion und Absorption von aufsteigender langwelliger Strahlung aus dem Boden die Abkühlung verhindert werden (Barron-Gafford et al., 2016).

Eine Entwicklung eines vollständigen thermischen Modells besonders für mitteleuropäische Freiland-Standorte stellt eine Herausforderung dar, da kaum empirische Daten aus Messungen vorhanden sind und der Effekt von mehreren Faktoren abhängig ist, wie dem räumlichen Maßstab, der geografischen Position, der Moduldicke, dem Ausgangs-Albedo der Landnutzung, der Moduleffizienz sowie Saisonabhängigkeit, Advektion oder Wolkenbedeckung.

Viele der Studien, die diesen Effekt untersuchten, basieren auf theoretischen Annahmen (Armstrong et al., 2014), numerischen Modellierungen in städtischen Umgebungen (Brito, 2020; Cortes et al., 2015; Masson et al., 2014; Salamanca et al., 2016; Taha, 2013; Tian et al., 2007) oder direkte Temperaturmessungen in semiariden Gebieten ohne Vegetationsdecke unter den Photovoltaik-Modulen (Barron-Gafford et al., 2016; Broadbent et al., 2019; Chang et al., 2018; Stern et al., 2020; Yang et al., 2017). Diese Ergebnisse sind jedoch nur sehr bedingt auf mitteleuropäische Freiland-Ökosysteme (Grasland, Acker od. Konversionsstandorte) übertragbar. Gegenwärtig existieren lediglich zwei Studien, aus denen sich valide Rückschlüsse auf den hier zu betrachtenden Fall ableiten lassen.

Beide Studien basieren auf Messkampagnen, bei denen ein Referenzstandort (ohne PV-Module) mit einem neu errichteten Solarpark verglichen wurde. Gemessen wurde jeweils die bodennahe Lufttemperatur unter und zwischen den Modulreihen. Die Studien wurden in Nordsardinien (Vervloesem et al., 2022) bzw. in Eng-

land (Armstrong et al., 2016) jeweils in agrarisch geprägtem Umfeld durchgeführt. Im Ergebnis haben die Messungen gezeigt, dass die täglichen Minimal- und Maximaltemperaturen in den Sommermonaten nachts tendenziell wärmer (bis zu 2,4 K) und tagsüber kühler (bis zu 6,0 K) waren. Weiterhin war die Bodentemperatur von Frühjahr bis Herbst unter den Modulen deutlich kühler (bis zu 5,2 °C im Tagesdurchschnitt) mit Reduzierungen von bis zu 3,5 °C und 7,6 °C des täglichen Minimums beziehungsweise Maximums. Der Begründungszusammenhang liegt hier in der Verschattung der Bodenoberfläche am Tage sowie einer reduzierten Ausstrahlung in der Nacht im Vergleich zum Referenzstandort. Bezogen auf die Tagesmitteltemperatur wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen Photovoltaik- und Referenzstandort festgestellt (Abbildung 8).

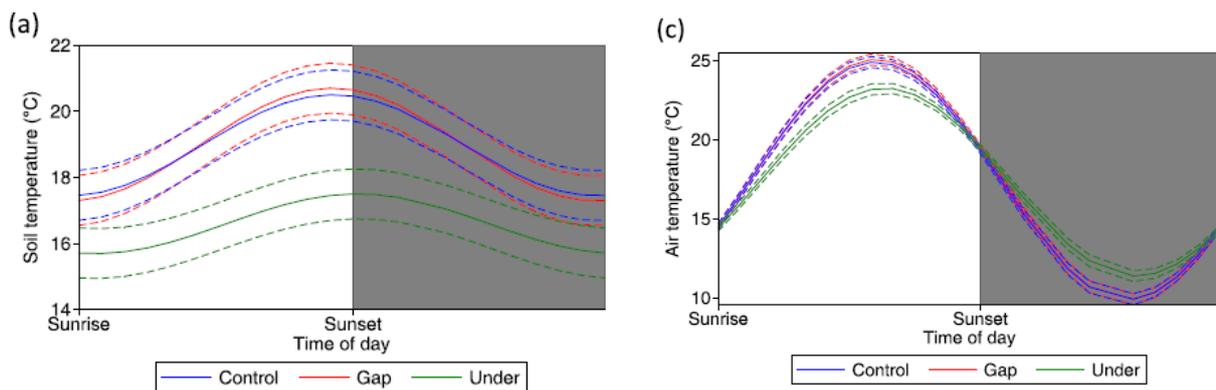


Abbildung 8: Tageszeitliche Differenzen in der Bodentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur im Bereich der Referenzstation (blau; „Control“), der Station zwischen den Modulen (rot; „Gap“) und der Station unter den Modulen (grün; „Under“); (Quelle: Armstrong et al., 2016)

Die beiden Studien bestätigen die physikalisch zu erwartenden Effekte, wonach die Errichtung von Solarparks mit einer Veränderung des Mikroklimas im Bereich der Solarparks verknüpft sein können. Gleichzeitig ist festzustellen, dass einige für die Ziele des vorliegenden Gutachtens relevante Effekte nicht Gegenstand der Untersuchungen waren. Hierzu zählen insbesondere

- die horizontale und vertikale Reichweite der zu erwartenden Auswirkungen bzw. des PVHI sowie
- die Auswirkungen auf die Strömungseinflüsse und die Kaltluftproduktion- und den Kaltlufttransport.

Die notwendigen Messungen zur Schließung dieser Erkenntnislücken sind z. B. bei GEO-NET zurzeit in Planung (Stand Anfang 2025), aber mit sehr großem Aufwand verbunden und selbstverständlich ausschließlich in einem bereits bestehenden Solarpark möglich. Benötigt werden würde entweder ein dichtes Netz an stationären Messmasten mit mehreren 10er Metern Höhe oder eine Intensivmesskampagne während sommerlicher Strahlungswetterlagen (z.B. mithilfe von Meteo-Drohnenaufstiegen). Insgesamt ist der Forschungsbedarf für das skizzierte Themenfeld als hoch einzustufen, woraus sich ein zu akzeptierendes Maß an Unsicherheiten in der gutachterlichen Tätigkeit ergibt. Aus diesen genannten Gründen wurden Photovoltaikanlagen nicht in der Eingangsdatenerstellung der Stadtklimaanalyse (SKA) Münster berücksichtigt, obwohl dieses Thema auch für Münster zunehmend von Bedeutung ist.



2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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

Die etablierten Instrumente für entsprechende Grundlagenuntersuchungen stellen Stadtklimaanalysen sowie ggf. Detailgutachten für kleinräumigere Planungsprozesse (z.B. verbindliche Bebauungsplanung, 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 (demnächst abgelöst durch 3787 Bl. 1 (Entwurf 11/24))
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen (demnächst abgelöst durch 3787 Bl. 1 (Entwurf 11/24))
- VDI 3787 Blatt 2 (2022): Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas
- VDI 3787 Blatt 5 (Entwurf 03/2024): Lokale Kaltluft
- VDI 3787 Blatt 8 (2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- VDI 3787 Blatt 9 (2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen (demnächst abgelöst durch 3787 Bl. 1 (Entwurf 11/24))

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl. 5 & VDI 3787, Bl. 1 aktuell in der Entwurfsfassung). 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 9). 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 Modellierungen 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 9: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG, 2022, S. 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 dem Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.
2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die



Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).

3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).

Dabei steigt über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung 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 aufgelösten 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 10). Die Bearbeitungszeit lag zwischen Dezember 2023 und März 2025. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelemente sind numerische Stadtklimamodellierungen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt, eine Messkampagne sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarte. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere der dortigen Projektleitung bei der Stabsstelle Klima sowie zu speziellen Einzelthemen zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.



Abbildung 10: 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 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). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaß-



stäben und -verfahren zulässig (Fürst & 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, 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, 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 und damit eine entsprechende Akzeptanz und Praxisanwendung erwarten lässt. Die Inhalte und Darstellungen weichen dabei notwendigerweise in einzelnen Punkten von den Vorschlägen in der VDI-Richtlinie ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.

Folgende Dezernate, Ämter und Fachstellen waren regelmäßiges Mitglied der PAG:

- Dezernat OB: Stabsstelle Klima
- Dezernat III: 61 Stadtplanungsamt
- Dezernat III: 62 Vermessungs- und Katasteramt
- Dezernat III: 66 Amt für Mobilität und Tiefbau
- Dezernat V: 53 Gesundheits- und Veterinäramt
- Dezernat VI: 67 Amt für Grünflächen, Umwelt und Nachhaltigkeit

Folgende Dezernate und Ämter wurden zusätzlich für Absprachen in Sonderterminen konsultiert:

- Dezernat IV: 51 Amt für Kinder, Jugendliche und Familien
- Dezernat V: Sozialamt



Neben diversen Abstimmungsterminen zu Detailabsprachen fanden im Projektverlauf insgesamt vier Sitzungen der PAG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- 16.04.2024: Vorstellung der Ergebnisse der Modellierung des Status Quo, Diskussion zur Erstellung von Szenarien für die Zukunftsmodellierung (vor Ort)
- 04.11.2024 Vorstellung der Ergebnisse der Zukunftsmodellierungen und der Klimaanalysekarten (Online)
- 19.12.2024 Vorstellung der Bewertungskarten und Diskussion eines Entwurfes der Planungshinweiskarte (PHK) (vor Ort)
- 25.02.2025 Vorstellung der finalen PHK, des Maßnahmenkataloges, sowie der Sensitivitätsanalyse, Diskussion zum Thema Vertiefungsgebiete (online)



4. Klima und Klimawandel im Raum Münster

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Münster basiert überwiegend auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2024b; Kaspar et al., 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von monatlichen oder 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 Münsters wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km- Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige (Normal-)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. Unterstützend wurden auch Daten von einzelnen Messstationen im Umfeld von Münster ausgewertet.

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 (Jacob et al., 2014). Ergänzt wurden diese Modellierungen für Deutschland im Projekt ReKliEs-De (Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland, Hübener, Hoffmann, et al., 2017; Hübener, Spekat, et al., 2017). Durch den DWD wurde aus diesem übergeordneten Prozess ein für Deutschland repräsentatives Referenzensemble ausgewiesen (DWD, 2024c). Zudem wurden diese Daten im Rahmen eines Ressortforschungsprojektes einer Biasadjustierung unterzogen und auf eine höhere Auflösung regionalisiert.

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 Münster ein Modellensemble bestehend aus 21 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden. Laut Vorgaben des Landes Nordrhein-Westfalen wurde dabei das gesamte DWD-Referenzensemble v2018 ausgewertet (LANUV, 2024).

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., 2024).

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

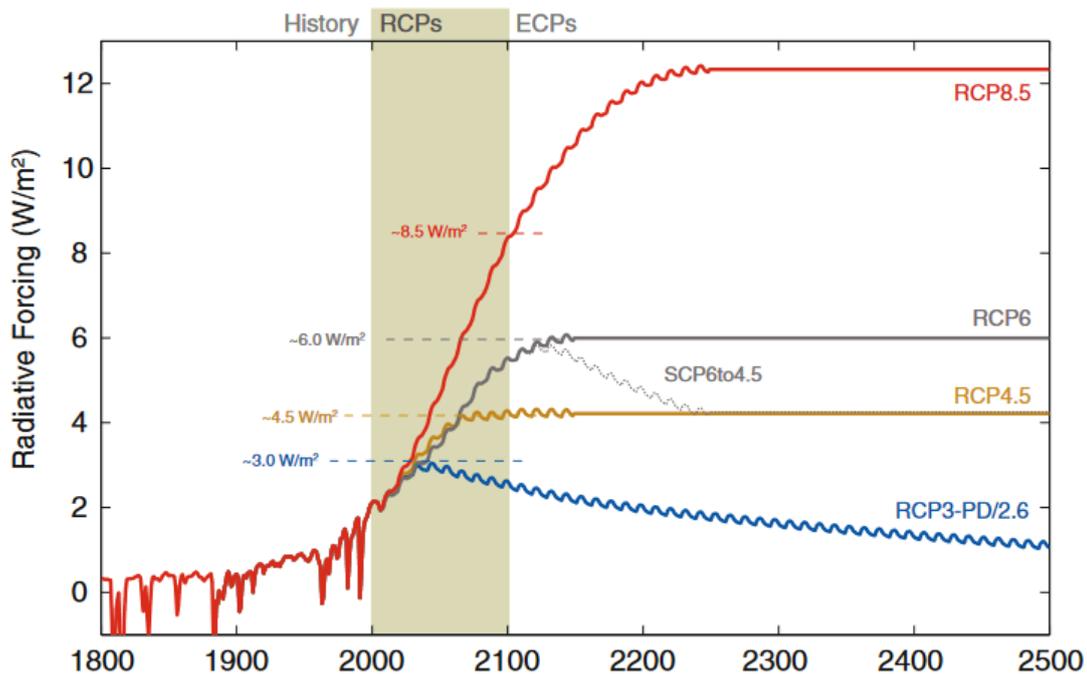


Abbildung 11: Strahlungsantrieb der verschiedenen Representative Concentration Pathways (RCP²) und ihre Entwicklung bis 2100. (Quelle: Meinshausen et al., 2011)

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. In den vom DWD aufbereiteten Daten 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, 2024). Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien³), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten und dem DWD Referenzensemble enthalten.

² RCPs = Representative Concentration Pathways (repräsentativer Konzentrationspfad); ECP = Extended Concentration Pathways, sind ergänzende Szenarien bis 2300.

³ 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 W/m^2 , der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Abbildung 11)(Moss et al., 2010):

- 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 $2 \text{ }^\circ\text{C}$ -Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. $4 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter-wie-bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO_2 -Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. 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 et al., 2017; Peters et al., 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert.

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

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

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 (mittlere Zukunft): 2031 – 2060

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 (Linke et al., 2024). 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 12).

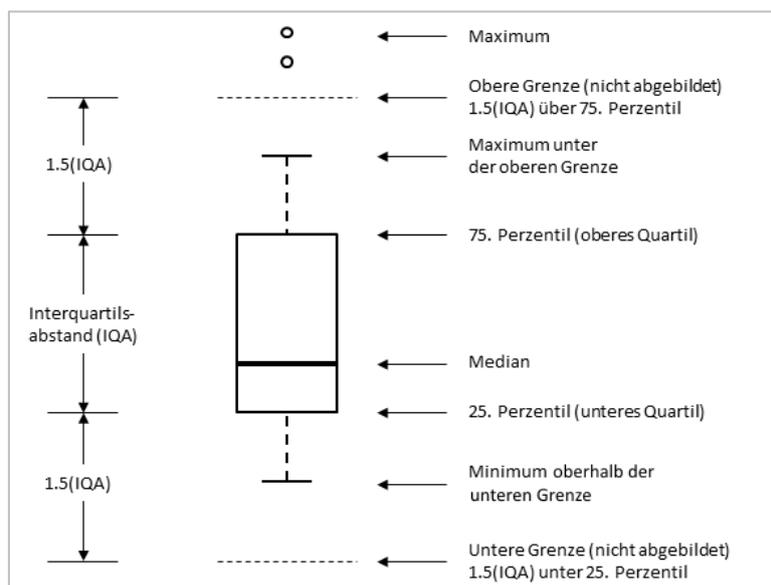


Abbildung 12: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots (eigene Darstellung)

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Münster ist, bezogen auf die Klimanormalperiode von 1991 – 2020, gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 10,4 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von 755 mm/Jahr, wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen im Juli/August und Dezember/Januar auftreten (Abbildung 13 & Tabelle 2). Damit ist die Stadt um 1,1 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C (UBA, 2024b). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge in derselben Periode liegt geringfügig unter dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (UBA, 2024c).

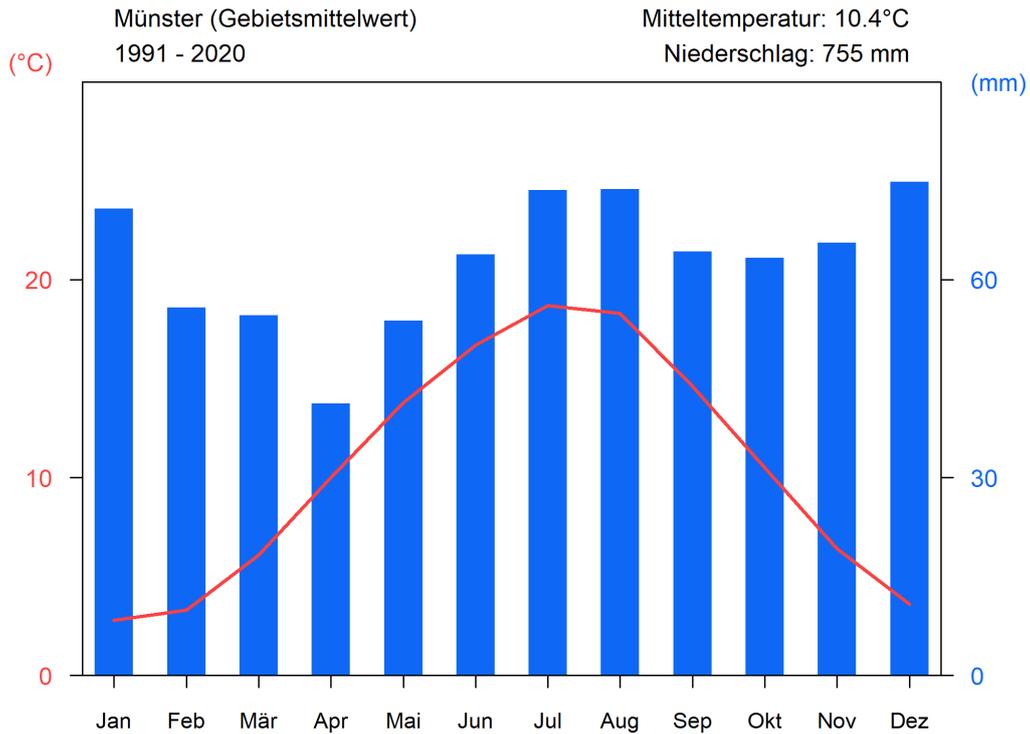


Abbildung 13: Klimadiagramm der Stadt Münster für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Rasterdatenprodukten des Deutschen Wetterdienstes (nach DWD, 2024b)

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Münster – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur dort seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,7 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten – darunter die Top 4 Jahreswerte allein in den letzten fünf Jahren (Abbildung 14).

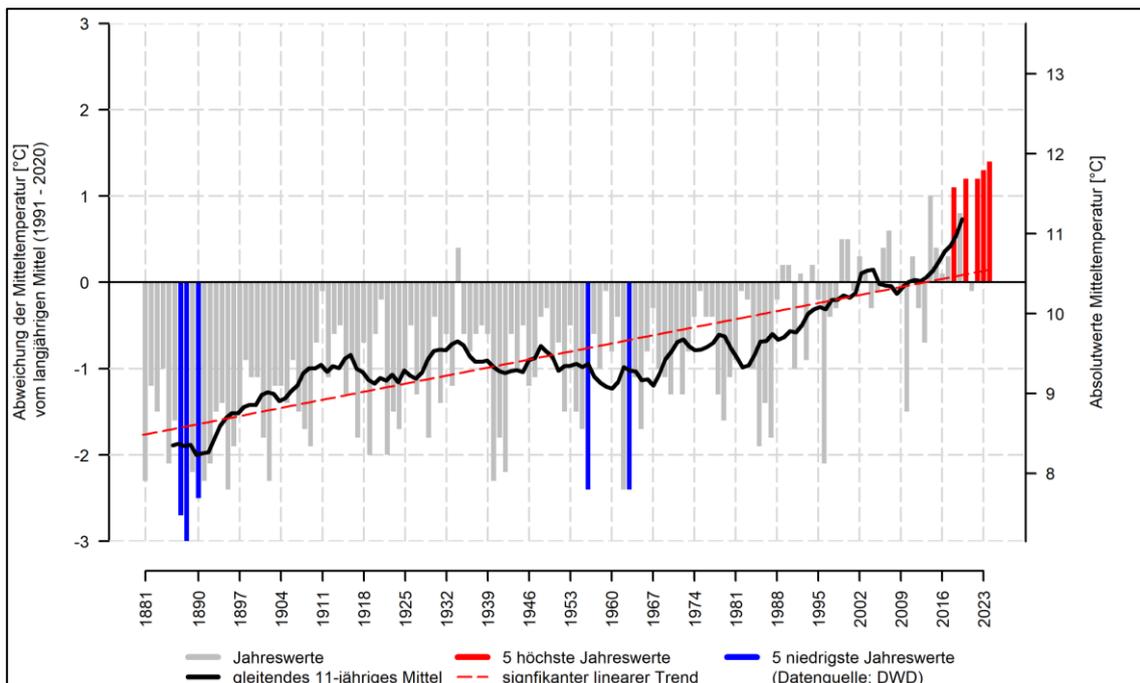


Abbildung 14: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Münster im Zeitraum von 1881 bis 2024 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b)

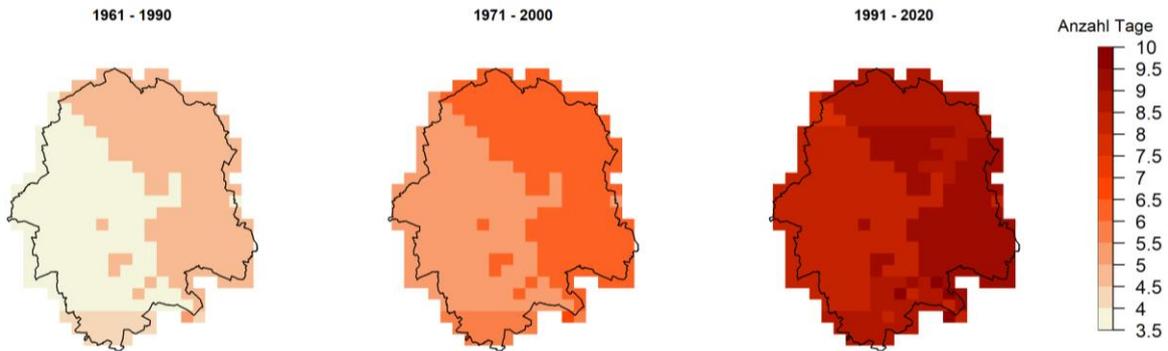


Abbildung 15: Räumliche Darstellung der Anzahl Heiße Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in verschiedenen Perioden in Münster (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b)

Tabelle 2: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kennzahlen in Münster (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b).

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	9,5	9,8	10,4
Sommertage ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) [n/Jahr]	25	29	38
Heiße Tage ($T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) [n/Jahr]	4	6	9
Tropennächte ⁴ ($T_{min} \geq 20 \text{ °C}$) [n/Jahr]	keine Angabe	< 1	< 1
Frosttage ($T_{min} < 0 \text{ °C}$) [n/Jahr]	60	55	56
Eistage ($T_{max} < 0 \text{ °C}$) [n/Jahr]	14	11	9
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	756	754	755

Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991 – 2020 traten in Münster 38 Sommertage und 9 Heiße Tage pro Jahr auf. Die subatlantische Lage Münsters, mitten im Münsterland, zeigt sich unter anderem in der Anzahl meteorologischer Kennzahlen im Winter. In Münster wurden in den letzten drei Dekaden im Mittel 56 Frosttage und 9 Eistage pro Jahr registriert.

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein Maß für die Bodenfeuchte ist die nutzbare Feldkapazität. Sie unterliegt in Münster deutlichen Schwankungen (Abbildung 16). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) wird das pflanzenverfügbare Wasser angezeigt. Im Rückblick auf die Zeitspanne 1991 bis 2024 ist klar zu erkennen, dass die nFK im Sommer (Juni, Juli, August / orangefarbene Balken in der Abbildung) deutlich niedriger liegt als zu anderen Jahreszeiten. Die Werte der Sommermonate schwanken meist um ca. 60 % nFK, wobei sie in den vergangenen Jahren mehrfach auf nur ca. 50 % nFK absanken. Es ist davon auszugehen, dass es im Stadtgebiet mindestens lokal Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress standen.

⁴ Da die Tropennächte vom DWD nicht als flächendeckende Raster veröffentlicht werden, beziehen sich die Angaben der Tropennächte auf die DWD Station Münster-Osnabrück (DWD, 2024a)

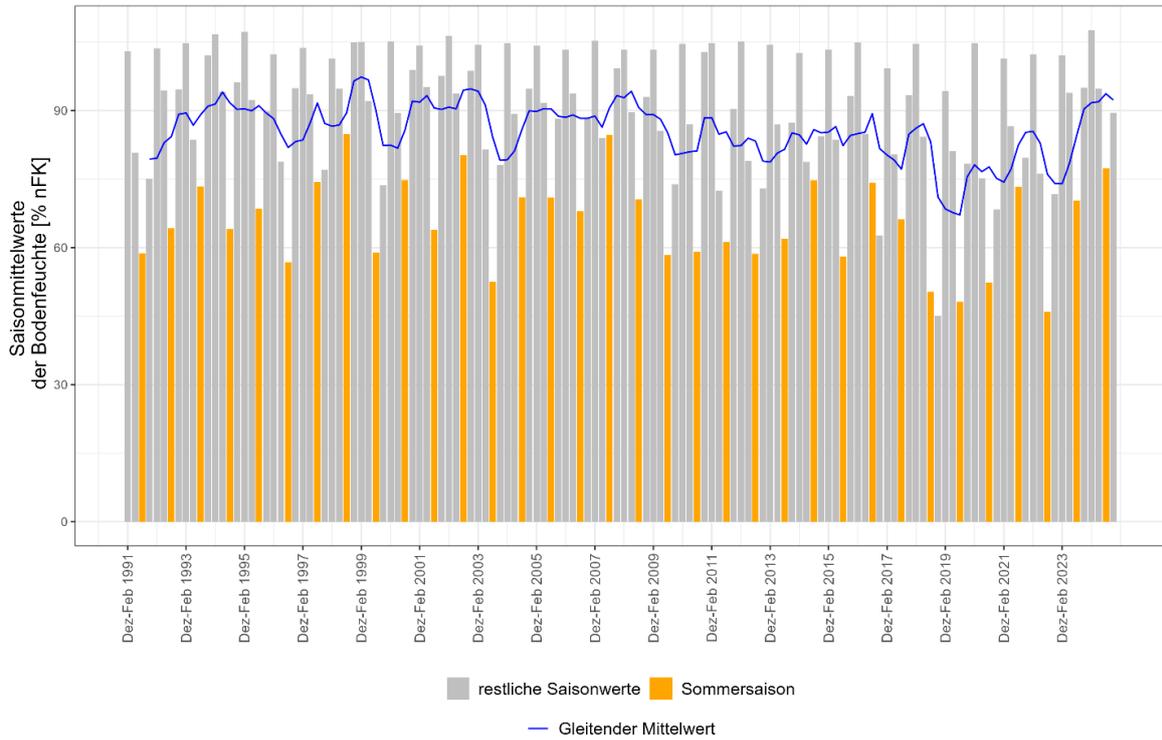


Abbildung 16: Langjährige Entwicklung der saisonalen Mittelwerte der Bodenfeuchte in Münster im Zeitraum 1991 bis 2024 (eigene Berechnung nach DWD, 2024b)

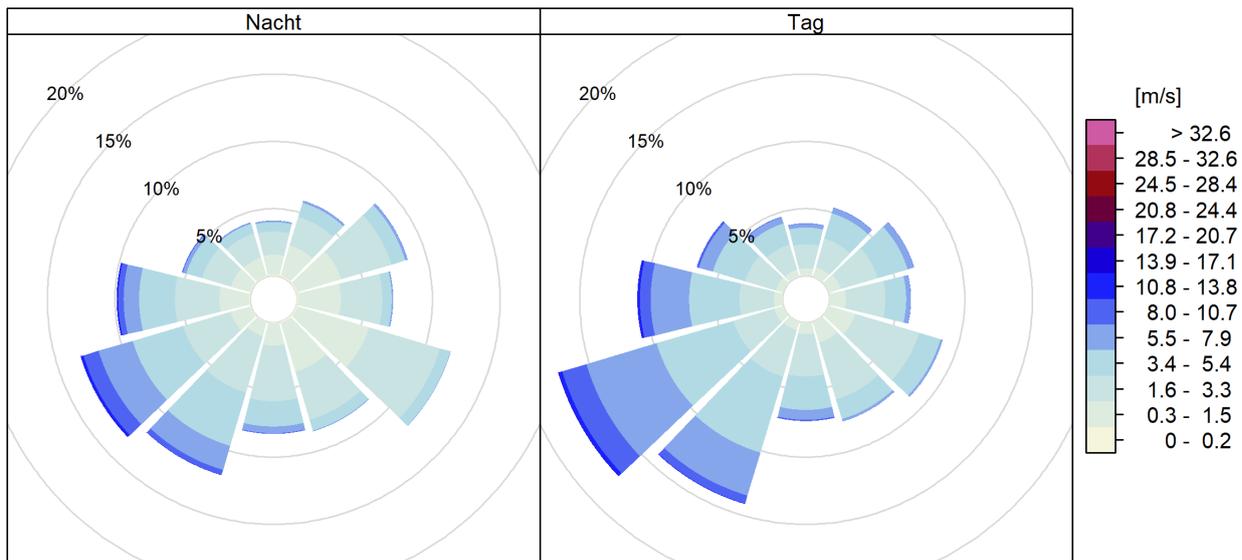


Abbildung 17: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Münster für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Münster-Osnabrück (DWD, 2024a)

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Münster-Osnabrück (am Flughafen) dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Münster. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit für 1991 - 2020 liegt bei 3,3 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 3,3 m/s am häufigsten auftraten (leichte Brise). In den Tagstunden dominieren Winde aus südwestlicher Richtung, während nachts der Wind auch etwas häufiger aus südöstlichen Richtungen weht (Abbildung 17).



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.

Um autochthone Nächte zu ermitteln braucht es Angaben zur stündlichen Windgeschwindigkeit, zur Temperatur und zum Bedeckungsgrad (Berechnung nach Augter, 1997). Daher wurden diese für die nahe gelegene repräsentative Station Münster-Osnabrück des Deutschen Wetterdiensts (DWD) ausgewertet. Dort traten im langjährigen Mittel der Jahre 1991 - 2020 rund 76 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf (Abbildung 18). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im Mittel rund 8 windschwache Strahlungsnächte pro Monat beobachtet, was einem Anteil von 27,7 % entspricht – etwas mehr als jede vierte Sommer-nacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen. Die Station Münster-Osnabrück liegt am dortigen Flug-hafen. Sie ist, wie die meisten DWD Stationen, WMO-konform⁵ aufgebaut und liegt nicht im urbanen Stadtge-biet, sondern im rural geprägten Rand der Stadt. Daher kann es zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Auftrittshäufigkeit autochthoner Nächte in der Innenstadt von Münster kommen. Die obenstehenden Anga-ben sind daher als Mindestmaß zu verstehen. Einen Hinweis auf die im Sommer 2024 in Münster aufgetrete-nen autochthonen Nächte geben die Ergebnisse der Messkampagne (Kap. 6.2).

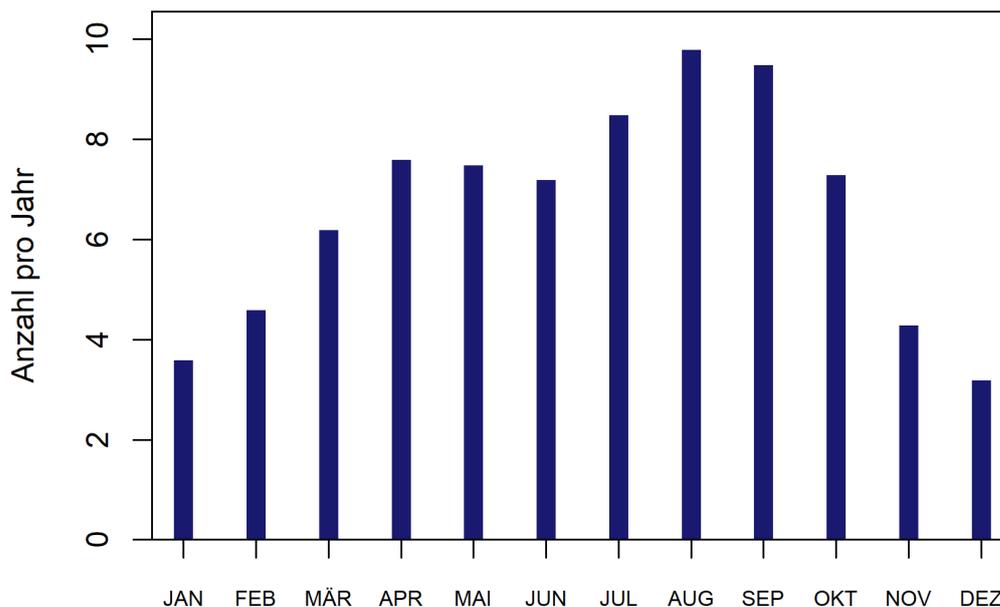


Abbildung 18: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Münster (ca. 76 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der nächstgelegenen geeigneten DWD-Station Münster-Osnabrück (DWD, 2024a)

⁵ Nach Vorgaben der World Meteorological Organization (WMO) gestaltete Messstationen befinden sich in Deutschland meist auf flachem Terrain, fernab von Gebäuden oder größeren Waldflächen und auf Rasenflächen, um eine langzeitige Vergleichbarkeit zwischen den Stationen herstellen zu können.

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Alle ausgewerteten RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Münster bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 19 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 Minimumtemperaturen⁶ (siehe Tabelle 3 & Abb. A 3 im Anhang).

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

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 19 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). Die in diesem Kapitel beschriebenen Änderungen der klimatischen Parameter werden, wie in Kapitel 4.1 erläutert, im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 angegeben.

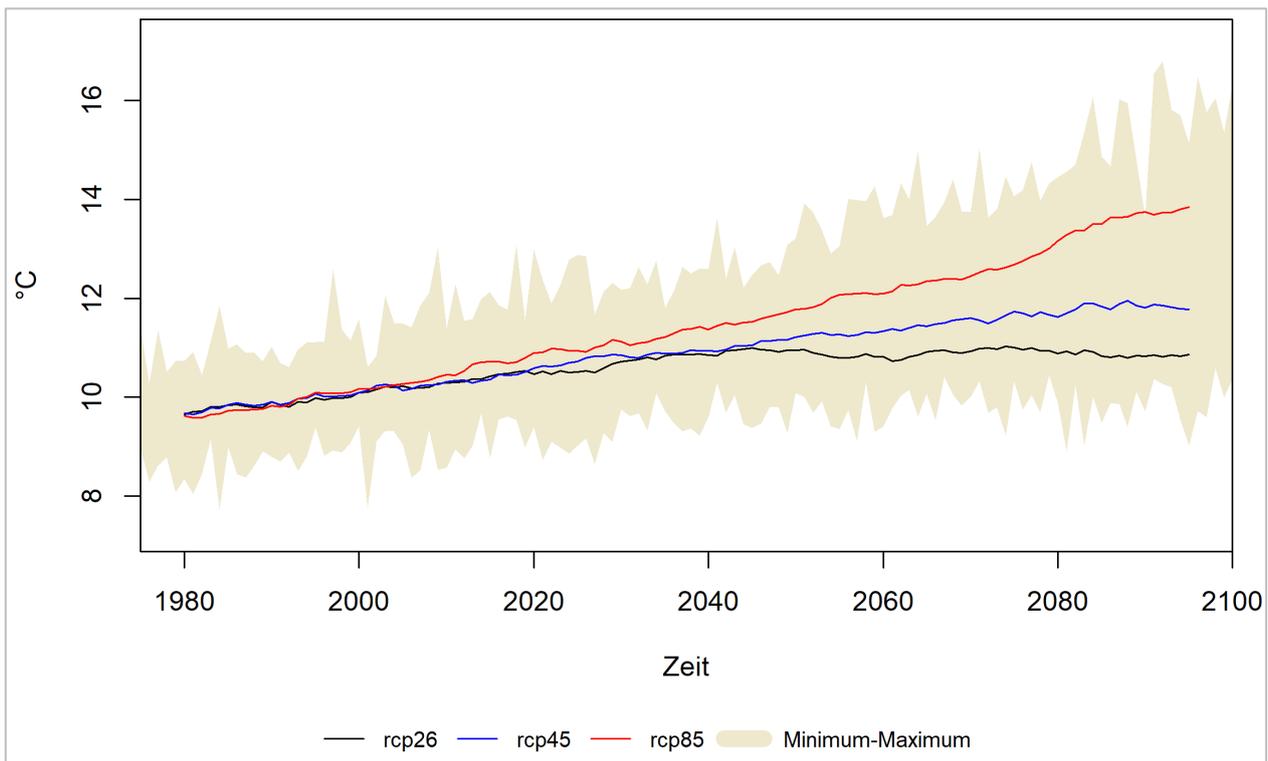


Abbildung 19: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Münster (ausgewählte RCP-Szenarien, eigene Berechnung nach EURO-CORDEX-Daten des DWD, 2024c).

⁶ Minimum- bzw. Maximumtemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.



Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Münster (P 0 / 100 = Minimum/Maximum, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2031 – 2060			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,6	1	1,4	0,6	1,1	1,4	0,5	1	1,5
	RCP 4.5	0,5	1,1	1,9	0,6	1,4	2,1	1,2	2	3
	RCP 8.5	0,6	1,4	2,1	1	1,8	2,5	2,4	3,6	4,9
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	2	2,8	0	2	3,2	1	2	3,5
	RCP 4.5	0,4	2,5	3,6	0,6	3,2	5	2,1	3,8	5,8
	RCP 8.5	-0,1	2,3	4,5	0,6	2,9	5,5	3,7	6	9,3
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,1	1,3	3,6	-0,3	1,4	3,2	-0,5	1,6	4
	RCP 4.5	0,5	1,4	3	0,1	1,7	3,8	0,7	2,5	4,9
	RCP 8.5	0,3	1,5	2,8	0,8	2	4,1	3	5,1	8,7

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar (ohne Abb.), jedoch treten in Münster im Herbst tendenziell größere Temperaturänderungen auf als im Rest des Jahres (Abbildung 20). Dieses Muster zeigen alle RCP-Szenarien (ohne Abbildung), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen).

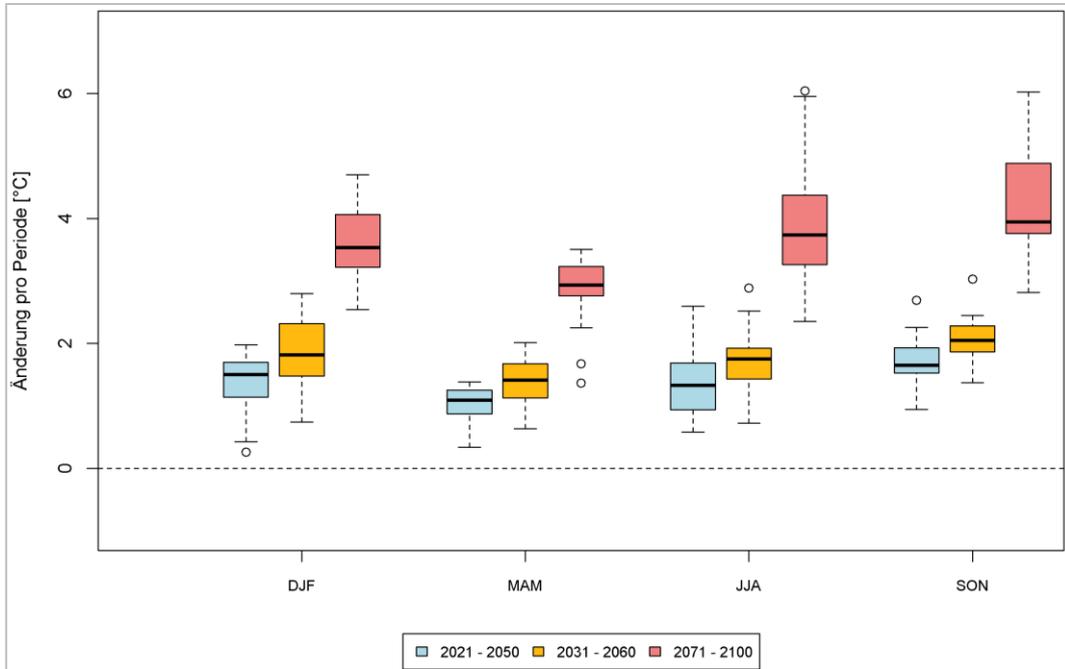


Abbildung 20: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen in Münster im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 (bezogen auf das Szenario RCP 8.5). Die X-Achse gibt die Abkürzungen für die Monate bzw. Jahreszeiten aus (bspw. JJA = Juni-Juli-August).

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen künftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende



des Jahrhunderts hin im Mittel mit **19 zusätzlichen Heißen Tagen pro Jahr** zu rechnen, während diese in der Referenzperiode nur sechsmal jährlich auftraten (1971 – 2000).

Tropennächte treten in Münster derzeit relativ selten auf (im Mittel weniger als eine Tropennacht pro Jahr). In der mittleren Zukunft (2031 – 2060) wird im RCP 8.5 zusätzlich rund eine Tropennacht 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, prognostiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären in der 2. Zukunftsperiode im Mittel **sieben zusätzliche Tropennächte pro Jahr** in Münster möglich. Es 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. Es existieren verschiedene Definitionen für solche Ereignisse z. B. nach Vorgabe des DWD (VDI 3787, Blatt 7, 2024) oder nach WMO (WMO, 2017), letztere war Grundlage für die Berechnung im vorliegenden Bericht. 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 Münster zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um bis zu vier Tage (ohne Abb.).

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer **Abnahme an Frost- und Eistagen**. In Münster wurden im langjährigen Mittel 55 Frosttage bzw. 11 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 25 Frosttage bzw. 4 Eistage auftreten.

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

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Münster (P 0 / 100 = Minimum / Maximum, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2021 – 2050			2031 – 2060			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Sommertage (T _{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	3,4	12	23,8	4,1	12	26,2	5,7	12,7	23,7
	RCP 4.5	5,5	13,1	26,3	6,1	13,4	32,1	11,7	19,7	39,9
	RCP 8.5	6,4	15,1	31,9	13,8	19	36,6	21,6	43,1	76,5
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	2,5	4,2	9,7	2	4,3	8,6	2,2	5,5	10,4
	RCP 4.5	1,9	5,2	11	2,7	5,2	13,6	4,1	7,4	18
	RCP 8.5	2,7	5,2	12,7	4,3	8,1	15,2	11,2	19,3	43,6
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,1	0,2	1,3	0	0,2	0,8	0,1	0,5	1,4
	RCP 4.5	0	0,4	1,3	0,2	0,4	2,8	0,3	1,2	6,9
	RCP 8.5	0	0,5	1,6	0,1	1	3,6	3,4	6,9	27,2
Frosttage (T _{min} < 0°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	-12,2	-3,1	-0,6	-10,3	-4,9	-0,8	-12	-3	1
	RCP 4.5	-16,8	-5,5	1,1	-22,1	-8,2	-1,3	-26,4	-15,5	-5,7
	RCP 8.5	-16,9	-7,5	1,8	-24,3	-13,7	-4,2	-44,3	-30,2	-23,8
Eistage	RCP 2.6	-3,3	-2,4	-0,2	-3,2	-2,1	0,1	-5,3	-3	0,4



(T _{max} < 0°C) [n/Jahr]	RCP 4.5	-5	-2	0,8	-5,8	-2,9	0,5	-7,5	-4,7	-0,4
	RCP 8.5	-5,1	-3,2	1,4	-6,1	-4,1	-0,5	-7,9	-6	-3,6

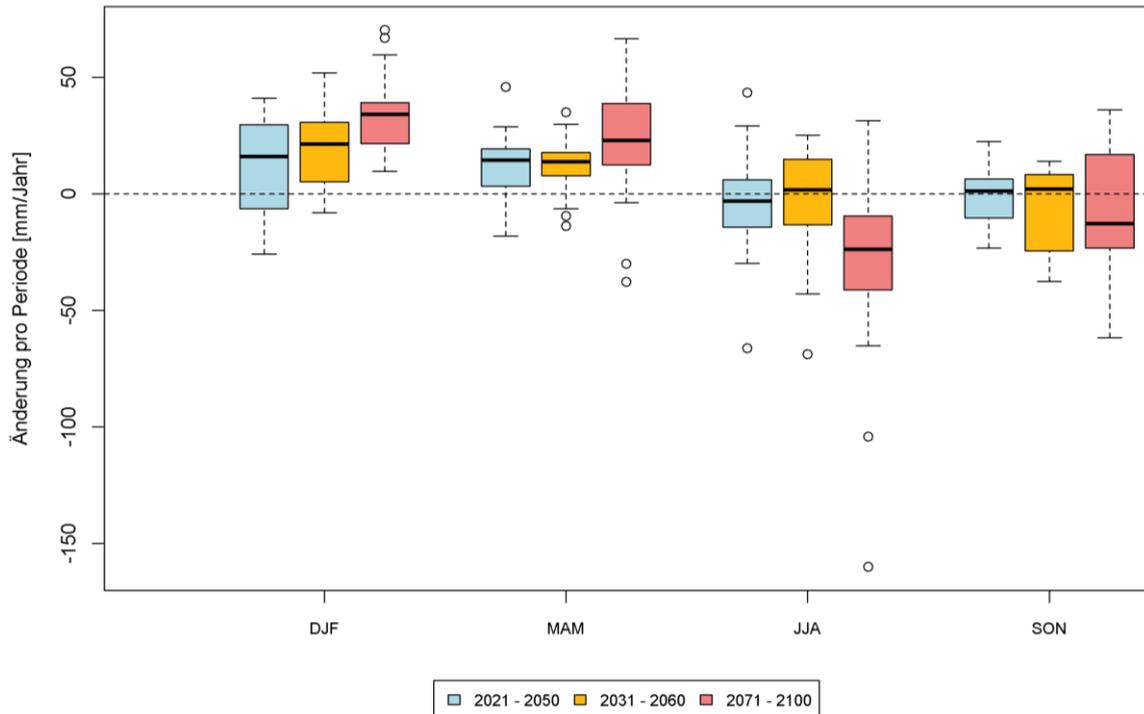


Abbildung 21: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in den drei Zukunftsperioden für Münster (RCP 8.5). Die X-Achse gibt die Abkürzungen für die Monate bzw. Jahreszeiten aus (bspw. JJA = Juni-Juli-August)

In Bezug auf die zukünftige Entwicklung von **Trockenperioden** sind nur bedingt Aussagen aus den EURO-CORDEX-Daten möglich, da der Parameter Bodenfeuchte nicht im Datensatz enthalten ist.

Als Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Bei einer saisonalen Betrachtung weist die klimatische Wasserbilanz im RCP-Szenario 8.5 einen Rückgang in den Sommermonaten auf, der zum Ende des Jahrhunderts am deutlichsten ausfällt (Abbildung 21).

In Bezug auf den Sommer zeichnet sich damit eine verschärfende Trockenheit ab, wobei davon auszugehen ist, dass sie sich auch auf die Bodenfeuchte auswirken wird.



5. Analysemethoden

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die 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, 2012a, 2012b, 2014, 2017; Gross et al., 2002)

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 (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
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Stadt Münster und angrenzendes Umland rd. 9,9 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

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

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

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
20	Gebäude	individuell
21	Gebäude mit Dachbegrünung	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 22 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, 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.

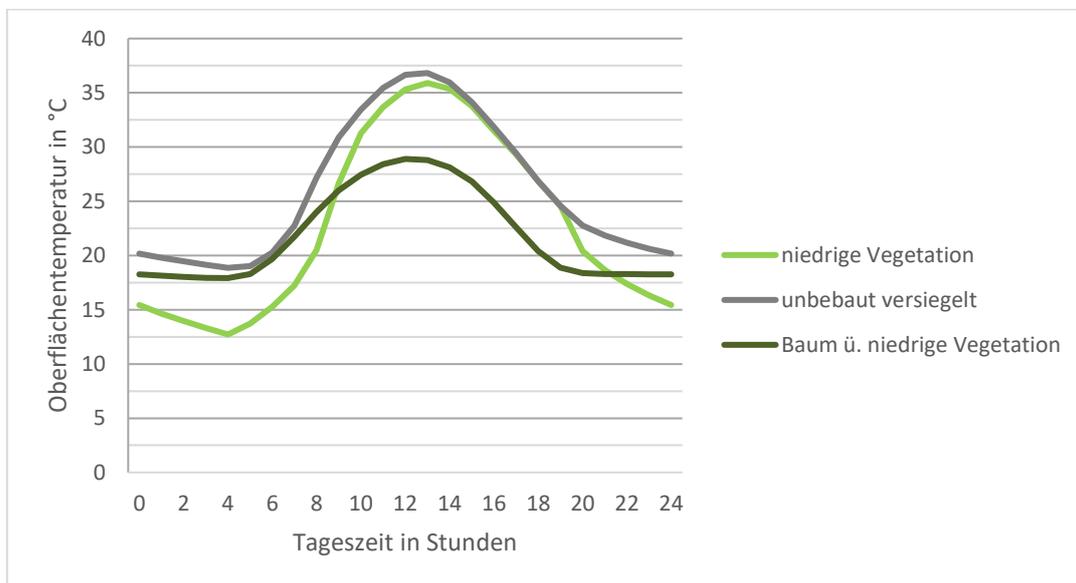


Abbildung 22: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese 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 23 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

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

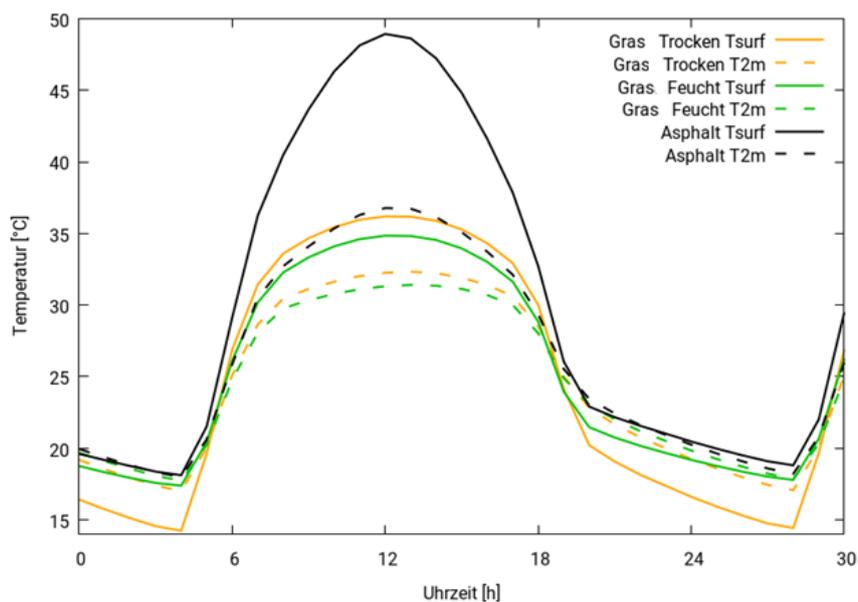


Abbildung 23: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

5.2 SZENARIENENTWICKLUNG

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

Im Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt- bzw. regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte oder eines Masterplans Stadtklimawandel erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

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

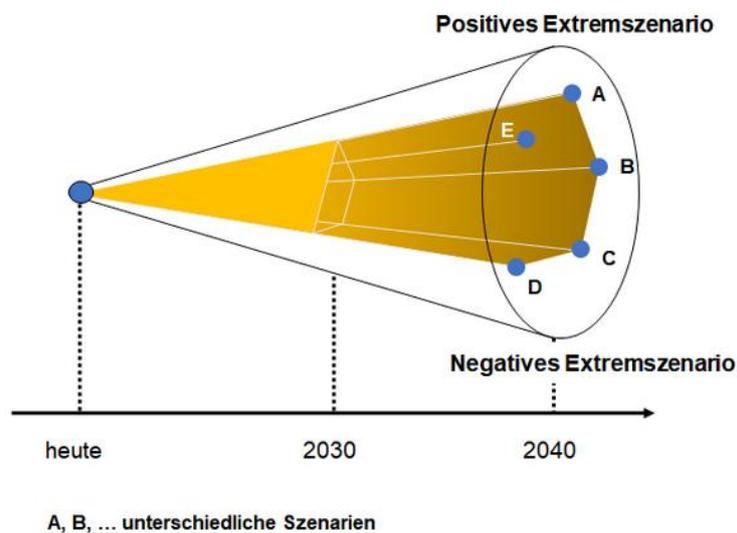


Abbildung 24: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Im vorliegenden Fall wurden unter Beteiligung der PAG zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont eins ist die Periode 2021 – 2050, mit Fokusjahr 2035 (Tabelle 6). Zielhorizont zwei ist die Periode 2031 – 2060, mit Fokusjahr 2045. Die Szenarien basieren auf dem 85. Perzentil des RCP-Szenarios 8.5. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 wurde zur Antriebstemperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D hinzugerechnet (+1,8 K bzw. +2,2 K, fettgeschrieben in Tabelle 6).



Tabelle 6: Projizierte Zunahme der mittleren Temperatur in den Sommermonaten (J/J/A) für verschiedene Zieljahre gegenüber 1971-2000 für den Raum Münster.

	Zielhorizont 2021-2050 (Mitte = 2035)			Zielhorizont 2031-2060 (Mitte = 2045)		
	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
15. Perzentil	0,6	0,8	0,9	0,5	1,0	1,3
Median	1,0	1,1	1,3	1,1	1,2	1,8
85. Perzentil	1,3	1,3	1,8	1,3	1,5	2,2

Für beide Szenarien wurden zusätzlich die Auswirkungen einer zunehmend abnehmenden Bodenfeuchte berücksichtigt (vgl. Abbildung 25). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, und für niedrige Vegetation entsprechend am Tage der kühlende Effekt von Verdunstung ausfällt, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind. Die nFK wurde analog zum Vorgehen in der landesweiten Klimaanalyse NRW auf individuelle Werte, in Abhängigkeit von einer Modellierung des Bodenfeuchtedefizites mit dem Wasserhaushalts-Modell mGROWA, von flächendeckend 60 % im Ist-Zustand auf einen individuellen Wert zwischen 30 % und 59 % heruntersetzt. Die Bodenfeuchte hat dabei nur auf die FITNAH Nutzungsklassen 9 (niedrige Vegetation / Rasen) und 25 (Baum über Rasen) einen Einfluss. Des Weiteren wurde ein gewisser Ausfall der Grünversorgung in Form eines Nettoverlustes von 6 bzw. 8 % aller Bäume im Stadtgebiet angenommen.

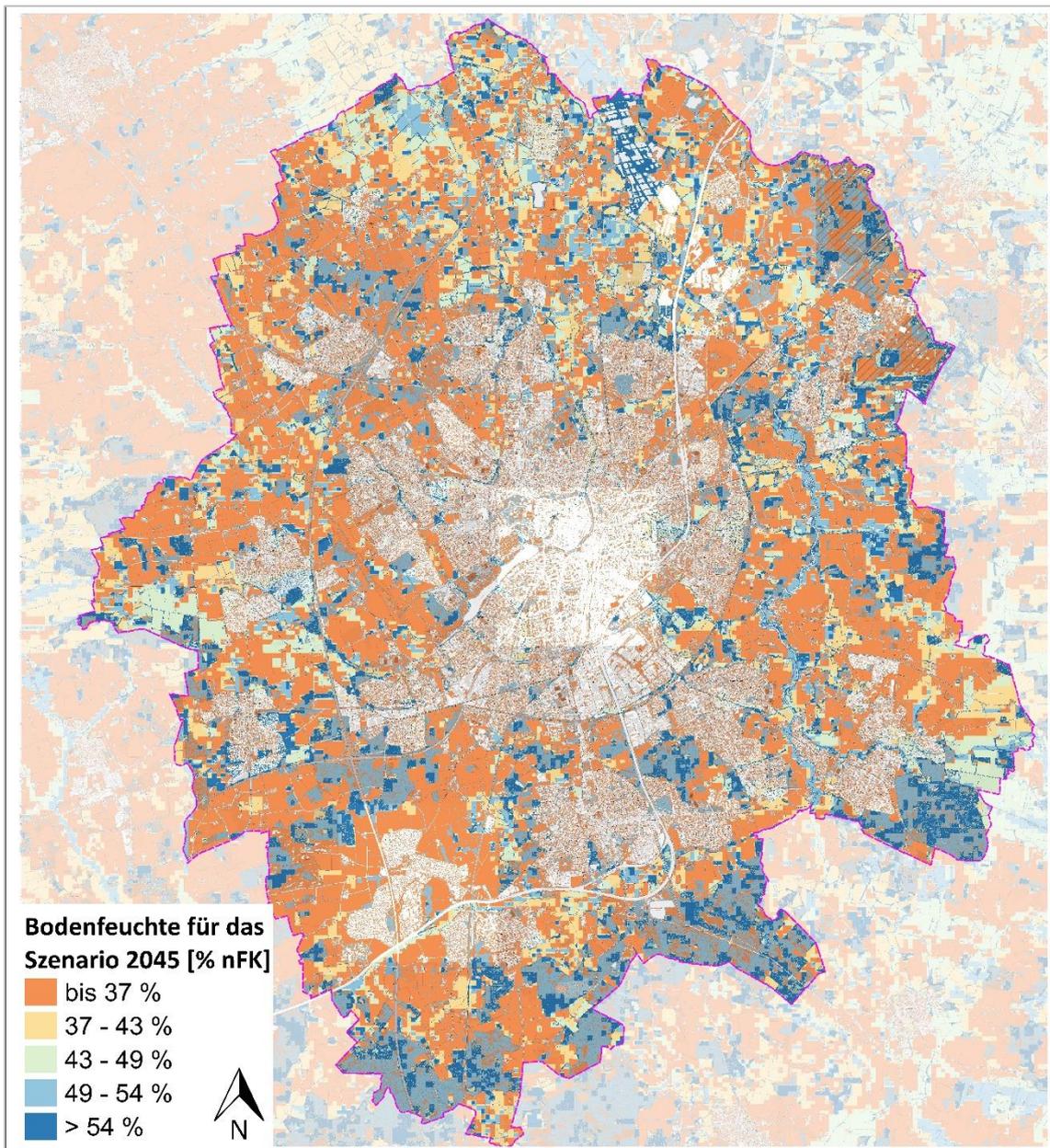


Abbildung 25: Abgeleitete Bodenfeuchte (in % nFK) für das Zukunftsszenario 2045 für die Nutzungsklassen Freifläche und Baum über Freifläche.

Für die Zukunftsszenarien wurden eine Reihe städtebaulicher Entwicklungsflächen, für die meist keine konkrete Planung vorlag, mit Hilfe von Mischpixeln in die Modelleingangsdaten übernommen (Flächenliste siehe Tabelle 31 im Anhang, Methodik siehe Kapitel Aufbereitung der Modelleingangsdaten). Außerdem wurde für das Szenario 2045 (S2) eine Nachverdichtung der Stadt durch automatisierte Bebauung von heute bekannten Baulücken (340 Stück) angenommen. Im Szenario S2 wurden mehr Flächen aufgenommen, als nach heutiger Abschätzung faktisch benötigt und daher entwickelt werden. Da noch nicht klar ist, welche dieser Flächen später tatsächlich entwickelt werden, wurden – um die jeweilige mikroklimatische Situation abschätzen zu können – alle Flächen in die Modellierung eingestellt.

Es wurden keine Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation modelliert. Ansatz ist hier, einzig die Auswirkungen des Klimawandels und der städtebaulichen Entwicklung (letztere begrenzt auf oben genannte Flächen) auf die zukünftige bioklimatische Situation zu untersuchen, um entsprechend Maßnahmen zu empfehlen. Tabelle 7 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.



Tabelle 7: Entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Status Quo, Ist-Zustand	<ul style="list-style-type: none"> ■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von Anfang 2024 ■ 334 B-Pläne und Bauprojekte überprüft & ggf. eingepflegt, die derzeit oder in Kürze umgesetzt werden
Szenario 2035 (S1)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines starken Temperaturänderungssignals von 1,8 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 8.5, 85. Perzentil) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte ■ Ausfall von 6 % aller Bäume im Stadtgebiet ■ 42 städtebauliche Entwicklungsflächen
Szenario 2045 (S2)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Berücksichtigung eines starken Temperaturänderungssignals von 2,2 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 8.5, 85. Perzentil) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte ■ Ausfall von 8 % aller Bäume im Stadtgebiet ■ 36 Städtebauliche Entwicklungsflächen ■ Füllung von 340 heute bekannten Baulücken

5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadtgebiet von Münster sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers (Ausschnitt mit Fokus auf die Stadtgrenze: Abbildung 26).



Abbildung 26: Stadtgrenze (pinke Linie); Hintergrund: Luftbild Mai / Juni 2024 (Geobasis NRW).



Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert. Ein numerisches Modell wie FITNAH 3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind:

- **Geländehöhe**
 - ↳ Digitales Geländemodell (Auflösung: 1m; Stand: 2019)
- **Landnutzung**
 - ↳ RGBI-Luftbilder⁷ (Auflösung: 0,35 m; Stand: 2022)
 - ↳ ALKIS Nutzungen (Stand: 2022)
 - ↳ LOD1 Gebäude (Stand: 2023)
 - ↳ städtische Versiegelungskartierung (Stand: 2022)
 - ↳ Bebauungspläne (in Absprache mit der Stadt, bis Ende 2023)
- **Strukturhöhe**
 - ↳ Digitales Oberflächenmodell (DOM) (Auflösung: 1m; Stand: 2019)
 - ↳ LOD1 Gebäude (Stand: 2023)
 - ↳ städtische Baumkartierung (Stand: 2021)
 - ↳ Lärmschutzwände (Stand: ca. 2022)
- **Wassertemperatur „sommerlicher Mittelwert“**
 - ↳ Aasee (Münster): Messreihe 2019 – 2023 → 22,63 °C
 - ↳ Hiltruper See (Münster): Messreihe 2019 – 2023 → 23,46 °C
 - ↳ Pegel Albersloh-Werse (LANUV): Messreihe 2022 – 2023 → 20,14 °C
 - ↳ Dortmund-Ems-Kanal (ELWAS): Messreihe 2015 – 2023 → 21,55 °C

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Landnutzung Münsters wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2019 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Die Datengrundlagen zu Gebäuden stammen jedoch aus dem ersten Quartal 2023 und waren zum Zeitpunkt der Eingangsdatenaufbereitung (Ende 2023) demnach sehr aktuell. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels Orthophotos abgeglichen und auch vom Auftraggeber gegengeprüft. Die Auswirkungen sehr neuer Planvorhaben wurden zum Teil über aktuelle Bebauungspläne berücksichtigt.

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Im Umland von Münster sind die Eingangsdaten teilweise weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen Münster und seinen Nachbarorten hinreichend genau zu erfassen. Darüber hinaus wurde bei der Modellrechnung ein Nesting-Verfahren angewandt, um weitergehende regionale Einflüsse zu berücksichtigen (siehe Kap. 2.3, bzw. Kap. 5.4).

Das Stadtgebiet Münsters erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. 18 km in Ost-West- bzw. ca. 24 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von etwa 302 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 504 km² auf (22,8 km x 26,2 km). Insgesamt wird das Modellgebiet mit ca. 23,6 Mio. Rasterzellen beschrieben, wobei für jede Rasterzelle jeweils eine Information zur Geländehöhe, Landnutzung und Strukturhöhe hinterlegt ist. Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 1m-Auflösung in die für die Modellierung notwendige 5 m-Rasterauflösung gemittelt wurde (Abbildung 27). Im Untersuchungsgebiet treten Höhenunterschiede von ca. 83 Metern auf. Der höchste Punkt innerhalb der Stadtgrenze von Münster liegt

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

auf ca. 100m ü NN. In den Randbereichen des Untersuchungsgebietes steigt das Gelände zum Teil auf bis zu 120m ü. NN an.

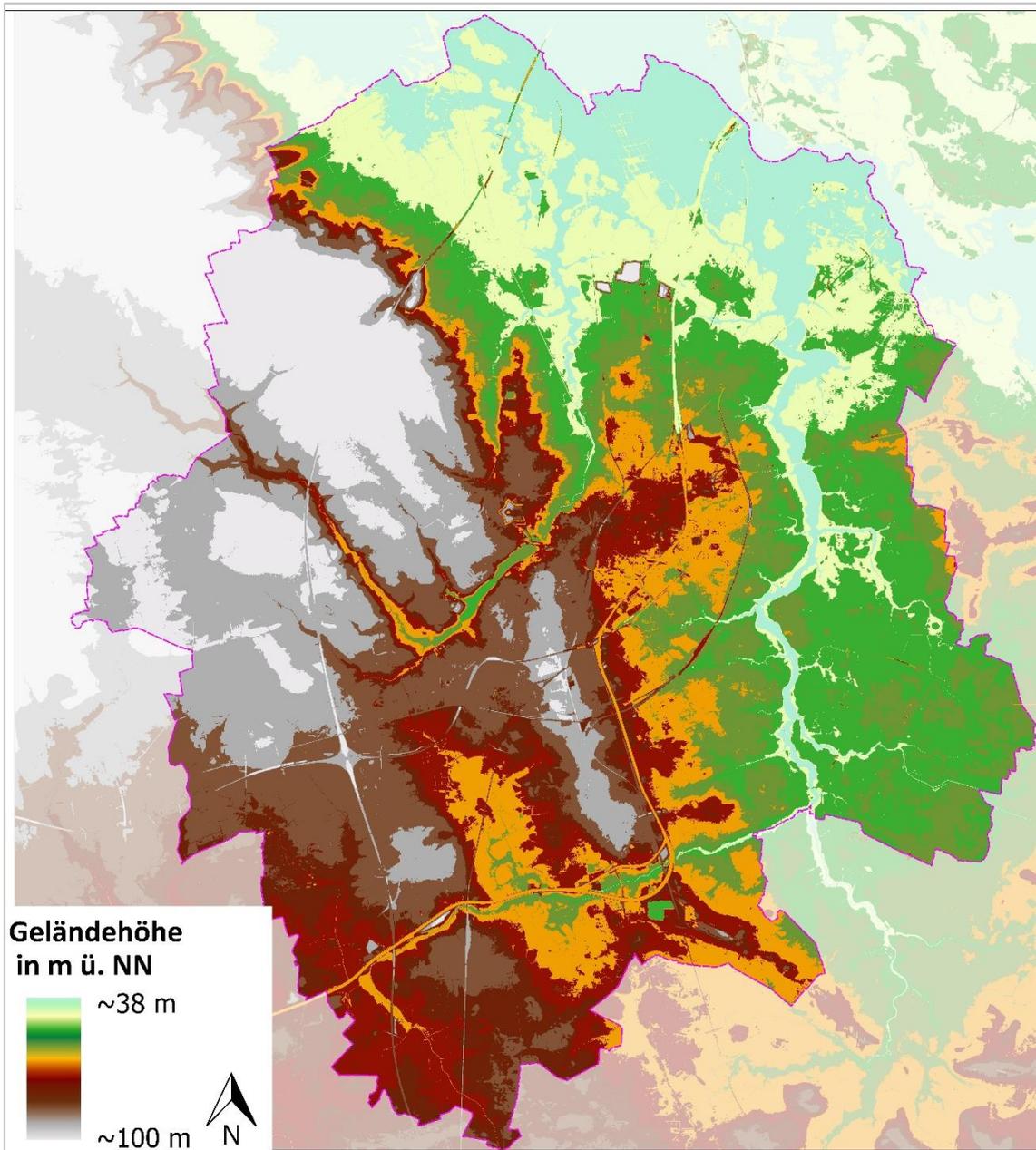


Abbildung 27: Digitales Geländemodell für Münster und Umgebung.

Die Münsteraner Landnutzung wird über 10 verschiedene Nutzungsklassen (Tabelle 5 & Abbildung 28) definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsclassifizierung aufzulösen. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 3 m werden drei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden Bäume über Versiegelung (z.B. Straßenbäume), Bäume über Rasen (z.B. Bäume in Parks) und Bäume über naturfernem Boden (z.B. Bäume neben Gleisanlagen oder Sportplätzen) ausdifferenziert. Für die Stadt Münster lag eine Baumkartierung vor. Für die flächendeckende Beurteilung wurde anhand der weiteren vorliegenden Datengrundlagen ein Baumraster erstellt und mit dem Baumkataster abgeglichen. Es lagen hochaufgelöste RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2022 in einer Auflösung von 35 cm x 35 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von



0,05 war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Prinzip siehe Abbildung 29). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisierten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert wurden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 5 m x 5 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

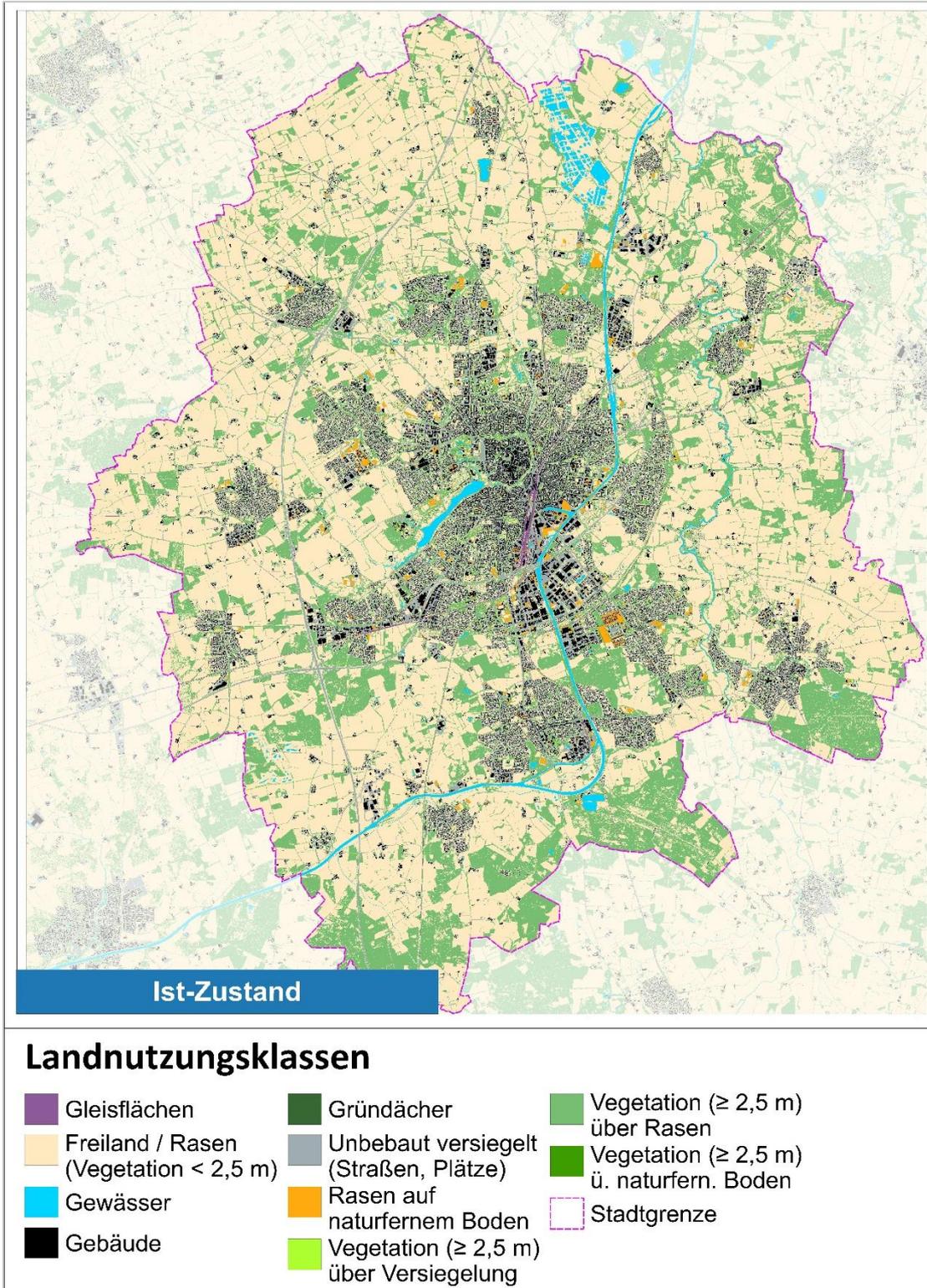


Abbildung 28: Klassifizierte Landnutzung / Stadtstruktur der Bestandssituation in Münster und Umgebung.

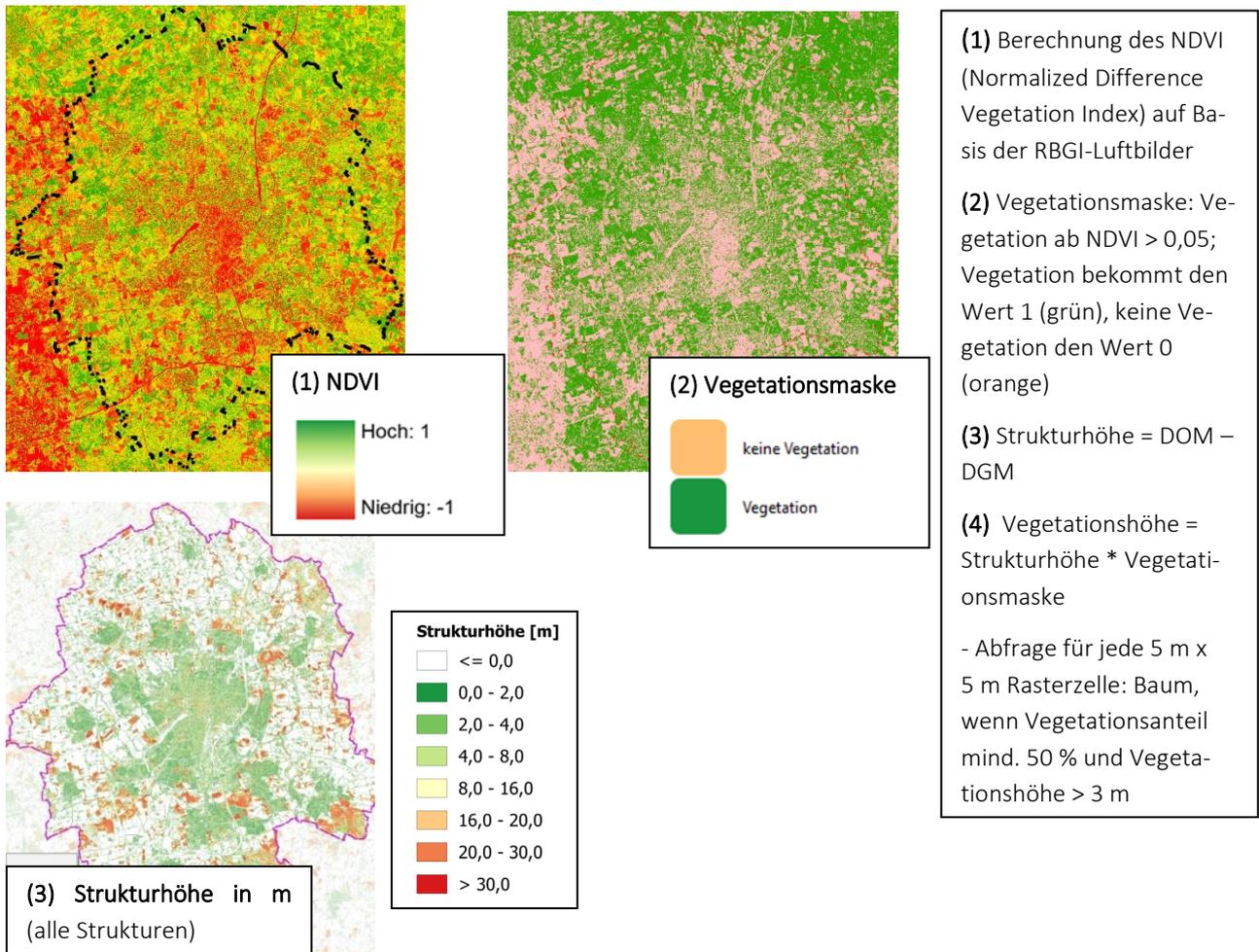


Abbildung 29: Beispielhafte Arbeitsschritte zur Identifikation von Baumstandorten anhand von NDVI-Werten und Strukturhöhen.

Da das verwendete Luftbild (Stand 2022) Bereiche mit aktueller Bautätigkeit zeigte, wurden in Abstimmung mit der Stadt Münster in 334 Gebieten Änderungen des Nutzungsrasters anhand von Bebauungsplänen (BP) oder sonstigen Planunterlagen in die FITNAH-Landnutzung für den Ist-Zustand eingearbeitet (Prinzip in Abbildung 30).



Abbildung 30: Beispielhafte Überführung der Informationen eines B-Plans und eines Städtebaulichen Entwurfs in das FITNAH-Nutzungsraster.



Der Landnutzung für die **Zukunftssituation** liegt an erster Stelle diejenige des Status Quo zugrunde. In den in Tabelle 31 beschriebenen Gebieten wurde allerdings eine mögliche Bebauung auf Grundlage verschiedener Quellen (Bauleitplanung, Gewerbeflächenentwicklungskonzept; Integriertes Flächenmanagement (IFM)) angenommen (vgl. Kap. 5.2).

Da für diese Flächen noch keine weitergehenden Konzeptionen, städtebaulichen Entwürfe oder genauere Daten zu Entwicklungsumfang und Intensität existieren, wurden allgemeine Parameter zu Grunde gelegt. Die Flächen wurden in Gruppen ähnlicher zu erwartender Bebauungsdichte eingeteilt. Mit Hilfe von Flächenzwillingen, also Vorbildern aus der bestehenden Stadtstruktur, wurden dann statistische Verteilungen der Landnutzungsklassen und Gebäudehöhen für diese Dichteklassen abgeleitet.

Die Einarbeitung der Siedlungsentwicklungsflächen erfolgte dann über den Mischpixelansatz. Hierfür wurden die prozentualen Anteile der FITNAH-Nutzungsklassen und die Gebäudehöhenangaben verwendet. Neue Bäume wurden standardmäßig auf 6 m gesetzt. Bäume, die in Szenario 2035 neu hinzugekommen waren, wurden für das Szenario 2045 auf 12m hochgestuft. Eine Aufstellung der prozentualen Anteile der Nutzungsklassen zu den Dichteklassen ist in Tabelle 8 abgebildet.

Tabelle 8: Prozentuale Flächenanteile der FITNAH-Nutzungsklassen für die jeweiligen potenziellen Entwicklungsflächen im Zukunftsszenario

Dichteklasse	Name der Flächenzwillinge	Nutzungsklasse in Prozent				Gebäudehöhe in Meter
		Rasen	Gebäude	unbebaut versiegelt	Baum über Rasen	
1	Mauritz-Ost – Schmittingheide; Uppenberg – westl. Prins-Claus-Kaserne	25	25	30	15	8
2	Gievenbeck-Südwest – Nördlicher Teil; Gievenbeck – Toppheide, nordwestlicher Teil	30	25	30	10	10
3	Mecklenbeck – Meckmannweg / Schwarzer Kamp; Angelmodde – Schlesienstraße / Albersloher Weg	30	26	30	10	6
4	Gievenbeck – Arnheimweg; Uppenberg – ehem. Lincoln-Kaserne	27	28	31	10	13
5	Gievenbeck – Toppheide, südlicher Teil; Schützenhof – Scheibenstraße; Kinderhaus – westlich Regina-Prothmann-Straße; Kreuzviertel – Schulstraße	27	30	32	8	12



6	Mitte - Steinfurter Str. / südlich Yorkring bzw. nördlich Yorkring	27	32	34	5	14
7	Mitte – Bohlweg; Mitte – Hüfnerstraße / Ring	26	37	34	2	12
8	Gewerbegebiete: Südlich Notulner Landweg; Wolbecker Windmühle	20	28	35	10	8
9	Gewerbegebiete: Loddenheide (östlicher Teil); Zentrum Nord	20	32	35	7	12
10	Gewerbegebiete: Loddenheide (westlicher Teil); Gewerbegebiet – Höltenweg	22	28	40	5	10

In den Zukunftsmodellläufen füllt das FITNAH-Modul „Randomisator“ die Siedlungsentwicklungsflächen rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen aus der Tabelle auf. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen (Abschätzung der Unsicherheit siehe Kap. 5.7). Abbildung 31 zeigt exemplarisch zwei mit dem Randomisator gefüllte Flächen für eine Wohnbebauung und eine Gewerbeentwicklung.



Abbildung 31: Zwei Beispiele für mit dem Mischpixelansatz gefüllte Entwicklungsflächen: links Wohnbebauung, rechts Gewerbegebiet

5.4 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 Münster regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (siehe Kapitel 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 Münster 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 32 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.

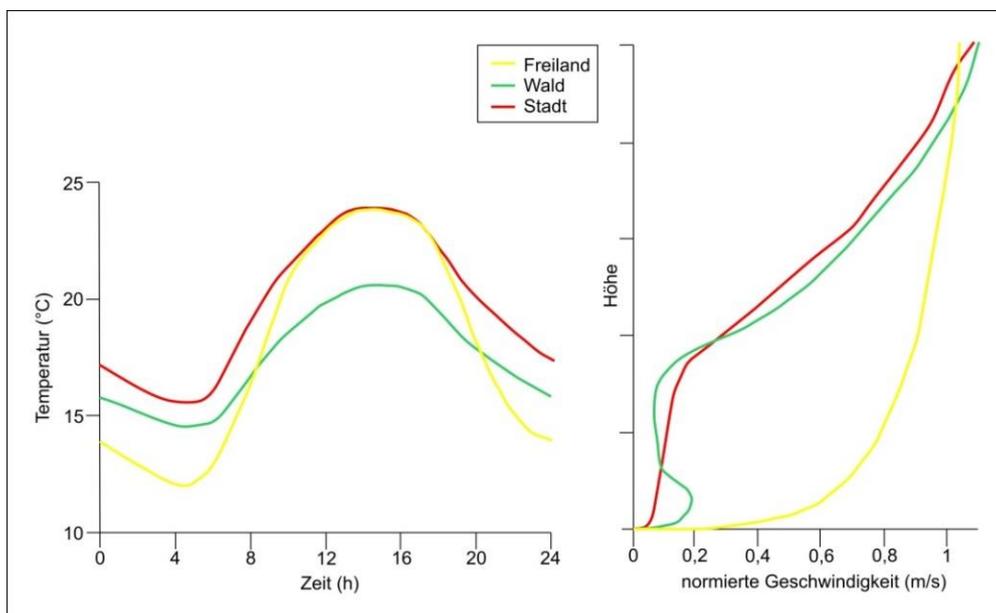


Abbildung 32: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Gross, 1992).

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.

Zur Festlegung der Starttemperatur für die Modellierung des Ist-Zustandes wurden Daten zu Wind, Bedeckungsgrad und Temperatur an der DWD Messstation Münster-Osnabrück ausgewertet (Abbildung). Die so ermittelte Verteilung von 21 Uhr Temperaturen in autochthonen Nächten in den Sommermonaten Juni, Juli, August an Sommertagen ($t_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) für den Zeitraum 1991 – 2020 ergab einen Mittelwert von $19,6 \text{ °C}$, welcher als Starttemperatur festgelegt wurde.

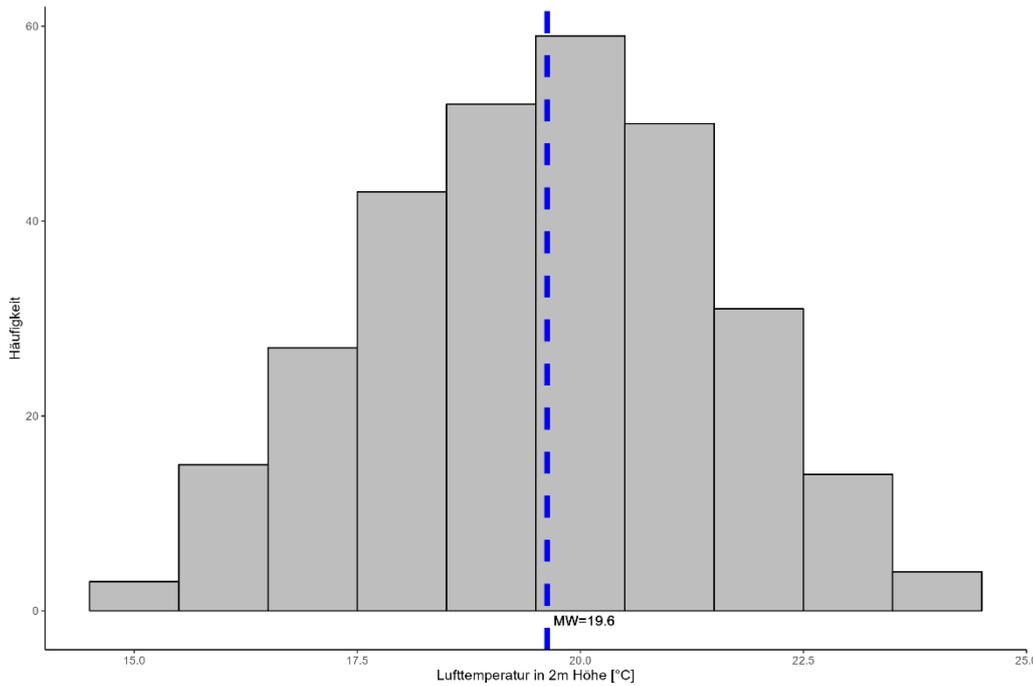


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung der 21-Uhr-Temperatur während austauscharmer Wetterlagen in den Sommermonaten (JJJ) an Sommertagen ($T_{max} \geq 25 \text{ °C}$) an der Station Münster Osnabrück (Anzahl: 298) für die Jahre 1991 - 2020 (eigene Darstellung nach DWD, 2024a)

Um die regionalen Winde im Großraum berücksichtigen zu können, wurde ein Nesting-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus einer Modellrechnung in 200 m Auflösung für ganz Deutschland. Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungs-geschehen an das kleinere Untersuchungsgebiet der Münsteraner Klimaanalyse weitergegeben.

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 9). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte. Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W-Komponenten des Windes) sowie Größen, welche die bodennahe Lufttemperatur beeinflussen, beispielsweise 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]	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 zugrundeliegenden 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 Auswerteniveaus und Auswertzeitpunkte 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 humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertzeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.

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

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



5.6 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, welches 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.

5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätze 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 (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 in anderen Stadtklimamodellen Anwendung findet, die aber selten dieselbe hohe räumliche Auflösung bei gleichzeitiger Modellgebietsgröße erreichen.

Zu den internen Unsicherheiten gehört darüber hinaus auch das sogenannte „Modellrauschen“. Es beschreibt, in welchem Ausmaß die Ergebnisse zwischen mehreren Modellläufen mit demselben Antrieb bzw. denselben Randbedingungen über verschiedene räumliche und zeitliche Skalen variieren. Dieser Punkt ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarien-Rechnungen enthält, also z.B. die Auswirkungen des zukünftig erwarteten Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmen-szenarien abbildet. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modellrauschen bei +/- 0,1 bis



0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei einer Mittelwertbildung auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt das für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltluftthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt das Modellrauschen bei +/- 1 bis 2 % bezogen auf eine flächenhafte Betrachtung. Bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

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

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

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

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

Vergleichbares gilt für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer Stadtbodenkartierung abgeleitet und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Ein gesamtstädtischer Geodatensatz ist für dieses Thema i. d. R. 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.

Bezüglich der Zukunftsmodellierung ist es denkbar, dass sich randomisierte Flächen im Modell ungünstiger darstellen als die spätere tatsächliche Entwicklung. Durch die Zufallsverteilung (vgl. Kap. 5.3) werden keinerlei zusammenhängende Gebäudestrukturen, Straßen, größere Freiräume oder Grünbereiche abgebildet, die ggf. dem Luftaustausch zuträglich sind. Für die Betrachtungsebene der Gesamtstadt sind die durchschnittlichen Wirkungen der Entwicklungsflächen aber repräsentativ.

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

5.8 MESSKAMPAGNE

5.8.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE IN MÜNSTER IM SOMMER 2024 DURCHGEFÜHRTEN MESSUNGEN

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse Münster wurde zusätzlich zur Modellierung mit FITNAH 3D eine umfassende Messkampagne durchgeführt. 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 2024 jeweils an einem ruralen und einem urbanen Messstandort im Stadtgebiet Vertikalsondierungen und Wärmebildaufnahmen mit Drohnen und in einer weiteren Nacht eine mobile Messfahrt 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 Klimakennwertstatistiken des Sommers 2024 anzufertigen. Gleichzeitig ermöglichen die Langzeitmessungen 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 11 zeigt eine genaue Aufstellung der Standorte, Messzeiträume und Instrumentierungen aller im Untersuchungsgebiet durchgeführten Messkampagnen. Die Daten der Stationen Hafenplatz und Steinfurter Straße wurden dabei für die Auswertung im Rahmen der Stadtklimaanalyse von der Universität Münster zur Verfügung gestellt und nicht selbst erhoben. Die



tiefergehende Darstellung aller Standorte, Messgeräte und Methodiken erfolgt in den Kapiteln 5.8.2 (Langzeitmesskampagne), 5.8.3 (Messfahrten) und 5.8.4 (Vertikalsondierungen); die Ergebnisse aller Messkampagnen in Kapitel 6.2.

Tabelle 11: Standorte, Messzeiträume und Instrumentierung während der im Sommer 2024 im Rahmen der Klimaanalyse Münster durchgeführten meteorologischen Messkampagne.

Untersuchung	Standort (Koordinaten)	Auswertezeit- raum	Uhrzeit MESZ	Höhe über Grund	Messgrößen ⁸	Auflösung der Messung
Urbane Messstation	Hörsterstraße (51.575275°N, 7.375725°O)	01.06.2024- 31.08.2024	-	2 m, 10 m 10 m	T, rH WS, WD	1 s intern auf 10 min aggregiert
Rurale Messstation	Zoo (51.565006°N, 7.345348°O)	01.06.2024- 31.08.2024	-	2 m, 10 m 10 m	T, rH WS, WD	1 s intern auf 10 min aggregiert
Messstation Hafenplatz	Hafenplatz (51.57331°N, 7.381617°O)	01.06.2024- 31.08.2024	-	3 m 3,5 m	T, rH WS, WD	1 m intern auf 10 min aggregiert
Messstation Steinfurter Str.	Steinfurter Straße (51.584846°N, 7.355731°O)	01.06.2024- 31.08.2024	-	2 m 2 m	T, rH WS, WD	10 min
Messfahrt 2. Nachthälfte	-	27.06.2024	02:40 – 05:00	1,5 m	T	1s (ca. 8 m)
Vertikalsondierung urban	Hörsterstraße (51.575275°N, 7.375725°O)	25./26.06.2024	13:00 & 03:00	bis 120 m	T, rH, T _{Surf} , Foto	1 s (1 m vertikal)
Vertikalsondierung rural	Zoo (51.565006°N, 7.345348°O)	25./26.06.2024	14:00 & 04:00	bis 120 m	T, rH, T _{Surf} , Foto	1 s (1 m vertikal)

5.8.2 LANGZEITMESSKAMPAGNE (01.06.-31.08.2024)

STANDORTE DER LANGZEITMESSKAMPAGNE

Für die Langzeitmesskampagne vom 01.06.-31.08.2024 wurden zusätzlich zu den bestehenden Messstationen an der Steinfurter Straße und an dem Hafenplatz temporär je ein weiterer urbaner und ruraler Standort gewählt, um den Unterschied zwischen Stadt und Umland klimatologisch zu vermessen. Der ca. 57 m ü. NHN gelegene urbane Standort befand sich im nordöstlichen Bereich des innerstädtischen Parkplatzes an der Hörsterstraße (s. Abbildung). Der direkte Untergrund der Station bestand aus einem Gemisch aus Schotter und Erde und war vereinzelt spärlich mit Gräsern bewachsen. Im unmittelbaren Umfeld der Station befindet sich in westlicher bis südlicher Richtung ein vollversiegelter Parkplatz, sowie in nördlicher bis östlicher Richtung Wohnbebauung. Somit konnte ein geeigneter urbaner Standort gewählt werden, der sich aufgrund des angrenzenden Parkplatzes über den Großteil des Tages weitgehend unverschattet zeigt und entsprechend aufheizt, während in der Nachtsituation die Durchlüftungssituation durch die angrenzende Bebauung gestört ist.

⁸ T = Lufttemperatur, rH = relative Luftfeuchte, WS = wind speed (Windgeschwindigkeit), WD = wind direction (Windrichtung), T_{Surf} = Oberflächentemperatur



Abbildung 34: Urbaner Standort der Langzeitmessung auf dem Parkplatz an der Hörsterstraße in Münster als Schrägaufnahme mit Blickrichtung Ost aus 100 m Höhe; pinker Kreis markiert den Standort (links) und Aufbau des Messmastes mit Blickrichtung Nord (rechts) (Bildquellen: GEO-NET).

Die rurale Klimamessstation wurde am südwestlichen Rand des Stadtgebietes von Münster auf einer Wiese des Ausweichparkplatzes am Zoo auf ca. 60 m ü. NHN installiert (s. Abbildung 35). Der Untergrund bestand aus einer Wiese mit natürlichem Erdreich. Rund um die Wiese schließen in östlicher als auch südlicher Richtung in einer Entfernung von ca. 120 bis 150 m ein bewaldeter Bereich an. In nördlicher Richtung grenzen Agrarflächen an. Westlich grenzt in ca. 50 m Entfernung ein 20 bis 40 m breiter baumbestandener Grünstreifen an den Messstandort an. Die nächsten überbauten Strukturen in der Umgebung sind ein vereinzelter Hof, ca. 160 m nordwestlich vom Messstandort entfernt. Dem naturnahen und grüingeprägten Umfeld entsprechend ist eine gute nächtliche Auskühlung sowie Produktion von Kaltluft zu erwarten. Dementsprechend ist der Standort für eine rurale Referenzstation zur Bewertung der innerstädtischen Wärmeinsel gut geeignet.



Abbildung 35: Ruraler Standort der Langzeitmessung am Zoo im Südwesten von Münster als Schrägaufnahme mit Blickrichtung Nord, aufgenommen aus 100 m Höhe; grüner Kreis markiert den Standort (links) und Aufbau des Messmastens mit Blickrichtung Nordost (rechts) (Bildquellen: GEO-NET).

Am Messstandort „Hafenplatz“ wird von der Universität Münster eine Klimamessstation betrieben, deren meteorologischen Daten im Rahmen der vorliegenden Klimaanalyse zur Verfügung gestellt wurden. Die Station befindet sich südlich der Straße Hafenplatz sowie östlich der Straße Albersloher Weg in einem zentralen und urban geprägten Bereich der Stadt Münster (Abbildung 36). Die urban gelegene Station befindet sich dabei auf einem öffentlichen Platz der überwiegend versiegelte Oberflächen aufweist, jedoch über vereinzelte Grünflächen sowie vereinzelten Baumbestand verfügt und von mehrgeschossiger Bebauung umgeben ist. Die Mess-technik ist dabei an einer Straßenlaterne installiert. Dies hat zur Folge, dass der unmittelbare Untergrund der Messstation, als versiegelt angesehen werden kann und sich entsprechend stark unter sommerlichen Bedingungen aufheizt. Im östlichen Bereich grenzt in ca. 90 m Entfernung das Hafenbecken an den Standort an.



Abbildung 36: Standort der Langzeitmessung am Hafenplatz als Luftbildaufnahme (Bildquelle: Geobasis NRW); orangener Kreis markiert den Standort (links) und Standort des Messmasten mit Blickrichtung Ost (rechts, Bildquelle: GEO-NET).

Eine weitere Messstation der Universität Münster befindet sich am Messstandort „Steinfurter Straße“. Diese Station liegt im nordwestlichen Außenbereich der Stadt Münster, auf einer Grünfläche nordöstlich der Steinfurter Straße (siehe Abbildung 37). Die Umgebung der Station ist überwiegend von großflächigen Agrarflächen geprägt. Direkt nördlich grenzt ein etwa 20 Meter breiter verbuschter Grünstreifen an, während sich zwei einzelne Höfe in einer Entfernung von etwa 70 bis 120 Metern in östlicher Richtung befinden. Die Messtechnik der Station ist direkt auf einer Wiese installiert. Dadurch bleibt der unmittelbare Untergrund natürlich und kühlt nachts entsprechend stark aus.

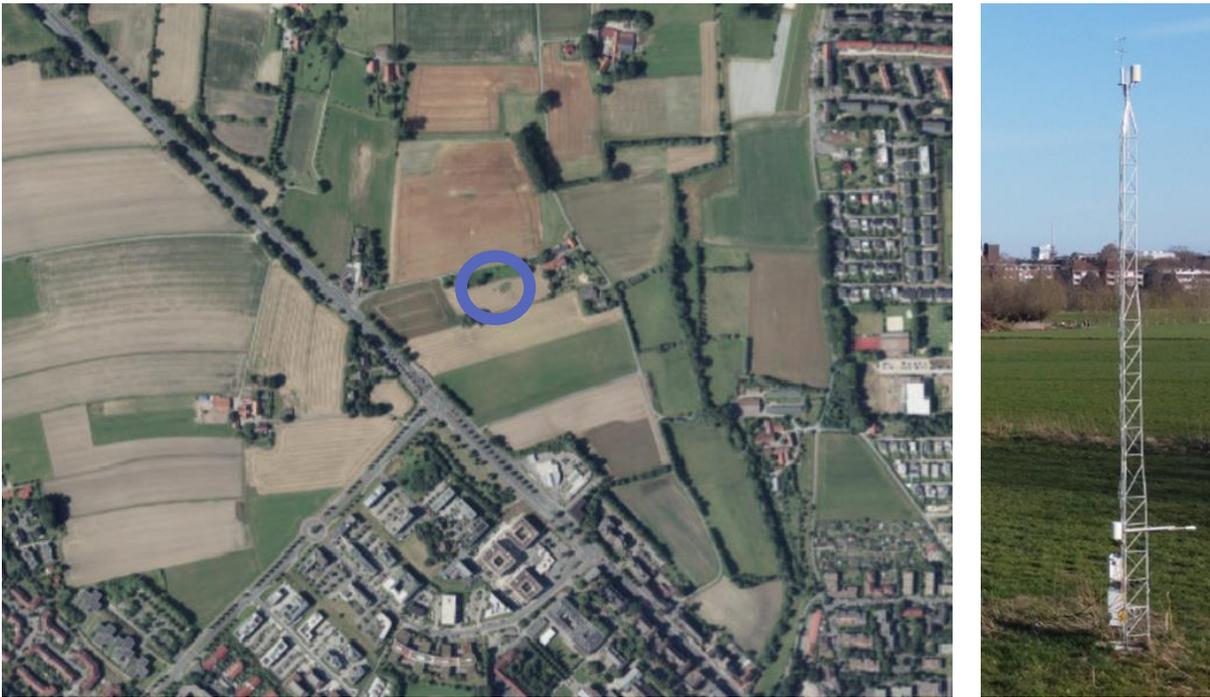


Abbildung 37: Standort der Langzeitmessung im Bereich der Steinfurter Straße im Norden von Münster als Luftbildaufnahme (Bildquelle: Geobasis NRW); blauer Kreis markiert den Standort (links) und Standort des Messmasten mit Blickrichtung Süd (rechts, Bildquelle: Anna Böttger und Eleonore Henely (Universität Münster)).

MESSGERÄTE UND METHODIK DER LANGZEITMESSKAMPAGNE

Die Instrumentierung der temporären Messstationen erfolgte sowohl am urbanen als auch am ruralen Standort auf gleiche Weise. Ein mittels dreier Drahtseile abgespannter Mast von 10 Metern Höhe wurde auf 2 m ü. Grund mit einem Temperatur-Feuchte-Messgeber 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 1-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 28.05.2024 standen ab dem 29.05.2024 Messdaten zur Verfügung. Die Demontage erfolgte im September 2024. Der Untersuchungszeitraum der sommerlichen Langzeitmessung wurde auf die Zeitspanne vom 01.06.2024 bis 30.08.2024 festgelegt.

REGIONALE KLIMATOLOGIE DES MESSZEITRAUMES

Der Juni war in Nordrhein-Westfalen mit durchschnittlich 16,2 °C um 0,8 K wärmer als das langjährige Mittel von 1961 bis 1990; auch die Sonnenscheindauern waren mit 200 Stunden gegenüber den 184 Stunden der langjährigen Referenz überdurchschnittlich hoch (DWD, 2024a). Die Niederschlagsmenge entsprach mit rund 87,5 l/m² dagegen in etwa denen der o.g. Klimareferenzperiode (84 l/m²).

Gegenüber dem klimatologischen Mittel fiel der Juli mit 18,4 °C um ca. 1,5 K wärmer aus (DWD, 2024a). Die Niederschlagssumme, lag mit 86 l/m², wie schon im Juni, leicht über der Klimareferenz (82 l/m²). Mit 210 Sonnenstunden (klimatologisches Mittel: 187 h) wurde in NRW die ortsübliche Sonnenscheindauer im Juli 2024 überboten. Dennoch war das Bundesland in diesem Monat im nationalen Vergleich wie auch im Referenzzeitraum am sonnenscheinärmsten.

Der Folgemonat August zeigte sich in Nordrhein-Westfalen noch sonniger. Hier wurde mit 240 Stunden das langjährige Mittel um 57 h überboten (DWD, 2024a). Dementsprechend war auch die Monatsmitteltemperatur von 19,7 °C gegenüber der Klimareferenz (16,6 °C) stark erhöht. Zusätzlich fiel der August mit im Bundesland registrierten 79 l/m² etwas zu feucht aus (Klimareferenz: 73 l/m²).

5.8.3 INTENSIVMESSKAMPAGNE: MESSFAHRT (26./27.07.2024)

BEFAHRENE ROUTE, MESSGERÄTE UND METHODIK DER MESSFAHRT

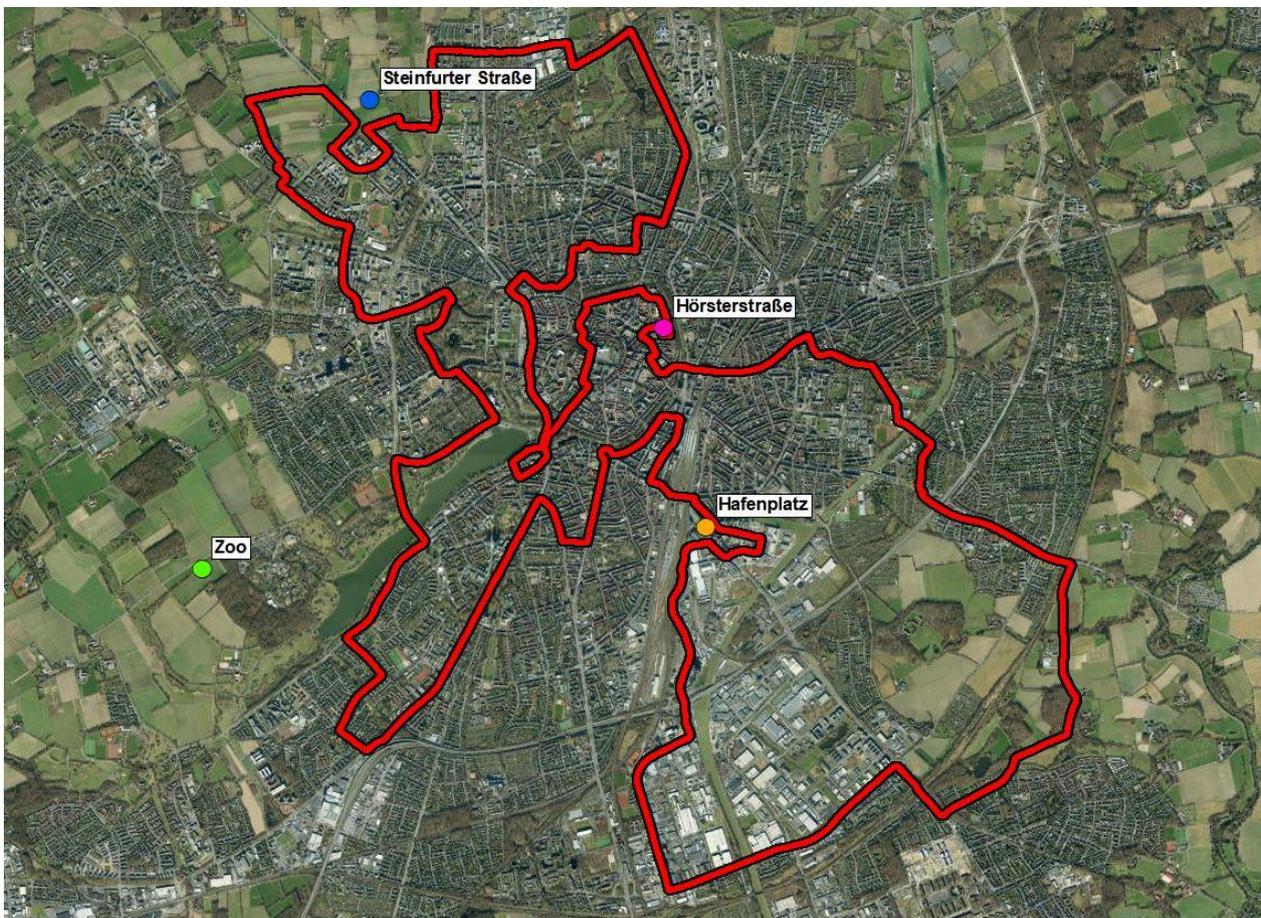




Abbildung 38: Mobile Messroute im Stadtgebiet von Münster (rote Linie), die Messstationen des urbanen (pinker Punkt) und ruralen Standorts (grüner Punkt) sowie die Messstationen der Universität Münster am Hafenplatz (oranger Punkt) und an der Steinfurter Straße (blauer Punkt). Luftbildquelle: Geobasis NRW.

Bei der Planung der mobilen Messroute stand die Befahrung möglichst aller relevanten Stadtstrukturtypen der Stadt Münster im Fokus. Hierfür wurde eine insgesamt 44 km umfassende Messstrecke geplant, die an der urbanen Messstation auf dem Parkplatz an der Hörsterstraße begann und endete (s. Abbildung 38) und gegen den Uhrzeigersinn befahren wurde.

Befahrene Stadtstrukturtypen, die größtenteils den urbanen Siedlungsraum beschreiben sind bspw. die für Städte tendenziell nur mäßig verdichteten und versiegelten Stadtteile Mauritz West und Ost (im Osten der Stadt), Kreuzviertel (im Norden), oder Aaseestadt (Südwesten). Der Siedlungsraum entspricht in diesen Stadtteilen hauptsächlich einer Einzel- und Reihenhausbauung wie bspw. entlang des Lohausweges im Stadtteil Mauritz-Ost oder der Mecklenberger Straße im Stadtteil Aaseestadt. Dieser Stadtstrukturtyp verfügt weiterhin über einen nennenswerten Grünanteil und beschreibt einen Großteil des Münsteraner Siedlungsraums. Blockbauung mit begrünem Innenhof wie im Bereich der Kreuzung Maximilianstraße / Wermelingstraße zählt darüber hinaus aufgrund der dichteren Bebauung zu den bereits stärker versiegelten und potenziell hitzebelasteten Stadtstrukturtypen. Der befahrene Bereich entlang der Rosenstraße im Stadtzentrum ist ebenfalls hauptsächlich von Block- und Blockrandbauung geprägt, darüber hinaus aber wesentlich enger bebaut und mit einem sehr hohen Versiegelungsanteil versehen. An den befahrenen Industrie- und Gewerbeflächen wie z.B. im Bereich des Industriegeweges oder der Siemensstraße im südöstlichen Bereich der Stadt (Stadtteile Hafen bzw. Berg Fidel) sind die Bebauungsdichte und vor allem der Versiegelungsgrad stark erhöht.

Befahren wurden darüber hinaus auch innerstädtische Grün- und Ausgleichsflächen wie der Bereich nördlich angrenzend an den Schlossgraben, der Mauritzfriedhof oder der Waldbereich entlang des Kaldenhofer Weges. Zwischen einzelnen ländlich geprägten Stadtstrukturtypen führte die Messroute auch entlang diverser Agrarflächen wie beispielsweise entlang der Steinfurter Straße und der dort befindlichen ruralen Klimamessstation der Universität Münster nordwestlich der Stadt.

MESSGERÄTE UND METHODIK DER MESSFAHRTEN

Zur Einordnung klimatologischer Prozesse wie der nächtlichen Überwärmung der Stadt gegenüber dem Umland bzw. ruraler Phänomene wie der Entstehung von Kaltluft auf den Grün- und Freiflächen wurde die Messfahrt in der Nacht vom 26. zum 27.06.2024 zu möglichst stabilen atmosphärischen Bedingungen im Sommer angesetzt. Als Messfahrzeug wurde ein Mitsubishi Eclipse Cross 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 39). 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 bis 30 km/h etwa alle 7-8 m einen Temperaturmesswert auf. Die Messfahrt wurde in der zweiten Nachthälfte von 02:40 Uhr bis 05:00 Uhr Ortszeit durchgeführt.



Abbildung 39: 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 der Parkplatz an der Hörsterstraße. 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.

5.8.4 INTENSIVMESSKAMPAGNE: VERTIKALSONDIERUNGEN MIT DROHNEN (25.6.-26.06.2024)

STANDORTE DER VERTIKALSONDIERUNGEN

Die Vertikalsondierungen fanden in unmittelbarer Nähe zu den beiden Klimamessstationen statt und wurden am 25./26.06.2024 direkt angrenzend an die urbane und rurale Messstation durchgeführt (s. Abbildung 40). Für die Beschreibung der genauen Beschaffenheit der Untergründe an den Standorten und von deren Umgebung wird auf Kapitel 5.8 verwiesen.



Abbildung 40: Standorte der Vertikalsondierung am 25./26.06.2024 an der urbanen Station (links, Blickrichtung Nord) und an der ruralen Station (rechts, Blickrichtung Nordost).

MESSGERÄTE UND METHODIK DER VERTIKALSONDIERUNGEN

Das Messsystem für die Vertikalsondierung meteorologischer Parameter ist eine Kombination aus einer Drohne des Typs DJI Mavic 3T und dem Sensor iMet-XQ2 der Firma InterMET zur Erfassung meteorologischer Parameter. Die Sonde misst Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Luftdruck sowie Position (Longitude und Latitude). Um GPS-stabil in der Luft zu stehen, gleicht die Drohne den Wind durch leichte Neigungen in x-, y-, und z-Richtungen aus. Die Drohne verfügt darüber hinaus über eine Weitwinkel- und Telekamera zur Durchführung hochauflösender Luftbildaufnahmen sowie einer Thermalkamera zur Erfassung von Oberflächentemperaturen (s. Abbildung 41).



Abbildung 41: DJI Mavic 3T in Nahansicht mit der Radio-sonde iMet-XQ2 (oben) und im Aufstieg an der Messstation (unten) (Bildquellen: GEO-NET).

Bei den Messungen in Münster lag am ruralen Standort am Zoo die maximale Mächtigkeit der Kaltluftsäule, in der Innenstadt an der Hörsterstraße hingegen die nächtliche städtische Überwärmung im Fokus. Um einen Unterschied zwischen der Tag- und Nachtsituation aufzeigen zu können, wurden die Messungen an beiden Standorten um die Mittagszeit (urban 13:00 Uhr MESZ; rural 14:00 Uhr MESZ) und vor Sonnenaufgang (urban 03:00 Uhr MESZ; rural 4:00 Uhr MESZ) durchgeführt.

Ein typischer Aufstieg in Münster erfolgte derart, dass die Drohne nach dem Start so lange bodennah verweilte, bis eine konstante Lufttemperatur aufgenommen wurde. Anschließend wurde der Aufstieg des Messsystems mit einer Steiggeschwindigkeit von ca. 1 ms^{-1} eingeleitet, um bei einer Sondenmessfrequenz von etwa 1 Hz exakt einen Messwert pro Höhenmeter zu erhalten. Dabei hielt sich die Drohne (auch gegen vorhandene Horizontalwinde) positionsgetreu über dem Startpunkt (GPS-stabiler Flugmodus). Nach Erreichen einer Höhe von 120 m über Grund wurde der erneute Abstieg des Messsystems eingeleitet. Vorsorglich wurde direkt anschließend ein zweiter identisch aufgebauter Messflug durchgeführt, um einen Ersatz-

datensatz verfügbar zu haben. Die aktuell vorherrschende Höhe wird mittels barometrischer Höhenformel aus dem vom iMet-XQ2 aufgezeichneten Luftdruck berechnet und für die Grafiken im Kapitel 6.2 verwendet. Anschließend wurde eine flächendeckende Kartierung der Umgebung der Messstationen in Form von Thermalbildaufnahmen durchgeführt. Die zusätzlich aufgenommenen Luftbildaufnahmen bieten die Möglichkeit zur nachträglichen Abschätzung des vorherrschenden Wetters und geben Einblick in die Gestalt des umgebenen Geländes. Die integrierte Infrarotkamera der DJI Mavic 3T 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 folglich, je nach objektspezifischem Emissionsgrad, eine Aussage über die Oberflächentemperatur getroffen werden. Gegenüberstellungen von Realfotografie und Infrarot-Bildern der Tag- und Nachtsituation finden sich ebenfalls in Kapitel 6.2.6 wieder.

6. Analyseergebnisse

6.1 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt wurden in gelayouteten Karten als QGIS Kartenpaket visualisiert und als Geodaten sowie als hochauflösende PDF-Dokumente übergeben. Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten rasterbasierter Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftproduktionsrate, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben. Alle Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kapitel 5.4). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m ü. Gr. (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Klassenschritte in der Farblegende wurden so gewählt, dass die Unterschiede innerhalb der Stadt möglichst gut zur Geltung kommen.

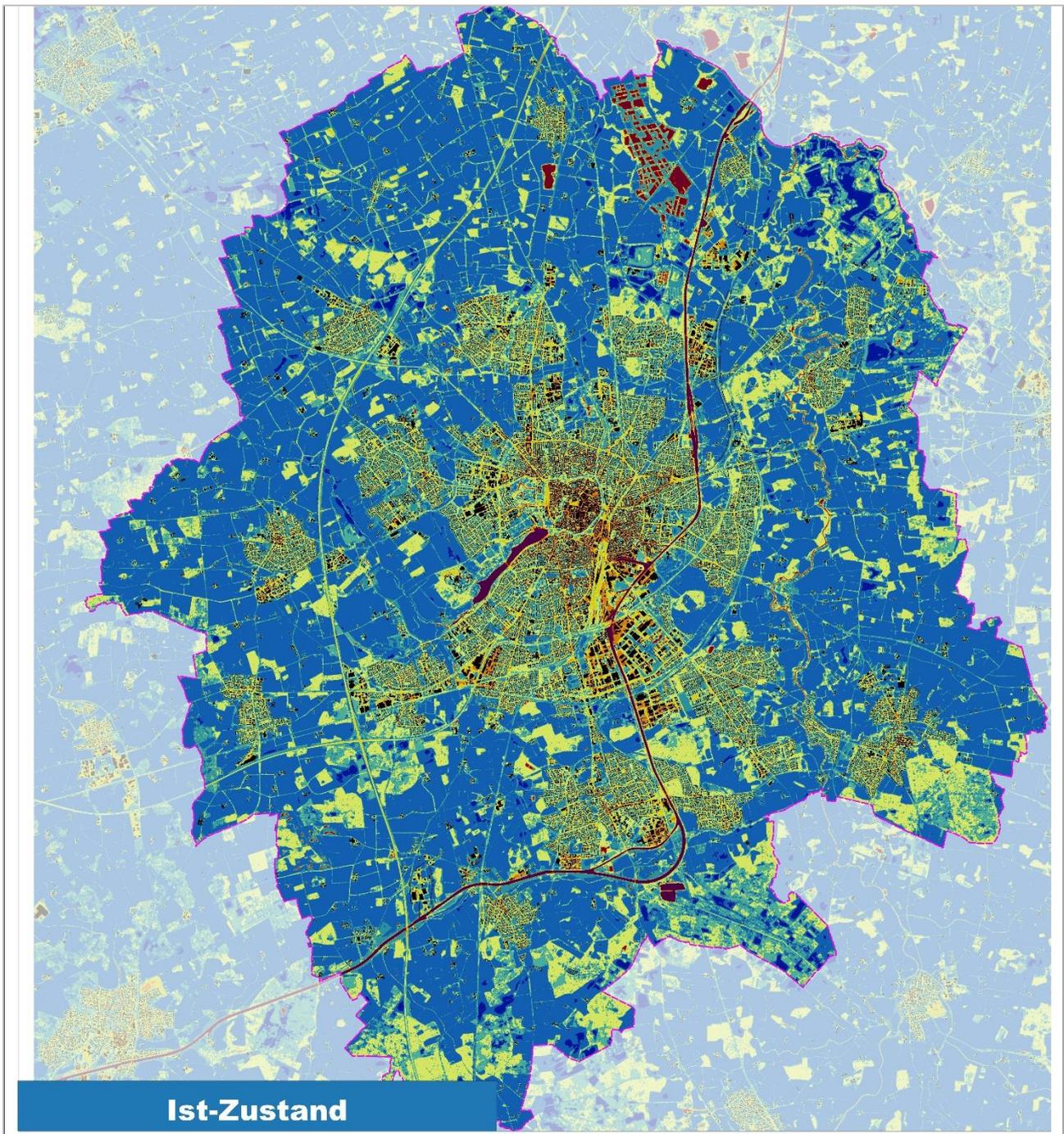
6.1.1 NACHTSITUATION

NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

Die Ermittlung des bodennahen Temperaturfeldes ermöglicht es, Bereiche mit potenziellen bioklimatischen Belastungen abzugrenzen und die räumliche Ausprägung sowie Wirksamkeit von Kalt- bzw. Frischluftströmungen abzuschätzen. Die aufgeführten Absolutwerte der Lufttemperatur sind exemplarisch für eine autochthone Sommernacht als besondere Wetterlage zu verstehen. Die daraus abgeleiteten relativen Unterschiede innerhalb städtischer Bereiche bzw. zwischen den Nutzungsstrukturen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen, sodass die Flächenbewertung in den Planungshinweiskarten auf diesen beruht.

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Münsteraner Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur um 4 Uhr (T04) im Ist-Zustand bei Minimalwerten von ca. 13 °C über Freiflächen und Maximalwerten bis etwa 21 °C über Gewässern wie dem Aasee eine Spannweite von 8 °C. Die mittlere Temperatur der Stadt liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei ~15 °C. Die Modellrechnung bestätigt folglich den bereits in den Grundlagen benannten Wärmeinseleffekt (Kapitel 2.2) und erlaubt darüber hinaus eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. In der Innenstadt Münsters sind die höchsten Bebauungsdichten und – insbesondere auch in den gewerblich geprägten Bereichen – hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der nächtlichen Überwärmung an diesen Orten widerspiegelt (s. Abbildung 42 & Abbildung 43, z.B. rund um das Hafenbecken am Kreativkai). Große Überwärmungen zeigen sich auch im Umfeld von Straßen und Plätzen (z.B. an der Lambertikirche und entlang der Hammer Straße). Im Münsteraner Zentrum liegt die Temperatur im Ist-Zustand häufig im Bereich von 17,5 bis 19,5 °C. Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden mit Spannen zwischen 14,0 und 17,5°C in den locker bebauten Stadt- & Ortsteilen (z.B. Nienberge) erreicht.



Ist-Zustand

Lufttemperatur in der Nacht [in °C in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr]

bis 13,0	> 17,0 - 17,5	> 20,5
> 13,0 - 14,0	> 17,5 - 18,5	Stadtgrenze
> 14,0 - 15,0	> 18,5 - 19,5	Planflächen
> 15,0 - 16,0	> 19,5 - 20,0	Gebäude
> 16,0 - 17,0	> 20,0 - 20,5	

Abbildung 42: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Stadtgebiet Münster.



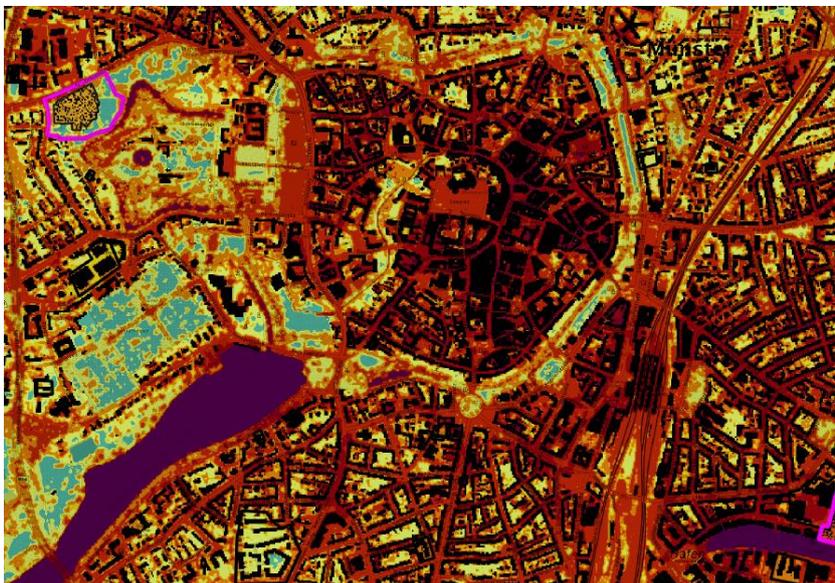
Unter den Grün- und Freiflächen zählen die Freiflächen in höheren Lagen wie z. B. nördlich von Nienberge mit rund 13 °C zu den kältesten Bereichen innerhalb der Stadtgrenze. Acker- und auch Rasenflächen kühlen sich nachts auch in den tieferen Lagen stark ab, weshalb diese Orte in der Regel Temperaturen unterhalb von 14,5 °C aufzeigen und auch eine Gunstwirkung auf umliegende Bebauung bedingen können. Verglichen mit den grünen Außenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 14 bis 15,5 °C ein etwas höheres Wertespektrum auf, wobei aufgrund der lockeren Siedlungsstruktur von Münsters Stadtteilen ein relativ geringer Unterschied zu den Außenbereichen besteht.

In Wäldern aber auch flächig baumbestanden parkähnlichen Arealen dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und verhindert damit eine stärkere Abnahme der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 16,0 – 17,5 °C erreicht werden (z.B. im Schlossgarten; Wolbecker Tiergarten). Nachts fällt hier daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduzenten ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen geringen Tagesgang der Wassertemperatur. Dieser beeinflusst folglich auch die darüberliegende 2 m-Lufttemperatur des Modells, die sich am Tage und in der Nacht vergleichsweise konstant verhält. So erscheinen die Wasserflächen wie oben beschrieben nachts bei Temperaturen von 18,5 °C bis 21 °C ähnlich überwärmt wie Teile des Siedlungsraumes oder sogar noch wärmer (z.B. Aasee, Dortmund-Ems-Kanal).

In den beiden Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine zunehmende flächendeckende Erwärmung der Stadt (Abbildung 43 Mitte und unten, Differenzen in Abbildung 44). Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben bestehen und damit bleibt auch der Wärmeinseleffekt auf einem vergleichbaren Niveau erhalten. Das Zentrum ist nach wie vor das am stärksten überwärmte Gebiet und im Szenario 2045 werden stellenweise nächtliche Temperaturen über 20 °C im Siedlungsgebiet erreicht, was heutzutage nur über Gewässern der Fall ist. Öffentliche Parks wie der Südpark stellen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren) und siedlungsferne Freiflächen kühlen am stärksten aus.

Gesondert müssen die möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen betrachtet werden (pink bzw. grün gestrichelt umrandete Flächen in Abbildung 42 & Abbildung 43). Durch die Entwicklung einer bisherigen Freifläche nimmt die Lufttemperatur zusätzlich zum Klimawandelsignal infolge der Überbauung zu, wie bspw. auf den möglichen Entwicklungsflächen entlang der Steinfurter Straße 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 (siehe Abbildung 44 z. B. Münster Modellquartier 3 (MMQ 3) Theodor-Scheiwe-Straße). Auf die stadtklimatische Bewertung der Entwicklungsflächen wird bei der Beschreibung der Planungshinweiskarte eingegangen (Kapitel 0).



(Lufttemperatur in °C um 04:00 Uhr in 2m ü. Gr.)

- bis 13,0
- > 13,0 bis 14,0
- > 14,0 bis 15,0
- > 15,0 bis 16,0
- > 16,0 bis 17,0
- > 17,0 bis 17,5
- > 17,5 bis 18,5
- > 18,5 bis 19,5
- > 19,5 bis 20,0
- > 20,0 bis 20,5
- > 20,5

Abbildung 43: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr für einen Ausschnitt des Stadtgebiet Münsters für alle drei Szenarien (oben = Ist; Mitte = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).



**Änderung der Lufttemperatur in der Nacht
im Vergleich zum Ist-Zustand**

[in °C in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr]

- bis -2,0
- < -2,0 bis -1,0
- < -1,0 bis 1,0
(keine signifikante Änderung)
- > 1,0 bis 1,5
- > 1,5 bis 2,0 **Klimadelta 2035: +1,8 °C**
- > 2,0 bis 2,5 **Klimadelta 2045: +2,2 °C**
- > 2,5 bis 3,0
- > 3,0

Abbildung 44: Änderung des nächtlichen bodennahen Temperaturfelds von 04 Uhr im Vergleich zum Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Münsteraner Stadtgebiets (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).

KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

Lokalen Strömungssystemen wie Flurwinden oder Hangabwinden kommt eine besondere stadtplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken aufgrund ihrer hohen aerodynamischen Rauigkeit als Strömungshindernis, sodass die Durchlüftung des Stadtkörpers herabgesetzt ist. Die Abfuhr überwärmter und schadstoffbelasteter Luftmassen in den Straßenschluchten kann in Abhängigkeit von der Bebauungsart und -dichte deutlich eingeschränkt sein. Speziell bei austauschschwachen Wetterlagen wirken sich diese Faktoren bioklimatisch zumeist ungünstig aus. Daher können die genannten Strömungssysteme durch die Zufuhr kühlerer und frischer Luft eine bedeutende klima- und immissionsökologische Ausgleichsleistung für die Belastungsräume erbringen.

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abbildung 45).

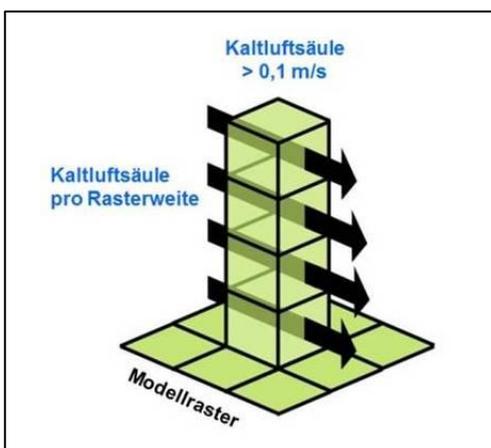


Abbildung 45: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.

Der modellierte Kaltluftvolumenstrom (Einheit m^3/s) bezieht sich in dieser Arbeit auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ synonym verwendet.⁹

Wie auch die anderen Klimaparameter ist der Kaltluftvolumenstrom eine Größe, die während der Nachtstunden in ihrer Stärke und Richtung veränderlich ist. Die sich im Verlauf der Nacht einstellenden Strömungsgeschwindigkeiten hängen im Wesentlichen von der Temperaturdifferenz der Kaltluft gegenüber der Umgebungsluft, der Hangneigung und der Oberflächenrauigkeit ab. Die Mächtigkeit der Kaltluftschicht nimmt im Verlaufe einer Nacht in der Regel zu und ist, genau wie die Luftaustauschprozesse allgemein, meist erst in der zweiten Nachthälfte vollständig entwickelt.

⁹ Der Kaltluftvolumenstrom in m^3/s beschreibt die Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Rasterzelle (hier: 5 m breit) fließt. Um Ergebnisse verschiedener Modellauflösungen miteinander vergleichbar zu machen, bietet sich der Kaltluftvolumenstrom als Dichte (in $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) an, da seine Intensität nicht von der Rasterzellenbreite abhängt.



Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig¹⁰ markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee¹¹ zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen können. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße und -struktur sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine hohe Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten von knapp $40 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert im Stadtgebiet Münster liegt bei $7,5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (Abbildung 46). Über den Grünflächen zwischen Nienberge und Häger entsteht Kaltluft, die aufgrund der Geländeneigung in Richtung Nordosten abfließt. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem auf den bebauten Teil des Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse. Kaltluftvolumenströme sind dabei jedoch nicht ausschließlich geländeorientiert. Kaltluftbewegungen entstehen auch durch Temperaturunterschiede zwischen kühlem Ausgleichsraum und warmen Siedlungskörper. Über letzterem steigt die warme Luft auf, wodurch ein Vakuum entsteht, das durch vergleichsweise kühlere Luft vom umgebenen Umland ausgeglichen wird. Diese Art thermisch bedingter Winde werden Flurwinde genannt. Die eher lockere Bebauung der verschiedenen Wohnsiedlungen Münsters begünstigt ein relativ weites Vordringen der durch Hangab- und Flurwinde induzierten Kaltluft (z. B. in Mauritz-Ost). In den eher gewerblich genutzten Gebieten nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung in der Folge ab (z. B. Gustav-Stresemann-Weg / Loddenheide).

Rauigkeitsarme Strukturen wie Bahntrassen (z. B. zwischen Berg Fidel und Hafen) oder breite Straßen sind teilweise durch hohe Volumenströme gekennzeichnet, transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grün geprägte Strukturen (die Kaltluft erwärmt sich während des Transports über diesen Flächen).

¹⁰ dem Wind zugewandte Seite

¹¹ dem Wind abgewandte Seite

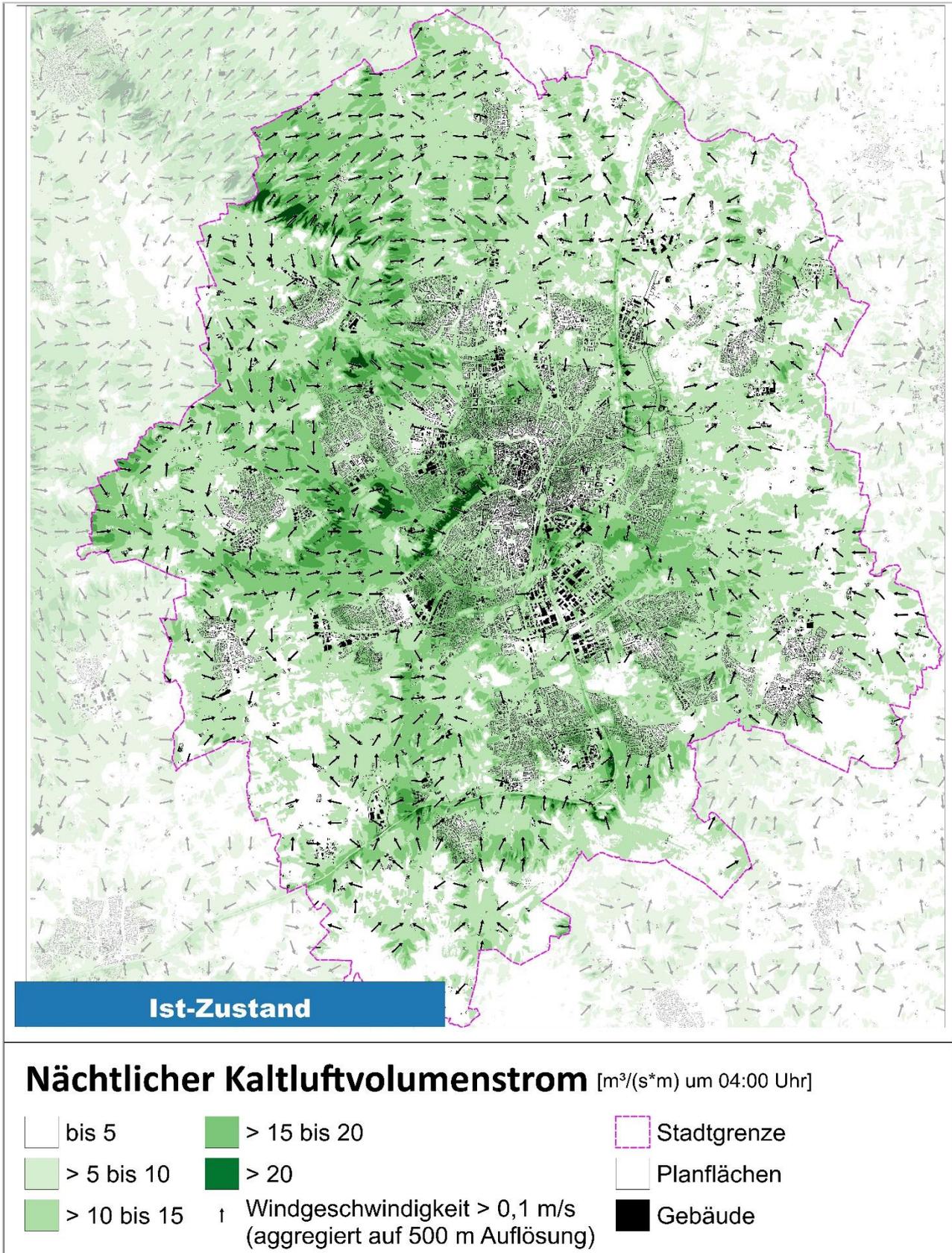
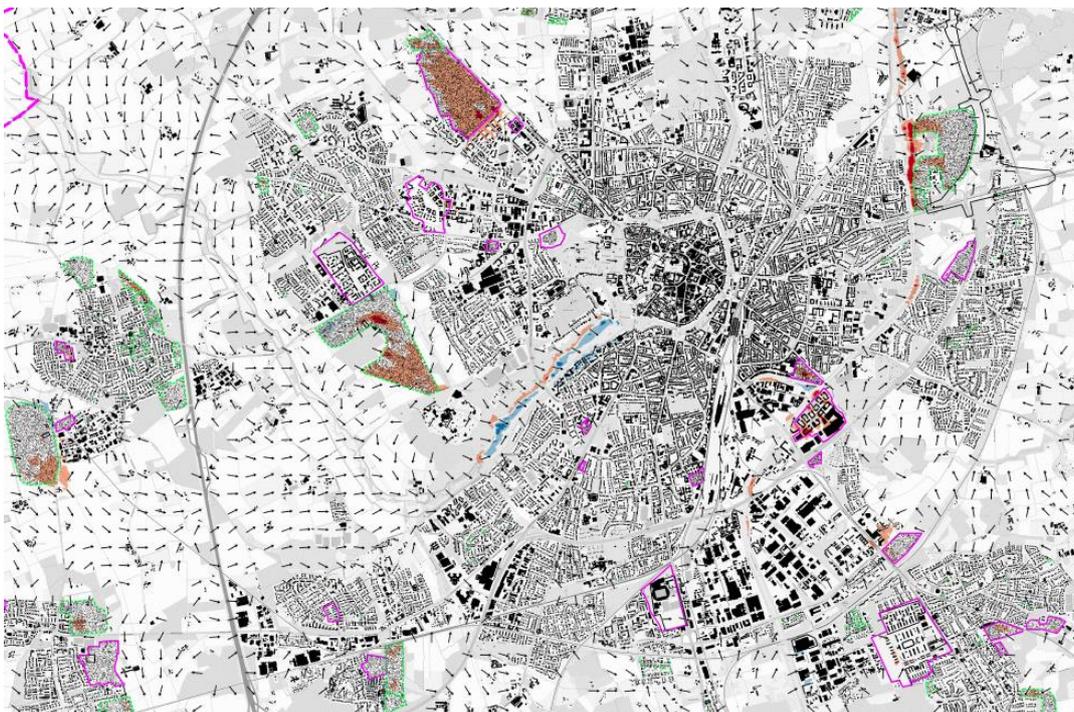


Abbildung 46: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom von 04 Uhr des Ist-Zustandes für das Stadtgebiet Münster.



**Änderung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms
im Vergleich zum Ist-Zustand**
[m³/(s*m) um 04:00 Uhr]

- bis -10,0
- <-10,0 bis -5,0
- <-5,0 bis 5,0
(keine signifikante Änderung)
- > 5,0 bis 10,0
- > 10,0

↑ Strömungsrichtung*

Abbildung 47: Änderung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms im Vergleich zum Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).



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 Sentrup-West „Zooquartier“ zu erkennen ist (siehe Abbildung 47 unten), 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. Diese Aussagen lassen sich analog auf die Windgeschwindigkeit und das Bodennahe Strömungsfeld übertragen (Abbildung 48 & Abb. A 12).

Abbildung 48 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur¹²) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s angenommen. Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfelds folgt zum großen Teil dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Stadtgebiet Münster treten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 1,5 m/s am westlichen Rand des Aasees auf. Vergleichbar gut durchströmt zeigen sich z. B. die ruhigkeitsarmen Ausgleichsflächen zwischen Roxel und Gievenbeck. In 2 m ü. Gr. tritt die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutzwänden stärker hervor, sodass viele Siedlungsgebiete, nicht nur der Stadtkern, bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren. Der mittlere Wind beträgt insgesamt innerhalb der Stadtgrenze $\sim 0,15$ m/s. Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch der Verkehrsraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft-, nicht mehr um Frischlufttransport (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich).

¹² Die Pfeile wurden in einer höheren räumlichen Auflösung von 500 m abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.



Ist-Zustand

Bodennahes Strömungsfeld [Windgeschw. in m/s in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr]

 bis 0,1	 > 0,8 bis 1,2	 Stadtgrenze
 > 0,1 bis 0,2	 > 1,2	 Planflächen
 > 0,2 bis 0,4	† Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s (aggregiert auf 500 m Auflösung)	 Gebäude
 > 0,4 bis 0,8		

Abbildung 48: Nächtliches bodennahes Windfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster.



Neben Gebäuden stellen Bäume und insbesondere Wälder mit ihrem dichten Baumbestand zwangsläufig ein Hindernis für bodennahe Strömung dar, doch zeigen die Ergebnisse, dass von den Waldrändern her auch bodennahe Ausgleichsströmungen Richtung Stadtgebiet einsetzen (z. B. vom Wolbecker Tiergarten nach Wolbeck). Oftmals sind Wälder jedoch vielmehr Orte der Kaltluftentstehung bzw. Kaltluftproduktion als solche mit hohem Kaltluftvolumenstrom. Die Kaltluftproduktionsrate (KPR) gibt an, wie viele Kubikmeter Luft sich pro Quadratmeter innerhalb einer Stunde lokal durch Ausstrahlung abgekühlt hat. Die Abkühlungsrate hängt unter anderem von der Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität des Bodens ab. Für die Berechnung der Kaltluftproduktionsraten sind somit Kenntnisse über die thermischen Eigenschaften des Untergrundes von großer Bedeutung. Die in der Literatur aufgeführten Werte zu den wichtigsten Bodeneigenschaften decken eine große Bandbreite ab, sodass Parametrisierung der Wärmeleitung im Boden für Modellsimulationen stets mit Unsicherheiten behaftet ist. Die Bestimmung der Kaltluftproduktion kann daher erhebliche Fehler aufweisen, was sowohl für modellhafte Berechnungen als auch für Geländemessungen gilt. In der hier durchgeführten Modellsimulation wurden einheitliche thermische Eigenschaften für den nicht versiegelten Untergrund angenommen. Eine Berücksichtigung unterschiedlicher Bodenfeuchten und daraus resultierender Abkühlungsraten fand damit nicht statt.

Anhand der kleinteiligen Flächen hoher Kaltluftproduktionsrate z. B. an der Zentraldeponie wird bei KPR-Werten über $60 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (Maximum des Stadtgebietes bei $105 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) ersichtlich, dass die Geländeneigung die bestimmende Größe für Kaltluftentstehung darstellt (Mittelwert innerhalb der Stadtgrenze: $22,3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$). Zusätzlich ist die Landnutzung die zweite entscheidende Größe zur Beeinflussung der Kaltluftproduktion – je versiegelungsärmer der Untergrund, desto größer die Kaltluftproduktionsrate. So weisen die geneigten Freiflächen oftmals überdurchschnittlich hohe Werte zwischen 30 und $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ auf. Auch im Siedlungsbereich sind Grünflächen auszumachen, die mit KPR-Werten zwischen 20 und $50 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ einen wichtigen innerstädtischen Abkühlungsfaktor darstellen. Dies gilt z. B. für viele der Parks. Stark versiegelte Areale wie große Teile des Verkehrsraums oder die Gleisflächen im Bereich des Hauptbahnhofes Münster sind hingegen mit Werten unter $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ nicht mit Kaltluftproduktionsprozessen assoziiert.

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 (vgl. Abb. A 13 im Anhang).

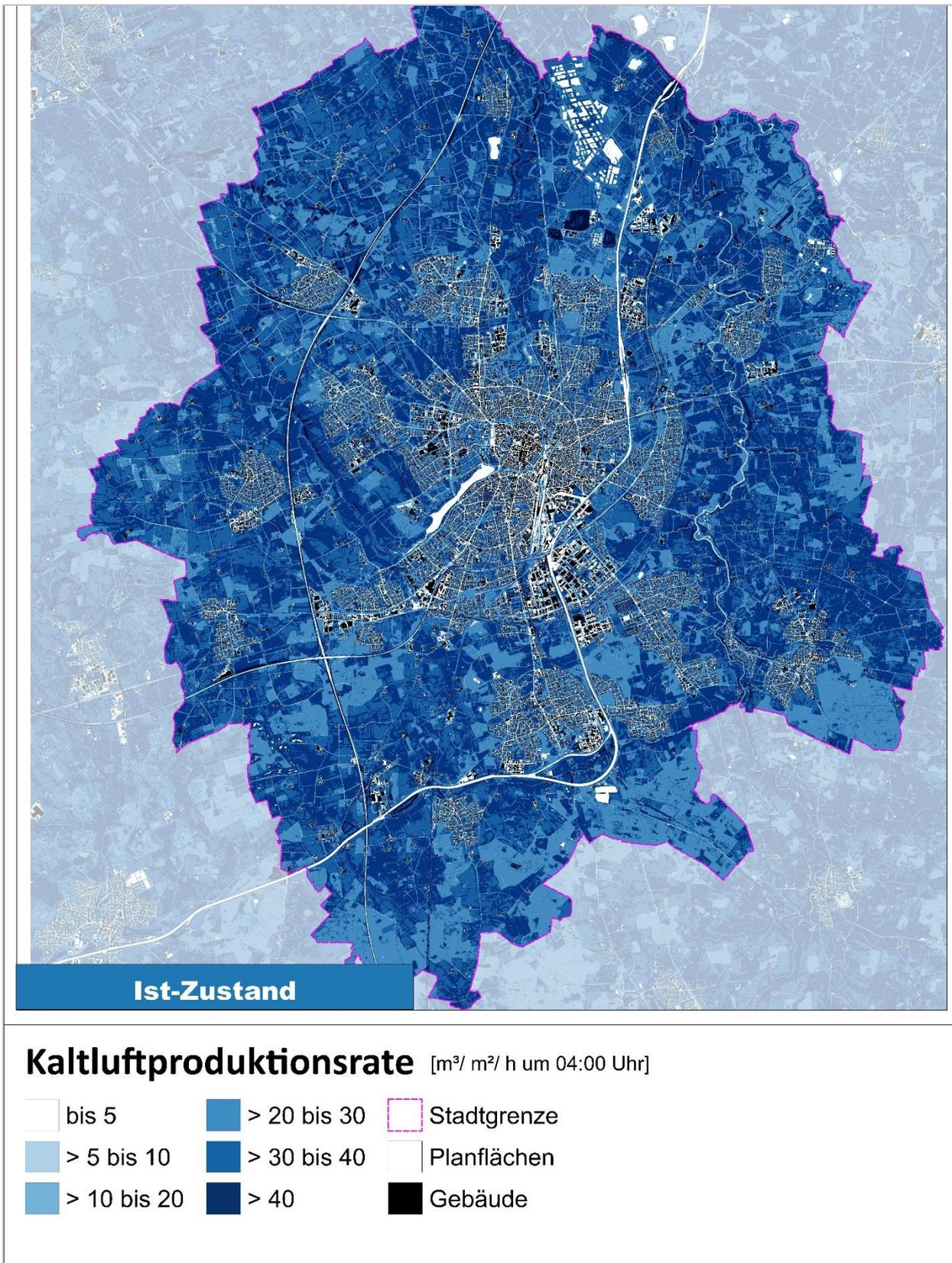


Abbildung 49: Nächtlliche Kaltluftproduktionsrate von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster.

6.1.2 TAGSITUATION

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen¹³.

Tabelle 12: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (VDI 3787, Blatt 2, 2022)

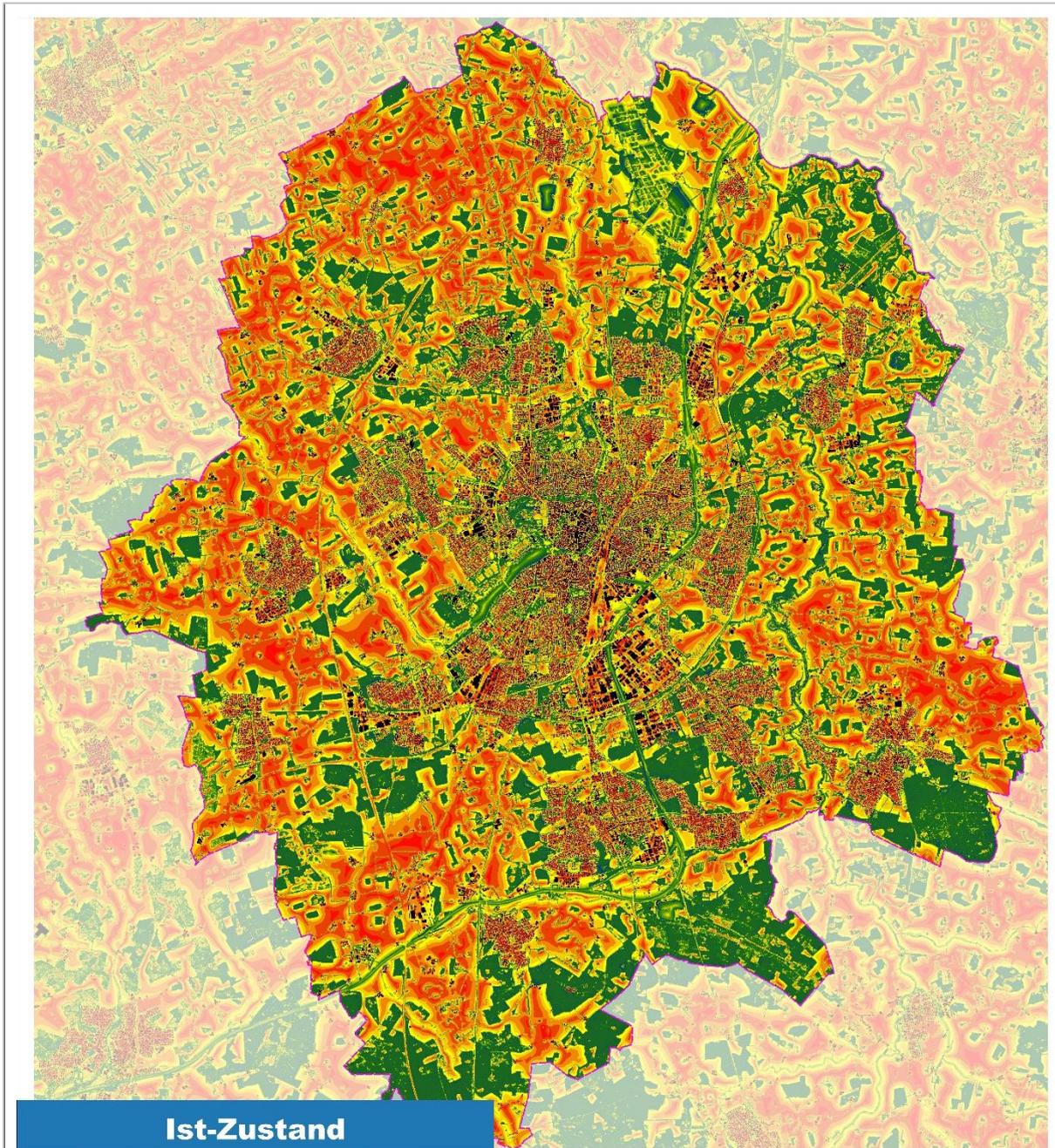
PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
$PET \leq 4$	Sehr kalt	extremer Kältestress
$4 < PET \leq 8$	Kalt	starker Kältestress
$8 < PET \leq 13$	Kühl	moderater Kältestress
$13 < PET \leq 18$	Leicht kühl	leichter Kältestress
$18 < PET \leq 23$	Komfortabel (neutral)	kein thermischer Stress
$23 < PET \leq 29$	Leicht warm	leichte Wärmebelastung
$29 < PET \leq 35$	Warm	moderate Wärmebelastung
$35 < PET \leq 41$	Heiß	starke Wärmebelastung/Hitzestress
$PET > 41$	Sehr heiß	extrem starke Wärmebelastung/Hitzestress

In der vorliegenden Analyse wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; Matzarakis et al., 1999). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit intuitiver nachvollzogen werden zu können¹⁴. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Kuttler, 2013). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 2 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tabelle 12).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET um 14 Uhr in Münster im Ist-Zustand mit einer Spannbreite von ~27 °C größere Unterschiede im Untersuchungsgebiet auf und reicht von ~17 bis ~44 °C. Die geringsten Werte sind in den Uferbereichen der Stillgewässer (z. B. am Sandruper See), der Fließgewässer (z. B. der Werse) sowie in Waldgebieten (z.B. im Brinkbusch) zu finden, die tagsüber mit PET-Werten von meist unter 25°C (leichte Wärmebelastung) eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung induzieren (Abbildung 50).

¹³ Energiebilanzmodelle für den menschlichen Wärmehaushalt bezogen auf das Temperaturempfinden einer Durchschnittsperson („Klima-Michel“ mit folgenden Annahmen: 1,75 m, 75 kg, 1,9 m² Körperoberfläche, etwa 35 Jahre; vgl. Jendritzky, 1990).

¹⁴ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCL (Universeller thermischer Klimaindex).



Ist-Zustand

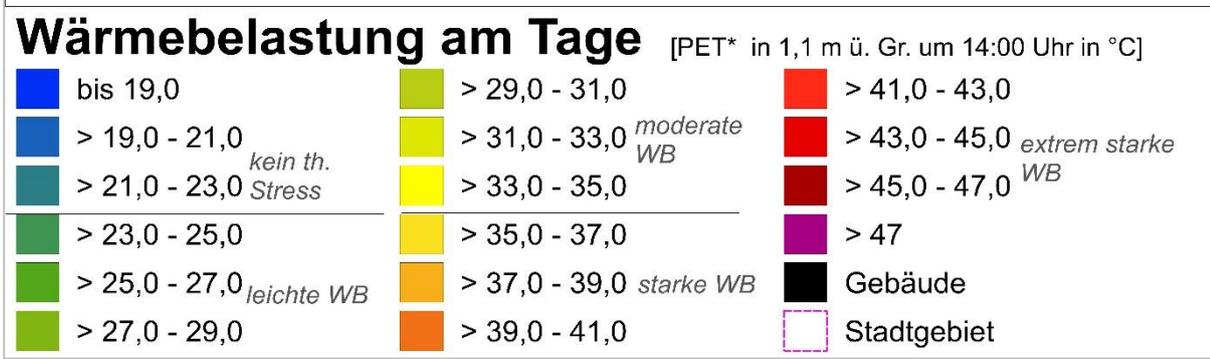


Abbildung 50: Wärmebelastung um 14 Uhr am Tage im Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster.

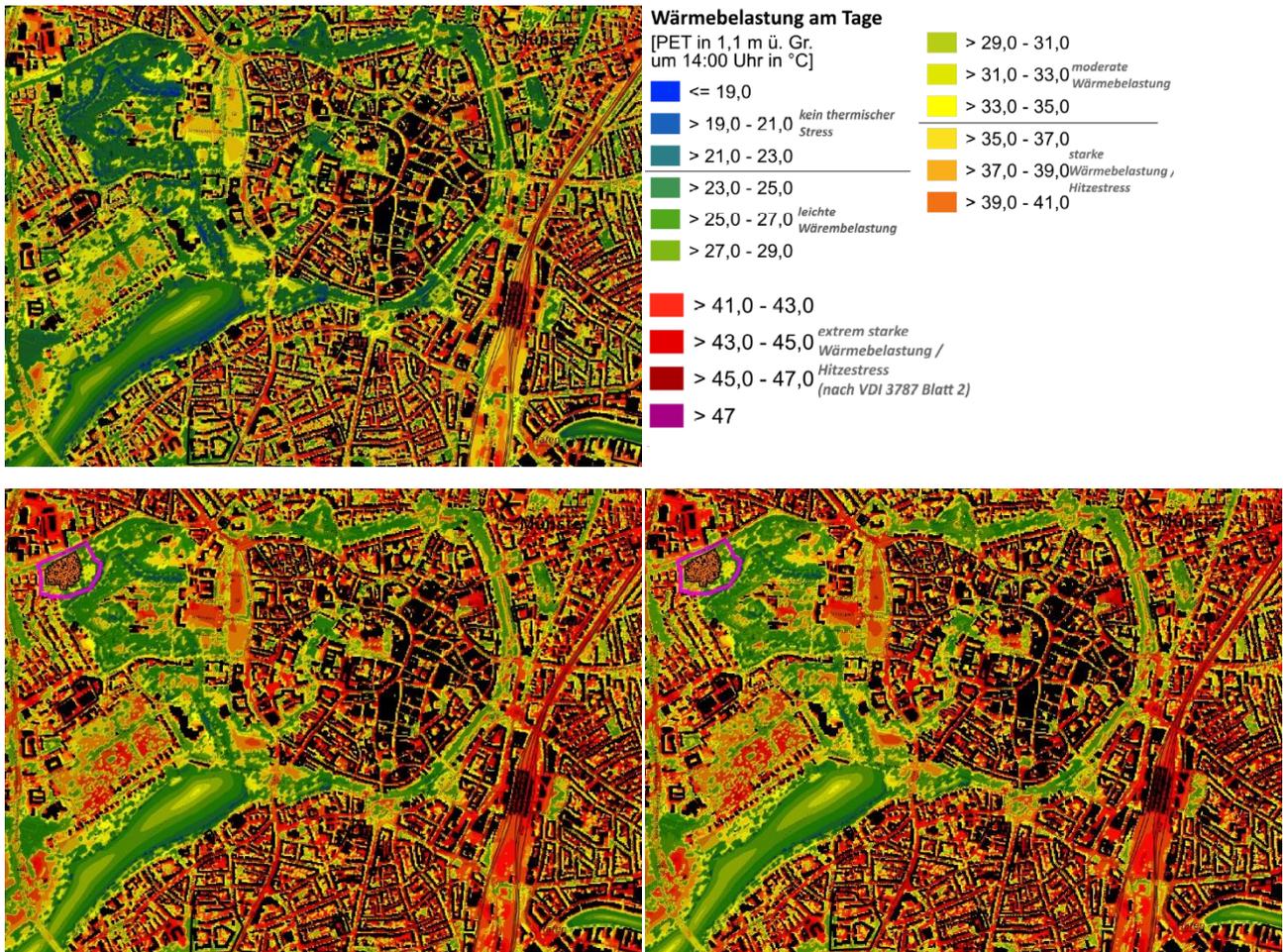
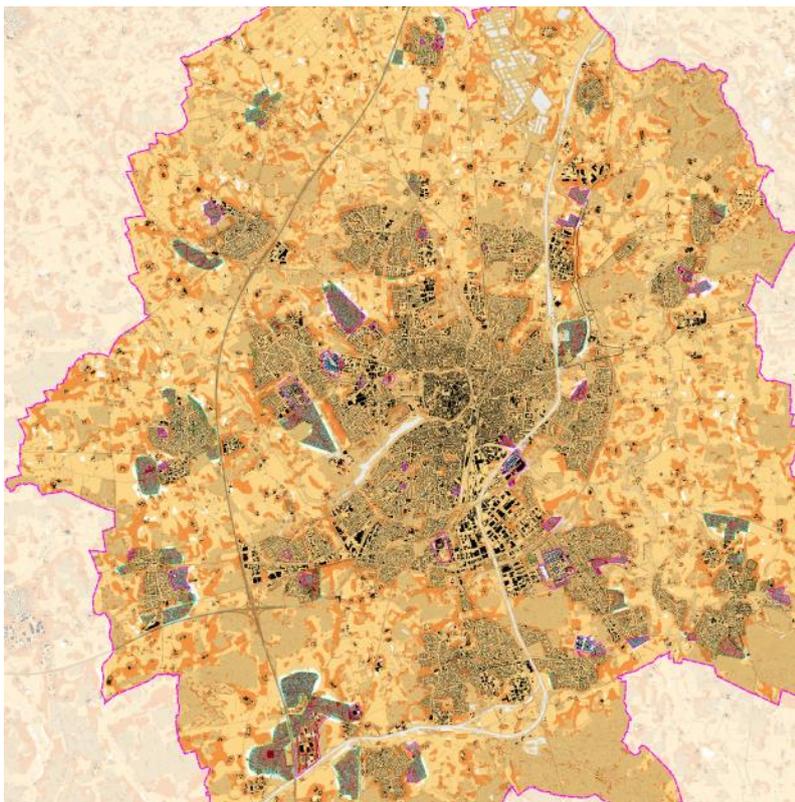


Abbildung 51: Wärmebelastung am Tag (PET) in der Kernstadt von Münster. Oben: Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario 2035, unten rechts: Zukunftsszenario 2045.



**Änderung der Wärmebelastung am Tage
im Vergleich zum Ist-Zustand**

[PET in 1,1 m ü. Gr. um 14:00 Uhr in °C]

- bis -6,0
- < -6,0 bis -2,0
- < -2,0 bis 2,0
(keine signifikante Änderung)
- > 2,0 bis 4,0
- > 4,0 bis 6,0
- > 6,0 bis 8,0
- > 8,0 bis 12,0
- > 12,0

Abbildung 52: Änderung der Wärmebelastung am Tage im Vergleich zum Ist-Zustand für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).



Der Aufenthaltsbereich des Menschen unterhalb des Kronendachs ist vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder und Baumbestände allgemein als Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen können. Zudem vermögen stadtnahe Wälder und Baumgruppen auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes zu erzeugen (hier nicht dargestellt). Auch in Parks (z.B. im Wienburgpark) oder auf Friedhöfen (z.B. Städtischer Friedhof Nienberge) herrschen unter größeren Baumgruppen größtenteils PET-Werte von unter 29 °C. Besonders wertvoll zeigen sich all jene Flächen, die die Schattenwirkung von Bäumen und die an Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse kombinieren. Hierfür ist beispielhaft der Weg am südöstlichen Ufer des Aasees entlang der Bismarckallee, wo baumbestandene Bereiche bei PET-Werten von um 20 °C einen besonderen humanbioklimatischen Stellenwert besitzen (Abbildung 51).

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine moderate Wärmebelastung auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer starken oder auch extrem starken Wärmebelastung betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten (z.B. Loddenheide) und im versiegelten und unverschatteten Verkehrsraum zu finden (z. B. Aegidiistraße; mehr als 38 °C PET). Auch Teile der Innenstadt sind mit einer extremen Wärmebelastung assoziiert. Teilweise profitieren diese Flächen zum Modellausgabezeitpunkt jedoch bereits von der gen Osten sichtbaren Schattenwirkung der westlich des Verkehrsraums gelegenen Gebäude, die die PET hier auf teils 34 °C absenken kann. Damit ergibt sich auf der Westseite der Straßen eine moderate, auf der Ostseite eine starke Wärmebelastung (z. B. am Prinzipalmarkt). Die Schattenwirkung als vornehmlich PET-steuernder Parameter wird auch auf den Ackerflächen im Außenbereich deutlich. Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen ähnlich hohe Werte wie in den unverschatteten Siedlungsräumen. Beispielhaft sind hier die Agrarflächen zwischen Loevelingloh und Willbrenning zu nennen, in welchen bis zu 42 °C auftreten. Dass Schatten spendende Bäume die Klimasituation am Tag wesentlich verbessern können, wird u. a. in den Straßenräumen sichtbar. So erscheinen baumbestandene Straßen, wie z. B. die Marienstraße in Sprakel, mit PET-Werten um 27 °C kühler als die stark versiegelten und nur geringfügig verschatteten Siedlungsbereiche.

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann (vgl. Abbildung 51 und Abbildung 52). Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst im Szenario 2045 gibt es noch Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten (z. B. Schlossgarten in Abbildung 51) sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen. Bei den Entwicklungsflächen ergibt sich ein differenzierteres Bild. Bei größeren Entwicklungsflächen wie der Erweiterung des Hansa Business Parks bis 2045 (Abbildung 52), kommt es am Rand der Flächen zu einer Kompensation des Klimawandelsignals (weiße Farbe = keine signifikante Änderung in der Differenzkarte). Diese ist bedingt durch ein mittägliches Flurwindphänomen am Übergang vom Bestands-Ausgleichsraum zum neuen Wirkraum. Die erhöhte Windgeschwindigkeit führt zu einer Absenkung der PET in diesem Randgebiet. Bei Bereichen, die mit einer konkreten Planung zum Außenraum modelliert werden konnten (wie dem Gebiet bei der Busso-Peus-Straße), sieht man den positiven Effekt von Schattenwurf durch Baumpflanzungen auf heutigen Freiflächen.



6.2 MESSKAMPAGNE

6.2.1 AUSWERTUNG VON KLIMAKENNTAGEN IM UNTERSUCHTEN ZEITRAUM (01.06.2024 – 31.08.2024)

Für die Beschreibung der klimatischen Situation an den Messstandorten wurden, wie bereits im Kapitel 5.8 beschrieben, klimatologische Kenntage verwendet (siehe außerdem Tabelle 13).

Tabelle 13: Bezeichnung und Kriterien für klimatologische Kenntage.

Bezeichnung	Kriterium
Sommertag	Tageshöchsttemperatur ≥ 25 °C
Heißer Tag	Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C
Tropennacht	Tagesminimaltemperatur ≥ 20 °C

SOMMERTAGE

Tage, an denen im Untersuchungszeitraum 25 °C erreicht oder überschritten wurden, erhielten in Abbildung 53 einen Eintrag als Sommertag. Dabei ist auffällig, dass erst ab Ende Juni regelmäßig Sommertage registriert wurden. Die urbane Station Hörsterstraße verzeichnet mit 42 Sommertagen die höchste Anzahl, von denen 16 autochthon sind. Im Vergleich dazu zeigt die urbane Station Hafenplatz mit 34 Sommertagen eine deutlich geringere Anzahl, jedoch ebenfalls mit 16 autochthonen Tagen. Die rurale Station Steinfurter Straße weist 31 Sommertage auf (15 autochthon) und die rurale Station am Zoo registrierte eine leicht erhöhte Anzahl von 34 Sommertagen (14 autochthon). Die DWD-Referenzstation Flughafen Münster/ Osnabrück (FMO) verzeichnet mit 29 Sommertagen den geringsten Wert aller Stationen, bei einer vergleichbaren Anzahl autochthoner Verhältnisse (14).

Der Vergleich zwischen den urbanen und ruralen Stationen verdeutlicht den Einfluss der städtischen Wärmeinsel. Die urbanen Stationen weisen insgesamt eine höhere Anzahl an Sommertagen auf als die ruralen Stationen, was insbesondere auf die stärkere Versiegelung und die reduzierte Luftzirkulation in den städtischen Gebieten zurückzuführen ist. Innerhalb der urbanen Standorte zeigt sich jedoch ein Unterschied zwischen der temporär eingerichteten Messstation an der Hörsterstraße zu der der Universität Münster am Hafenplatz. Die urbane Station an der Hörsterstraße weist mit 42 Sommertagen eine deutlich höhere Anzahl auf als die urbane Station am Hafenplatz (34 Tage), obwohl beide Standorte urban geprägt sind. Dies könnte sowohl auf unterschiedliche Messmethoden oder auch lokale Standortbedingungen wie beispielsweise der Nähe zum Hafenbecken am Hafenplatz zurückzuführen sein, da Gewässer tagsüber einen kühlenden Einfluss auf das lokale Klima aufweisen.

Auch bei den ruralen Stationen ist ein Unterschied zwischen den beiden Messsystemen feststellbar. Die temporär eingerichtete Station am Zoo zeigt mit 34 Sommertagen eine höhere Anzahl als die Station der Universität Münster an der Steinfurter Straße (31). Gleichzeitig zeigt der Vergleich zur ebenfalls rural gelegenen DWD-Referenzstation FMO, dass die Anzahl an Sommertagen dort mit 29 am niedrigsten ausfällt, was neben den Standortbedingungen zum Teil auch auf Unterschiede in der Messtechnik zurückzuführen sein kann.

Der direkte Vergleich zwischen urbanen und ruralen Stationen innerhalb der jeweiligen Messnetze verdeutlicht dennoch den urbanen Wärmeinseleffekt. Die Differenz zwischen den urbanen und ruralen Stationen beträgt dabei zwischen den Messstationen der Universität Münster 3 Sommertage (Hafenplatz: 34, Steinfurter Straße: 31) und 8 Sommertage bei den temporär errichteten Klimamessstationen (Hörsterstraße: 42, Zoo: 34).

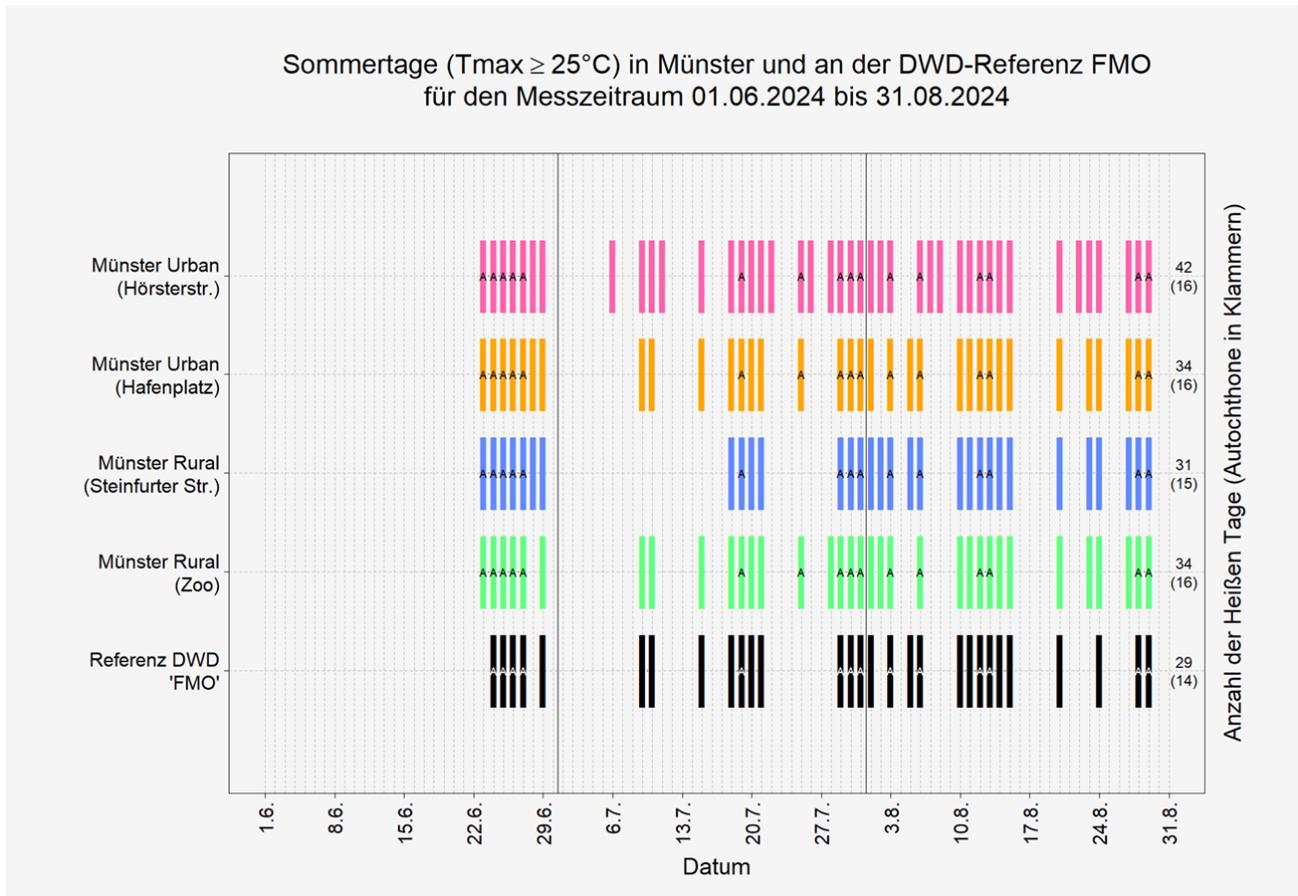


Abbildung 53: Sommertage bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 01.06.2024 bis 31.08.2024 an den untersuchten Messstationen im Stadtgebiet von Münster und der Referenz-Station des DWD am Flughafen Münster-Osnabrück.

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 53 eine Markierung durch ein „A“. Der Vergleich von Sommertagen bei autochthonen und nicht-autochthonen Bedingungen zeigt an den fünf Standorten einen jeweils ähnlichen Zusammenhang. An der DWD-Station als auch an den Stationen am Hafenplatz, an der Steinfurter Straße und am Zoo sind ca. 47 bis 48 % der aufgezeichneten Sommertage bei autochthonen Bedingungen aufgetreten. Der erhöhte Anteil an Sommertagen bei vergleichbarer Anzahl autochthoner Verhältnisse führt an der urbanen Klimamessstation an der Hörsterstraße mit 38 % zu einem geringeren Anteil autochthoner Tage.



HEIßE TAGE

Abbildung 54 zeigt für die vier Klimamessstationen im Stadtgebiet von Münster und die DWD-Referenzstation Flughafen Münster-Osnabrück auf, an welchen Tagen im Zeitraum der Messkampagne die Tageshöchsttemperatur 30 °C erreicht oder überschritten wurde und somit ein Heißer Tag vorlag. Erstmals tritt an der urbanen Station Hörsterstraße am 25. Juni ein Heißer Tag auf, während an der urbanen Station Hafenplatz sowie an den ruralen Stationen am Zoo und an der Steinfurter Straße der erste Heiße Tag erst am 26. Juni und an der DWD-Referenzstation erst am 27. Juni innerhalb des Messzeitraums auftritt. Insgesamt liegt die Zahl Heißer Tage im untersuchten Zeitraum an der Station Hörsterstraße (12) über der Anzahl an Heißen Tagen an der urbanen Messstation Hafenplatz (10), sowie der ruralen Messstation am Zoo (11), der Station Steinfurter Straße (9) und der DWD-Referenzstation FMO (7).

Bei der Auswertung Heißer Tage zeigt sich, dass sowohl die urbane (Hörsterstraße) als auch die rurale (Zoo) temporär errichtete Station jeweils zwei Heiße Tage mehr anzeigen als die entsprechenden urbanen bzw. ruralen Standorte der Messstationen der Universität Münster (Hafenplatz, Steinfurter Straße). Beim Vergleich innerhalb der Messstationen der Universität Münster und der temporär eingerichteten Stationen deutet sich dennoch jeweils der städtische Wärmeinseleffekt an, der im urbanen Raum jeweils einen Heißen Tag mehr aufweist. Den deutlich geringsten Wert zeigt die DWD-Referenzstation mit 7 Heißen Tagen, was erneut die Differenz zwischen urbanen und ruralen Standorten unterstreicht.

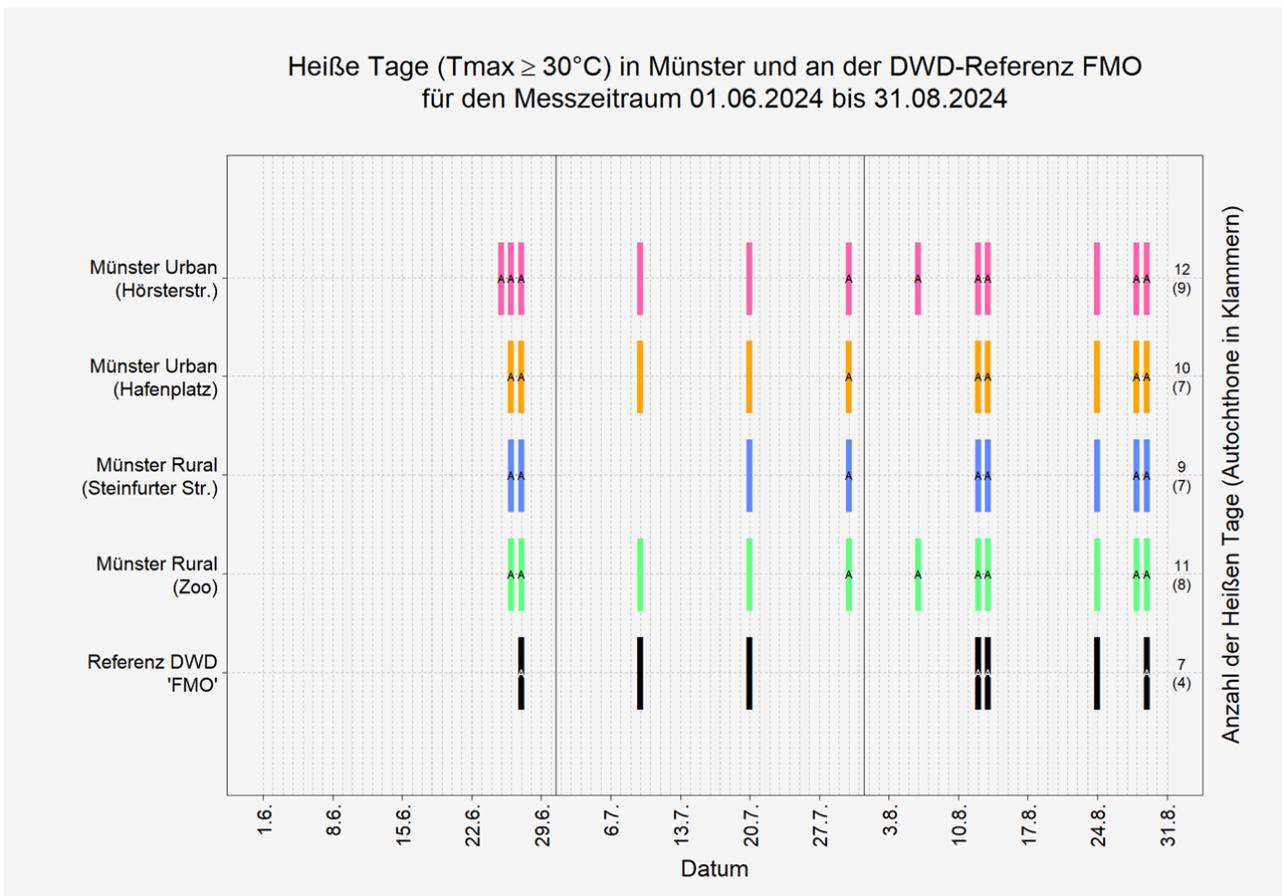


Abbildung 54 Heiße Tage bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 01.06.2024 bis 31.08.2024 an den untersuchten Messstationen im Stadtgebiet von Münster und der Referenz-Station des DWD am Flughafen Münster-Osnabrück.



TROPENNÄCHTE

Tropennächte wurden in Münster zum ersten Mal am 27. Juni für beide urbanen Standorte erfasst (Abbildung 55). Bei der Anzahl an Tropennächten zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den urbanen und ruralen Messstationen. Insgesamt wurden lediglich an den urbanen Standorten Tropennächte registriert, während sie an den ruralen Stationen Steinfurter Straße und Zoo nicht auftraten. Dies bestätigt erneut den städtischen Wärmeinseleffekt. Die Station an der Hörsterstraße verzeichnete dabei 3 Tropennächte, von denen 2 autochthon sind, während am Hafenplatz mit 4 Tropennächten eine Nacht mehr registriert wurde. Dies könnte auf den zusätzlich wärmenden Effekt von Gewässern in der Nacht hindeuten, das vom angrenzenden Hafenbecken ausgeht.

Auffällig ist zudem, dass an der DWD-Referenzstation eine Tropennacht gemessen wurde, obwohl die anderen ruralen Stationen keine aufweisen. Dies könnte auf die weite Distanz zur Stadt Münster und damit lokal abweichende Temperaturen zurückzuführen sein. Möglich ist auch, dass die Temperaturen vom vollversiegelten Flughafenbereich beeinflusst werden, der sich in 50 bis 100 Metern östlicher Richtung befindet und während der Nacht Wärme abstrahlt. Solche Standortbedingungen treten bei den anderen ruralen Messstationen nicht auf, wodurch sich die Abweichung erklären lässt.

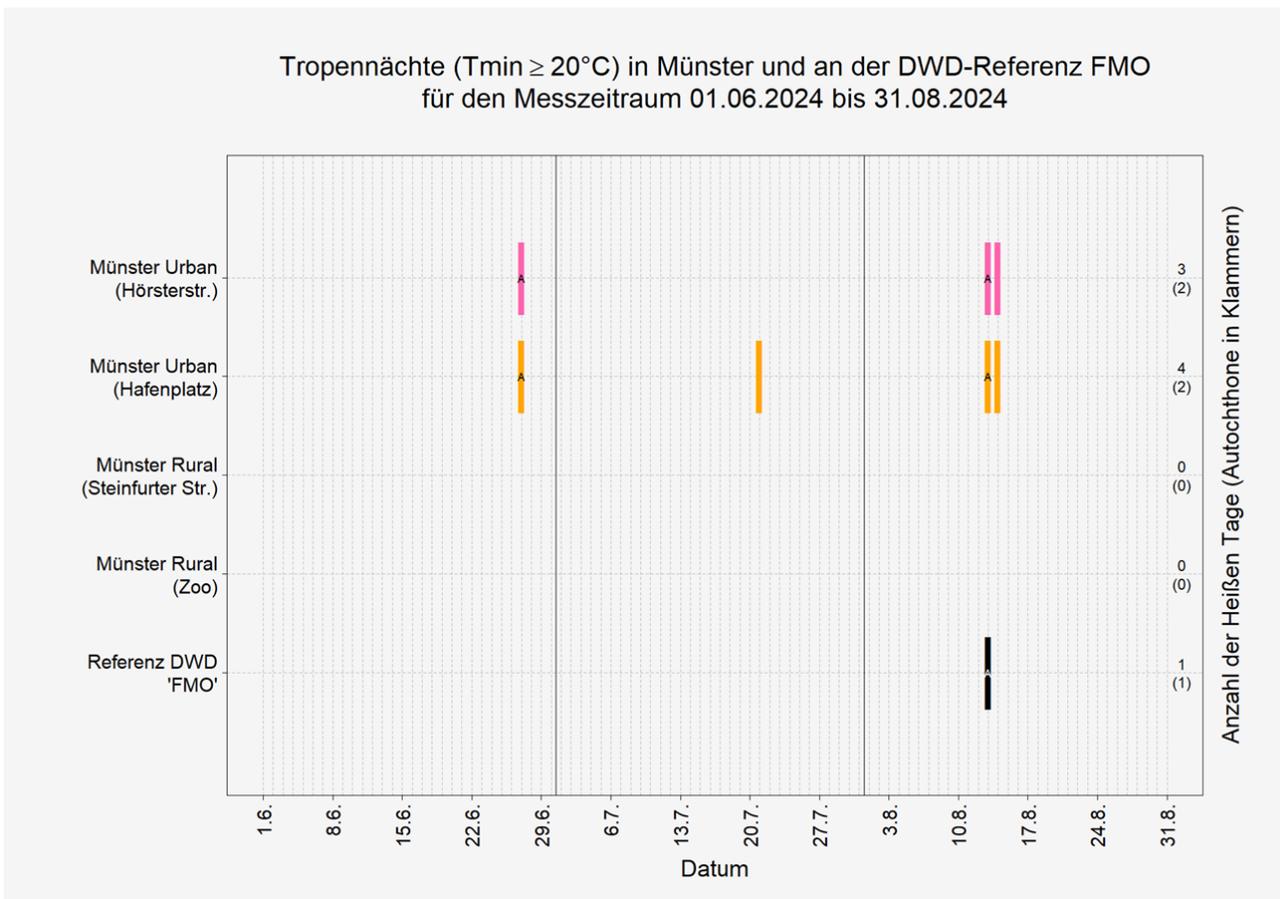


Abbildung 55: Tropennächte bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 01.06.2024 bis 31.08.2024 an den untersuchten Messstationen im Stadtgebiet von Münster und der Referenz-Station des DWD am Flughafen Münster-Osnabrück.



6.2.2 AUSARBEITUNG DOMINIERENDER WINDRICHTUNGEN IM UNTERSUCHTEN ZEITRAUM (01.06.2024 – 31.08.2024)

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die während der sommerlichen Messkampagne vom 01.06.-31.08.2024 aufgezeichneten Hauptwindrichtungen an den urbanen und den ruralen Stationen sowie an der DWD-Referenzstation Flughafen Münster-Osnabrück ausgewertet. Bei der Betrachtung von Abbildung 56, die eine Auswertung aller Stunden des untersuchten Zeitraumes aufzeigt, fällt auf, dass die Hauptwindrichtungen an den untersuchten Stationen zwar Gemeinsamkeiten aufweisen, allerdings bei genauerer Betrachtung unterschiedlich ausfallen. An allen untersuchten Standorten herrschen südwestliche Hauptwindrichtungen, wobei diese signifikant unterschiedlich breit gefächert sind. So lässt sich die Hauptwindrichtung am Zoo beispielsweise auf einen geringeren Bereich von 190° bis 230 °südwestlicher Richtung einschränken, während sich dieser an der Hörsterstraße deutlich weiter auf einen Bereich von 180° bis 270 °südwestlicher Richtung erstreckt. Auffällig ist, dass die Messstation am Hafenplatz neben der Hauptwindrichtung aus 220 – 240 ° südwestlicher Richtung eine weitere Hauptwindrichtung aus entgegengesetzter nordöstlicher Richtung (50 – 70 °) aufweist, was auf den „Straßenschluchtcharakter“ in diese beiden Richtungen und die damit verbundene Ablenkung des Windes entlang der Gebäude zurückzuführen ist. Die Windgeschwindigkeiten an den urbanen Stationen an der Hörsterstraße und am Hafenplatz sind mit überwiegend schwachen Windgeschwindigkeiten zwischen 0-3 m/s (Mittelwerte: 1,3 bzw. 1,2 m/s) und Windspitzen bis zu 4,2 m/s an der Hörsterstraße deutlich geringer als an den rauhigkeitsarmen, ländlich gelegenen Stationen, bei Mittelwinden zwischen 2,6 m/s (DWD) und 1,7 m/s (Zoo, Steinfurter Straße) und Windböen bis ca. 11,3 m/s (DWD).

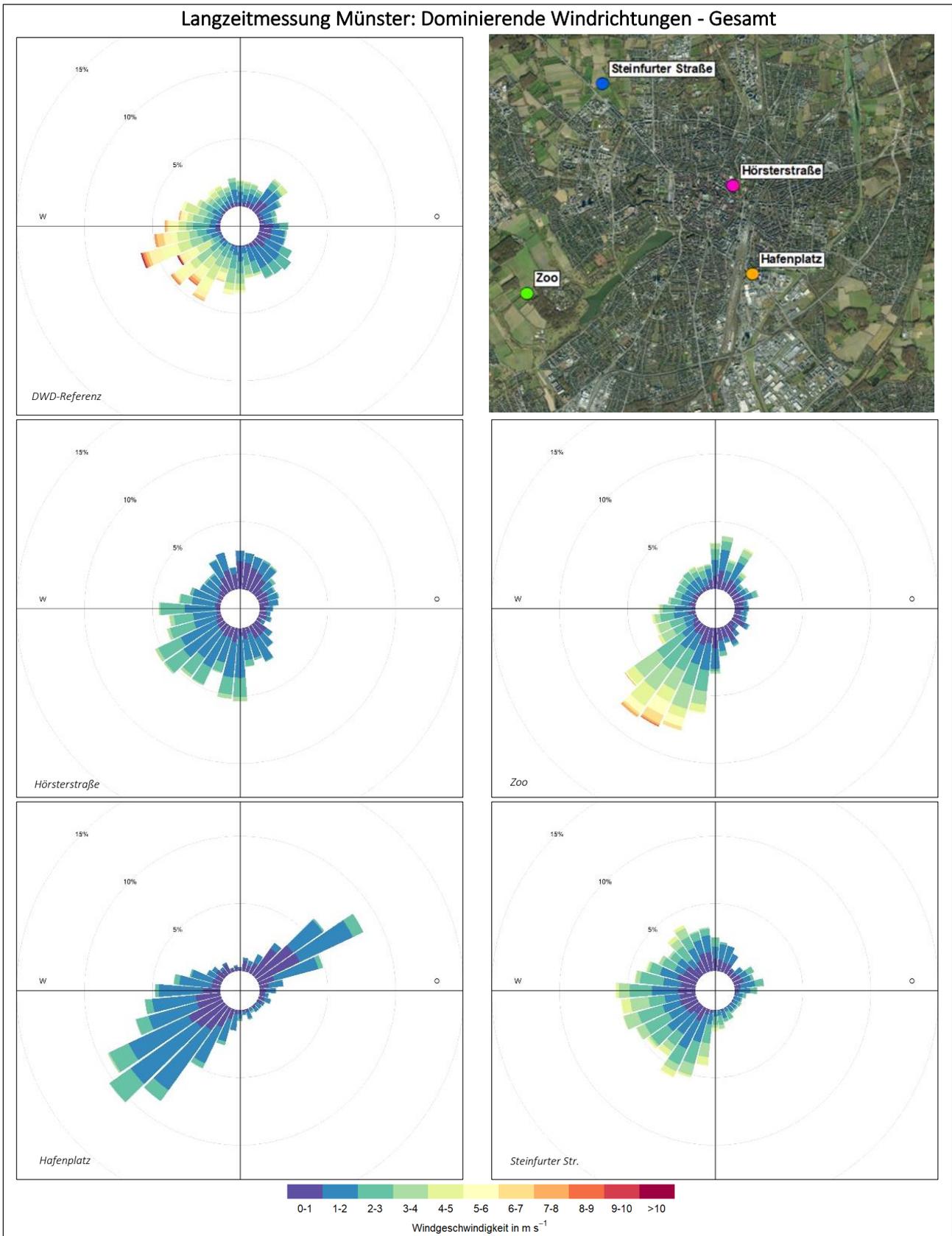


Abbildung 56: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2024 – 31.08.2024 für alle Stunden an den untersuchten Klimamessstationen. Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.



Abbildung 57 zeigt die vorherrschende Windrichtung innerhalb der Nachtstunden von 19 - 07 Uhr MESZ des Untersuchungszeitraums. Da hierdurch die am Tage auftretenden Turbulenzeffekte nicht stattfinden, sinken allgemein die Windgeschwindigkeiten, wobei die DWD-Station mit 2,4 m/s die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten aufzeigt (vgl. 1,0 m/s am urbanen Standort an der Hörsterstraße bzw. 1,2 m/s am ruralen Standort am Zoo). An den Standorten am Hafenplatz und an der Steinfurter Straße treten in Bezug auf die Hauptwindrichtung keine signifikanten Änderungen auf. Am urbanen Standort an der Hörsterstraße und an den rural gelegenen Stationen am Zoo und am Flughafen ist eine Zunahme der Windrichtungen aus Nordost zu erkennen, wobei an der Hörsterstraße und am Zoo weiterhin je eine vorliegende Hauptwindrichtung aus Südwest zu beobachten ist. Bei der ruralen Station am Zoo zeichnet sich demnach eine erkennbare Aufteilung in Südwest/ Nordost ab.

Da in der Modellsimulation eine nächtliche autochthone Wettersituation vorlag, um übergeordnete Windsysteme weitgehend auszuschließen, werden in Abbildung 58 ebenfalls nur autochthone Nachtstunden im sommerlichen Messzeitraum untersucht. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass sich die auftretenden Windströmungen weiter von den Windrichtungen des Gesamtzeitraums abgrenzen. 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 mit einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von nur noch 1,4 m/s, wobei auf 120 ° im Osten das Richtungsmaxima zu finden ist. An der Station an der Hörsterstraße dominieren Windrichtungen aus Nord, hier liegt die durchschnittliche Windgeschwindigkeit mit 0,9 m/s im Vergleich zur DWD-Station auf einem geringeren Niveau. Am urbanen Standort am Hafenplatz ist weiterhin eine deutliche Aufteilung der Hauptwindrichtung auf Nordost und Südwest zu erkennen, was auf den von den lokalen Gegebenheiten verursachten Düseneffekt der Luftströmung zurückzuführen ist. Dabei treten maximale Windgeschwindigkeiten unter 2 m/s auf. Während am ruralen Standort am Zoo eindeutig Winde aus nördlicher Richtung mit maximalen Geschwindigkeiten bis zu 3 m/s dominieren, deutet sich an der Steinfurter Straße kein eindeutiges Bild ab. Hier dominieren Windrichtungen aus Südwest bis Nordost, mit ebenfalls maximalen Geschwindigkeiten von bis zu 3 m/s.

Die Hauptwindrichtungen in den autochthonen Nächten lassen sich damit für die ruralen Standorte an der Steinfurter Straße und am Zoo auf Hangwinde zurückführen, die dem schwachen Gelände entsprechend hangabwärts strömen. Für den Standort am Flughafen treten die Windströmungen aus Südost ebenfalls reliefbedingt auf, während bei den Strömungen aus Nordost thermisch induzierte Winde aufgrund des in der Nacht überwärmten Flughafenbereichs verantwortlich sind. An der Hörsterstraße lässt die Hauptwindrichtung aus Nord ebenfalls auf thermisch induzierte Winde schließen, die in Richtung des Zentrums des überwärmten Parkplatzes strömen. Die signifikante Aufteilung am Hafenplatz in nordöstliche sowie südwestliche Winde sind grundsätzlich den lokalen Gegebenheiten der Bebauung geschuldet. Hinzu kommt, dass sowohl in südwestlicher Richtung mit dem großflächigen Straßenbereich als auch in nordöstlicher Richtung mit dem Hafenbecken Landnutzungsformen vorliegen, die in der sommerlichen und nächtlichen Betrachtung Wärme-Hotspots darstellen und entsprechend Antreiber für thermisch induzierte Windsysteme bilden können.

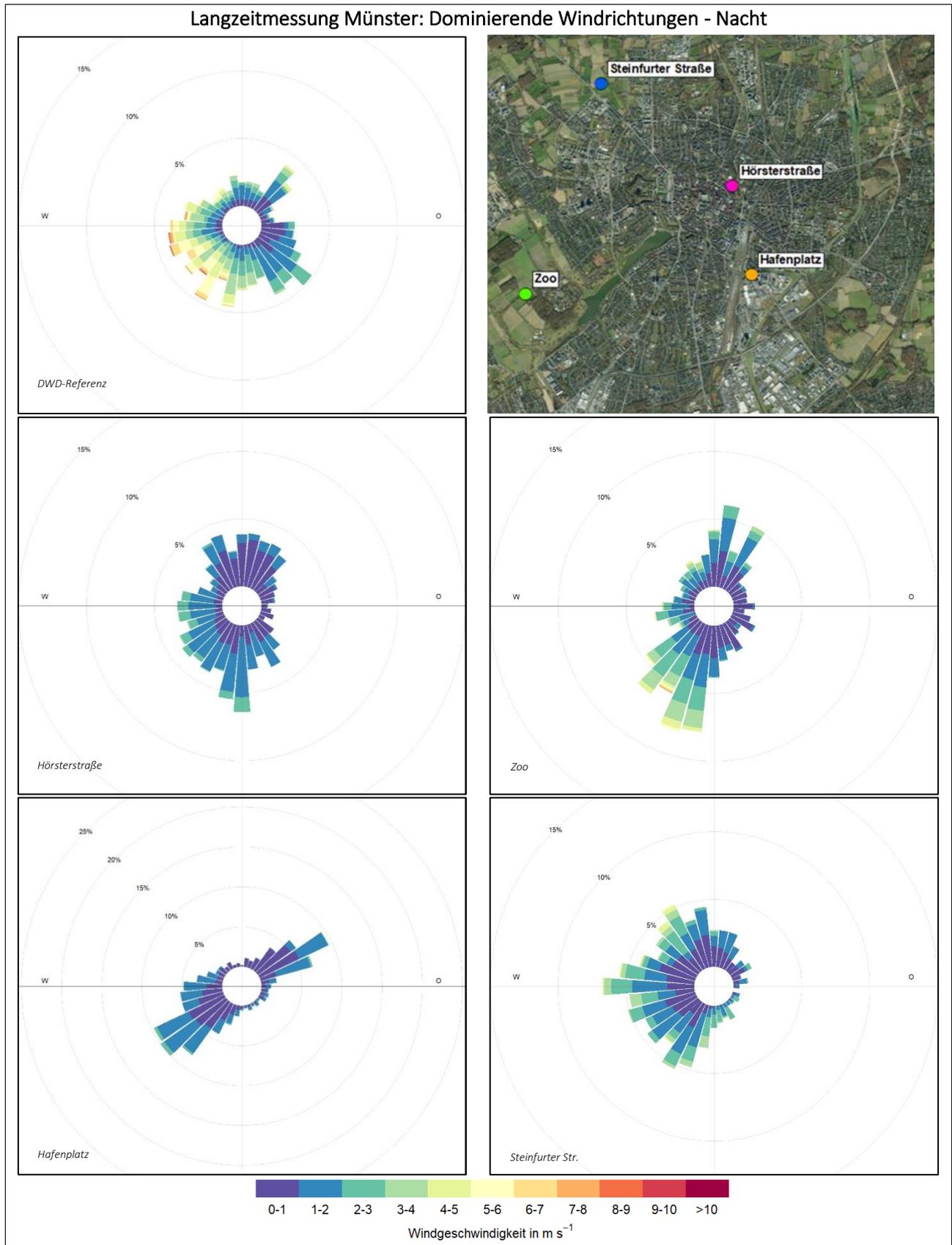


Abbildung 57: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2024 – 31.08.2024 für alle Nachtstunden (19-07 Uhr MESZ) an den untersuchten Klimamessstationen. Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.

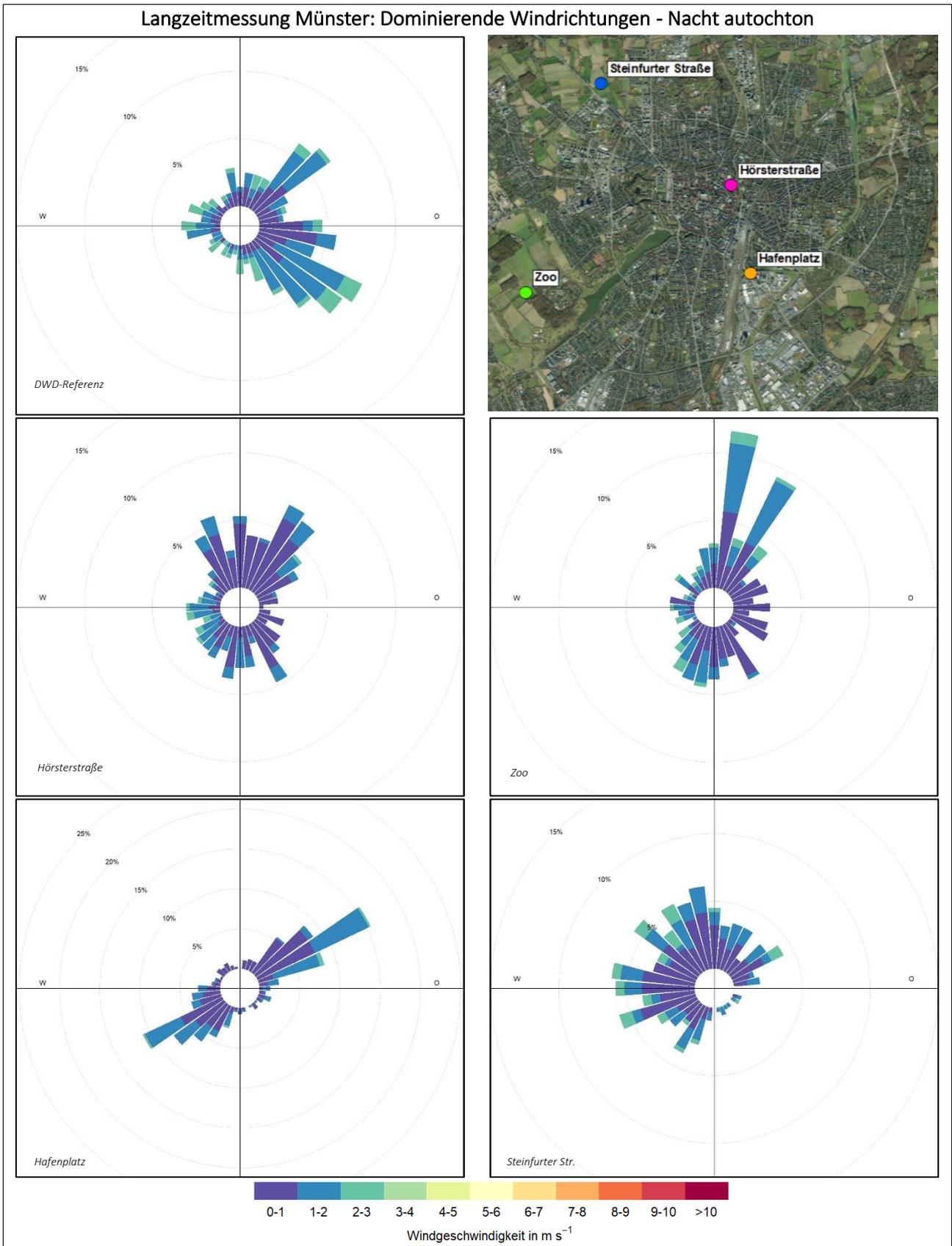


Abbildung 58: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2024 – 31.08.2024 für alle autochtonen Nachtstunden (19-07 Uhr MESZ) an den untersuchten Klimamessstationen. Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.



In Abbildung 59 ist die modellierte nächtliche Windrichtung und -geschwindigkeit an den Stationen im Stadtgebiet von Münster für 04 Uhr nachts dargestellt. Dies bietet die Möglichkeit eines Vergleichs mit den Messungen der Sommermesskampagne in Münster, 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 den urbanen Stationen geringer als an den ruralen Stationen. Auch bei der modellierten Windrichtung sind große Übereinstimmungen zur Messung festzustellen. Während an der ruralen Station an der Steinfurter Straße großflächig nordwestliche Winde modelliert wurden, wird an der urbanen Station an der Hörsterstraße mit nordöstlichem Wind der Hauptwindsektoren getroffen. Bei den Messungen entsprechenden stark aufgeteilten Hauptwindrichtungen am Hafenplatz in Nordost und Südwest, hat das Modell mit einem Windfeld in nordöstliche Richtung zum Hafenbecken eine der beiden Hauptwindrichtungen bestätigt. Für die Messstation am Zoo gibt die Modellierung kein eindeutiges Ergebnis, da für den Standpunkt der Station ein windschwacher Bereich modelliert wurde ($\leq 0,1$ m/s). Aus den Modellierungsergebnissen geht hervor, dass sich das Windfeld in diesem Bereich zweiteilt. So gehen nördlich bis östlich des Standortes der Messstation Windströmungen in nördliche Richtung aus und südlich bis westlich des Standortes Windströmungen in südliche Richtung aus. Dementsprechend ist eine Übereinstimmung der Modellergebnisse mit den Ergebnissen der Messungen erkennbar, jedoch nicht eindeutig, da sich die Station im Übergangsbereich der modellierten Windströmungen befindet.

Grundsätzlich bleibt anzumerken, dass die im Modell angenommenen Bedingungen immer auch eine Vereinfachung der Realität darstellen. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass vereinzelt übergeordnete Windsysteme auf die Ergebnisse der autochthonen Nächte während der Messkampagne Einfluss genommen haben. Auch die vereinfachte Erfassung der realen Gegebenheiten von Landnutzung, Geländehöhe und Strukturhöhe können trotz der hohen Auflösung im Modell (5 m) zu geringfügigen lokalen Abweichungen zwischen modelliertem und tatsächlichem Windfeld führen.

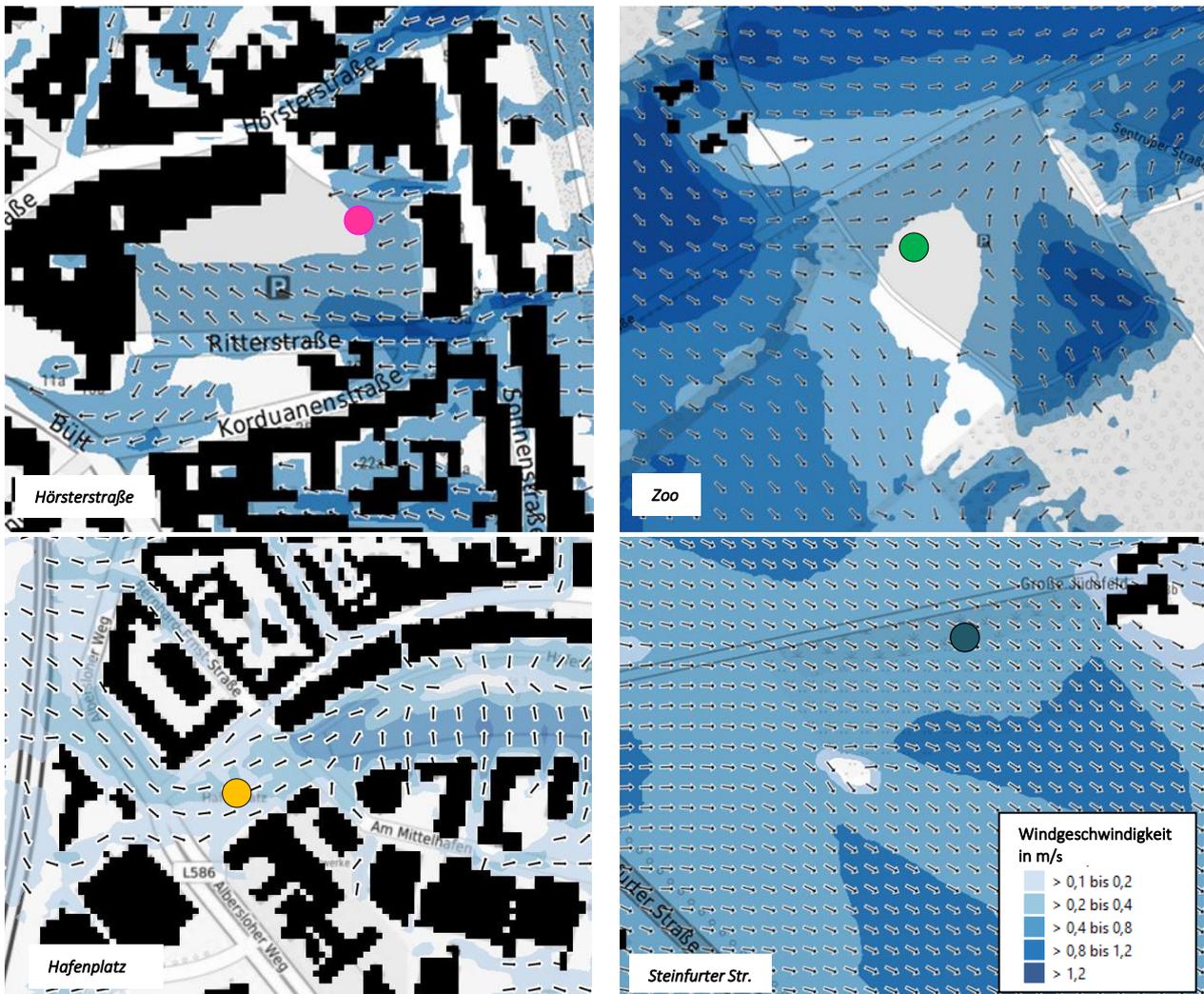


Abbildung 59: Modellierte nächtliche Windrichtung und -geschwindigkeit von 04:00 Uhr an den ruralen und urbanen Messstandorten zu einer autochthonen Wettersituation.

6.2.3 WETTERSITUATION WÄHREND EINER EXEMPLARISCHEN HITZEPERIODE (24.-27.06.2024)

Die Auswertung einer exemplarischen Hitzeperiode ermöglicht die Analyse von Unterschieden im Tagesgang der Messgrößen an den verschiedenen Messstandorten in Münster. Dafür wurde die niederschlagsfreie Hitzeperiode im Zeitraum der Messkampagne vom 24. bis 27.06. gewählt, die sich, wie an der ca. 20 km entfernten DWD-Station FMO gemessen, zusätzlich durch überwiegend sehr hohe Sonnenscheindauern zwischen 13,7 und 15,7 Sonnenstunden auszeichnete (Abbildung 60). Das tagsüber teils wolkige Erscheinungsbild mit bis zu 6 Achteln Bedeckungsgrad und teils höher schlägt sich dabei vor allem auf die tägliche Sonnenstundendauer am 24.06. nieder, doch auch die Nachmittagsstunden des 26.06. sowie die Mittagsstunden des 27.06. zeigen den Einfluss von Bewölkung in Form von reduzierter Sonnenscheindauer. Am 26.06. tritt keine Bewölkung auf, wodurch die maximale tägliche Sonnenscheindauer an diesem Tag erreicht wird.

Die Windgeschwindigkeiten verblieben an den vier Stationen und der DWD-Referenz auf einem schwachen bis mäßigen Niveau zwischen weniger als 1 bis maximal ca. 4,0 m/s am Tage und nochmals geringeren Werten in der Nacht (Abbildung 61). Dabei zeigten sich die Windgeschwindigkeiten der ruralen Messstationen im rauhigkeitsarmen Umland (Steinfurter Str., Zoo, DWD) allgemein höher als in der Stadt (Hörsterstr., Hafenplatz), teils um bis zu 1,6 m/s (z.B. 27.06. um 16:00 Uhr; vgl. Hörsterstr. und Zoo).

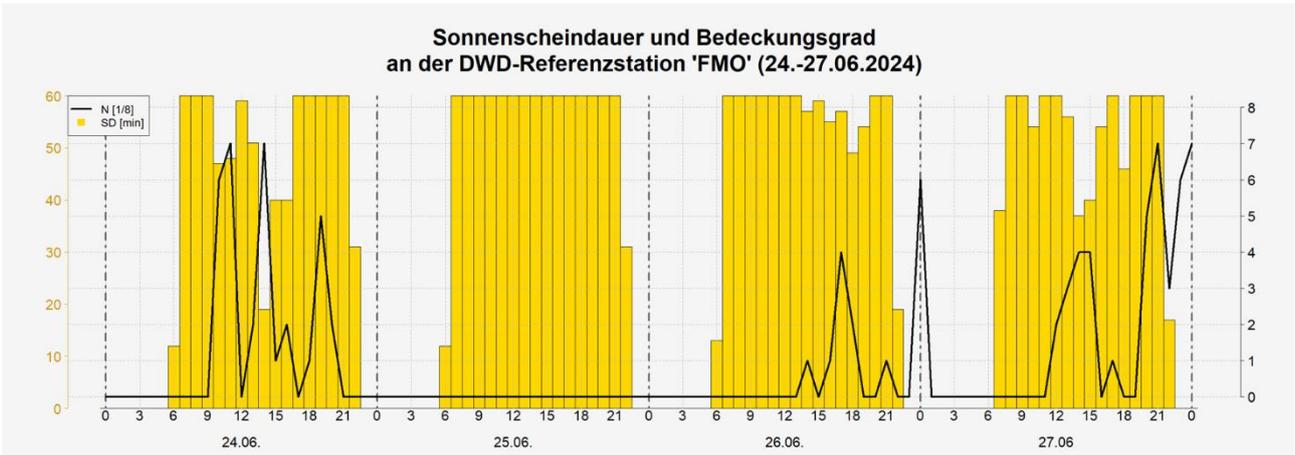


Abbildung 60: Sonnenscheindauer (SD) und Bedeckungsgrad (N) zur betrachteten Hitzeperiode vom 24.-27.06.2024, ermittelt an der DWD-Station FMO.

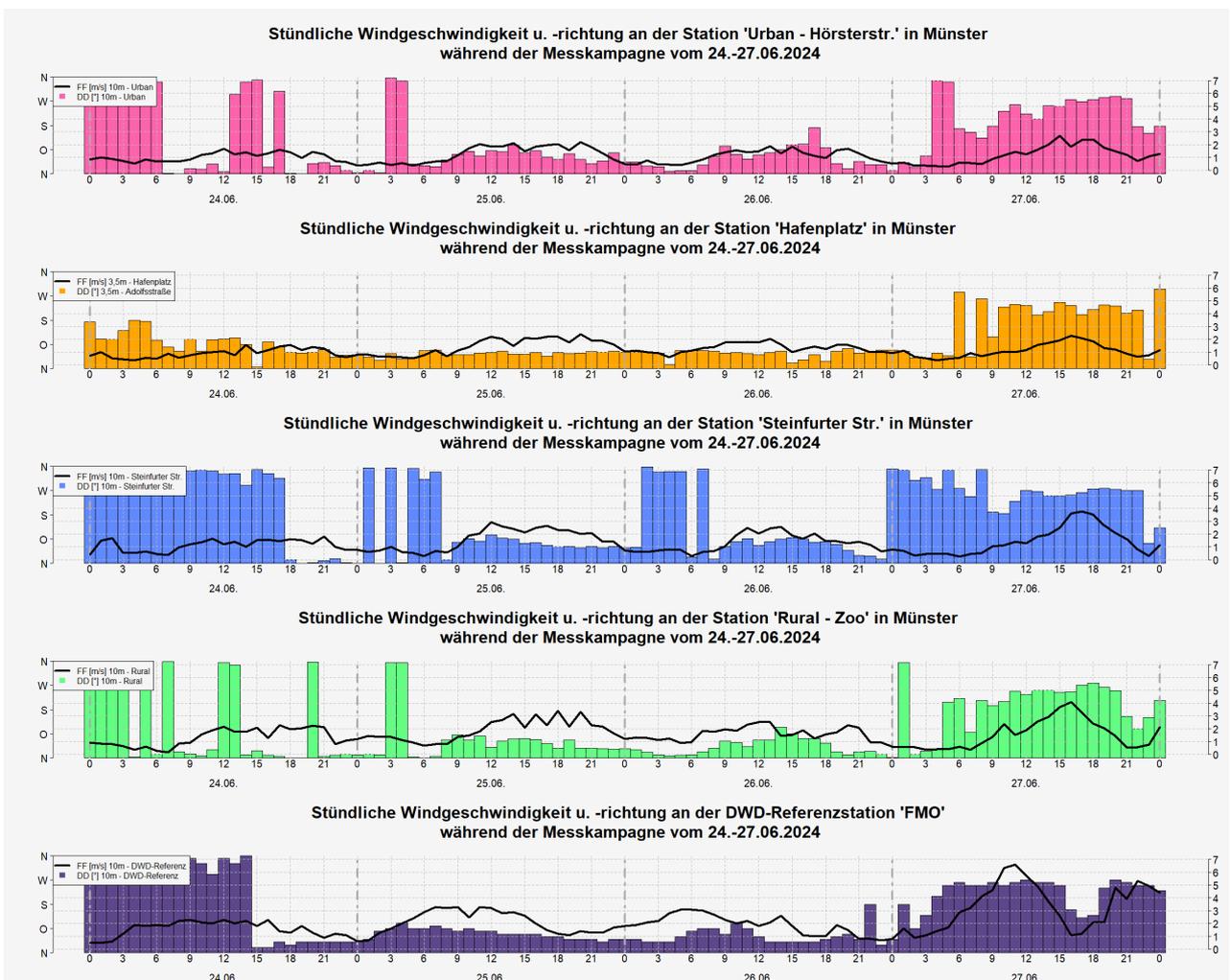


Abbildung 61: Gemessene stündliche Windgeschwindigkeiten (FF) und -richtungen (DD) auf 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode vom 24.-27.06.2024, ermittelt an den Messstationen in Münster und an der Referenz-Station des DWD am Flughafen Münster-Osnabrück.

Abbildung 62 zeigt den Tagesgang der mittleren Temperatur für die zwei temporären Messstandorte in Münster (Hörsterstr., Zoo), sowie den Standorten der Universität Münster (Hafenplatz, Steinfurter Str.) und des DWD-Referenzstandortes während der gewählten heißen 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 24.-27.06. an allen Standorten täglich an. Weiterhin wird ersichtlich, dass die Innenstadttemperaturen an der Hörsterstraße nahezu jederzeit höher sind als jene im Umland am Zoo und an der Steinfurter Straße, wobei dieser Effekt am Tage mit einer Temperaturdifferenz von bis zu 1,8 K (um 16:00 Uhr) etwas geringer zur Geltung kommt als in der Nacht mit Differenzen von bis zu 2,7 K (um 04:00 Uhr). Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der rurale Standort an der Steinfurter Straße mit Ausnahme des 27.06. tendenziell ein geringeres Temperaturniveau annimmt als der Standort am Zoo. Auffällig ist der reduzierte Tagesgang der Lufttemperatur am urbanen Standort am Hafenplatz. An diesem Standort werden (mit Ausnahme der DWD-Referenzstation) innerhalb der gesamten Hitzeperiode die höchsten Tagesminimaltemperaturen in der Nacht sowie die geringsten Maximaltemperaturen am Tage gemessen. Dieses Phänomen könnte auf den Standort in ca. 100 m Entfernung zum Hafenbecken zurückzuführen sein. Aufgrund einer hohen Wärmespeicherkapazität weisen Gewässer grundsätzlich geringere Tagesgänge der Temperatur auf. Dadurch kann von ihnen im Sommer tagsüber ein Kühleffekt und in der Nacht ein wärmender Effekt ausgehen. Der Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland beschreibt den Wärmeinseleffekt. Die Referenzkurve des DWD ist nahezu im gesamten Messzeitraum kühler als die Temperaturmessungen am urbanen Standort an der Hörsterstraße und mit Einschränkungen auch am urbanen Standort am Hafenplatz. Im Vergleich zu den ruralen Standorten am Zoo und an der Steinfurter Straße nähern sich die Temperaturwerte der beiden urbanen Stationen nach Sonnenaufgang etwas an, während mit Ausnahme des 26.06. in der Nacht tendenziell kühlere Werte an der DWD-Station auftreten.

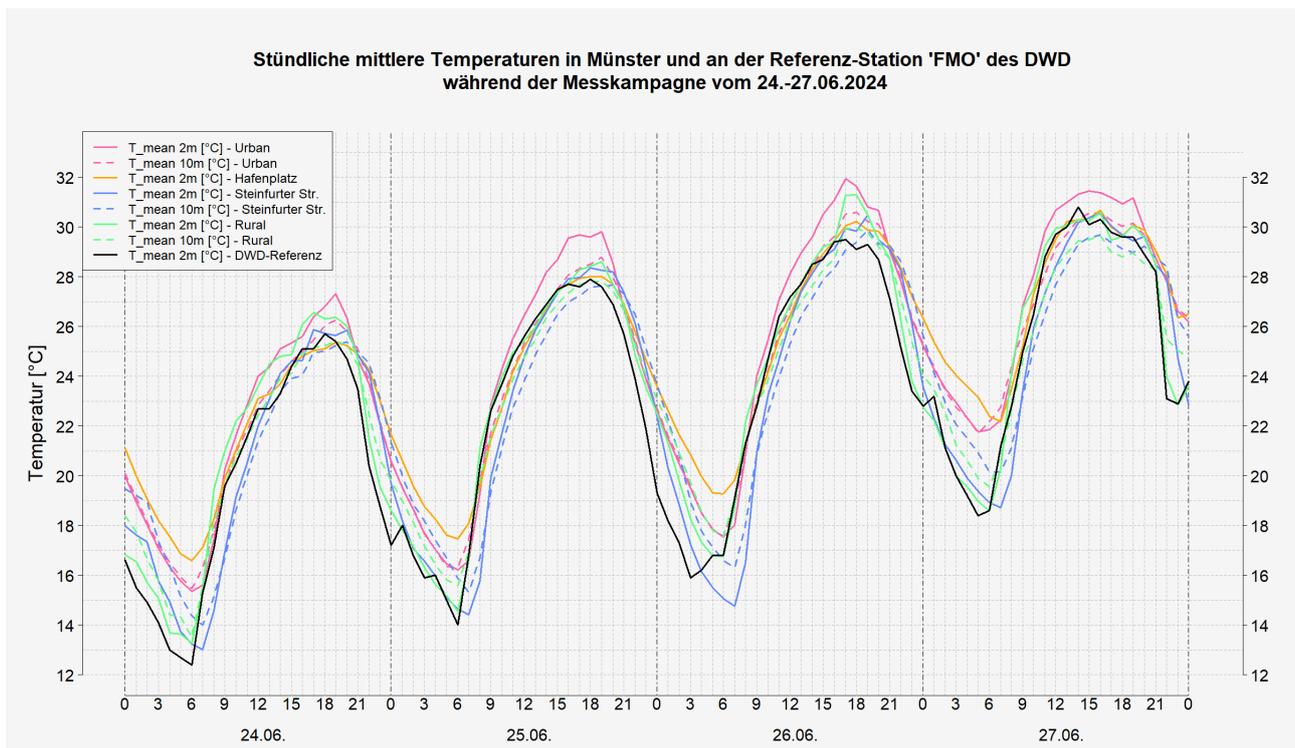


Abbildung 62: Gemessene stündliche Temperaturen auf 2 m und 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode vom 24.-27.06.2024, ermittelt an den Messstationen in Münster und an der Referenz-Station des DWD Flughafen Münster-Osnabrück.

Zum Sonnenaufgang gegen 06:00 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 an der Station am Zoo lediglich vom Boden aus Wärme abgestrahlt wird. Neben dem Material ist auch die Farbe der Oberflächen von Belang: Helle 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.

Die Hitzeperiode wird auch durch die Temperaturmaxima aller Stationen unterstrichen. Alle untersuchten Klimamessstationen registrierten vom 24. bis 27.06 Temperaturen jenseits der 25 °C, die somit als Sommertage definiert wurden. Für den urbanen Standort an der Hörsterstr. werden zudem ab dem 25.07. und für die Standorte am Hafenplatz, am Zoo und an der Steinfurter Straße ab dem 26.07. Temperaturwerte jenseits der 30 °C erreicht und damit ein Heißer Tag registriert. Auf Basis der Daten der DWD-Referenzstation ist dies lediglich für den 28.06.2024 der Fall.

Ab den Abendstunden (Sonnenuntergang gegen 21:30 Uhr) und in der ersten Nachthälfte fallen die Temperaturen der Stationen im ländlichen Raum an der DWD-Referenzstation, am Zoo sowie an der Steinfurter Straße rascher ab als in der Stadt, was an den steileren Kurven zu erkennen und auf die höheren Wärmekapazitäten im urbanen Raum bzw. an den urbanen Stationen zurückzuführen ist. Die Temperaturen verbleiben in der Folge im Innenstadtbereich an der Hörsterstraße und am Hafenplatz tendenziell auf einem erhöhten Niveau, wobei der Standort am Hafenplatz die höchsten nächtlichen Temperaturen aufweist. Die Temperaturen an der DWD-Station kühlen dagegen im Verlauf der Nacht grundsätzlich am stärksten ab und zeigen mit Ausnahme des 26.06. die geringsten Minima. Gleiches gilt für die Wiesen an den ruralen Stationen am Zoo und an der Steinfurter Straße, die sich jedoch nicht ganz so stark abkühlen wie der Standort der DWD-Referenzstation. Eine Ausnahme bildet dabei die Nacht vom 25. auf den 26.06., wo die Abkühlung an der Steinfurter Straße signifikant am stärksten ausfällt. Tropennächte bei Temperaturminima ≥ 20 °C werden im untersuchten Zeitraum der Hitzeperiode für die Nacht vom 26. auf den 27.06. an beiden urbanen Stationen festgestellt.

Die Temperaturwerte der Messung auf 10 m ü. Gr. sind in der Nacht stets höher als jene derselben Station auf 2 m, am Tag sind sie zumeist niedriger. Diese Beobachtung hängt damit zusammen, dass am Tage die bodennahen Luftschichten zügiger durch die emittierte Wärmestrahlung aufgeheizt werden als darüber liegende 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 schwerere kalte Luft nach unten absinkt, bodennah stets die geringeren Temperaturwerte registriert werden. Dieser Effekt ist aufgrund der eingeschränkten nächtlichen Kaltluftbildung im urbanen Raum weniger stark ausgeprägt als im Umland.

Während der sommerlichen Messkampagne wurde an den fünf Standorten neben der Temperatur in °C auch die relative Luftfeuchtigkeit (rH) in % aufgezeichnet. Diese Größe bringt eine Temperaturabhängigkeit mit sich und liefert infolgedessen keinen großen Mehrwert gegenüber den gezeigten Temperaturabbildungen. Dennoch zeigt Abbildung 63 exemplarisch die relative Feuchte während der Hitzeperiode vom 24.-27.06.2024. Die Werte der Feuchte liegen am Tage an allen Standorten etwas näher beieinander und auf einem geringeren Wertenniveau und fächern nachts weiter auf. Nahezu überall, wo zuvor Temperaturmaxima registriert wurden, zeigt die Feuchte Minima auf und umgekehrt. Sehr gut ist dies exemplarisch an der urbanen Klimamessstation an der Hörsterstraße zu beobachten, die zuvor stets das höchste Temperaturmaximum offenbarte, nun jedoch die geringsten Feuchteminima und den insgesamt tendenziell niedrigsten Verlauf dieser Größe besitzt.

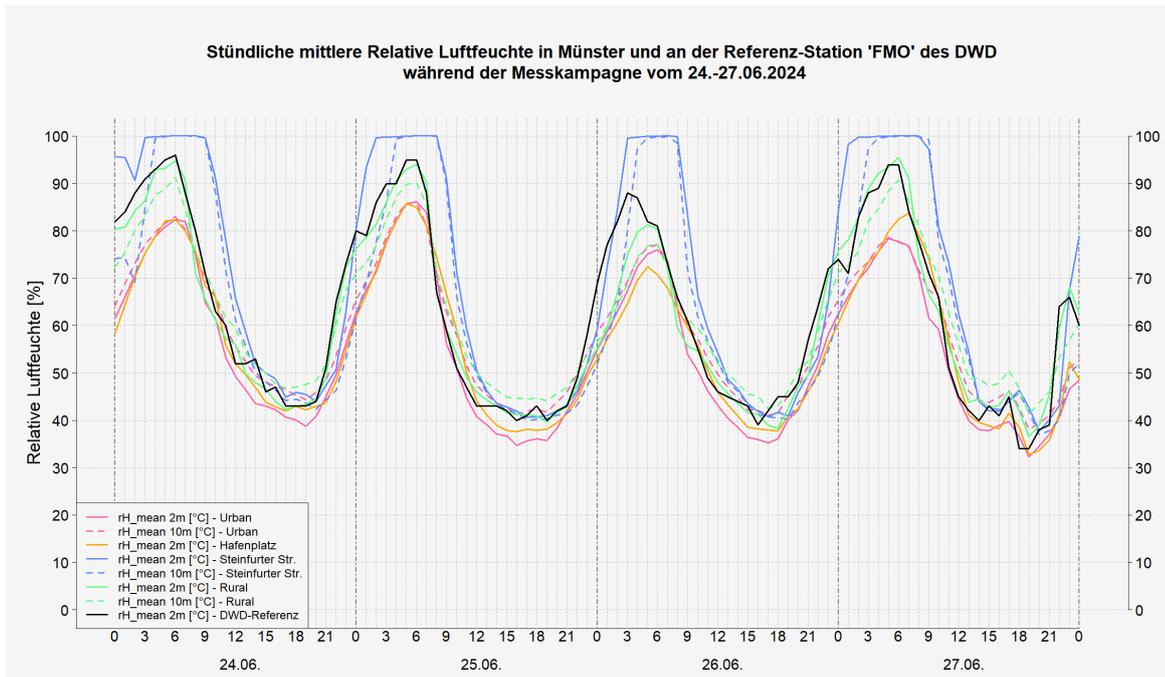


Abbildung 63: Gemessene stündliche relative Luftfeuchtigkeit (rH) auf 2 m und 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode vom 24.-27.06.2024, ermittelt an den Messstationen in Münster und an der Referenz-Station des DWD Flughafen Münster-Osnabrück.

6.2.4 ERGEBNISSE DER MESSFAHRT

Wie bereits in Kapitel 6.2.3 geschildert, entsprach die Wettersituation am Vortag der Durchführung der Messfahrt am 26.06.2024 mit Temperaturen bis zu 32,0 °C an der Station Hörsterstraße für alle Stationen im Stadtgebiet der Definition eines heißen Tages. Verbunden mit dem hohen Anteil an Sonnenstunden konnten sich die Oberflächen im Stadtgebiet dementsprechend stark aufheizen, womit eine ausgeprägte städtische Wärmeinsel zu erwarten war. Zum Zeitpunkt der Messfahrt (02:40 Uhr bis 05:00 Uhr) war darüber hinaus mit einer maximalen nächtlichen Auskühlung der Flächen zu rechnen, die vollständig ausgebildete Flur- und Hangabwindssysteme zur Folge haben. Für die beiden urbanen Standorte an der Hörsterstraße und am Hafenplatz wurde dennoch die Minimaltemperatur von 20 °C nicht unterschritten, wodurch für den urbanen Bereich eine Tropennacht registriert wurde.

Der Temperaturspanne aus der Modellierung von 11,0-21,9 °C gegen 04 Uhr stand eine gemessene Spanne von ca. 18,9-22,5 °C gegenüber. Durch den Vergleich wird deutlich, dass vor allem die Temperaturminima der Modellierung und der Messfahrt stark voneinander abweichen. Mögliche Ursachen für den Unterschied zwischen Modellierung und Messfahrt können zum einen dadurch begründet werden, dass die Messfahrt hauptsächlich auf einer versiegelten Straße stattgefunden hat. Dadurch werden die Temperaturminima im Umland durch die nächtliche Wärmeausstrahlung der Straßenmaterialien beeinflusst. Zum anderen treten die niedrigen Temperaturwerte kleiner 15 °C in den Modellierungsergebnissen größtenteils auf größeren Grünflächen im Umland auf, die im Rahmen der Messfahrt nicht befahren werden konnten. Um dennoch eine visuelle Vergleichbarkeit zwischen den Temperaturwerten der Modellierung mit denen der Messfahrt zu erhalten, wurde die Farbskala der Profilmessfahrt durch einen kleineren Klassenabstand von 0,25 °C so angepasst, dass die Farbgebung der jeweiligen Temperaturextrema übereinstimmen. Dadurch können weiterhin quantitative Aussagen zu den räumlichen Mustern beim Vergleich von modellierten und gemessenen Wärme- und Kältespots im Stadtgebiet getroffen werden. Die Ergebnisse der Messfahrt vom 27.06.2024 02:40 Uhr bis 05:00 Uhr, interpoliert auf den Modellausgabezeitpunkt 04 Uhr, sind in Abbildung 64 aufgetragen (hervorgehoben durch



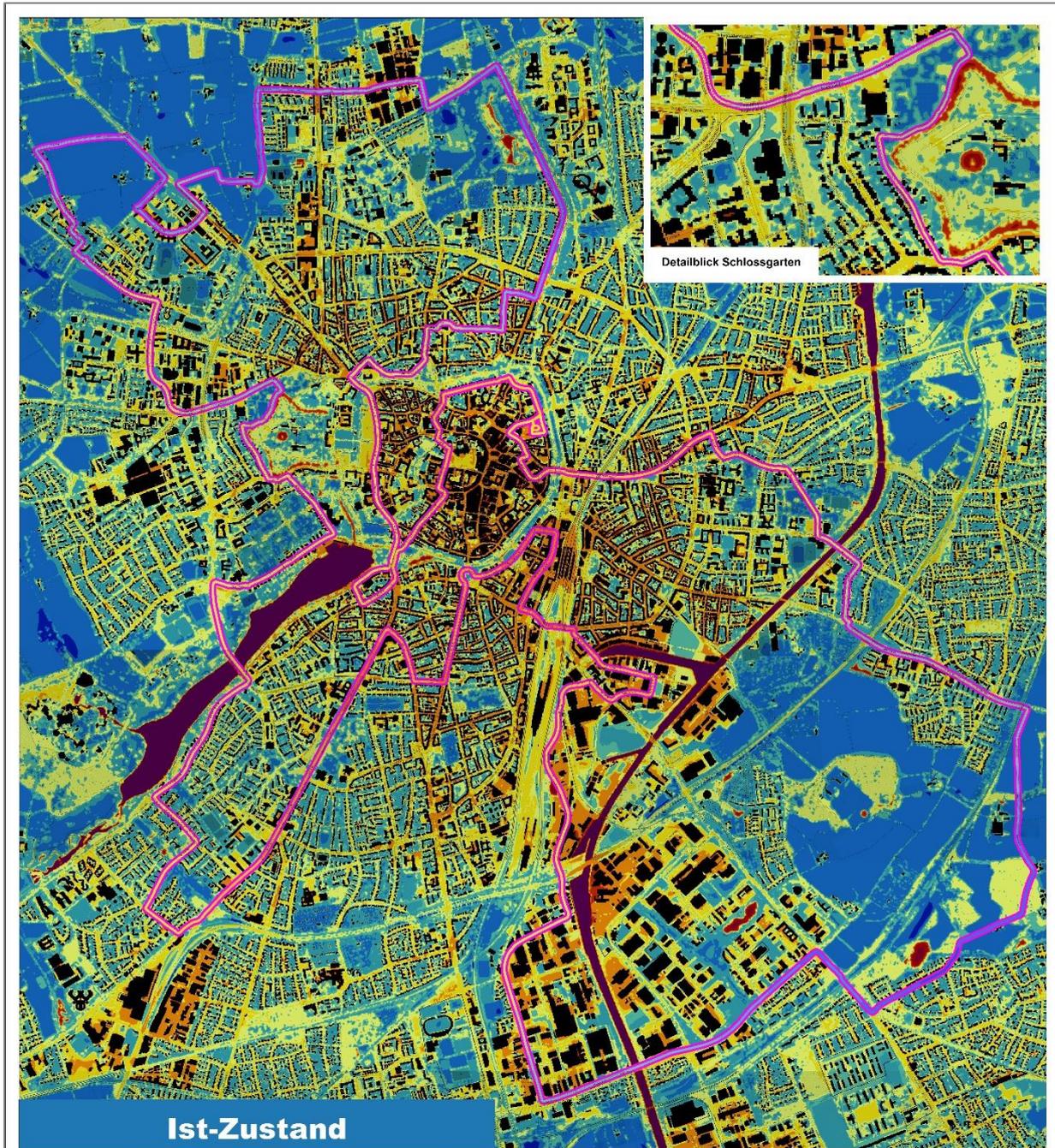
eine pinke Umrandung). Im Hintergrund der Karte befindet sich das flächenhaft modellierte nächtliche Temperaturfeld für 04 Uhr in einer horizontalen Auflösung von 5 m.

Insgesamt ähneln sich die Positionen der Temperaturextrema von 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 (18,9 °C) an den Grünflächen im südöstlichen Stadtgebiet im Bereich des Erbdrostenweges nördlich von Gremmendorf registriert wurde.

Am wärmsten treten im Modell neben den kleineren Gewerbegebieten vor allem die Innenstadtbereiche östlich des Domplatzes und auch im Bereich der Bahnhofsstraße hervor. Letzteres deckt sich mit den Ergebnissen der Messfahrt, die für den Bereich Bahnhofsstraße / Urbanstraße die höchsten Werte mit bis zu 22,5 °C registriert. Auch für den Bereich östlich des Domplatzes werden hohe Werte im Rahmen der Messfahrt erreicht, die mit 21,75 °C etwas unterhalb der Werte an der Urbanstraße liegen. Weniger übereinstimmend ist dagegen die Messung entlang des Gewerbegebietes im Bereich der Siemensstraße. Hier zeigt sich an der Kreuzung zur Trauttmansdorfstraße, dass es bei der Temperaturmessung während der Messfahrt zu einem verzögerten Anstieg der Lufttemperatur kommt. Daraus ergibt sich im Verhältnis zu den restlichen Werten der Temperaturmessfahrt ein eher kühleres Wertenniveau um die 20,0 °C bis 20,5 °C, das jedoch immer noch über den modellierten Temperaturwerten für diesen Bereich liegt. Diese tendenziell kühleren Verhältnisse an der Trauttmansdorfstraße können im Zusammenhang mit dem erhöhten Grünanteil südlich der Straße stehen. Dementsprechend ist es möglich, dass im befahrenen Randbereich des Gewerbegebietes zum Zeitpunkt der Messfahrt eine gute Durchlüftungssituation ausgehend von den umliegenden Grünflächen vorlag.

Wiederum gute Übereinstimmungen sind im Bereich der Grünflächen des Schlossgartens, südlich der Einsteinstraße zu beobachten. Hier werden die Temperaturwerte im Verlauf der Messfahrt zwischen der Hüfferstraße und der Corrensstraße um bis zu 0,75 °C reduziert, wobei im Verlauf der Einsteinstraße erneut eine verzögerte Anpassung der Messwerte festzustellen ist. Dennoch wird der im Modell berechnete Kühleffekt der Grünfläche durch die Messfahrt bestätigt. Weitere gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messung finden sich derweil in Übergangsbereichen zwischen urbanen und ländlich geprägten Strukturen bzw. innerstädtischen Ausgleichsräumen wieder. So zeigen beispielsweise der Siedlungsbereich im Bereich der Warendorfer Straße oder auch der gewerblich genutzte Bereich rund um den Industriegeweg gute Übereinstimmungen der Messung mit dem Modell. Auch der wärmende Einfluss von Gewässern ist im Bereich des Aasees zu erkennen, auch wenn sich dieser nur geringfügig mit einem Temperaturanstieg bis zu 0,2 °C im Bereich der Torminbrücke in den Messwerten widerspiegelt.

Etwas weniger gut passen auf den ersten Blick andere befahrene Siedlungsbereiche zur Modellierung. Hierbei ist beispielsweise der Bereich der Kreuzung Albersloher Weg / Erbdrostenweg im Südosten des Stadtgebietes zu nennen. Dieser fällt mit der blauen Farbgebung der Messung im Vergleich zur eher grün-gelblich eingefärbten Umgebung der Modellierung unterschiedlich aus. Dabei sollte jedoch berücksichtigt werden, dass dieser Siedlungsbereich über einen hohen Grünanteil mit hohem Baumbestand verfügt. Das hat zur Folge, dass sich in den Modellierungsergebnissen ein erhöhtes Temperaturfeld aufgrund von aufgestauten warmen Luftmassen im Kronenbereich der Baumstandorte widerspiegelt. Da die Befahrung aber im Verkehrsraum stattfand, wo die Baumkronendichte mitunter nicht ganz so hoch ist, kann hier entgegen den Modellierungsergebnissen eine gute Durchlüftungssituation und entsprechend nächtliche Abkühlung vorliegen, zu dem auch die teils begrünten Vorgärten im Umfeld beitragen.



Lufttemperatur in der Nacht [in °C in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr]

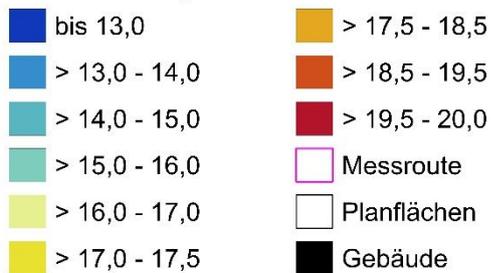


Abbildung 64: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt der zweiten Nachhälfte (auf 04 Uhr normiert) und dem FITNAH-Modelllauf von 04 Uhr. Inklusive Detailblick auf den Bereich Schlossgarten.

6.2.5 ERGEBNISSE DER VERTIKALSONDIERUNGEN

Am 25. Juni und in der Nacht zum 26. Juni 2024 fanden Vertikalsondierungen mit einer Drohne an der urbanen Station an der Hörsterstraße und an der ruralen Station am Zoo statt. Dadurch wurden Ergebnisse für den frühen Nachmittag (13:24 Uhr urban; 14:49 rural) sowie kurz vor Sonnenaufgang (03:40 Uhr urban; 04:37 rural) für die beiden Standorte generiert, die im Folgenden verglichen werden. Dabei wird zuerst die Messung der Lufttemperatur am frühen Nachmittag, nachfolgend jene in den Nachtstunden kurz vor Sonnenaufgang vorgestellt.

Abbildung 65 zeigt die grafische Darstellung der mittels drohnenbasierter Vertikalsondierung erhobenen Temperatur um 13:24 Uhr am urbanen Standort an der Hörsterstraße sowie um 14:49 Uhr für die Messung am ruralen Standort am Zoo. Zu diesem nachmittäglichen Zeitpunkt zeigt sich an beiden Standorten eine „klassisch“ mit der Höhe abnehmende Lufttemperatur. Der Boden nimmt insb. zu dieser Zeit kurz nach Sonnenhöchststand solare Strahlung auf, speichert sie als Wärme und gibt diese teils wieder an die umgebende, bodennahe Luft ab. Bodennah zeigt sich dabei, dass die Temperaturen an den beiden Standorten ein ähnliches Wertespektrum aufweisen. Die Temperatur am urbanen Standort an der Hörsterstraße liegt dabei mit 27,6 °C etwa 0,5 K über dem Wert des ruralen Standorts (27,1 °C). Dabei ist zu beachten, dass die Messung am Zoo aus logistischen Gründen zu einem späteren Tageszeitpunkt erfolgte und dementsprechend tagesgangbedingt bereits etwas höhere Temperaturwerte im Vergleich zur Uhrzeit der Messung an der Hörsterstraße auftreten. Entsprechend wäre eine höhere Temperaturdifferenz zu erwarten, wenn beide Messungen zeitgleich durchgeführt worden wären. Insgesamt nimmt die Temperatur auf den ersten 100 Höhenmetern am urbanen Standort mit ca. 2,9 K in der Höhe stärker ab als am ruralen Standort (ca. 1,6 K), was bestätigt, dass sich die Temperatur am urbanen Standort oberflächennah stärker erwärmt.

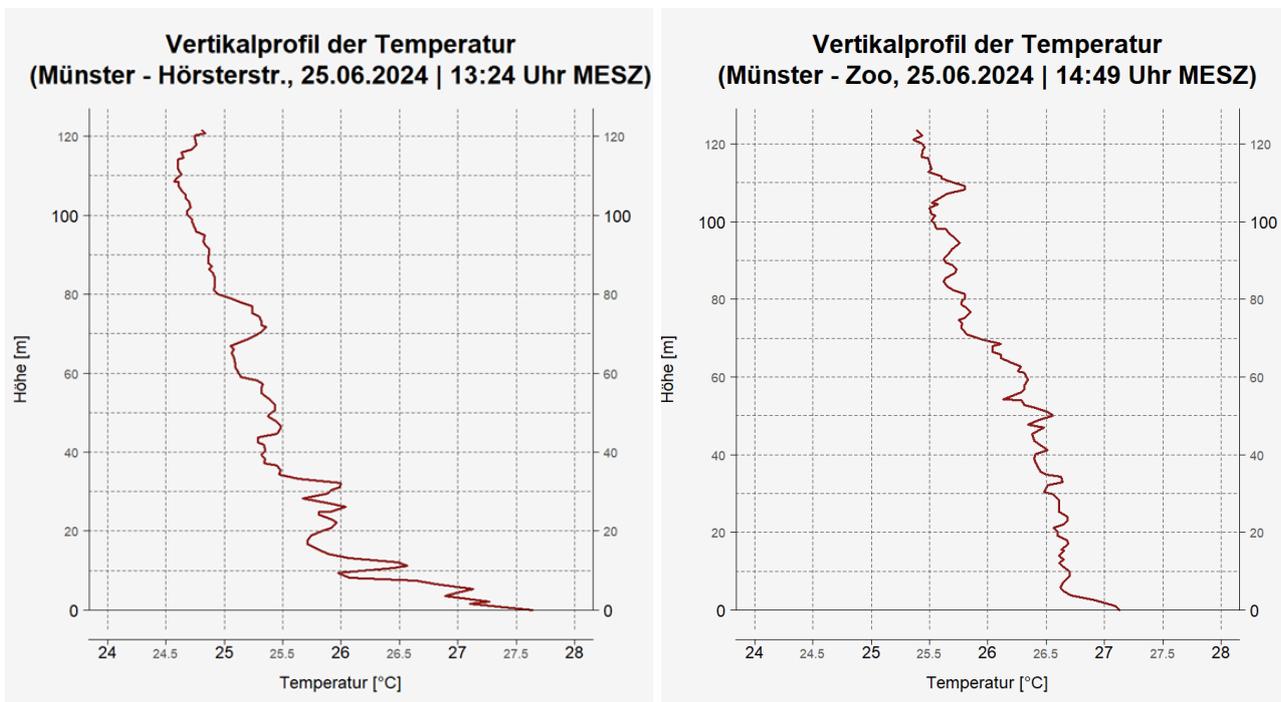


Abbildung 65: Vertikalprofile der Lufttemperatur am urbanen Standort an der Hörsterstraße (links) und am ruralen Standort am Zoo (rechts) am Nachmittag des 25.06.2024 um 13:24 (urban) bzw. 14:49 Uhr (rural).

Abbildung 66 stellt die Vertikalsondierung der Temperatur in der Nacht an den beiden Messstandorten dar. Die Abbildung zeigt sehr anschaulich, wie sich die Temperaturwerte im Verlauf der Nacht bodennah von ca. 27,6 °C gegen 13:24 Uhr bis ca. 18,5 °C um 03:40 Uhr am urbanen Standort, sowie von ca. 27,1 °C gegen 14:49 Uhr bis ca. 16,8 °C um 04:37 Uhr am ruralen Standort abgekühlt haben. Die bodennahen Temperaturen in der



Innenstadt sind damit in der Nacht um etwa 1,7 °C höher als am ruralen Standort am Zoo. 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 Bereich am Zoo in den späten Nachtstunden erst wesentlich später ausgekühlt, weshalb das Kaltluftprozessgeschehen im urbanen Raum gestört ist. Dies ist auch an den Temperaturwerten in der Höhe zu beobachten.

Am ruralen Standort findet hingegen aufgrund der natürlichen Oberflächeneigenschaften der Wiesen eine stark ausgeprägte Entstehung kalter Luftmassen statt. Das zeigt sich zum einen im Temperaturniveau, dass mit 1,7 °C signifikant unter dem Niveau des urbanen Standorts liegt. Zum anderen liegt eine mit ca. 78 m sehr hoch ausgeprägte Inversionsschicht vor, die die bodennah produzierte Kaltluftmächtigkeit widerspiegelt.

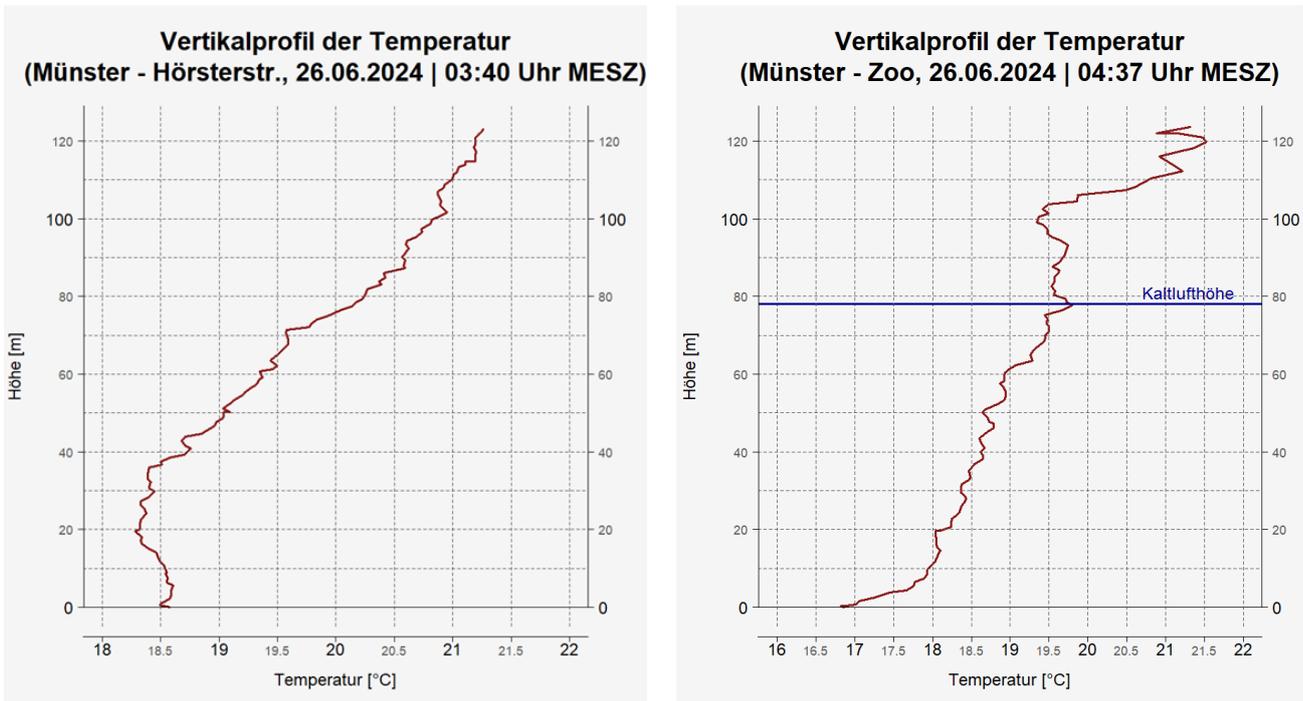


Abbildung 66: Vertikalprofile der Lufttemperatur am urbanen Standort an der Hörsterstraße (links) und am ruralen Standort am Zoo (rechts) in der Nacht am 26.06.2024 um 03:40 Uhr (urban) bzw. 04:37 Uhr (rural). Die blaue horizontale Linie deutet die abgeschätzte Höhe der Kaltluftschicht an.

6.2.6 AUSWERTUNG VON INFRAROT-AUFNAHMEN

Abbildung 67 zeigt eine Gegenüberstellung von Foto- und Infrarotaufnahmen die zum Zeitpunkt der Vertikalsondierungen am 25.07. und 26.07.24 am Tage und in der Nacht an der urbanen Klimamessstation erstellt wurden. Diese verbildlichen die tagsüber einwirkende kurzwellige Einstrahlung sowie die nächtliche, langwellige Ausstrahlung verschiedener Oberflächen anhand der Aufzeichnung der Oberflächentemperatur.

Tagsüber werden auf den hoch versiegelten und unverschatteten Flächen des Parkplatzes an der Hörsterstraße (1) sehr hohe Oberflächentemperaturen von bis zu 50 °C erreicht. Im Vergleich dazu zeigt der verschattete Bereich desselben Parkplatzes (2) deutlich kühlere Werte von etwa 25 °C, was den Einfluss von Verschattung auf die thermische Belastung verdeutlicht. Ein ähnlicher Effekt ist in der Häuserschlucht entlang der Hörsterstraße (3) zu beobachten, wo aufgrund der Verschattung vergleichbare Oberflächentemperaturen wie an Punkt 2 beobachtet werden. Deutlich höhere Temperaturen treten auf dem Flachdach mit dunkler Oberfläche (4) auf, das Spitzenwerte von über 60 °C erreicht. Im Gegensatz dazu zeigt das begrünte Flachdach (5)



eine geringere Erwärmung mit Oberflächentemperaturen unter 50 °C, was den positiven Effekt einer Dachbegrünung auf das thermische Verhalten von Gebäuden am Tage unterstreicht. In der Nacht zeigt sich, dass versiegelte Flächen wie der Parkplatz (1) aufgrund der gespeicherten Wärme weiterhin verhältnismäßig hohe Temperaturen von bis zu 30 °C aufweisen. Die zum Aufnahmezeitpunkt am Tage noch verschatteten Bereiche (2 und 3) passen sich in der Nacht zunehmend den Umgebungstemperaturen an, weisen jedoch weiterhin leicht kühlere Werte als Punkt 1 auf. Das Flachdach mit dunkler Oberfläche (4) kühlt in der Nacht aufgrund seiner geringen Materialmächtigkeit am stärksten aus und erreicht Tiefstwerte von etwa 10 °C. Demgegenüber bleibt das begrünte Flachdach (5) etwas wärmer als Punkt 4, zeigt aber dennoch eine erkennbar kühlere Oberflächentemperatur im Vergleich zu den versiegelten Flächen (Punkte 1-3).

In Abbildung 68 sind die Foto- und Infrarotaufnahmen des Messtages vom 25./26.06.2024 auf der Grünfläche am Zoo gegenübergestellt. Aufgrund insgesamt ähnlicher Oberflächenbeschaffenheiten und kaum vollversiegelter Flächen zeigt sich das Feld der Oberflächentemperatur bereits tagsüber gegen 14:00 Uhr deutlich homogener und auf einem geringeren Temperaturniveau als in der Innenstadt. Dennoch sind markante Temperaturunterschiede feststellbar. So weist der Straßenbereich (1) mit etwa 50 °C die höchsten Temperaturen auf. Im Gegensatz dazu zeigt die durch Baumbestand verschattete Wiese (2) mit ca. 20 °C die geringsten Werte. Eine ausgetrocknete Grünfläche ohne erkennbare Vegetation (3) liegt mit Temperaturen zwischen 35 und 45 °C deutlich über den Werten der intakten Wiese (4), die mit etwa 25 °C bis 30 °C ein moderates Temperaturniveau aufweist. In der Nacht kühlen die Oberflächen im ruralen Raum insgesamt deutlich ab. Der versiegelte Straßenbereich (1) behält jedoch mit Temperaturen um 30 °C die höchsten Werte. Die Punkte 2 und 4 auf der Wiese gleichen sich aufgrund des entfallenden Verschattungseffekts auf etwa 10 °C an. Die ausgetrocknete Fläche (3) weist aufgrund der fehlenden Vegetationsdecke eine reduzierte Abkühlung auf und zeigt leicht erhöhte Werte im Vergleich zu Punkt 2 und 4.

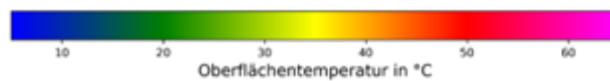
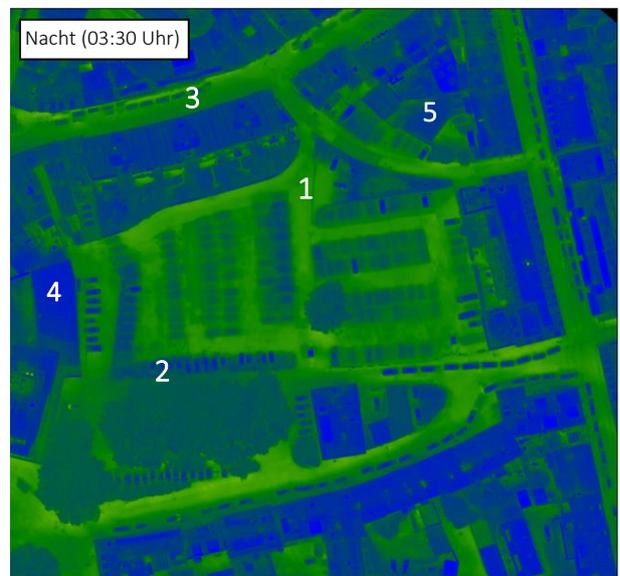


Abbildung 67: Orthogonal zum Erdboden gerichtete Foto- und Infrarotaufnahmen verschiedener Zeiten am urbanen Standort in Münster am 25./26.06.2024.

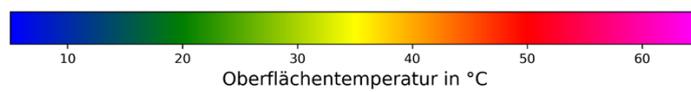
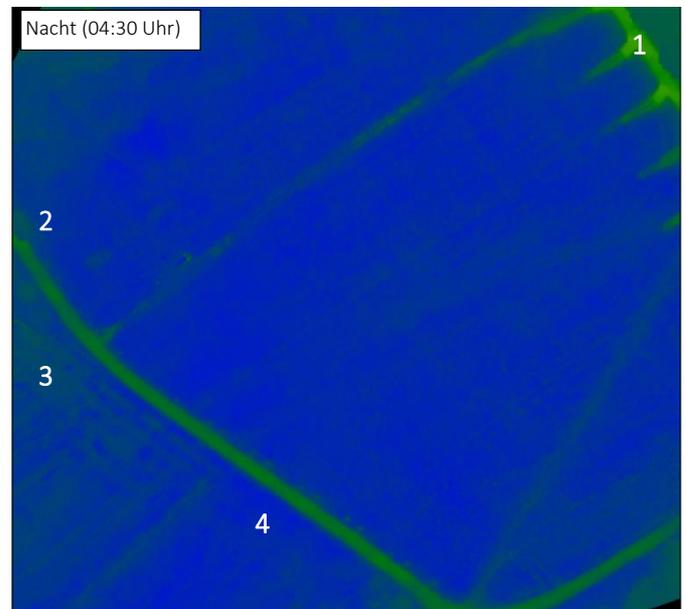
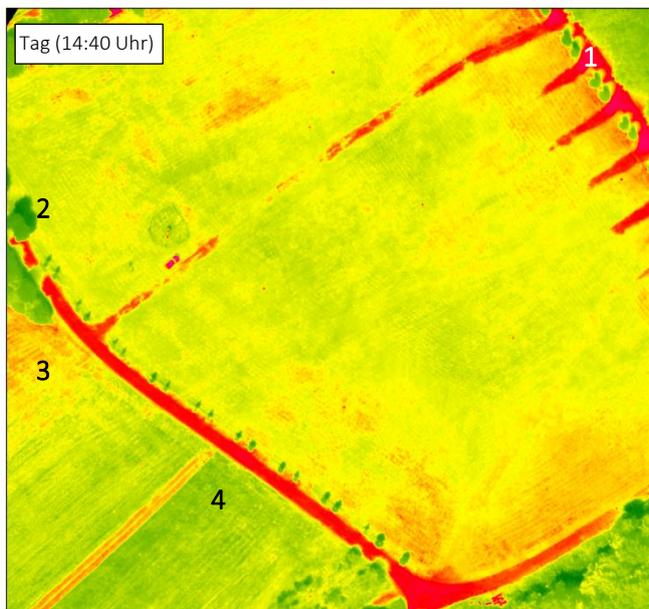


Abbildung 68: Orthogonal zum Erdboden gerichtete Foto- und Infrarotaufnahmen verschiedener Zeiten am ruralen Standort in Münster am 25./26.06.2024.



FAZIT ZUR VALIDIERUNG DER MODELLERGEBNISSE AUF BASIS DER ERGEBNISSE DER MESSKAMPAGNE

Ziel der Messkampagne war unter anderem die Validierung der Modellierungsergebnisse auf denen die später folgenden Bewertungskarten sowie die Planungshinweiskarte basieren.

Die nächtliche Temperaturmessfahrt am 27.06.2024 zeigt dabei sowohl Übereinstimmungen als auch nachvollziehbare Abweichungen zwischen den gemessenen und modellierten nächtlichen Lufttemperaturwerten. Die modellierten und gemessenen Temperaturmaxima liegen auf einem vergleichbaren Niveau, wobei die Abweichungen zwischen den Temperaturminima von Modellierung und Messfahrt mit bis zu 7,9 °C sehr hoch sind. Dies kann teilweise darauf zurückgeführt werden, dass die Messfahrt überwiegend auf versiegelten Straßen durchgeführt wurde. Dadurch fällt der gemessene Minimalwert höher aus als in der Modellierung, bei der die Temperaturminima auf zentralen Bereichen unversiegelter Grünflächen auftreten, die im Rahmen der Messfahrt nicht befahren werden konnten. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse die unterschiedlichen Mikroklimaeinflüsse in urbanen und ruralen Gebieten auf. Die gute Übereinstimmung in den Bereichen der Temperaturmaxima im Stadtgebiet, wie beispielsweise in Innenstadtbereichen und Gewerbegebieten, bestätigt die hohe räumliche Genauigkeit der Modellierung. Besonders hervorzuheben ist die Übereinstimmung im Bereich der Bahnhofstraße sowie entlang der Grünfläche im Bereich des Schlossgartens, wo die Effekte von Vegetation und städtischer Wärme gut erfasst wurden. Lokal treten auch Abweichungen auf, wie entlang des gewerblich genutzten Bereichs der Siemensstraße oder in Siedlungsbereichen entlang des „Erbdrostenweges“. Diese Unterschiede sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen:

- **Modellannahmen und Idealbedingungen:** Die Modellierung basiert auf idealisierten meteorologischen Eingangsparametern mit einem Bedeckungsgrad von 0/8, keinem überlagernden Wind, sowie einer hohen Ausprägung der Sonneneinstrahlung, die dem Stichtag des 21. Juni (jahreszeitlich bedingte höchste Sonnenscheindauer) entspricht. Die Temperaturmessfahrt wurde zwar zu einer vergleichbaren meteorologischen Situation durchgeführt, unterliegt jedoch den Einflüssen der variablen, realen Bedingungen. Hierdurch können lokale Abweichungen im Vergleich zu den hochaufgelösten Modellierungsergebnissen nicht ausgeschlossen werden.
- **Zeitliche Verzögerung des Sensors:** Der Temperatursensor, der im Rahmen der Messfahrt am Auto installiert wurde, reagiert mit einer gewissen Verzögerung auf schnelle Temperaturwechsel. Insbesondere in heterogenen Bereichen kann dies zu Abweichungen zwischen den Modellierungsergebnissen und den Ergebnissen der Messfahrt führen.
- **Einfluss von Versiegelung und Mikroklima:** Messungen entlang versiegelter Straßenflächen zeigen höhere Temperaturen im Vergleich zu umgebenden Grünflächen, da Wärmeausstrahlungen von Straßenmaterialien die nächtliche Abkühlung beeinflussen.

Trotz der aufgeführten Abweichungen liefern sowohl die Modellierungen als auch die Ergebnisse der Messfahrt insgesamt ein realistisches und räumlich differenziertes Bild der nächtlichen Lufttemperaturverhältnisse im Stadtgebiet von Münster. Die Übereinstimmungen in den Übergangsbereichen zwischen urbanen und ländlichen Strukturen sowie die Berücksichtigung von Wärme- und Kältespots verdeutlichen die Verlässlichkeit des Modells.

Die Langzeitmesskampagne bestätigt darüber hinaus den allgemein auftretenden Wärmeinseleffekt zwischen dem urbanen und ruralen Standort. So wurden im urbanen Bereich an der Hörsterstraße und am Hafenplatz signifikant mehr Sommertage, Heiße Tage und Tropennächte festgestellt, was die städtische Überwärmung durch versiegelte Flächen und dichte Bebauung verdeutlicht.



Die Vertikalsondierungen und Auswertungen der Oberflächentemperaturen bestätigen zudem, dass auf den Grünflächen im Umland eine signifikant höhere nächtliche Kaltluftproduktion und Abkühlung stattfindet als im urbanen Bereich.

Die Validierung durch die Messkampagne zeigt demnach, dass die Modellierung ein geeignetes Werkzeug zur Darstellung städtischer Wärmeinselphänomene darstellt und wertvolle Erkenntnisse für die Stadtplanung und Klimaanpassung liefert.



7. Zwischenprodukte

7.1 KLIMAANALYSEKARTE

Gemäß VDI-Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte (KAK) die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, S. 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen – für die Nachtsituation in einer Karte pro Szenario 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 3787, Blatt 1, 2015, S. 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, S. 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore, 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Projekt über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (ab Kap. 8). Mit diesem Verständnis wurden im vorliegenden Projekt die Klimaanalysekarten für alle drei modellierten Szenarien erstellt.

Die Legende der Klimaanalysekarte (Abbildung 69) 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 Modellausgabe¹⁵ (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

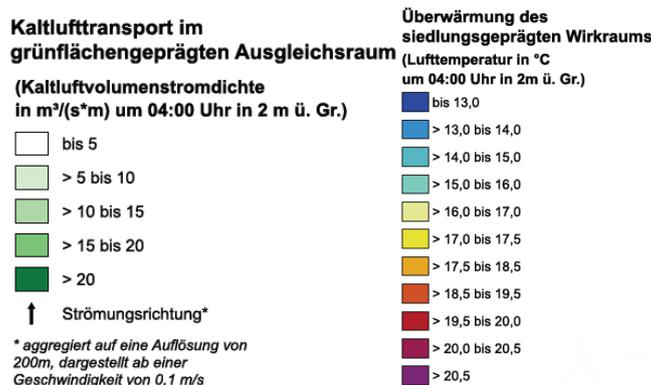


Abbildung 69: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarten für alle drei Szenarien

15 Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilinare 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.



Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch fünf Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 14 & Abbildung 70). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 200 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 Ausgleichs- 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 (ha) und einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 30,35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Die Flächengröße von einem ha repräsentiert einen in der numerischen Klimamodellierung gebräuchlichen Wert. Die entsprechende Konvention legt fest, dass für bestimmte Auswertungen nicht einzelne Gitterpunkte des Modells (was hier 25 m^2 entspräche), sondern auch die jeweils umgebenden mitberücksichtigt werden sollten („moving window Ansatz“).

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Münster 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. In der Stadt Münster gibt es zudem eine Reihe von innerstädtischen Grünflächen, welche in der Nacht ihre kühle Luft in die bebaute Umgebung transportieren, so dass hier von einem sogenannten **Parkwind** gesprochen werden kann. Breite Straßenzüge bzw. rauigkeitsarme Strukturen und eine strömungsparallele Ausrichtung der Gebäudekörper begünstigen ein weites Eindringen von kühlerer Luft in den Siedlungsbereich.

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

Legendenelement	Ableitungsmethode
Fließrichtung der Kaltluft	auf 200 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,10 \text{ m/s}$
Kaltluftproduktionsfläche	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 30,35 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$



Kaltluftleitbahn (linear)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Kaltluftabfluss (flächenhaft)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen; mit Fokus auf die Siedlungs-/Bebauungsgrenzen
Parkwind	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen und Karteninformationen zur Nutzung als Park o. ä.

Die Ausweisung der Leitbahnen, Austauschbereiche und Parkwinde erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abbildung 70 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den Bereich des Aatals zwischen Roxel und Gievenbeck/ Sentruper Höhe einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

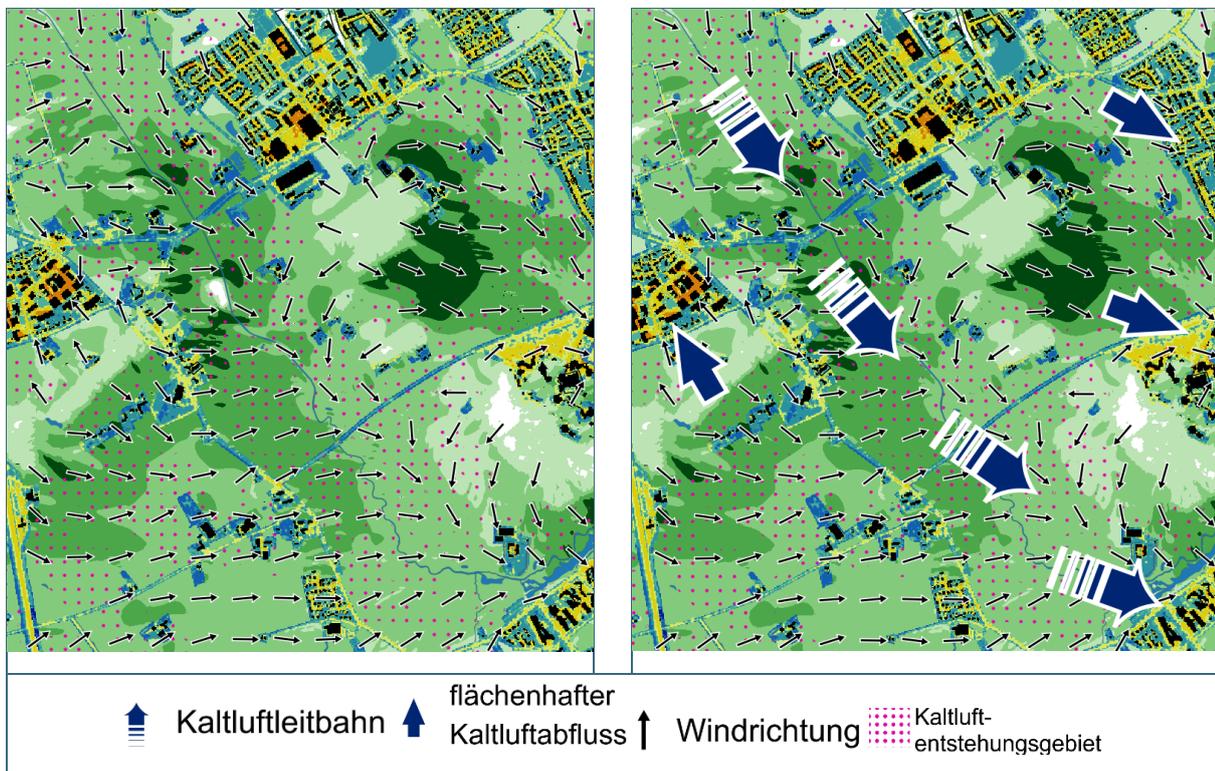


Abbildung 70: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung)

Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch sol-



che Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte.

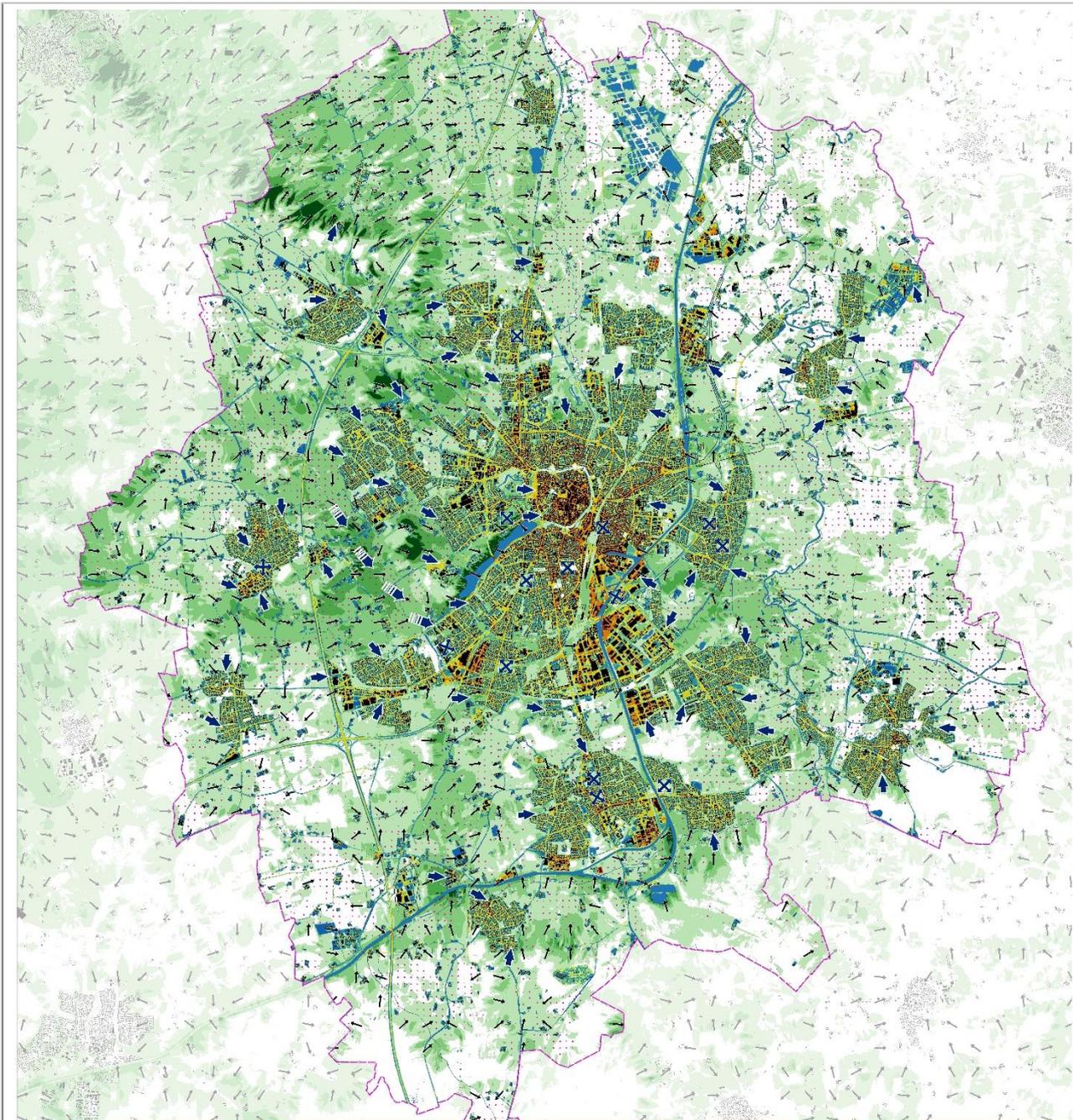
Im Folgenden werden die Inhalte der Klimaanalysekarte inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben. Sie fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Für die Situation um 14 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter, sodass auf die Erstellung von Klimaanalysekarten für die Tagsituation verzichtet wurde. Die Karten der PET (Abbildung 50, Abbildung 51) können jedoch auch als „Klimaanalysekarten für die Tagsituation“ verstanden werden.

Die Abbildung 71 zeigt die Klimaanalysekarte des Status Quo für das Stadtgebiet Münster. Die auf Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (Wirkraum) durch die nächtliche Überwärmung dargestellte thermische Belastungssituation zeigt sich z. B. im Bereich des Münsteraner Zentrums. Auch auf Industrie- und Gewerbeflächen (z.B. im Gewerbegebiet Höltenweg) und entlang von Verkehrsachsen (z.B. Weseler Straße) wird eine hohe Betroffenheit bei ähnlichen Temperaturdifferenzen zwischen Wirk- und Ausgleichsraum ersichtlich.

Die über den Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) hinterlegte Kaltluftvolumenstromdichte deckt sich für den Ist-Zustand mit jener aus Abbildung 46 und ist gemeinsam mit dem Strömungsfeld und den Kaltluftentstehungsgebieten essenzieller Bestandteil der gutachterlich festgelegten Kaltluftleitbahnen und -abflüsse. Im Stadtgebiet von Münster gibt es heutzutage eine **Kaltluftleitbahn**. Sie zeigt sich zwischen Gievenbeck und Roxel und verläuft parallel zur Münsterschen Aa entlang der Grünflächen bis zum Aasee (siehe auch Abbildung 70).

Neben der Kaltluftleitbahn, als linienhafte Struktur wurden für Münster auch **Kaltluftabflüsse** identifiziert, welche flächenhaft über unbebauten Hangbereichen (in Münster eher selten) oder rein thermisch in Form von Flurwinden auftreten. Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt diese sich, dem Gefälle folgend, in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse aus Hangbereichen meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Flurwinde, die sich aufgrund des Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Flächenhafte, orografiebedingte Kaltluftabflüsse sind durch eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte gekennzeichnet und treten z. B. südlich von Häger auf. Flurwinde hingegen konnten über das ganze Stadtgebiet verteilt, z.B. in Amelsbüren, ermittelt werden. Parkwinde wurden z. B. für das Zimmermannsche Wäldchen und den Friedhof Sankt Clemens abgeleitet.

In den Klimaanalysekarten zu den Zukunftsszenarien wurde hervorgehoben, wenn ein im Ist-Zustand gekennzeichnete Kaltluftprozess durch eine der modellierten möglichen zukünftigen Bebauungen potentiell negativ beeinträchtigt werden könnte (lilafarbener Pfeil in Abbildung 72). Außerdem kommt es bei wenigen flächenhaften Abflüssen zu einer Veränderung der Prozessrichtung durch die angenommene Bebauung (z. B. bei Sentrup West und dem dort angenommenen „Zooquartier“). Wie bereits im Kap. 6.1.1 beschrieben, werden die Kaltluftprozesse durch die zu erwartende Erwärmung eines voranschreitenden Klimawandels nicht signifikant modifiziert. Daher sind die Kaltluftsignaturen in den Klimaanalysekarten zum Ist-Zustand und zu den beiden Zukunftsszenarien, bis auf die beschriebene Beeinflussung durch die Entwicklungsflächen, deckungsgleich in Anzahl, Lage und Ausrichtung.



KLIMAANALYSEKARTE Ist-Zustand

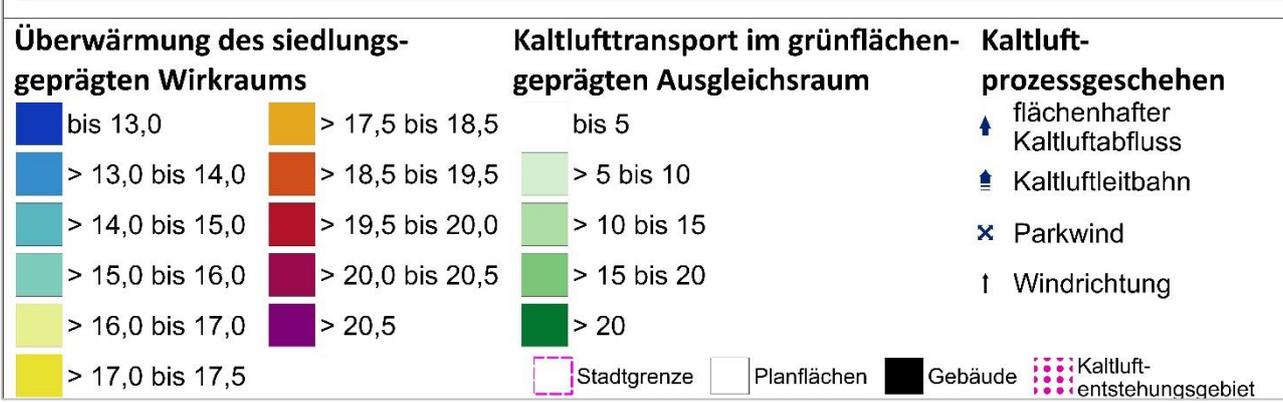


Abbildung 71: Klimaanalysekarte der Nacht im Ist-Zustand für das Stadtgebiet von Münster.

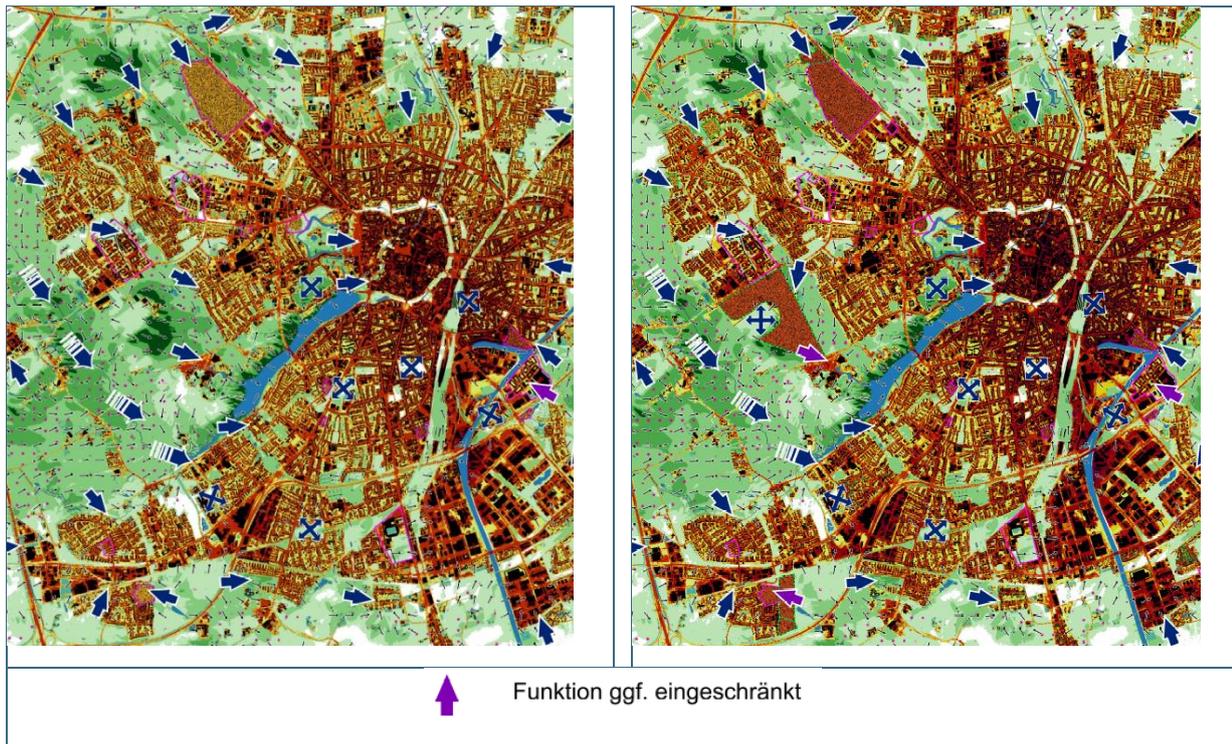


Abbildung 72: Zwei Ausschnitte aus den Klimaanalysekarten zu den Zukunftsszenarien mit potenziellen Auswirkungen von Siedlungsentwicklungen auf Kaltluftabflüsse (links 2035 und rechts 2045).

7.2 SENSITIVITÄTSANALYSE

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

7.2.1 DATENGRUNDLAGE

Für die Analyse wurden bestimmte Indikatoren verwendet, anhand derer die Sensitivität eines jeden Gebietes ermittelt werden konnte. Die Indikatoren sind folgende, als vulnerabel gegenüber Hitze beschriebene, Bevölkerungsgruppen:

Hochaltrige: Der Begriff hochaltrig wird in der Fachliteratur und Praxis je nach Anwendungsfall und Fokus unterschiedlich definiert (ab 65, 75 oder auch 85 Jahren). Im oben genannten Handlungsleitfaden und nach Abstimmung mit den beteiligten städtischen Fachbereichen werden in dieser Untersuchung auf Grundlage empirischer Daten zu Morbidität bzw. Mortalität im Kontext von Hitzebelastungen Personen im Alter ab 75 Jahren als „Hochaltrige“ bezeichnet. Bei Menschen in dieser Altersklasse besteht ein erhöhtes Risiko von Übersterblichkeit. Die erhöhte Mortalität begründet sich durch größere hitzeabhängige Gesundheitsrisiken infolge chronischer Erkrankungen, kognitiver und körperlicher Einschränkungen, Multimorbidität sowie Multimedikation und eine herabgesetzte Fähigkeit zur physiologischen Anpassung an Hitze (Becker et al., 2019; HLNUG, 2019). Die von der Stadt Münster bereitgestellten Daten zu dieser Bevölkerungsgruppe wurden zum Stichtag 31.12.2023 erhoben.



Kleinkinder: Kinder bis einschließlich 6 Jahren wurden als „Kleinkinder“ definiert. Im Vergleich zu Erwachsenen besteht bei Kleinkindern eine geringere Thermoregulation, der Körper produziert weniger kühlenden Schweiß, gleichzeitig bietet die Körperoberfläche eine größere relative Absorptionsfläche für Wärmestrahlung. Weiterhin liegt bei Kleinkindern ein höherer Flüssigkeitsanteil im Körper vor und die relative Verdunstung ist aufgrund der größeren Körperoberfläche in Bezug zum Körpervolumen ebenfalls höher als bei Erwachsenen. Bei Hitze sind sie daher einem größeren Risiko ausgesetzt, eine Exsikkose (Austrocknung des Körpers) als Folge einer Dehydration zu erleiden (HLNUG, 2019). Die verwendeten Daten der Stadt Münster hatten ebenfalls den Stichtag 31.12.2023.

Ökonomisch und sozial benachteiligte Menschen: definiert als Menschen, die Leistungen zur Existenzsicherung nach SGB II (Grundsicherung für Arbeitssuchende) und SGB XII (Sozialhilfe) erhalten. Die Herleitung erfolgt hierbei über den Mangel an ökonomischen Ressourcen, meist vorhandene Mehrfachbelastungen und den schlechteren Gesundheitszustand sozial benachteiligter Bevölkerungsgruppen (Bolte et al., 2012; HLNUG, 2019; Lampert et al., 2013). Die Wohnbedingungen sind meist schlechter, als bei nicht benachteiligten Bevölkerungsgruppen und Aufenthaltsalternativen sind seltener vorhanden. Diese und weitere Faktoren können zumindest in der Theorie zu einer höheren Gefährdung bei Hitzeextremen führen. Für Münster standen für die Analyse nur die Daten zu regelleistungsberechtigten Personen nach SGB II (Stand Dezember 2023) zur Verfügung.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die räumliche Verteilung der vulnerablen Bevölkerung Münsters in einer Karte. Die demographischen Daten lagen auf der Ebene von 139 „Stadtzellen“ vor. Dargestellt werden die Ergebnisse aber nur für aus ALKIS bekannte Siedlungsgebiete, da sich die Daten auf diese Bereiche beziehen. Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Einrichtungen sowie die Bevölkerungsdichte pro Stadtzelle im Zuge der Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

Analyse sensibler Orte / Einrichtungen: Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen an denen sich vulnerable Gruppen (alte oder kranke Menschen, Kinder) aufhalten. Für Münster wurden zum einen Kinderspielplätze, Kindertagesstätten, Schulen und Krankenhäuser ausgewertet (Stichtag 21.10.2024). Zum anderen wurden Seniorenzentren, Pflegeeinrichtungen, Einrichtungen für Menschen mit Behinderungen, Einrichtungen für Geflüchtete und Wohnungslose erfasst (Stichtag 30.09.2024). Diesen Orten sollte eine besondere Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zuteilwerden, um den Aufenthalt von hitzesensibler Bevölkerung im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend zu gestalten. Von den rund 990 untersuchten Orten mit erhöhter Vulnerabilität in Münster weisen im heutigen Klima 8 Orte eine sehr hohe bioklimatische Belastung auf, wodurch ein hoher Handlungsbedarf besteht (2 Kitas und 6 Pflegeeinrichtungen bzw. Sonstige Einrichtungen, wie z. B. Einrichtungen der Eingliederungshilfe, Abbildung 73). Diese liegen z. B. in gewerblich genutzten Flächen. Mit insgesamt 55 bzw. 83 Orten besteht bei rund 8 bzw. 12 % eine hohe bzw. erhöhte bioklimatische Belastung. 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 Einrichtungen besteht eine mittlere Belastung (478 Orte = 67 %). Allerdings sollte nur bei den Orten, die in Gebieten mit geringer oder keiner bioklimatischen Belastung liegen von einer längerfristigen Resilienz gegenüber den Folgen des Klimawandels ausgegangen werden. Die Analyse ermöglicht es der Stadtverwaltung, sensible Einrichtungen und Orte mit einer besonders hohen bioklimatischen Belastung zu identifizieren. Auf diese Weise können mit den Trägern der Einrichtungen zielgerichtet Maßnahmen in besonders sensiblen Gebieten im Stadtgebiet geplant werden. Für Bolz- und Spielplätze gelten bereits hohe Standards hinsichtlich einer Verschattung der Spielflächen. Auf Grundlage der Daten, die der Stadtverwaltung zur Verfügung stehen, lassen sich diese unter Berücksichtigung weiterer relevanter Aspekte (Schattenwurf, etc.) auf ihre bioklimatische Situation am Tage hin überprüfen.

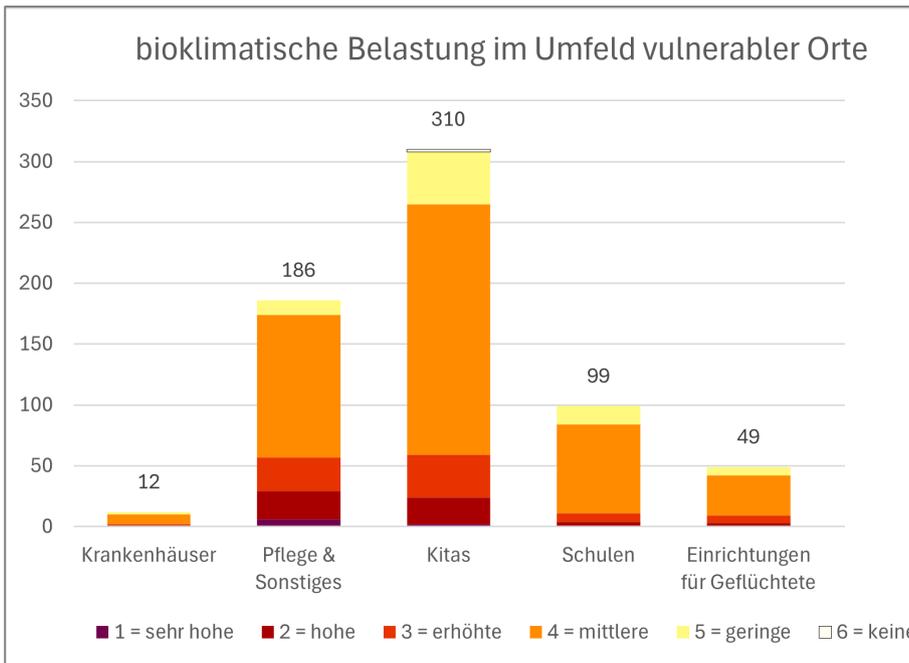


Abbildung 73: Verteilung der bioklimatischen Belastung innerhalb der Orte mit hoher Vulnerabilität

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

7.2.2 METHODIK

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

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

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

Die räumliche Verteilung der zuvor vorgestellten Basisindikatoren und deren Einteilung in Dezile ist in der nachfolgenden Abbildung 74 für jede vulnerable Bevölkerungsgruppe innerhalb eines Ausschnittes des Stadtgebiet Münsters dargestellt.

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

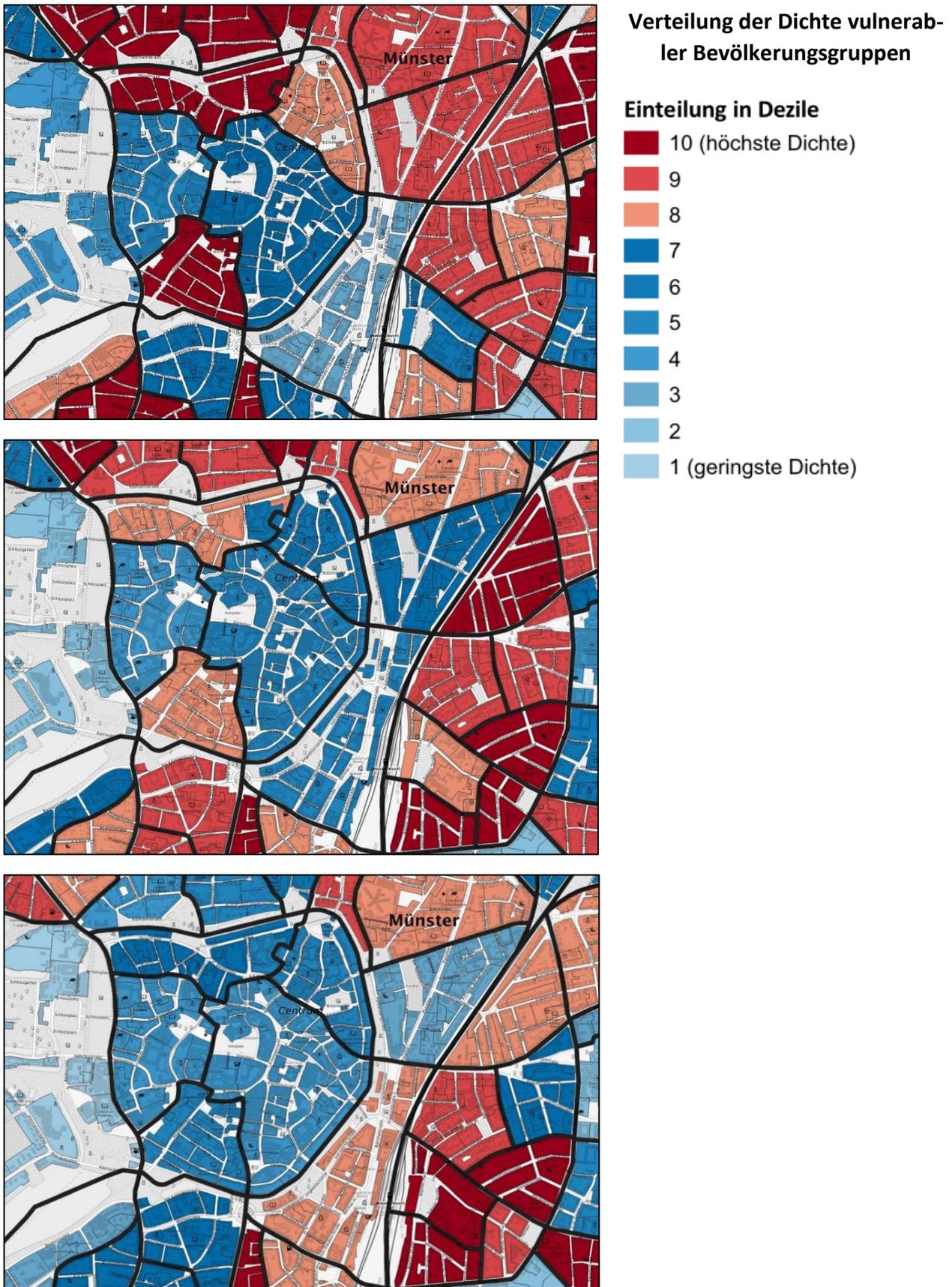


Abbildung 74: Konzentration der Sensitivität von Hochaltrigen (oben), Kindern bis 6 Jahren (Mitte) und SGB II Empfängenden (unten) in einem Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster.

7.2.3 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

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

Zur Identifizierung sensibler Gebiete wurde eine Überlagerung der Einzelindikatoren vorgenommen, was der folgenden Tabelle 15 zu entnehmen ist. Die Gefährdung der Hochaltrigen wurde bei der Ausweisung sensibler Gebiete stärker gewichtet als die Kinder- und die Armutsdichte, da eine auf Deutschland übertragbare, wissenschaftliche Evidenz für die Vulnerabilität von älteren Menschen gegenüber Hitze vorliegt (Becker et al., 2019; HLNUG, 2019) wohingegen die Kinder- und Armutsdichte nicht auf eindeutiger Evidenz beruht (HLNUG, 2019).

Tabelle 15: Klassifizierung der Sensitivität der Bevölkerung.

Klasse	Indikatoren
Extrem sensibles Gebiet	Hochaltrigen-Dichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 10 und Armutsdichte Dezil 10
Sehr hoch sensibles Gebiet	Hochaltrigen-Dichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 10 oder Armutsdichte Dezil 10
Hoch sensibles Gebiet	Hochaltrigen-Dichte Dezile 8 bis 10 oder Kinderdichte Dezil 10 oder Armutsdichte Dezil 10
Sensitives Gebiet	bisheriges nicht zutreffend, aber hohe Einwohnerdichte* oder ≥ 12 sensible Orte
wenig sensibles Gebiet	bisheriges nicht zutreffend

* hohe Einwohnerdichte = ab 100 EWO / Hektar

Die Sensitivitätsanalysekarte (Abbildung 75) zeigt die räumliche Verteilung hitzesensibler Bevölkerungsgruppen auf Stadtzellenebene. Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Münsteraner Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

In der „Planungshinweiskarte Stadtklima“ (s. Kapitel 8.4) wird die Sensitivität der Bevölkerung mit den Ergebnissen der stadtklimatischen Belastung in Münster verschnitten, um Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze treffen zu können.

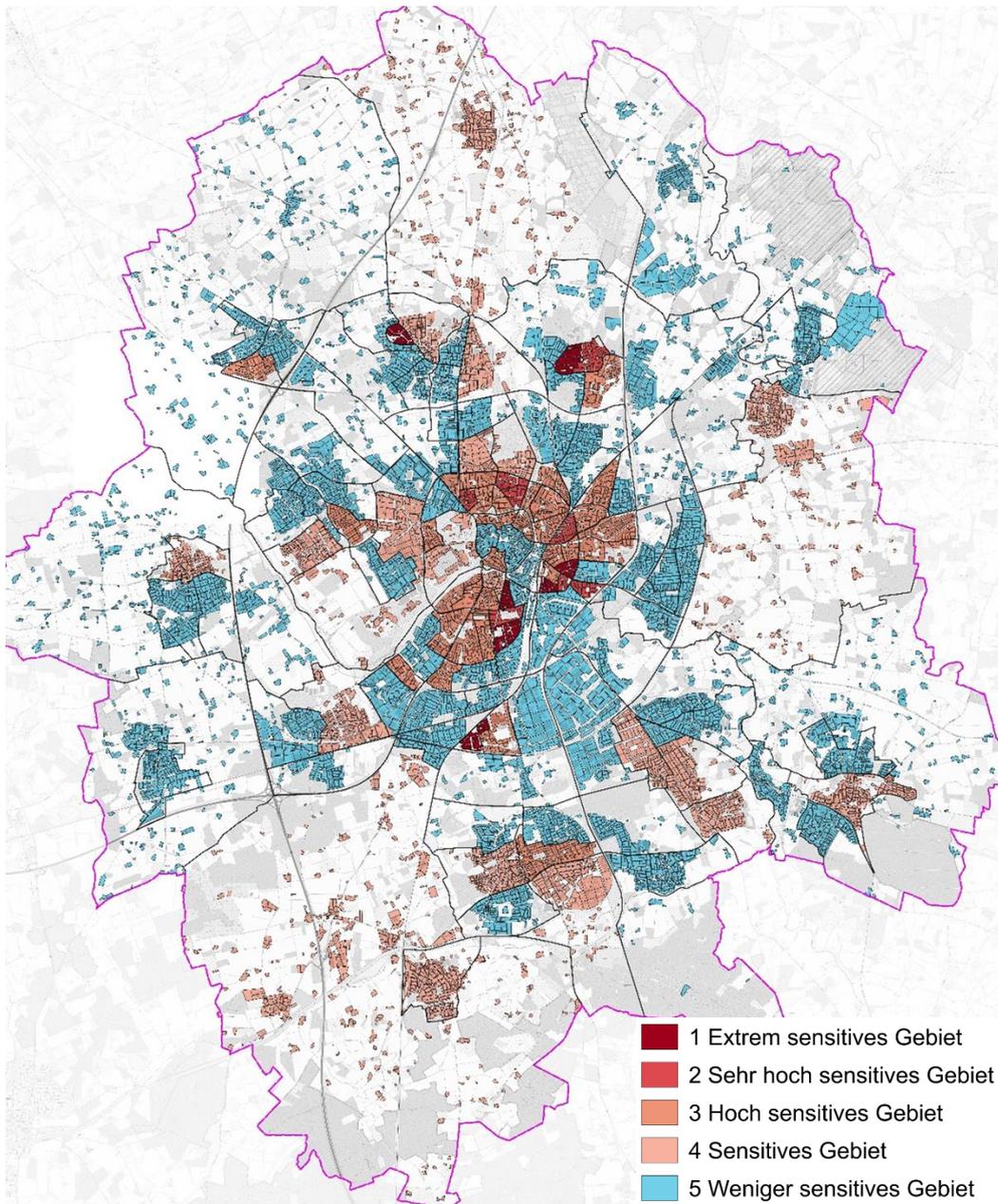


Abbildung 75 Sensitivitätsanalysekarte des Stadtgebiets von Münster



7.2.4 EMPFEHLUNGEN UND MAßNAHMEN

In den extrem bzw. (sehr) hoch sensitiven Gebieten wird empfohlen, Maßnahmen zur Anpassung an Hitzeextreme vorzunehmen, da dort gehäuft Menschen mit besonderem Schutzbedarf in Bezug auf Hitzeminderung leben. Der Leitfaden zur Klimaanpassung (HLNUG, 2019) gibt zum Schutz von Hochaltrigen folgende Empfehlungen vor: „Zur Vermeidung von Übersterblichkeit ist der präventive Aufbau von geeigneten Unterstützungsstrukturen für ältere, alleinlebende Menschen im Stadtteil im Rahmen der kommunalen Gesundheitsförderung anzustreben. Während Hitzeextremen wird empfohlen, kühle Orte bereit zu stellen, an denen sich hochaltrige Menschen aufhalten können.“ (HLNUG, 2019, S. 108).

In den Gebieten werden folgende Empfehlungen für Kinder unter 6 Jahren vorgeschlagen: „Insbesondere dann, wenn die betroffenen Gebiete zugleich eher bildungsbenachteiligte Gebiete sein könnten, sollten Strategien zur Information von Eltern über geeignete Multiplikatoren entwickelt werden. Die Bauten von Kindertagesstätten und Schulen in öffentlicher Trägerschaft sollten auf ihr thermisches Verhalten hin überprüft und ggf. saniert werden. Empfehlungen zum Aufenthalt im Freien während Hitzeextremen sollten gegeben werden. Familienhebammen, Kinderärztinnen und Kinderärzte, Erzieherinnen und Erzieher sowie Lehrkräfte sind potenzielle Multiplikatoren für Präventionsstrategien.“ (HLNUG, 2019, S. 108).

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

8. Endprodukte

8.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 handelt es sich dabei um eine „*informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält*“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, S. 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „*Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben*“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, S. 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 Kaltluftfunktionen) und Flächen im Wirkraum (mit potentiellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen) 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 Verkehrsraum 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 aus der Planungshinweiskarte vollumfänglich Bestandteil der Abwägung 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. 6.1) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadt- raum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

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

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum).

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkräumen), 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 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 76).

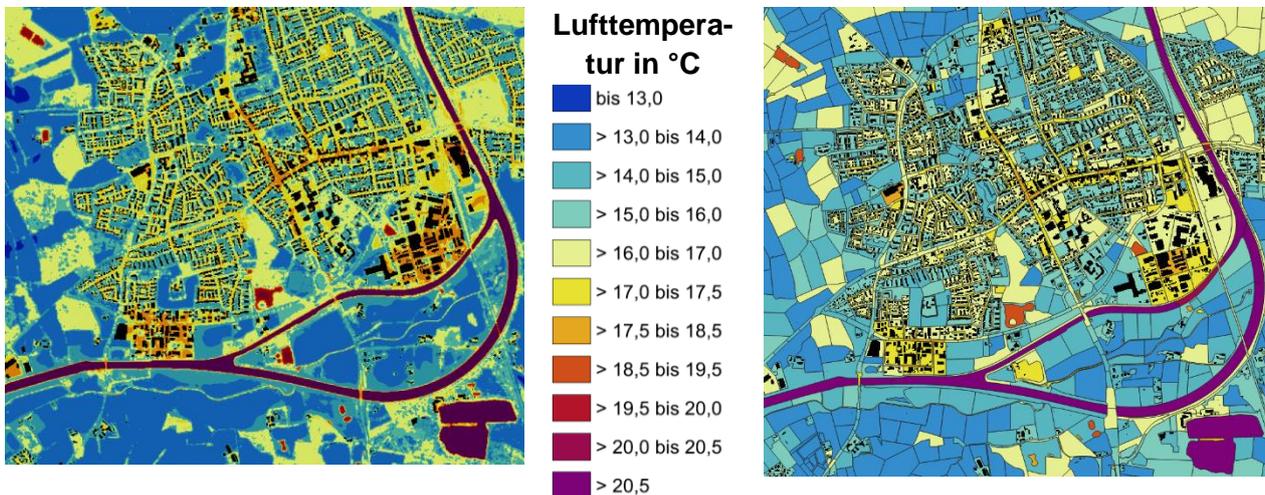


Abbildung 76: Links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie

8.3 BEWERTUNGSKARTEN

Die Modellergebnisse und die Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kap. 7.1). Die Beurteilung in den Bewertungskarten (und später auch der Planungshinweiskarte „PHK“) fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

Dabei wurden separate Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Wirkraum sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Blatt 1 bzw. 3787, Blatt 1 (VDI 3785, Blatt 1, 2008; VDI 3787, Blatt 1, 2015). Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Karten stellen aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar. Im Folgenden wird die Herleitung der Bewertungsklassen für die beiden Tageszeiten geschildert.



8.3.1 WIRKRAUM – METHODIK

Wertgebend für die Wirkraumklassen sind die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) um 14:00 für die Belastungssituation am Tage sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.5). Bei den der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb einer autochthonen Wetterlage gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden (autochthonen) 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 3785, Blatt 1, 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierenden z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 77).

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

Dabei ist

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

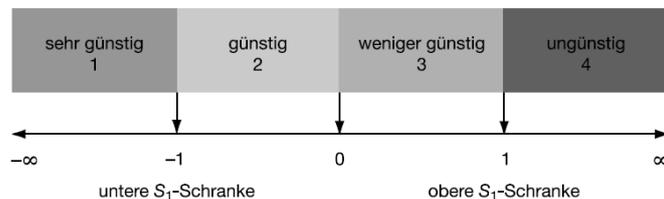


Abbildung 77: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 3785, Blatt 1, 2008)

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 Vorliegen 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 für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei Modellrechnungen (Ist-Zustand und die Szenarien 2035 sowie 2045) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperatur- bzw. PET-Werten ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken des Status quo (als kühlste Situation) und des Szenarios 2045 (als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters“ miteinander verknüpft. Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen



tionen innerhalb dieser Bandbreiten auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können, die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für beide Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Münster wurde aus Gründen der Darstellung die ursprünglich 4-stufige in eine 5-stufige Skala von „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen. Für die Tagsituation wurde eine Unterscheidung in Wirkraum 1 (Wohnen/Gewerbe) mit vorrangig stationärem Aufenthalt und Wirkraum 2 (Verkehrsraum) mit vornehmlich mobilem Aufenthalt des Langsamverkehrs wie Fußgängern und Radfahrern getroffen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Nachts steht der Schlafkomfort im Fokus, deshalb wurde der Verkehrsraum nicht bewertet (Tabelle 17). Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.

Tabelle 16: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohnen, Gewerbe & Verkehrsraum) am Tag.

Aufenthaltsqualität am Tag	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte für Wohnen & Gewerbe [°C]	Zugehörige PET-Werte für Verkehrsflächen [°C]
sehr günstig	$z \leq -1,0$	$PET \leq 31,0$	$PET \leq 30,8$
günstig	$-1,0 < z \leq -0,33$	$31,0 < PET \leq 34,8$	$30,8 < PET \leq 34,5$
mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$34,8 < PET \leq 38,5$	$34,5 < PET \leq 38,0$
ungünstig	$0,33 < z \leq 1,0$	$38,5 < PET \leq 42,2$	$38,0 < PET \leq 41,7$
sehr ungünstig	$z > 1,0$	$PET > 42,2$	$PET > 41,7$

Tabelle 17: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum (Wohnen & Gewerbe) in der Nacht

Humanbioklimatische Situation in der Nacht	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige Temperaturen für Wohnen & Gewerbe (T04) [°C]
sehr günstig	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 15,2$
günstig	$-1,0 < z \leq -0,33$	$15,2 < T04 \leq 16,3$
Mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$16,3 < T04 \leq 17,3$
ungünstig	$0,33 < z \leq 1,0$	$17,3 < T04 \leq 18,4$
sehr ungünstig	$z > 1,0$	$T04 > 18,4$



8.3.2 AUSGLEICHSRaum – METHODIK

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 in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen.

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

Die folgende Abbildung 78 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Kaltluftfunktion:
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 7,7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,17 \text{ m/s}$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate¹⁷ $\geq 35,3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen¹⁸

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.

¹⁷ Bei der Kaltluftproduktionsrate wurde der Mittelwert plus die 1-fache Standardabweichung verwendet, bei den anderen zwei Parametern nur der Mittelwert

¹⁸ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

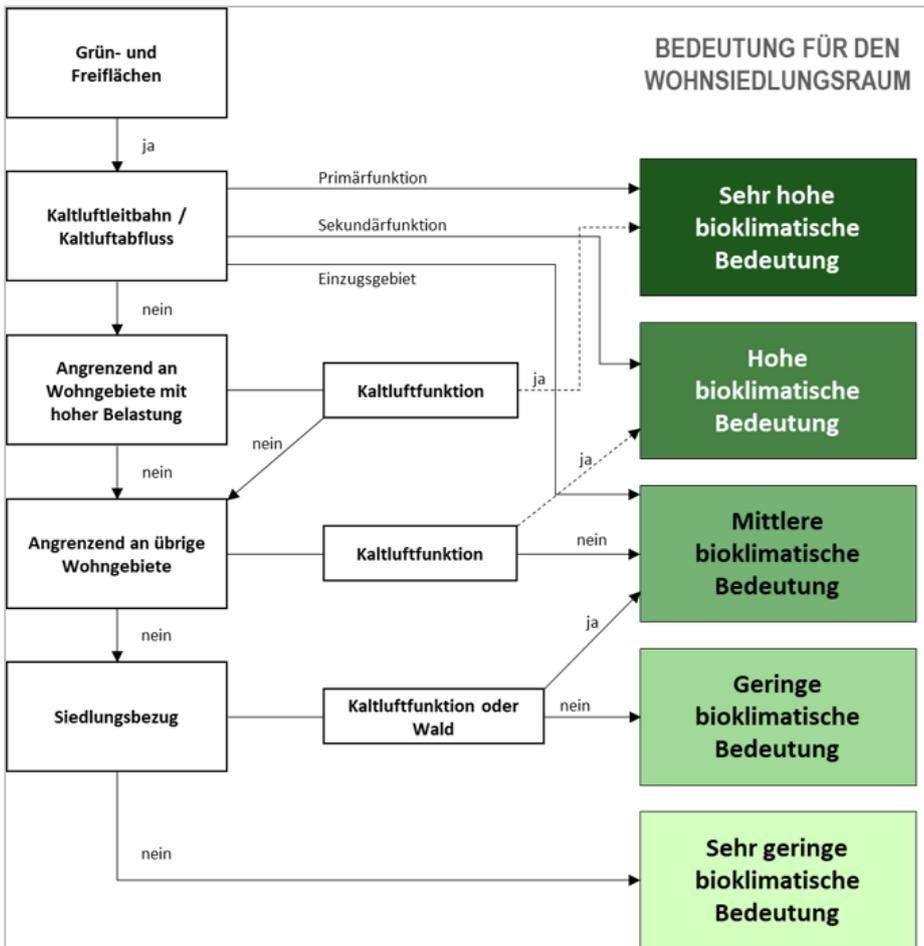


Abbildung 78: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.

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. **Tabelle 18** listet die festgelegten z-Werte und die zugehörigen PET-Bereiche für den Ist-Zustand für alle Ausgleichsflächen im Stadtgebiet Münster auf und stellt die in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 3785, Blatt 1, 2008) erarbeiteten Bewertungsstufen gegenüber.

Tabelle 18: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag (in Anlehnung an VDI 3785, Bl.1).

Aufenthaltsqualität an Sommertagen	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
sehr hoch	$z \leq -1,0$	$PET \leq 28,3$
hoch	$-1,0 < z \leq -0,33$	$28,3 < PET \leq 32,8$
mittel	$-0,33 < z \leq 0,33$	$32,8 < PET \leq 37,1$
gering	$0,33 < z \leq 1,0$	$37,1 < PET \leq 41,6$
sehr gering	$z > 1,0$	$PET > 41,6$

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 71) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (s. Kapitel 7.1).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen werden in der nächtlichen Bewertungskarte auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Der Kaltlufteinwirkungsbereich in blauer Schraffur zeigt an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (Abbildung 79). Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms und gleichzeitig die klimaökologisch wirksame Windgeschwindigkeit von 0,10 m/s erreichen oder überschreiten. Je nach Szenario schwankt dieser Mittelwert nur minimal (Ist = 7,26 m³/(s*m), S1 = 7,19 m³/(s*m), S2 = 7,21 m³/(s*m), sodass die Klassifizierung für jedes Szenario mit dem Mittelwert des Ist-Zustandes erfolgte. Wenn mehr als 50 % der Fläche eines Baublocks im Kaltlufteinwirkungsbereich liegen, verfügen diese Flächen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.



Abbildung 79: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 80 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Münster im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Dabei wurden hier und analog in den Zukunftsszenarien die Straßenräume nicht bewertet (siehe Kap. 8.3.1). Etwa 19,1 % der heutigen Siedlungsflächen der Stadt sind durch eine sehr günstige und 55,2 % durch eine günstige thermische Situation gekennzeichnet (**Tabelle 19**). Durch die Annahme eines starken Klimawandels werden diese Flächen sich zu den betrachteten Zeithorizonten 2035 und 2045 in den mittleren bis ungünstigen Bereich verschieben. Es gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen dieser Kategorie an. Sie weisen heutzutage einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte bereits am Tage dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann. 22,4 % der Siedlungsflächen, also fast ein Viertel aller heutigen Wirkraumflächen, weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad. Nur 3,1 % der Flächen gehören heute der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an (Anstieg auf rund 50 % in den Zukunftsmodellierungen). Flächen dieser Kategorie verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Abschließend sind aktuell erst ca. 0,1 % der Flächen durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. In den Zukunftsszenarien steigt dieser Anteil auf ~14 bzw. ~32 %. Gründe für diese sehr ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr, was sich in Münster vorrangig im Zentrum einstellt.

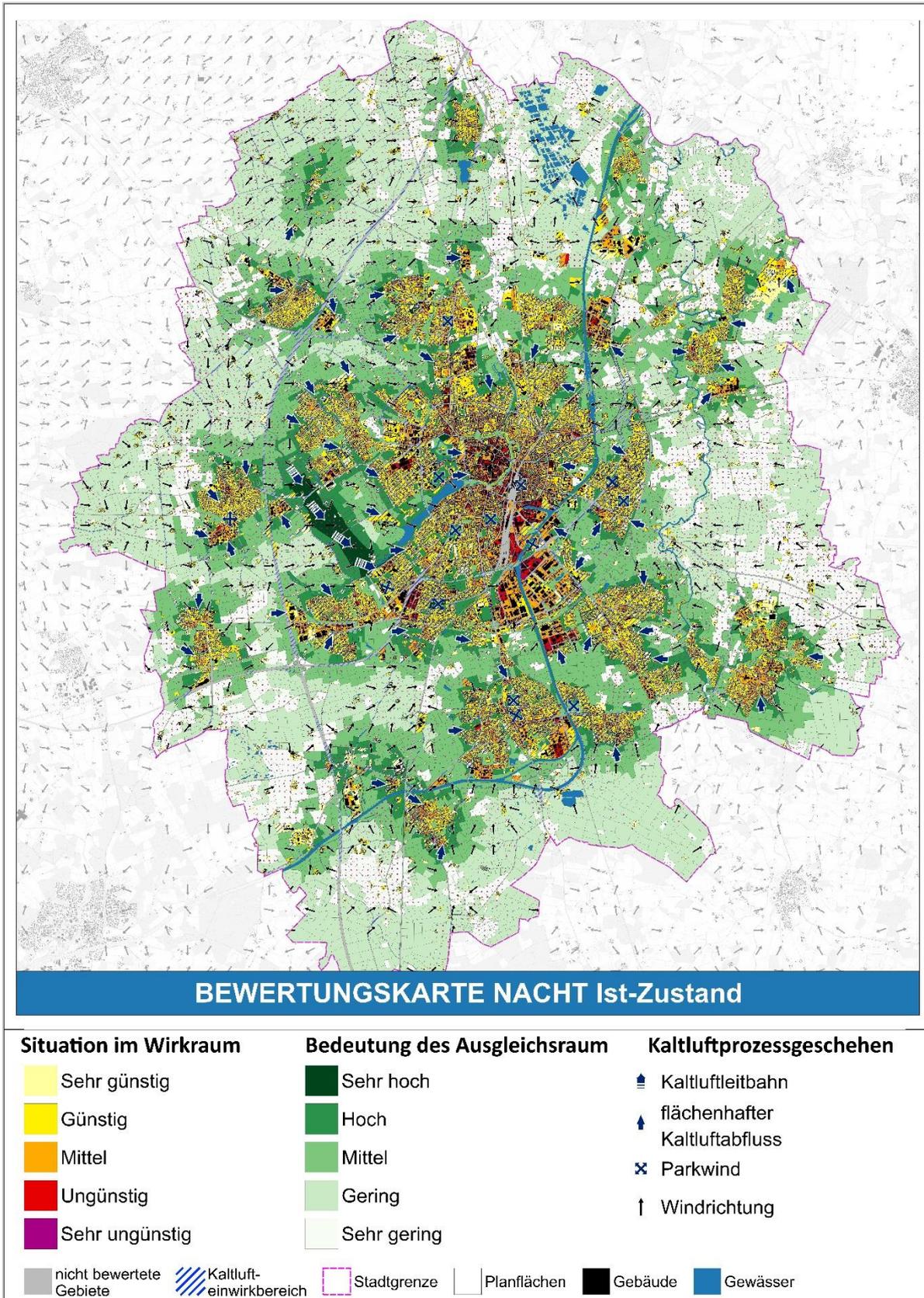


Abbildung 80: Bewertungskarte für den Ist-Zustand der Nachtsituation des Stadtgebiets von Münster.



Tabelle 19: Flächenanteile der Klassifizierung der humanbioklimatischen Situation in der Nacht, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

Humanbioklimatische Situation (Überwärmung in der Nacht)	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr günstig	19,1 %	0,0 %	0,0 %
günstig	55,2 %	5,1 %	1,1 %
mittel	22,4 %	30,7 %	16,3 %
ungünstig	3,1 %	49,9 %	50,8 %
sehr ungünstig	0,1 %	14,2 %	31,7 %

Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt (vgl. Abbildung 81). Dabei fand eine Ausweisung von 0,8 % aller heutigen Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung in der Nacht statt (Tabelle 20). Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt ein großer Teil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen und weiterer bedeutender Kaltluftprozesse. Zusätzlich gehören manche Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an. Der Anteil mit „sehr hoher“ Bedeutung steigt bei den angenommenen Zukunftssituationen auf 5,8 % bzw. 8,5 %. Dabei handelt es sich fast ausschließlich um Flächen, die heutzutage eine „hohe“ humanbioklimatische Bedeutung in der Nacht innehaben. Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich heutzutage zu 9,4 % innerhalb der Münsteraner Stadtgrenze wieder. Mit 29,5 % entfällt fast ein Drittel aller heutigen Ausgleichflächen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftabflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrarflächen in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Kaltluftfunktion aufweisen. Mehr als die Hälfte der Ausgleichsflächen des Status Quo (39,9 % und 20,4 %), aber auch der Zukunftsszenarien, leisten nur einen geringen bzw. keinen nennenswerten Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen in der Nacht.

Tabelle 20: Flächenanteile der Klassifizierung der humanbioklimatischen Bedeutung für den Siedlungsraum in der Nacht, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

humanbioklimatische Bedeutung in der Nacht	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr gering	20,4 %	20,9 %	20,8 %
gering	39,9 %	39,2 %	37,7 %
mittel	29,5 %	29,2 %	30,0 %
hoch	9,4 %	4,8 %	3,0 %
sehr hoch	0,8 %	5,8 %	8,5 %

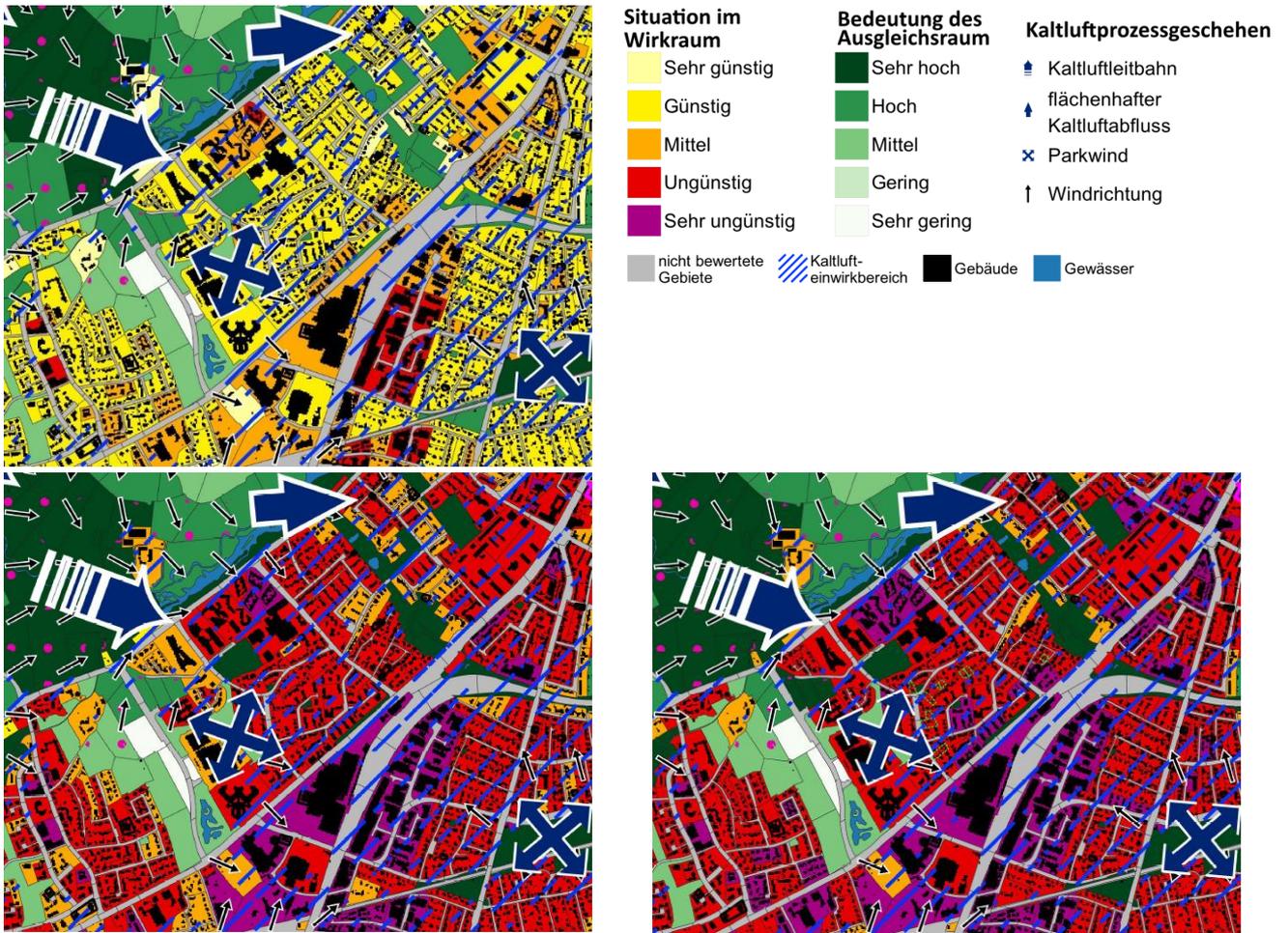


Abbildung 81: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario 2035, unten rechts Zukunftsszenario 2045). Verkürzte Legende

8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in den Bewertungskarten der Tagsituation für Münster, die für den Ist-Zustand in Abbildung 82 aufgetragen ist, wurden 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 Münster sind heutzutage 9,4 % der Wirkraumflächen (inkl. Verkehrsraum) durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet (Tabelle 21). Vor allem durchgrünte, gewässernahe Siedlungsteile und gut verschattete Straßenabschnitte gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün- (insbesondere Baum-)anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum. Durch einen starken Klimawandel kann dieser Anteil allerdings auf ca. 1 % absinken. 31,9 % der Wirkraumflächen der Stadt Münster wurden unter heutigen klimatischen Bedingungen der Kategorie der günstigen human-bioklimatischen Situation zugeordnet. Diese im Vergleich zum Innenstadtbereich noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Mit 48,5 % ist fast die Hälfte der Wirkraumflächen heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten.



Mit 10,2 % der Münsteraner Wohn-, Gewerbe- und Verkehrsflächen sind am Tage bereits heute Teile der Wirkraumflächenkulisse durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert, wobei der Anteil erst unter Annahme eines starken Klimawandels auf knapp unter bzw. über 50 % ansteigt. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die nur mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen Stadtbereiche. Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 5 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei den Industrie- und Gewerbearealen ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören am Tage z.B. Teile des Prinzipalmarkts, die durch bei Sonnenhöchststand fehlende Verschattung und starke Versiegelung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr (Fahrradfahrende sowie Fußgängerinnen und Fußgänger) mit sich bringen.

Eine sehr ungünstige thermische Situation am Tage wird heutzutage quasi nicht erreicht (0,04 %), aber 3 % bzw. 4,9 % der Wirkraumflächen haben das Potential in Zukunft in diesen Bereich abzurutschen. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper mit hoher Wärmekapazität und / oder eine mangelnde Verschattung. Überwiegend ist der an belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende Verkehrsraum durch diese thermische Situation charakterisiert (z. B. nördlich der Wolbecker Straße).

Tabelle 21: Flächenanteile der Klassifizierung der Aufenthaltsqualität im Außenraum des Siedlungsgebietes am Tage, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

Aufenthaltsqualität im Außenraum	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr günstig	9,4 %	1,8 %	0,9 %
günstig	31,9 %	10,7 %	7,7 %
mittel	48,5 %	38,7 %	32,1 %
ungünstig	10,2 %	45,8 %	54,4 %
sehr ungünstig	0,0 %	3,0 %	4,9 %

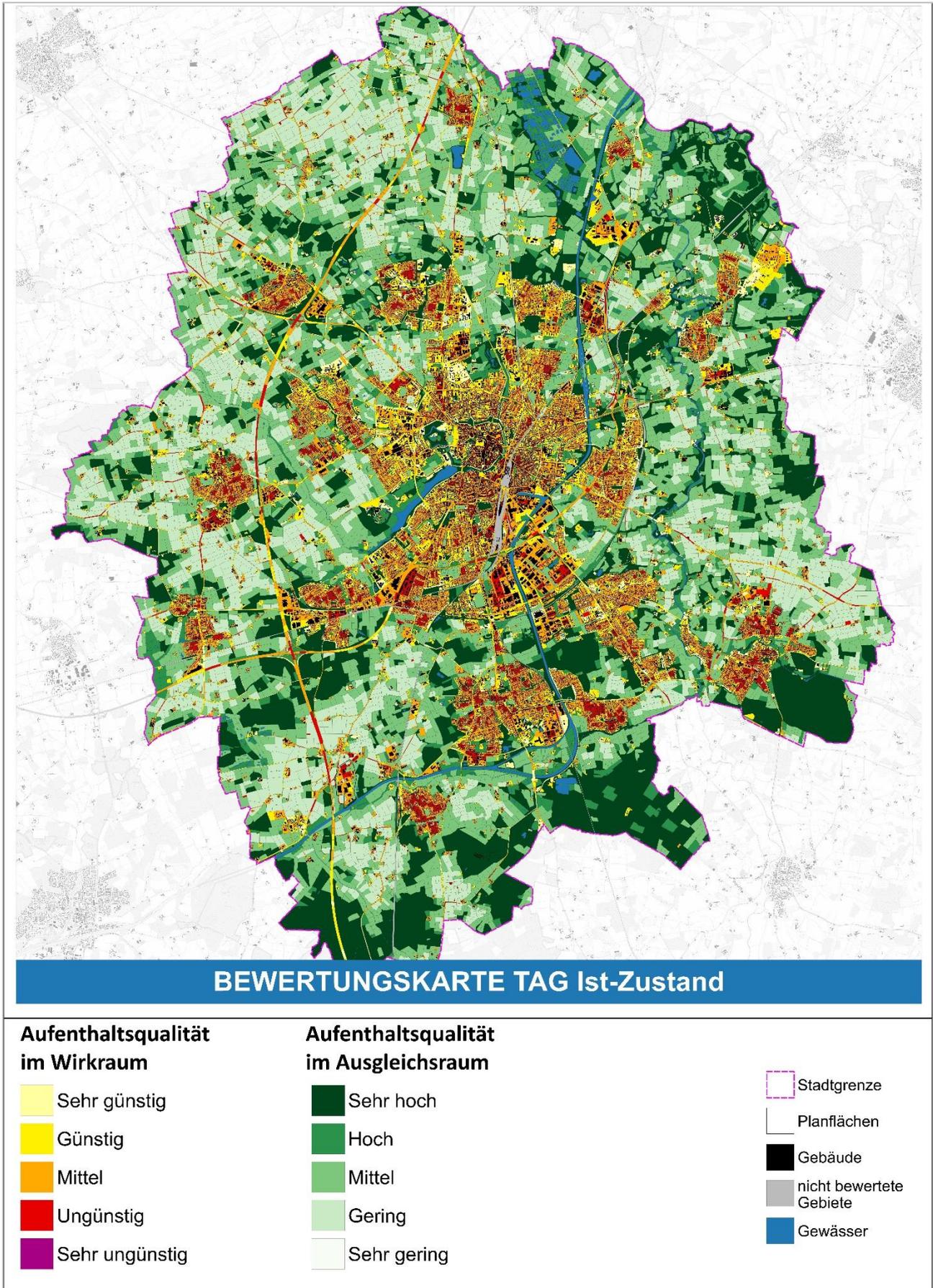


Abbildung 82: Bewertungskarte für den Ist-Zustand der Tagsituation des Stadtgebiets von Münster.

Wie in Abbildung 83 erkennbar ist, ist es mit einer angepassten klimaoptimierten Bebauung aber auch möglich, die Auswirkungen des Klimawandels abzumildern: die angenommene Bebauung in MMQ 2 an der Busso-Peus-Straße (in Pink eingefasster Bereich), liegt in den Zukunftsszenarien im mittleren bis günstigen Bereich und damit ein bis zwei Klassen über der unveränderten Bestandsumgebung.



Abbildung 83: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario 2035, unten rechts Zukunftsszenario 2045). Verkürzte Legende, die pinke Linie kennzeichnet den Bereich des MMQ 2 Busso-Peus-Straße.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt aber insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien in den Fokus. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher oder hoher Aufenthaltsqualität (heutzutage 25,3 % bzw. 8,6 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese zwei höchsten Bewertungsklassen fallen alle Waldareale im gesamten Stadtgebiet und diese Flächen bleiben hinsichtlich eines zunehmenden Klimawandels in Vergleich zu den Freiflächen robust (Tabelle 22). Auch innenstadtnah gibt es hoch bewertete Ausgleichsflächen (z.B. der Schlossgarten), die einen Rückzugsort für die Bewohner der belasteten Zentrumsbereiche darstellen.

38 % der Ausgleichsflächen sind im Status Quo einer mittleren Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen, in den angenommenen Zukunftsszenarien sinkt der Anteil allerdings stark ab. Die Flächen dieser Kategorie sind z. B. an den Rändern der Waldbereiche und der Gewässer zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichterem Baumbestand, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch im Siedlungsraum sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. die Kleingartenanlage „Grüner



Krug“) und wirken ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.

Ausgleichsräume ungünstiger Aufenthaltsqualität (28,1 % der heutigen Grünflächen) sind überall über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit 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 sehr geringer Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung in Zukunft einen steigenden Anteil der Ackerflächen überall im Stadtgebiet Münster ausmachen könnten (bis zu 17,5 % bis 2045).

Tabelle 22: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die potenzielle Erholungsfunktion am Tage, je Modellierungsszenario (Ist, 2035 oder 2045)

Aufenthaltsqualität im Ausgleichsraum	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario 2035	Flächenanteil Szenario 2045
sehr gering	0,0 %	14,0 %	17,5 %
gering	28,1 %	46,1 %	44,8 %
mittel	38,0 %	12,3 %	10,1 %
hoch	8,6 %	7,7 %	10,4 %
sehr hoch	25,3 %	19,8 %	17,1 %

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der sechs Bewertungskarten (s. Kapitel 8.3) in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen eine hohe stadtklimatische Bedeutung innehaben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen eine bioklimatische Belastung vorherrscht.

8.4.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird die **bioklimatische Belastung** dargestellt. Die Bewertung beruht zu gleichen Teilen auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion) und der Aufenthaltsqualität am Tage. Die Bewertung des Verkehrsraumes erfolgte dabei ausschließlich auf Grundlage der Tagsituation, da nachts der Fokus auf der Schlafsituation liegt und sich im Verkehrsraum zu wenige Menschen aufhalten (vgl. Kap. 8.3.1). Als Ergebnis entstand eine neue gesamt-hafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5. Die Zusammenfassung der Tag- und Nachtbewertung erfolgte nach dem in Tabelle 23 beschriebenen Muster im ersten Schritt für jedes der drei Szenarien getrennt. Aus Vorsorgegründen wurde dabei die Kombination einer ungünstigen bioklimatischen Situation in der Nacht (4) und einer geringen Aufenthaltsqualität am Tag (4) im Ist-Zustand der höchsten Klasse 5 zugeordnet (schwarz umrandete Rasterzelle in Tabelle 23, bei S1 und S2 steht an der Stelle eine vier).



Tabelle 23: Bewertungsmatrix der Belastungsklassen für den Wirkraum. Die schwarze Umrandung kennzeichnet eine abweichende Bewertung von Ist-Zustand und den Zukunftsszenarien.

		Wirkraum				
		Bioklimatische Situation Nacht (Bew.karten zT04 Wohnen, Gewerbe)				
		1 - sehr günstige	2 - günstige	3 - mittlere	4 - ungünstige	5 - sehr ungünstige
Aufenthaltsqualität am Tag (Bew.karten zPET Wohnen, Gewerbe, Platz, Straße)	1 - sehr hoch	1	2	2	3	3
	2 - hoch	2	2	3	3	4
	3 - mittel	2	3	3	4	4
	4 - gering	3	3	4	5	5
	5 - sehr gering	3	4	4	5	5

Je nachdem, ob bereits heutzutage eine für die Tag-Nacht-Kombination ermittelte Wirkraumbelastung vorherrscht oder ob die Wahrscheinlichkeit in der Zukunft steigt, wurden Belastungsklassen vergeben. Da der Verkehrsraum nur für die Tagsituation ausgewertet wurde, konnten die Bewertungskennzahlen hier direkt in stadtklimatische Handlungsprioritäten überführt werden (Tabelle 24).

Tabelle 24: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Belastungsklassen und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
sehr hohe bioklimatische Belastung	Flächen, die bereits heute eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 5 in Tabelle 23).	0,9 %
hohe bioklimatische Belastung	Flächen, die ab dem Szenario 2035 eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 5 in Tabelle 23).	8,9 %
erhöhte bioklimatische Belastung	Flächen, die ab dem Szenario 2045 eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 5 in Tabelle 23).	13,8 %
mittlere bioklimatische Belastung	Flächen, die bereits heute oder in einem der Zukunftsszenarien eine hohe Wärmebelastung aufweisen (Klasse 4 in Tabelle 23).	54,9 %
geringe bioklimatische Belastung	Flächen, die bereits heute oder in einem der Zukunftsszenarien eine mittlere Wärmebelastung aufweisen (Klasse 3 in Tabelle 23).	18,3 %
keine bioklimatische Belastung	Übrige Flächen	3,2 %

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt den **stadtklimatischen Schutzbedarf** dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation zunächst getrennt für alle drei Szenarien gegenüberstellt (Tabelle 25).



Tabelle 25: Bewertungsmatrix der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

		Ausgleichsraum				
		Bioklimatische Bedeutung der Fläche in der Nacht				
		5 - sehr hoch	4 - hoch	3 - mittel	2 - gering	1 - sehr gering
Bioklimatische Aufenthaltsqualität am Tag	5 - sehr hoch	5	5	4	4	3
	4 - hoch	5	4	4	3	3
	3 - mittel	5	4	3	3	2
	2 - gering	5	3	3	2	2
	1 - sehr gering	5	3	2	2	1

Die daraus resultierenden bioklimatischen Ausgleichsraumbewertungen und stadtklimatischen Schutzbedarfe sind in Tabelle 26 aufgeführt. In Abhängigkeit vom stadtklimatischen Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen (siehe Kap. 8.4.2).

Tabelle 26: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarfs und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Ausgleichsraum
sehr hoher Schutzbedarf	Höchste stadtklimatische Bedeutung in mindestens einem der drei Szenarien (Klasse 5 in Tabelle 25)	9,0 %
hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einem der drei Szenarien (Klasse 4 in Tabelle 25)	28,5 %
erhöhter Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einem der drei Szenarien (Klasse 3 in Tabelle 25)	34,0 %
geringer Schutzbedarf	Übrige Flächen	28,5 %

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte bzw. Bewertungskarte Nacht übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Windpfeilen, Kaltluftabflüssen und Kaltlufteinwirkbereichen. Darüber hinaus enthält die Planungshinweiskarte Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden und Gleisflächen (nicht bewertet), sowie den Bauplanflächen (vgl. Kapitel 5.3).

Zusätzlich sind für den Wirkraum die in der Sensitivitätsanalysekarte abgebildeten Informationen (vgl. Kapitel 7.2) überlagert worden. Über Schraffuren erfolgt eine Kennzeichnung von Baublöcken, die ein extrem oder sehr hoch sensitives bzw. ein (hoch) sensitives Gebiet darstellen. Diese Gebiete weisen einen entsprechend hohen Anteil an vulnerabler Wohnbevölkerung auf, sodass kenntlich wird, wo sich thermische Belastungsräume mit hohen Bevölkerungsdichten überschneiden (Abbildung 84).

Sensitivität der Bevölkerung gegenüber Hitze

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

Abbildung 84: Symbologie für Gebiete mit sensitiven Bevölkerungsanteilen.



8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse Münster, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 85 (ausschnittsweise) und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Belastungen und Schutzbedarfen aus.

Die *bioklimatischen Belastungen des Wirkraums* sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird (Tabelle 27).

Tabelle 27: Mit den Belastungen im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
sehr hohe oder hohe bioklimatische Belastung = klimatischer Handlungsbereich mit vorrangiger Priorität	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind hier notwendig und prioritär. Es besteht ein hoher Bedarf an Anpassungsmaßnahmen. Im Rahmen baulicher Entwicklungen / Überplanung soll eine Verbesserung der klimatischen Situation erzielt werden. Eine Verschlechterung der klimatischen Situation im direkten Umfeld ist auszuschließen. Ein planerisches Konzept zur Klimaanpassung ist erforderlich. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist in der Regel durch ein mikroklimatisches Gutachten nachzuweisen. Die sehr hohe Belastung bedeutet eine sehr ungünstige thermische Situation bereits in der Bestandsituation, die hohe Belastung eine sehr ungünstige Situation ab dem Zukunfts-Szenario 2035.
erhöhte oder mittlere bioklimatische Belastung = klimatischer Optimierungsbereich	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind zu empfehlen. Es besteht ein mittlerer Bedarf an Anpassungsmaßnahmen. Bauliche Entwicklungen sollten mindestens zum Erhalt, möglichst aber zu einer Verbesserung der klimatischen Situation auf der Fläche führen. Eine Verschlechterung der klimatischen Situation im direkten Umfeld ist zu vermeiden. Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist durch eine qualitative Stellungnahme zur klimaangepassten Optimierung der Planung nachzuweisen. Die erhöhte Belastung entspricht einer sehr ungünstigen Situation ab dem Zukunfts-Szenario 2045.
geringe bioklimatische Belastung = klimatischer Erhaltungsbereich	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden bei größeren Projekten empfohlen. Für bauliche Entwicklungen sind klimaökologische Mindeststandards zu beachten. Die bioklimatische Situation ist zu erhalten und nach Möglichkeit zu verbessern.
keine bioklimatische Belastung = klimatisch resilienter Bereich	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation haben keine Priorität, sollten jedoch bei größeren Vorhaben geprüft werden. Bei Nachverdichtungen oder neuer Bebauung sind mögliche Auswirkungen auf Luftleitbahnen oder flächenhafte Kaltluftabflüsse zu beachten

Die Tabelle 24 zeigt die Flächenanteile der verschiedenen bioklimatischen Belastungsklassen auf. Mit 0,9 % ist die sehr hohe Belastung zuvorderst im hoch versiegelten und oftmals sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerberaum zu finden (Abbildung 85). Aber auch in den stärker versiegelten bzw. schlechter durchlüfteten Innenstadtbereichen sind solche sehr hohen Belastungen verzeichnet. Immer noch hohe stadtklimatische Belastungen (8,9 %) treten ebenfalls über das ganze Stadtgebiet verteilt (z.B. im Bereich Loddenheide) auf (Abbildung 86). Die erhöhte und mittlere bioklimatische Belastung macht mit insgesamt 69 % der Wirkraumflächen einen überwiegenden Teil des Wirkraumes aus. Die in den Planungshinweisen für



die geringe bioklimatische Belastung (18,3 %) genannten „klimaökologischen Standards“ meinen u. a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum oder eine Dachbegrünung. Eine Auswahl der wichtigsten Maßnahmen verschiedener Funktionsziele aus stadtklimaökologischer Sicht ist in Kapitel 8.5 zusammengefasst. Diese sollten im Sinne der Klimaanpassung bei größeren Vorhaben auch geprüft werden, wenn laut der aktuellen Analyse noch keine stadtklimatische Belastung besteht (3,2 % der Flächen).

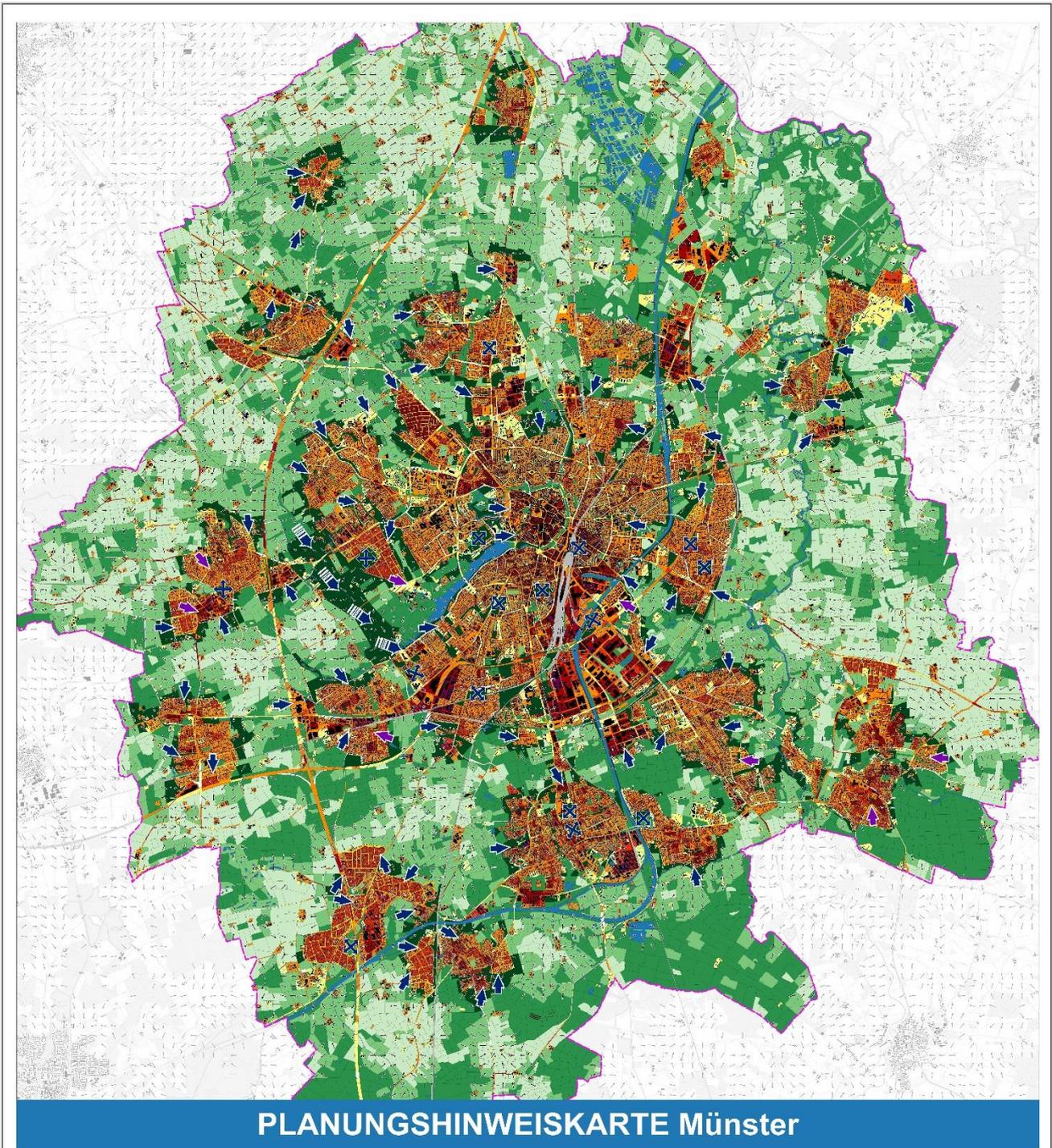
Grün- und Freiflächen, die nachts einen großen Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten und/oder durch schattenspendende Vegetation tagsüber einen wertvollen human-bioklimatischen Rückzugsort an Heißen Tagen darstellen, sind in der PHK durch entsprechende **stadtklimatische Schutzbedarfe** ausgewiesen. **Tabelle 28** stellt den stadtklimatischen Schutzbedarfen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber. Mit einem Anteil von 9 % ist ein kleiner Teil des Münsteraner Ausgleichsraums als besonders schutzbedürftig anzusehen (Tabelle 26). Hierzu zählen die Kaltluftleitbahn und weitere oft innerstädtische Flächen (z. B. Schlossgarten und Kleingärtnerverein Südhöhe, sowie Spielplatz Gut Insel). Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche mit ihren jeweils hohen bioklimatischen Ausgleichsfunktionen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, an dem die Flächen ihre Funktion entfalten, ist der Erhalt dieser Funktionen in der sehr hohen Kategorie bei geplanten Flächenentwicklungen stets nachzuweisen. Auch auf den Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse des hohen stadtklimatischen Schutzbedarfes ist zu achten (28,5 %). Etwa ein Drittel (34 %) der Grün- und Freiflächen weisen einen erhöhten stadtklimatischen Schutzbedarf auf. Hierzu zählen z. B. siedlungsnaher Agrarflächen. Deren Klimafunktionen, insb. Kaltluftentstehung, sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere bei größeren Entwicklungsvorhaben (z.B. bei Gewerbeparks/Hochhäusern), eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten. Abschließend besitzen 28,5 % der Flächen keine besondere stadtklimatische Funktion für den derzeitigen Siedlungsraum.

Tabelle 28: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
sehr hoher Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Flächen ist als erstes eine Vermeidung zu prüfen und in den Vordergrund zu stellen. Ansonsten ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion nachzuweisen (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
hoher Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Flächen ist als erstes eine Vermeidung zu prüfen und in den Vordergrund zu stellen. Ansonsten ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
erhöhter Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
geringer Schutzbedarf	Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf.



Abbildung 85: Planungshinweiskarte Stadtklima für einen Ausschnitt des Stadtgebiets von Münster.



**Stadtklimatische Handlungs-
priorität im Wirkraum**

- sehr hohe biokl. Belastung
- hohe biokl. Belastung
- erhöhte biokl. Belastung
- mittlere biokl. Belastung
- geringe biokl. Belastung
- keine biokl. Belastung

**Stadtklimatischer Schutzbedarf
im Ausgleichsraum**

- Sehr hoher Schutzbedarf
- Hoher Schutzbedarf
- Erhöhter Schutzbedarf
- Geringer Schutzbedarf

**Kaltluft-
prozessgeschehen**

- Kaltluftleitbahn
- flächenhafter Kaltluftabfluss
- Parkwind
- Windrichtung

- Stadtgrenze
- Gebäude
- Bahnverkehr
- Gewässer

Abbildung 86: Planungshinweiskarte Stadtklima für Münster (verkürzte Legende).



8.4.3 STADTKLIMATISCHE BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

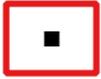
Die städtebaulichen Entwicklungsflächen, für die noch kein Baurecht besteht, sind in der Planungshinweiskarte mit einer farblichen Umrandung versehen. Aus der Betrachtung ausgeklammert wurden dabei Flächen, die in der Basisgeometrie als Verkehrsraum bewertet wurden. Daher handelt es sich in Summe um 584 Teilflächen, die sich auf die ca. 78 Entwicklungsflächen beziehen (vgl. Kapitel 5.2 & Tabelle 31 im Anhang Seite 180). Zwei Gebiete wurden dabei damals mit modelliert, die zum Stand des Abschlussberichtes (April 2025) gemäß abschließendem Ratsbeschluss nicht Bestandteil des IFM sind (betrifft: Kinderhaus - Südlich Moorhock und Gremmendorf - Westlich Frankenweg). Alle oben genannten städtebaulichen Entwicklungsflächen wurden in mindestens einem der beiden Zukunftsszenarien mitmodelliert und zeigen somit die potenziellen zukünftigen Hitzebelastungen am Tage und in der Nacht nach Umsetzung einer Bebauung. Allerdings wurden in diesen Gebieten überwiegend Mischpixel anhand von Statistiken zu Flächenzwillingen vergeben, weshalb die Ergebnisse eine Annäherung an die zu erwartenden Belastungen darstellen (vgl. Kap. 5.3 und Kap. 5.7). Analog zu allen Siedlungsflächen wurde ihnen eine der sechs bioklimatischen Belastungsklassen zugewiesen (vgl. Tabelle 24). Zusätzlich zeigt die farbliche Umrandung die Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit dieser Entwicklungsflächen an, welche auf der modellierten Belastung, sowie (sofern gegeben) auf der bioklimatischen Bedeutung als Grünfläche in der Ist-Situation basiert.

20 der Entwicklungsteilflächen sind mit der Kategorie „verträglich“ bewertet (grüne Umrandung mit Punkt). In ihnen ist die vorgesehene Entwicklung unter Beachtung klimaökologischer Standards stadtklimaverträglich möglich. 558 Flächen, also der Großteil, fallen in die mittlere Kategorie „Begleitung notwendig“ (gelbe Umrandung mit Raute). Bei diesen Flächen sollte eine Entwicklung frühzeitig durch eine klimafachliche Stellungnahme begleitet werden und individuelle Hinweise für die Planung auf Basis der SKA abgeleitet werden. Nur 6 Flächen sind mit der schlechtesten Klasse „erhebliche Auswirkungen möglich“ bewertet worden (rote Umrandung mit Quadrat). Bei diesen Flächen sollte im Falle einer verbindlichen Bauleitplanung ein mikroklimatisches Detailgutachten eingeholt werden, da die Ergebnisse der SKA einen Hinweis auf erhebliche Auswirkungen einer Bebauung liefern. Die Kriterien und Charakteristika sind in **Tabelle 29** näher erläutert.

Tabelle 29: Bewertungsgrundlagen der stadtklimatischen Verträglichkeit der städtebaulichen Entwicklungsflächen

Symbol	Kriterien für Flächen	Bewertung, Planungshinweise
	Bei Entwicklung im Wirkraum: Geringe oder keine bioklimatische Belastung (Kl. 5 oder 6). Falls in Ist-Situation unbebaut: zusätzlich zu erster Bedingung Grünfläche höchstens mit mittlerer Bedeutung (Tag/Nacht)	Entwicklung ist aus stadtklimatischer Sicht verträglich. <i>Die vorgesehene Entwicklung der Fläche bewirkt keine signifikante Verschlechterung des Stadtklimas vor Ort.</i>
	Bei Entwicklung im Wirkraum: Mittlere bis hohe bioklimatische Belastung. Falls in Ist-Situation unbebaut: Entweder: a) Grünfläche höchstens mit mittlerer Bedeutung (Tag /	Bei verbindlicher Bauleitplanung besteht die Notwendigkeit einer klimafachlichen Begleitung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse. Bei Nachverdichtungsvorhaben Empfehlung zur Bauherrenbegleitung. <i>Fläche mit insgesamt relativ hoher Handlungspriorität bzw. Wärmebelastung im Planzustand. Im Falle von in der Ist-Situation unbebauten Flächen haben diese aktuell lediglich eine mittlere oder geringe</i>



	Nacht) und Belastungs- klasse 1-4 oder b) Grünflä- che mit höherer Bedeu- tung und Belastungsklasse 3-6	<i>Bedeutung als stadtklimatische Ausgleichsfläche, so dass der Ein- griff mit möglichst geringen Auswirkungen auf weitere, umliegende Wohnsiedlungsflächen gestaltet werden kann.</i>
	Bei Entwicklung im Wirk- raum: sehr hohe bioklima- tische Belastung Falls in Ist-Situation unbe- baut: zusätzlich zu erster Bedingung Grünfläche min- destens mit mittlerer Be- deutung (Tag/Nacht)	Erhebliche Auswirkungen auf die Nachbarschaft und/oder Entste- hung eines neuen thermischen Belastungsschwerpunktes sind nicht ausgeschlossen. Bei verbindlicher Bauleitplanung Detailgutachten einholen. <i>Fläche mit insgesamt hoher Handlungspriorität bzw. Wärmebelas- tung im Planzustand. Im Falle von in der Ist-Situation unbebauten Flächen haben diese aktuell mindestens eine mittlere Bedeutung als stadtklimatische Ausgleichsfläche, so dass ein Eingriff potenziell große Auswirkungen auf die Nachbarschaft oder das Gebiet selbst haben kann.</i>

8.5 MAßNAHMEN

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für Münster wurde ein Katalog aus 20 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert, welche insbesondere die baulichen Schwerpunkte in der Ausrichtung des Handlungskonzepts Klimaanpassung 2030 (V/0799/2019/1) untermauern. Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. stadtklimatischer Handlungsbedarf in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stichpunktartig und durch Bilder illustriert im Maßnahmenkatalog (Kap 8.5.1) beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt (Tabelle 30):

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

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Münsteraner Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen. Beispiele für die Wirkung von Maßnahmen auf die PET oder die nächtliche Lufttemperatur zeigt Abbildung 87. In Modellierungen einer Modellstraße konnte u. a. gezeigt werden, dass eine Pflanzung von „vielen“ Bäumen im Mittel zu einer Reduktion der PET um 12 °C im Vergleich zu einer Straße ohne Grünausstattung führt. Die Abkühlung hängt allerdings auch von vielen Faktoren der Gebäudeausrichtung, -dichte usw. ab, weshalb die Spannbreite der möglichen Abkühlung in dem Projekt von gar keiner Abkühlung bis 20 °C weniger PET reichte (Hinweise zur Interpretation von Boxplots siehe Abbildung 12 in Kap. 4.1). Weiterführende Informationen zu dem Thema befinden sich z. B. in den Toolboxen zum Forschungsprojekt BlueGreenStreets (BlueGreenStreets, 2022a, 2022b).

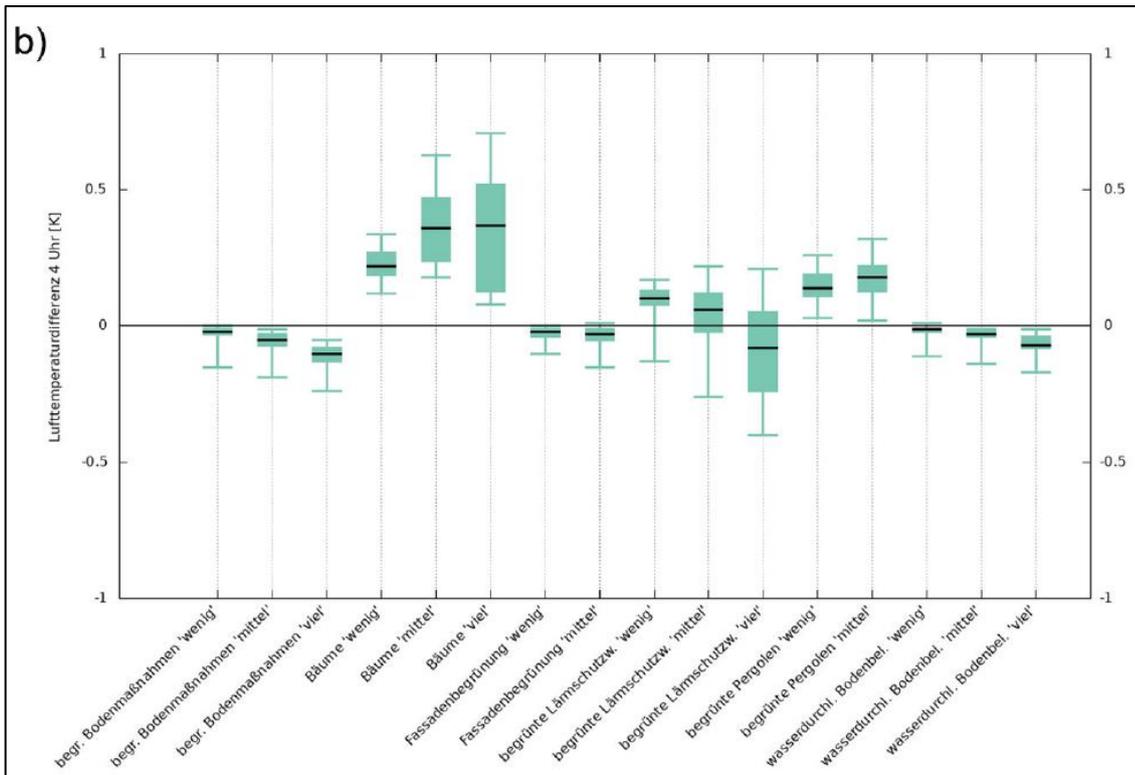
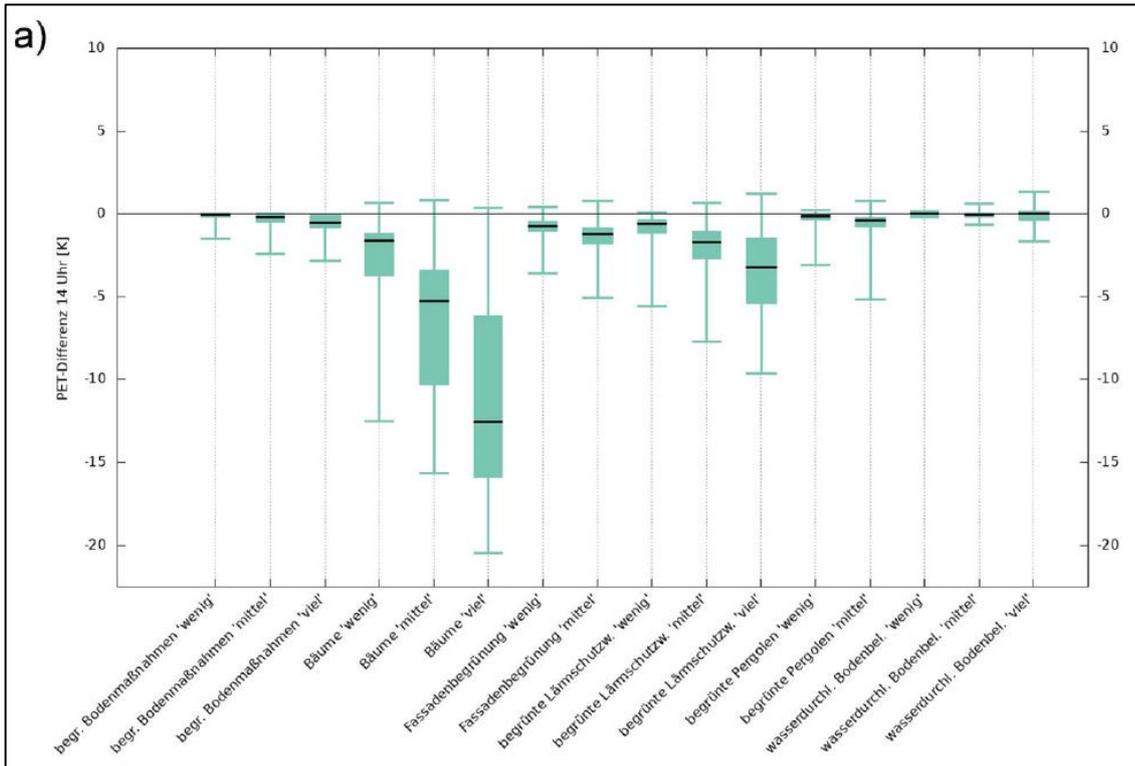


Abbildung 87: Effekte der BlueGreenStreets-Elemente für unterschiedliche Elementdichten. Wenig beschreibt eine niedrige Elementdichte, mittel eine mittlere Elementdichte, viel steht für eine hohe Elementdichte. a) zeigt die Effekte während der Tagsituation anhand des Parameters PET. Die Effekte während der Nacht werden in b) anhand der Lufttemperatur beschrieben. Die Effekte der Elemente auf die thermische Situation fallen tagsüber deutlich größer aus als während der Nacht, daher werden sie durch unterschiedliche X-Achsen dargestellt (BlueGreenStreets, 2022a).



Der Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Zum Beispiel die Waldgebiete Große Loden und Hohe Ward oder die Uferbereiche am Aasee stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M14: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen Bäume (und Sträucher) im Verkehrsraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (→ M11: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Eichen, Weiden und Pappeln sind demnach eher zu meiden. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (Lerm et al., 2016).

Maßnahmen zur Verschattung verringern die durch direkte Sonneneinstrahlung bedingte thermische Belastung am Tage. Beschattete Straßen, Fuß- und Radwege oder (Park-)Plätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten versiegelten Freiflächen (→ M06: Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien). Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden (→ M17: Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen).

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und prinzipiell der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasser-



schichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen¹⁹ Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit in Bezug auf Temperaturänderungen phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Verbesserung (z. B. über die Öffnung verrohrter und kanalisierter Gewässer) und die Schaffung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von regenwasserbasierten Bewässerungssystemen (→ M10), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme insbesondere auf Grundlage von Niederschlagswasser den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. In Münster entsteht z. B. nach einem Rückbau in der Regel mindestens das gleiche Volumen neu, dabei bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z. B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M20: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M12: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z. B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M18, M19).

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

Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M13). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepasstes Nachverdichtungsvorhaben nicht zwangsläufig entgegenstehen.

¹⁹ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)



Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen bzw. -parkhäuser) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Verkehrsraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Schattenspendende Elemente gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnerinnen und Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsprioritäten im Wirkraum und Schutzbedarfe im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren. Kübelbäume stellen dabei eher im Einzelfall und aus gestalterischer Sicht eine Lösung dar. Sie sind und bleiben kleinkronig und damit wenig Schatten spendend. Der Unterhaltungsaufwand ist sehr hoch und die Bäume sind i.d.R. nicht auspflanzbar.

In der Stadt Münster existieren weitere Planungswerke, die Hinweise für Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel enthalten, wie z. B. der Leitfaden „Klimagerechte Bauleitplanung Münster“ (V/0123/2023 und V/0323/2022) (Stadt Münster, 2023), das Klimaanpassungskonzept der Stadt Münster (V/0141/2017/1) (Stadt Münster, 2015) mit darauf aufbauenden Handlungskonzept Klimaanpassung 2030 (V/0799/2019/1) (Stadt Münster, 2019) oder auch der Maßnahmenkatalog zum Forschungsprojekt Multiklima in dem Münster Partnerstadt war (Multiklima, 2021). Nicht-bauliche Maßnahmen sind zudem im Hitzeaktionsplan der Stadt Münster aufgeführt (V/0480/2024) (Stadt Münster, 2024). Der vorliegende Katalog stellt eine Ergänzung und eine Anregung zur Verwendung dieser Planungswerke dar.



8.5.1 MAßNAHMENKATALOG

Tabelle 30: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Münster.

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
01	Begrünung im privaten Raum fördern	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit
		Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Erhöhung der Aufenthaltsqualität Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität
		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Gärten Innen- und Hinterhöfe
		
<p>Bild: Grüner Innenhof in Berlin (Quelle: © Dominika Leßmann, GEO-NET)</p>		
02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten
		Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität Erhöhung der Aufenthaltsqualität
		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten) Halböffentliche Grünflächen
		
<p>Bild: Lambertiplatz Pocketpark Lüneburg (Quelle: © Elke Hipler, GEO-NET)</p>		



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts 	<ul style="list-style-type: none"> Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand) ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Helle Fassade (Quelle: © Jens-Robert Schulz, pixelio)

04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement 	<ul style="list-style-type: none"> Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe



Bild: Parkplatz mit Rasengittersteinen Lüneburg (Quelle: © Elke Hipler, GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>05</p> <p>Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben</p>	<p>Kurzerläuterung</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Verkehrsraumgestaltung urbaner Quartiere“



Bild: Straßenbegleitgrün Hansaplatz/Hansaring in Münster (Quelle: © Rebekka Stöckel, Stadt Münster 2024)

<p>Wirkung</p>	<p>Räumliche Umsetzung</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsiegelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>06</p>	<p>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bäume oder als zweite Wahl: bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten) ▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen
<p>Wirkung</p>		<p>Räumliche Umsetzung</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts ▪ Erhöhung der Aufenthaltsqualität 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld
<p>07</p>	<p>Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)
<p>Wirkung</p>		<p>Räumliche Umsetzung</p>
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität ▪ Erhöhung der Aufenthaltsqualität 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Domplatz in Münster (Quelle: © Ralf Emmerich, Münster Marketing)



Bild: Wildblumenwiese am Aasee, Kardinal-von-Galen-Ring Münster (Quelle: © Rebekka Stöckel, Stadt Münster 2024)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>08</p>	<p>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten) 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltluftaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	
<p>Bild: Stadtpark Wienburg in Münster (Quelle: © Rebekka Stöckel, Stadt Münster 2024)</p>			
<p>09</p>	<p>Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird 	
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität ▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen 	
<p>Bild: Aaseepark in Münster (Quelle: © Stadt Münster 2024)</p>			



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



Bild: Illustration Regenwasserspeicherung im Oxford-Quartier (Quelle: © Stadt Münster 2024)

MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

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

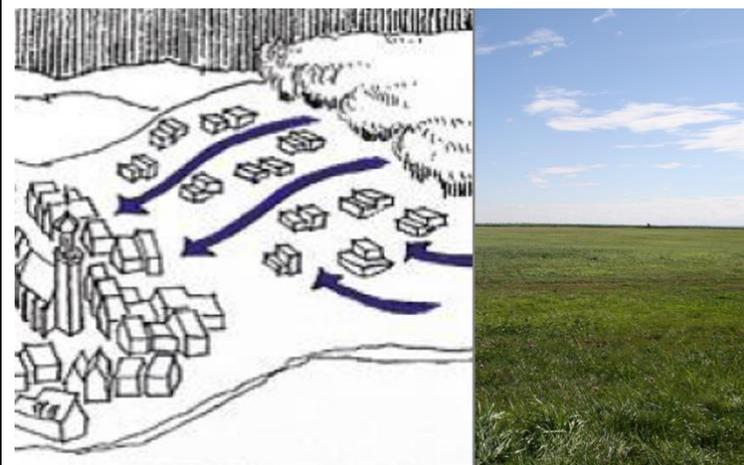


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

12	Optimierung der Gebäudety- pologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen, die oftmals Parkwinde induzieren ▪ Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungs-geschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht



Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)

Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme ▪ Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks

13	Entdichtung (Rückbau)	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungsdichte und das Bauvolumen



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

Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts ▪ Verbesserung der Durchlüftung ▪ Synergien zum Niederschlagswassermanagement 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen ▪ Garagen ▪ Lagerhallen ▪ ggf. Industrie- und Gewerbebrachen ▪ Bahnanlagen



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



Bild: Münster Landschaftspark Mecklenbeck (Quelle: © Rebekka Stöckel, Stadt Münster 2024)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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



Bild: Gründach Kita Meerwiese Münster (Quelle: © Stadt Münster)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>16</p>	<p>Fassadenbegrünung</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich und hinsichtlich des Brandschutzes zugelassen)
<p>17</p>	<p>Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 		<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand)



Bild: Fassadenbegrünung Karlsstraße Erlangen (Quelle: © Janko Löbig, GEO-NET)



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



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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

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

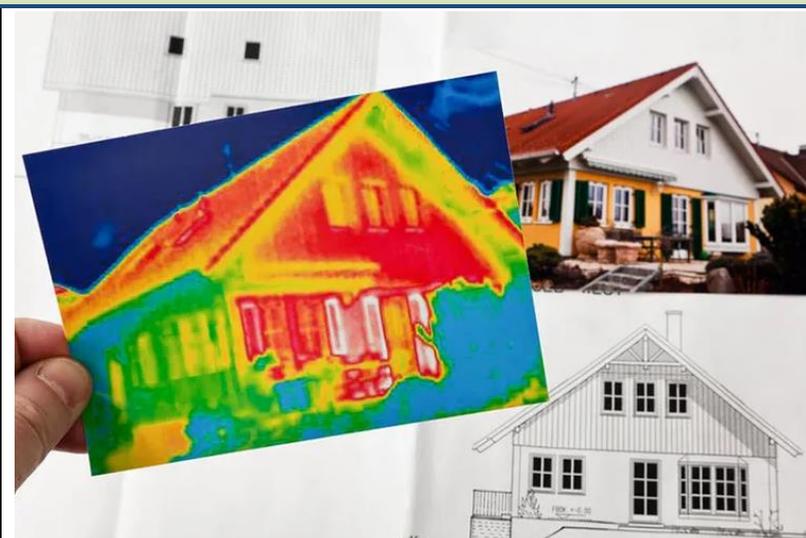


Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)

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

Wirkung		Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung ▪ Achtung: bei dieser Maßnahme kann es einen Zielkonflikt zu Belangen des Klimaschutzes geben; negative Auswirkungen auf den Klimaschutz sind möglich 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können

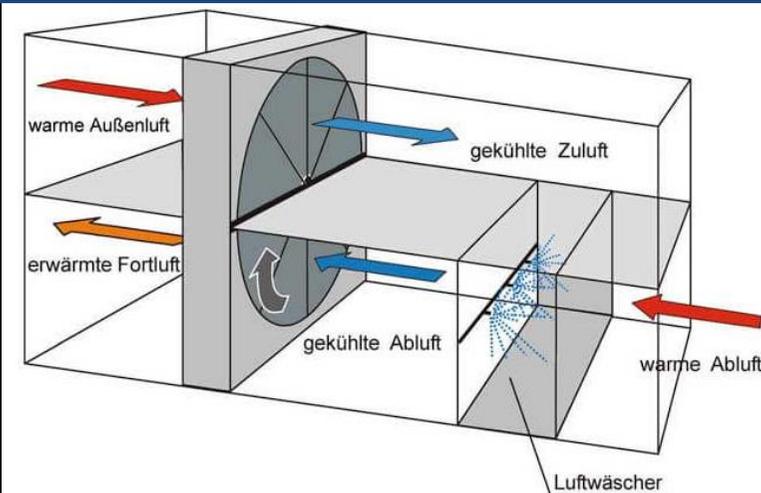


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



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



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



8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta-)Daten und steht der Verwaltung der Stadt Münster in Form von Geodaten (Rasterdaten und Shapefiles) mit Dokumentation zur Darstellung zur Verfügung.

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

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

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog. „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der ungefähr 29.500 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 90 Einzelinformationen zu den Kategorien: Eingangsdaten für die Modellrechnungen, Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten, wie z.B. Informationen zu Flächen mit Leitbahnfunktionen (vgl. Abbildung 88).

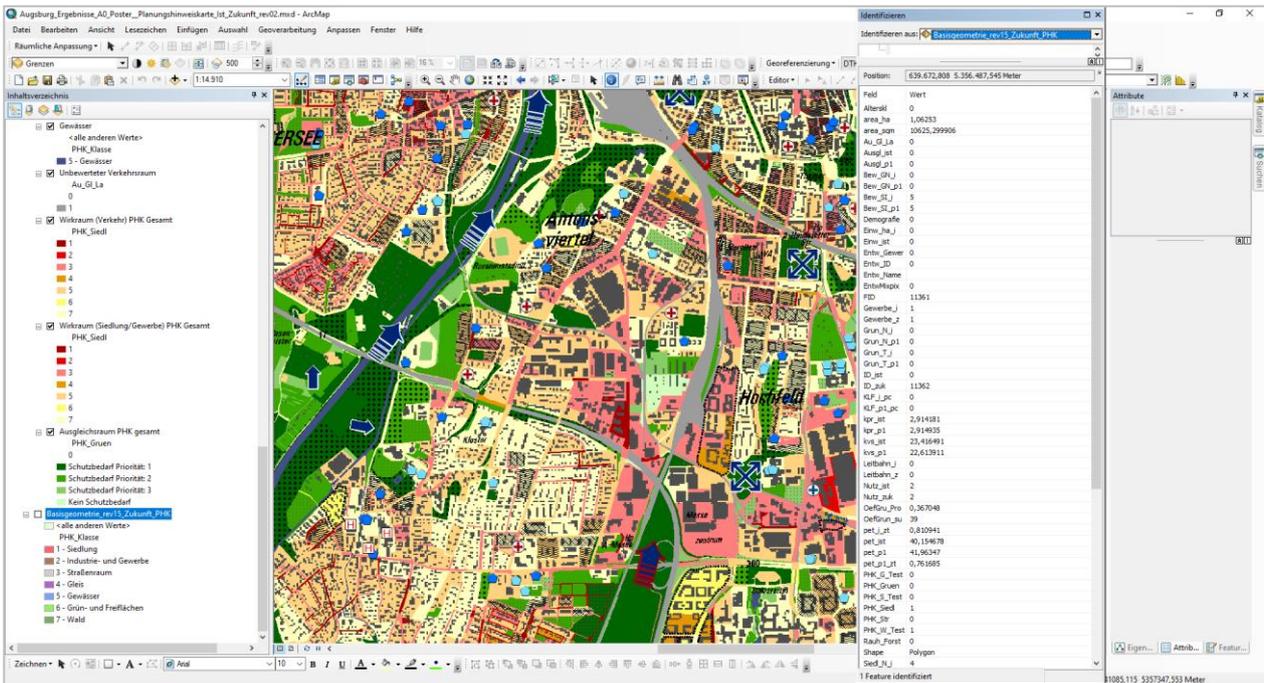


Abbildung 88: Beispielbild aus einer digitalen Planungshinweiskarte innerhalb eines Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.



9. Zusammenfassung & Ausblick

Mit der in diesem Bericht dokumentierten Klimaanalyse liegt die erste hochaufgelöste Analyse des Münsteraner 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 hochaufgelöste computergestützte Modellierungen einer typischen belastenden sommerlichen Wetterlage im heutigen Klima und für zwei Zukunftsszenarien, begleitet von einer Messkampagne.

Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungsnotwendigkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) der Münsteraner 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 hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann neben der vorbereitenden 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 Sanierung des öffentlichen Raums sowie städtischer Gebäude, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gesamtstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Münsteraner 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 politische Zieldefinition in Verbindung mit passgenauen gesamtstädtischen Maßnahmenzenarien anvisiert werden.

Quellenverzeichnis

39. BImSchV. (2010). Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*) (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen—39. BImSchV) (40. Aufl.). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_39/39._BImSchV.pdf
- An Der Heiden, M., Muthers, S., Niemann, H., Buchholz, U., Grabenhenrich, L., & Matzarakis, A. (2019). Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 62(5), 571–579. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02932-y>
- Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) (2004). https://www.gesetze-im-internet.de/arbst_ttv_2004/BJNR217910004.html
- Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Armstrong, A., Waldron, S., Whitaker, J., & Ostle, N. J. (2014). Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: Uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global Change Biology*, 20(6), 1699–1706. <https://doi.org/10.1111/gcb.12437>
- Augter, G. (1997). Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst.
- Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6(1), 35070. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- Becker, C., Herrmann, A., Haefeli, W. E., Rapp, K., & Lindemann, U. (2019). Neue Wege zur Prävention gesundheitlicher Risiken und der Übersterblichkeit von älteren Menschen bei extremer Hitze. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 62(5), 565–570. <https://doi.org/10.1007/s00103-019-02927-9>



- Beckmann, S. K., 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*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- BlueGreenStreets (Hrsg.). (2022a). BlueGreenStreets Toolbox – Teil A. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere (Stand: März 2022). HafenCity Universität Hamburg.
- BlueGreenStreets (Hrsg.). (2022b). BlueGreenStreets Toolbox – Teil B. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere (Stand: März 2022). HafenCity Universität Hamburg.
- Boden, T., Andres, R., & Marland, G. (2017). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions (1751–2014) (V. 2017) [Dataset]. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Oak Ridge, TN (United States). https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2017
- Böhm, J., Böhme, C., Bunzel, A., Kühnau, C., Landua, D., & Reinke, M. (2016). Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung: Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben „Entwicklung von naturschutzfachlichen Zielen und Orientierungswerten für die planerische Umsetzung der doppelten Innenentwicklung sowie als Grundlage für ein entsprechendes Flächenmanagement“ (FKZ 3513 82 0500). Bundesamt für Naturschutz.
- Bolte, G., Bunge, C., & Hornberg, C. (Hrsg.). (2012). Umweltgerechtigkeit: Chancengleichheit bei Umwelt und Gesundheit: Konzepte, Datenlage und Handlungsperspektiven (1. Aufl). Verlag Hans Huber.
- Brito, M. C. (2020). Assessing the Impact of Photovoltaics on Rooftops and Facades in the Urban Micro-Climate. *Energies*, 13(11), 2717. <https://doi.org/10.3390/en13112717>
- Broadbent, A. M., Krayenhoff, E. S., Georgescu, M., & Sailor, D. J. (2019). The Observed Effects of Utility-Scale Photovoltaics on Near-Surface Air Temperature and Energy Balance. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 58(5), 989–1006. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-18-0271.1>
- Cedeño Laurent, J. G., Williams, A., Oulhote, Y., Zanobetti, A., Allen, J. G., & Spengler, J. D. (2018). Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. *PLoS Medicine*, 15(7), e1002605. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1002605>



- Chang, R., Shen, Y., Luo, Y., Wang, B., Yang, Z., & Guo, P. (2018). Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China. *Renewable Energy*, 118, 131–137. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.007>
- Cortes, A., Murashita, Y., Matsuo, T., Kondo, A., Shimadera, H., & Inoue, Y. (2015). Numerical evaluation of the effect of photovoltaic cell installation on urban thermal environment. *Sustainable Cities and Society*, 19, 250–258. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.012>
- DKRZ. (2024). Die SSP-Szenarien. <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien>
- DWD. (2022). Nationaler Klimareport (6. überarbeitete Auflage). Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf;jsessionid=B0A90BE96E70B4EB4F9FD6717A50D3C6.live21063?__blob=publicationFile&v=15
- DWD. (2023). Stadtklima—Die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html
- DWD. (2024a). Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD. (2024b). Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD. (2024c). Liste der Klimaprojektionen (DWD-Referenz-Ensembles v2018). https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimaprojektionen/referenz-ensemble_tabelle.html;jsessionid=D4387517088804B6642FDE40968118F7.live21071?nn=541460
- DWD. (2025, Februar 19). Wetter und Klima—Deutscher Wetterdienst—Leistungen—Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizesthermisch/gefuehltetemp.html?nn=16102&lsbld=463812>
- Fanger, P. O. (1972). *Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. McGraw-Hill.
- Fürst, D., & Scholles, F. (Hrsg.). (2008). *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung* (3., vollst. überarb. Aufl.). Rohn.
- Gaede, M., & Härtling, J. W. (2010). *Umweltbewertung und Umweltprüfung (Dr. A 1)*. Westermann.



- Gross, G. (1989). Numerical simulation of the nocturnal flow systems in the Freiburg area for different topographies. *Beitr. Phys. Atmosph.*, 62, 57–72.
- Gross, G. (1992). Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research*, 10(4–6), 483–498. [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(92\)90035-U](https://doi.org/10.1016/0169-5983(92)90035-U)
- Gross, G. (2002). The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. *Meteorologische Zeitschrift*, 11(4), 295–302. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2002/0011-0295>
- Gross, G. (2012a). Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Microscale numerical experiments. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(4), 399–412. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0363>
- Gross, G. (2012b). Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(2), 173–181. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2012/0291>
- Gross, G. (2014). On the Parametrization of Urban Land Use in Mesoscale Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 150(2), 319–326. <https://doi.org/10.1007/s10546-013-9863-5>
- Gross, G. (2017). Some effects of water bodies on the n environment–numerical experiments. *Journal of Heat Island Institute International*. https://www.heat-island.jp/web_journal/JGM8SpecialIssue/2-1_gross.pdf
- Gross, G. (2021). A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. *Meteorologische Zeitschrift*, 30(3), 227–236. <https://doi.org/10.1127/metz/2021/1066>
- Gross, G., Frey, T., & Trute, P. (2002). On the applicability of numerical models for calculating local winds in complex terrain; Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhaeltnisse in komplexem Gelaende. *DEWI-Magazin*, 20.
- HLNUG. (2019, April 30). Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen – Hitze und Gesundheit. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/klimprax/KLIMPRAXstadtklima2019/L-Handlungsleitfaden2019_Einzelseiten.pdf



- HLNUG. (2022). Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse (S. 54). Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf
- Hübener, H., Hoffmann, P., Keuler, K., Pfeifer, S., Ramthun, H., Spekat, A., Steger, C., & Warrach-Sagi, K. (2017). Deriving user-informed climate information from climate model ensemble results. *Advances in Science and Research*, 14, 261–269. <https://doi.org/10.5194/asr-14-261-2017>
- Hübener, H., Spekat, A., Bülow, K., Früh, B., Keuler, K., Menz, C., Radtke, K., Ramthun, H., Rathmann, T., Steger, C., Toussaint, F., & Warrach-Sagi, K. (2017). ReKliEs-De Nutzerhandbuch. https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch
- ISO. (2017). ISO 7243:2017. Ergonomics of the thermal environment—Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. <https://www.iso.org/standard/67188.html>
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., ... Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>
- Jendritzky, G. (1990). Methodik zur räumlichen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Bd. 114). ARL.
- Jendritzky, G., Havenith, G., Weihs, P., Batchvarova, E., & DeDear, R. (2007). The Universal Thermal Climate Index UTCI. Goal and state of COST Action 730.
- Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., & Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany’s National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research*, 10(1), 99–106. <https://doi.org/10.5194/asr-10-99-2013>
- Kuttler, W. (2013). *Klimatologie* (2., aktualisierte und erg. Aufl., Bd. 3099). Schöningh. <https://doi.org/10.36198/9783838540597>



- Lampert, T., Kroll, L. E., Müters, S., & Stolzenberg, H. (2013). Messung des sozioökonomischen Status in der Studie „Gesundheit in Deutschland aktuell“ (GEDA). *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 56(1), 131–143. <https://doi.org/10.1007/s00103-012-1583-3>
- LANUV. (2024). Klimaentwicklung und Klimaprojektionen in Nordrhein-Westfalen (No. 157; LANUV-Fachbericht). Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. <https://www.lanuv.nrw.de/publikationen/publikation/klimaentwicklung-und-klimaprojektionen-in-nordrhein-westfalen>
- Lerm, M., Knopf, D., Roloff, A., & Boock, U. (2016). Bäume in Jena: Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel : Stadtbaumkonzept. *Schriften zur Stadtentwicklung*, 2016(07). https://www.db-thueringen.de/receive/dbt_mods_00038155
- Line, B. (2017). Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. *Satellite Liaison Blog*. <https://satellieliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- Linke et al., C. (2024). Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“.
- Masson, V., Bonhomme, M., Salagnac, J.-L., Briottet, X., & Lemonsu, A. (2014). Solar panels reduce both global warming and urban heat island. *Frontiers in Environmental Science*, 2. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00014>
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a universal thermal index: Physiological equivalent temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Mayer, H., Beckroege, W., & Matzarakis, A. (1994). Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (UVP-Report 5, S. 265–268).
- Mayer, H., & Höpfe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 38(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J.-F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & Van Vuuren, D. P. P. (2011).



The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1–2), 213–241. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z>

Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI) (Hrsg.). (2012). Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung. Druckfrisch Verlag für Druckerzeugnisse. <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/pdf/Klimafibel-2012.pdf>

Moore, G. E. (1903). *Principia Ethica*. Cambridge University Press.

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. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Multiklima. (2021). MULTIKLIMA Maßnahmenkatalog (Verbundprojekt: Kommunales Leuchtturmvorhaben „Management multiklimatischer Belastungen in öffentlichen Stadträumen in Bremen und Münster“). https://www.klimaanpassung.bremen.de/sixcms/media.php/13/Multiklima_Ma%C3%9Fnahmenkatalog_web.pdf

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

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. *Nature Climate Change*, 3(1), 4–6. <https://doi.org/10.1038/nclimate1783>

Richtlinie 2008/50/EG. (2008). RICHTLINIE 2008/50/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&qid=1419250736800&from=DE>

Salamanca, F., Georgescu, M., Mahalov, A., Moustou, M., & Martilli, A. (2016). Citywide Impacts of Cool Roof and Rooftop Solar Photovoltaic Deployment on Near-Surface Air Temperature and Cooling Energy Demand. *Boundary-Layer Meteorology*, 161(1), 203–221. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0160-y>



- Sandholz, S., & Sett, D. (2019). Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress: Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn (No. 2; Zures Working Paper, S. 11). United Nations University – Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS). <http://collections.unu.edu/view/UNU:7510>
- Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Springer Verlag.
- Stadt Münster. (1992). Stadtklima Münster.
- Stadt Münster. (2015). Klimaanpassungskonzept (S. 235). Stadt Münster, Amt für Grünflächen, Umwelt und Nachhaltigkeit. https://www.stadt-muenster.de/fileadmin/user_upload/stadt-muenster/67_klima/pdf/Vision/Klimaanpassungskonzept.pdf
- Stadt Münster. (2019). Handlungskonzept Klimaanpassung 2030 zur Umsetzung des Klimaanpassungskonzeptes der Stadt Münster [Anlage 1 zu Vorlage V/0799/2019 bzw. V/0799/2019/1]. Stadt Münster, Amt für Grünflächen, Umwelt und Nachhaltigkeit. https://www.stadt-muenster.de/sessionnet/sessionnetbi/vo0050.php?__kvonr=2004045174
- Stadt Münster. (2023). Leitfaden klimagerechte Bauleitplanung Münster (Anlage 1 zu Vorlage V/0123/2023 No. Version 1.0 Stand 02 2023). Stadt Münster, Dezernat für Planung, Bau und Wirtschaft, Stadtplanungsamt. https://www.stadt-muenster.de/fileadmin/user_upload/stadt-muenster/61_stadtplanung/pdf/Bebauungsplan/Klima-Leitfaden_1-0.pdf
- Stadt Münster. (2024). Hitzeaktionsplan für die Stadt Münster [Anlage 1 zu Vorlage V/0480/2024]. Stadt Münster, Gesundheits- und Veterinäramt. https://www.stadt-muenster.de/fileadmin/user_upload/stadt-muenster/53_gesundheit/pdf/V_0480_2024_Anlage_1_Hitzeaktionsplan.pdf
- Stern, R., Amer, M., Müller, J., Tatarinov, F., Segev, L., Rotenberg, E., & Yakir, D. (2020, März 23). „Solar panels forest“; and its radiative forcing effect: Preliminary results from the Arava Desert. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-18924>
- Taha, H. (2013). The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas. *Solar Energy*, 91, 358–367. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.09.014>



- Tian, W., Wang, Y., Ren, J., & Zhu, L. (2007). Effect of urban climate on building integrated photovoltaics performance. *Energy Conversion and Management*, 48(1), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2006.05.015>
- UBA (Hrsg.). (2005). *Gesünder Wohnen—Aber wie? Praktische Tipps für den Alltag* (k:_GRUNDLAGENliteraturUBA_Veröffentlichungen2885_broschüre_gesünder wphnen aber wie.pdf). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gesuender-wohnen-aber-wie>
- UBA. (2024a). *Gesundheitsrisiken durch Hitze* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze>
- UBA. (2024b). *Trends der Lufttemperatur* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur>
- UBA. (2024c). *Trends der Niederschlagshöhe* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>
- Urban, H., & Steininger, K. W. (2015). Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In K. Steininger, M. König, B. Bednar-Friedl, L. Kranzl, W. Loibl, & F. Prettenhaler (Hrsg.), *Economic Evaluation of Climate Change Impacts* (S. 301–322). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12457-5_16
- VDI 3783, Blatt 7. (2017). *Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle—Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder: VDI 3783/7*. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3783-blatt-7-umweltmeteorologie-prognostische-mesoskalige-windfeldmodelle-evaluierung-fuer-dynamisch-und-thermisch-bedingte-stroemungsfelder>
- VDI 3785, Blatt 1. (2008). *Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima*. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3785-blatt-1-umweltmeteorologie-methodik-und-ergebnisdarstellung-von-untersuchungen-zum-planungsrelevanten-stadtklima>
- VDI 3787, Blatt 1. (2015). *Umweltmeteorologie. Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen*. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-1-umweltmeteorologie-klima-und-lufthygienekarten-fuer-staedte-und-regionen>



VDI 3787, Blatt 2. (2022). Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-2-umweltmeteorologie-methoden-zur-human-biometeorologischen-bewertung-der-thermischen-komponente-des-klimas>

VDI 3787, Blatt 4. (2020). Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-4-umweltmeteorologie-methoden-zur-beschreibung-von-stark-und-schwachwinden-in-bebauten-gebieten-und-deren-bewertung>

VDI 3787, Blatt 5. (2003). Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft>

VDI 3787, Blatt 5 - Entwurf. (2024). Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft-1>

VDI 3787, Blatt 7. (2024). Umweltmeteorologie. Klimaindikatoren. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-7-umweltmeteorologie-klimaindikatoren>

Vervloesem, J., Marcheggiani, E., Choudhury, M. A. M., & Muys, B. (2022). Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. *Sustainability*, 14(12), 7493. <https://doi.org/10.3390/su14127493>

WMO. (2017, November 9). Event Types of Hazards and Extreme Events (Draft). World Meteorological Organization. https://wmoomm.sharepoint.com/sites/wmocpdb/eve_activityarea/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Feve%5Factivityarea%2FWorld%20Climate%20Programme%20%28WCP%29%5F649f07e1%2D1373%2De911%2Da965%2D000d3a396ff4%2FCatalogue%5FHazards%5FExtreme%5FEvents%5FWMO%5F091117%2Epdf&parent=%2Fsites%2Fwmoocpdb%2Feve%5Factivityarea%2FWorld%20Climate%20Programme%20%28WCP%29%5F649f07e1%2D1373%2De911%2Da965%2D000d3a396ff4&p=true&ga=



Yang, L., Gao, X., Lv, F., Hui, X., Ma, L., & Hou, X. (2017). Study on the local climatic effects of large photovoltaic solar farms in desert areas. *Solar Energy*, 144, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.solar.2017.01.015>

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 30.04.2025

Erstellt von:

Janine Könitz (M. Sc. Umweltnaturwissenschaften)

Gepüft von:

Dr. Björn Büter

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 I: Steckbriefe der Stadtbezirke

In den folgenden Steckbriefen werden die bioklimatischen Bewertungen in den sechs Münsteraner Stadtbezirken (Abb. A 1) zusammengefasst. In jedem Stadtbezirk wird das Bioklima (genau genommen „Humanbioklima“²⁰) auf Ebene der Planungshinweiskarte in Kombination mit dem Maßnahmenkatalog betrachtet. Die Steckbriefe bilden für jeden Stadtbezirk die genannten Produkte in gekürzter Form ab und setzen Vorkenntnisse über diese voraus.

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird jeder Stadtbezirk nach dem gleichen Muster beschrieben. Jeder Steckbrief enthält einen Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte, eine Flächenstatistik und eine beschreibende Tabelle zur bioklimatischen Bewertung einschließlich Hinweise zu Maßnahmenempfehlungen. Für ausgewählte Flächenkategorien liegen jeweils Statistiken und tabellarische Informationen zum entsprechenden Stadtbezirk vor. Die Tabelle gliedert sich pro Flächenart in die folgenden Einträge:

- Rangfolge unter den Bezirken bzgl. Summe und Anteil der Flächen mit hohem / sehr hohem Schutzbedarf (Ausgleichsraum: Grün- und Freiflächen) bzw. hoher/ sehr hoher bioklimatischer Belastung (Wirkungsraum: Siedlungsflächen, Verkehrswege und Plätze)
- besonders schützenswerte Grün- und Freiflächen bzw. besonders belastete Siedlungsflächen, Verkehrswege und Plätze
- wichtigste Maßnahmen für den Stadtbezirk

Beim Ausgleichsraum entspricht Rang 1 dem Stadtbezirk mit der größten Fläche (in ha) bzw. dem größten Flächenanteil (in % des Stadtbezirks) von hoch oder sehr hoch bedeutenden Grün- und Freiflächen. Demgegenüber hat der Stadtbezirk mit Rang 6 die geringste Fläche bzw. den geringsten Flächenanteil von (sehr) hoch bedeutenden Grün- und Freiflächen. Beim Wirkungsraum steht Rang 1 für den Stadtbezirk mit der größten Summe bzw. dem größten Anteil von Flächen mit ungünstiger bzw. sehr ungünstiger bioklimatischer Situation. Demnach steht beim Ausgleichsraum Rang 1 für den Stadtbezirk mit besonders großen oder relativ vielen schützenswerten Grün- und Freiflächen (positives Beispiel), wogegen im Wirkungsraum der Rang 1 für besonders große oder relativ viele bioklimatisch belastete Flächen steht (negatives Beispiel). Die getrennte Betrachtung von heutigem bzw. zukünftigen Klima und Tag- bzw. Nachtsituation erfolgt an dieser Stelle nicht und ist bei Bedarf aus den Bewertungskarten abzuleiten.

²⁰ Das Humanbioklima beinhaltet die Gesamtheit der Klimafaktoren unter Berücksichtigung ihrer Auswirkungen auf den Menschen (Der Oberbegriff „Bioklima“ berücksichtigt die Gesamtheit der Klimafaktoren und ihre Auswirkungen auf lebende Organismen).

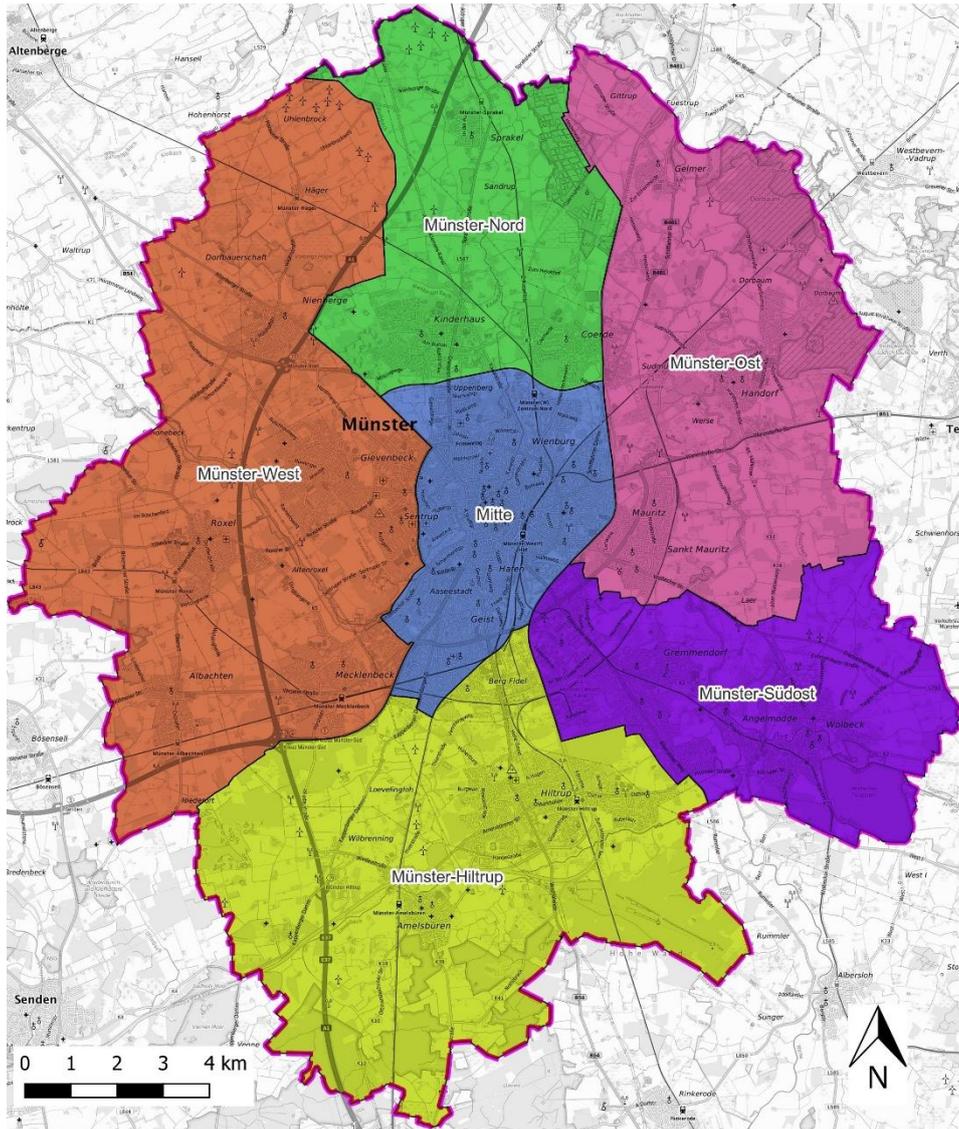


Abb. A 1: Lage der 6 Stadtbezirke von Münster

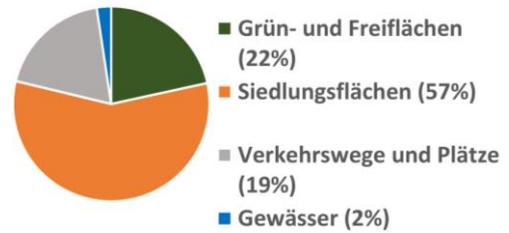
Pro Flächenart werden in jedem Steckbrief die drei wichtigsten Maßnahmen aufgelistet. Hierbei ist zu beachten, dass im konkreten Einzelfall noch weitere oder auch andere Maßnahmen relevant sein können und lediglich die Maßnahmen aufgezeigt werden, die für einen Großteil des Stadtbezirks zutreffen. So sind z.B. die Maßnahmen M18, M19 und M20 insbesondere für zentrumsnahe Siedlungsflächen relevant, da eine nächtliche Abkühlung durch urbanes Grün bzw. Kaltluftströmungen nur schwer erreicht werden kann. In aufgelockerten Randbereichen bieten sich dagegen andere Maßnahmen an (z.B. M15 bei niedrigen Gebäuden). Zusammenfassend richten sich die Maßnahmenempfehlungen nach der Bebauungs- und Grünstruktur des jeweiligen Stadtbezirks.



STADTBEZIRK 1: MÜNSTER MITTE



Flächenanteile im Ist-Zustand



Bioklimatische Bewertung aus PHK

Ausgleichsraum: Schutzbedarf



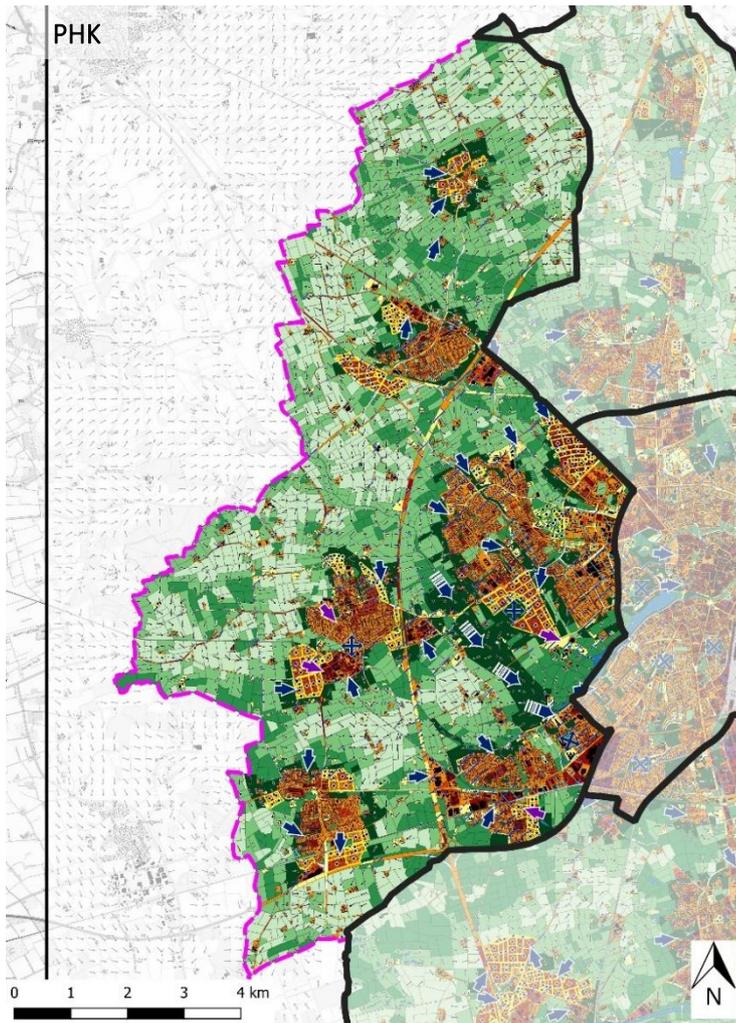
Wirkraum: Bioklimatische Belastung



Flächenart	Bioklimatische Bewertung und Hinweise
Grün- und Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 253 ha mit hohem und sehr hohem Schutzbedarf (Rang 3), entspricht einem Flächenanteil der Ausgleichsflächen im Stadtbezirk von 49,4 % (Rang 1) besonders schützenswerte Grünflächen: Schlossgarten; Zentralfriedhof; Aasee-Wiesen wichtigste Maßnahmen: M07 Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren, M09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen, M10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme, M13 Entdichtung (Rückbau)
Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 267 ha mit hoher und sehr hoher bioklimatischer Belastung (Rang 1), entspricht einem Flächenanteil im Stadtbezirk von 15,2 % (Rang 1) besonders belastete Siedlungsflächen: einzelne Flächen südöstlich des Prinzipalmarktes; Teilgebiete nördlich der Wolbecker Straße, nahe des Bahnhofs; einzelne Flächen am Stadthafen; Gewerbegebiet Geringhoffstraße/Borkstraße wichtigste Maßnahmen: M01 Begrünung im privaten Raum fördern, M02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen, M04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren, M06 Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien, M17 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen



STADTBEZIRK 2: MÜNSTER WEST



Flächenanteile im Ist-Zustand



Bioklimatische Bewertung aus PHK

Ausgleichsraum: Schutzbedarf



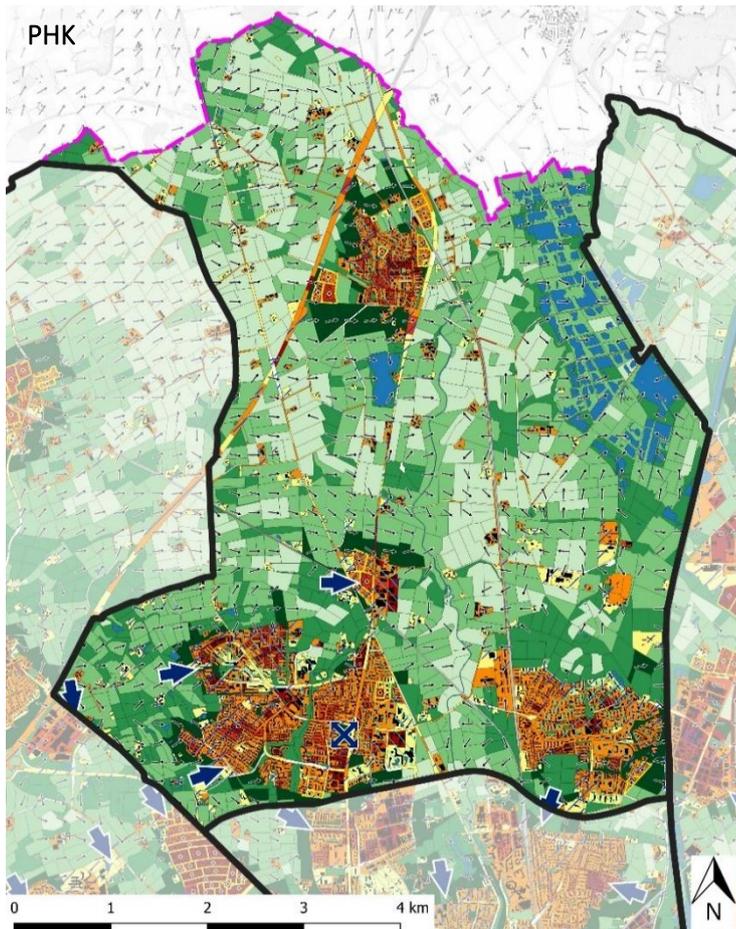
Wirkraum: Bioklimatische Belastung



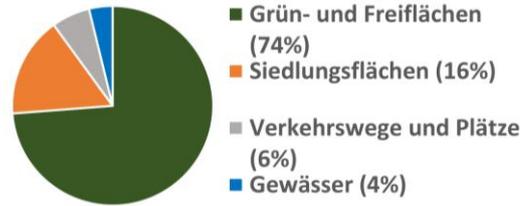
Flächenart	Bioklimatische Bewertung und Hinweise
Grün- und Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 730 ha mit sehr hohem Schutzbedarf (Rang 1), entspricht einem Flächenanteil der Ausgleichsflächen im Stadtbezirk von 12,5 % (Rang 2) besonders schützenswerte Grünflächen: Kaltluftleitbahn an der Münsterschen Aa; Flächen am Gievenbach und Aasee-Wiesen wichtigste Maßnahmen: M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen, M09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen, M11 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung, M14 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen
Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 161 ha mit hoher und sehr hoher bioklimatischer Belastung (Rang 3), entspricht einem Flächenanteil im Stadtbezirk von 6,7 % (Rang 5) besonders belastete Siedlungsflächen: Gewerbe südlich der Weseler Straße; Gewerbe in Roxel Süd; potenziell belastete Siedlungsflächen, falls nicht klimaangepasst bebaut: MMQ 1 Steinfurter Straße wichtigste Maßnahmen: M02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen, M03 Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten, M04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren, M05 Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben, M12 Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch



STADTBEZIRK 3: MÜNSTER NORD

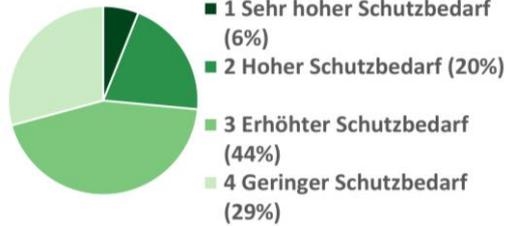


Flächenanteile im Ist-Zustand



Bioklimatische Bewertung aus PHK

Ausgleichsraum: Schutzbedarf



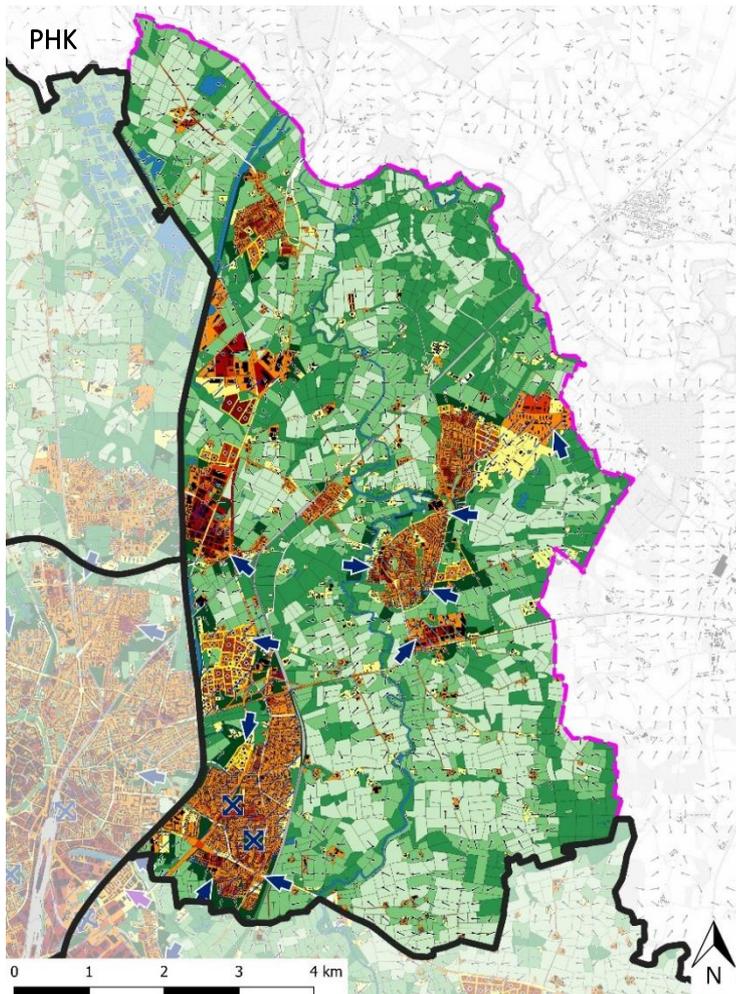
Wirkraum: Bioklimatische Belastung



Flächenart	Bioklimatische Bewertung und Hinweise
Grün- und Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 159 ha mit hohem und sehr hohem Schutzbedarf (Rang 6), entspricht einem Flächenanteil der Ausgleichsflächen im Stadtbezirk von 6,0 % (Rang 5) besonders schützenswerte Grünflächen: Zimmermannsches Wäldchen; Grünflächen an der Norbert Schule in Coerde wichtigste Maßnahmen: M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen, M14 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen
Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 34 ha mit hoher und sehr hoher bioklimatischer Belastung (Rang 6), entspricht einem Flächenanteil im Stadtbezirk von 4,1 % (Rang 6) besonders belastete Siedlungsflächen: an der Markus-Kirche in Kinderhaus; nahe Rotbuchenweg in Sprakel wichtigste Maßnahmen: M04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren, M05 Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben, M06 Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien



STADTBEZIRK 4: MÜNSTER OST



Flächenanteile im Ist-Zustand



Bioklimatische Bewertung aus PHK

Ausgleichsraum: Schutzbedarf



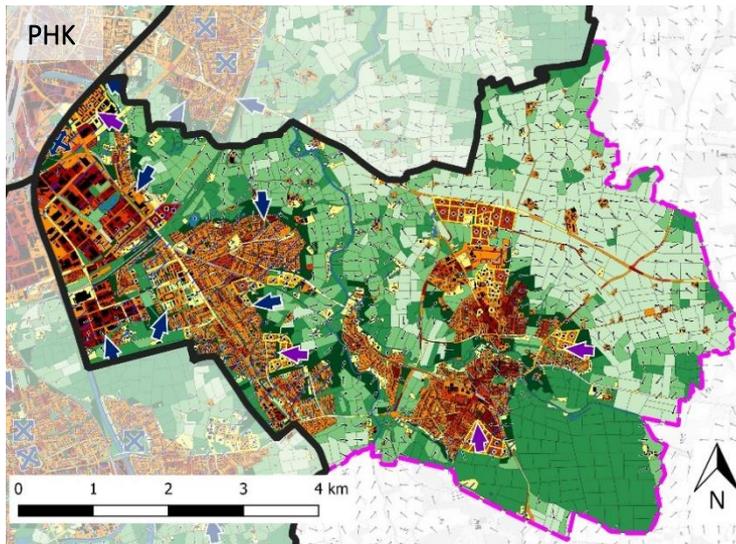
Wirkraum: Bioklimatische Belastung



Flächenart	Bioklimatische Bewertung und Hinweise
Grün- und Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 178 ha mit sehr hohem Schutzbedarf (Rang 5), entspricht einem Flächenanteil der Ausgleichsflächen im Stadtbezirk von 4,4 % (Rang 6) besonders schützenswerte Grünflächen: Spielplatz Hans-Bredow-Weg; Wäldchen südlich Heinrich-Lersch-Weg in Mauritz-Ost; Spielplatz und Teich nördlich der Hobbeltstraße in Handorf wichtigste Maßnahmen: M07 Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren, M09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen, M10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme
Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 92 ha mit hoher und sehr hoher bioklimatischer Belastung (Rang 5), entspricht einem Flächenanteil im Stadtbezirk von 7,7 % (Rang 4) besonders belastete Siedlungsflächen: rund um die Winkelheide in Gelmer; Gewerbe westlich Schiffahrter Damm/B481 und zwischen Schiffahrter Damm und Dortmund-Ems-Kanal wichtigste Maßnahmen: M02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen, M03 Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten, M04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren, M05 Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben, M17 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen



STADTBEZIRK 5: MÜNSTER SÜDOST



Flächenanteile im Ist-Zustand

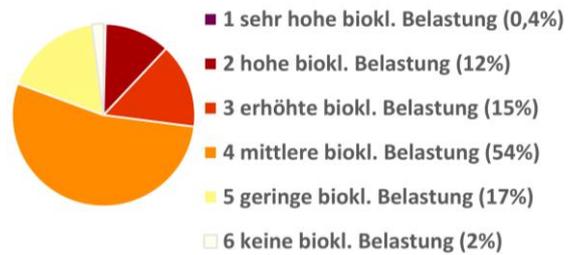


Bioklimatische Bewertung aus PHK

Ausgleichsraum: Schutzbedarf



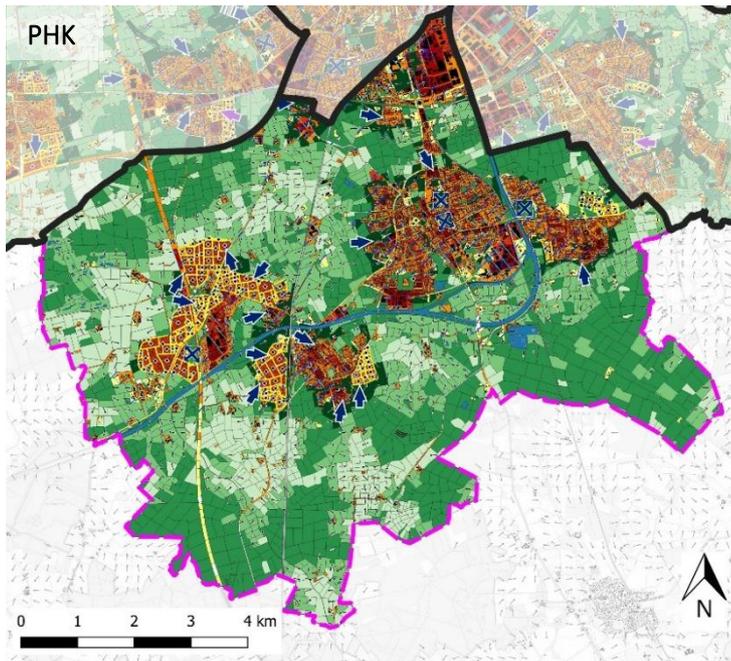
Wirkraum: Bioklimatische Belastung



Flächenart	Bioklimatische Bewertung und Hinweise
Grün- und Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 211 ha mit sehr hohem Schutzbedarf (Rang 4), entspricht einem Flächenanteil der Ausgleichsflächen im Stadtbezirk von 9,1 % (Rang 3) besonders schützenswerte Grünflächen: Freiflächen westlich der ehemaligen York-Kaserne; Freifl. am östlichen Ortsrand von Wolbeck; Freiflächen am Loddenbach wichtigste Maßnahmen: M07 Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren, M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen, M10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme, M14 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen
Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 147 ha mit sehr hoher bioklimatischer Belastung (Rang 4), entspricht einem Flächenanteil im Stadtbezirk von 12,0 % (Rang 2) besonders belastete Siedlungsflächen: Gewerbegebiet Loddenheide und südlich davon zwischen Kanal und York-Kaserne; Wolbeck südlich Petersdamm potenziell belastete Siedlungsflächen, falls nicht klimaangepasst bebaut: Gewerbeerweiterung Gremmendorf Heumannsweg wichtigste Maßnahmen: M02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen, M03 Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten, M04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren, M17 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen



STADTBEZIRK 6: MÜNSTER HILTRUP



Flächenanteile im Ist-Zustand



Bioklimatische Bewertung aus PHK

Ausgleichsraum: Schutzbedarf



Wirkraum: Bioklimatische Belastung



Flächenart	Bioklimatische Bewertung und Hinweise
Grün- und Freiflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 326 ha mit sehr hohem Schutzbedarf (Rang 2), entspricht einem Flächenanteil der Ausgleichsflächen im Stadtbezirk von 6,3 % (Rang 4) besonders schützenswerte Grünflächen: Friedhof Sankt Clemens, Grünflächen am Herz-Jesu-Krankenhaus, Freiflächen am südlichen Ortsrand von Amelsbüren und in Hilstrup West wichtigste Maßnahmen: M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen, M09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen, M10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme
Siedlungsflächen	<ul style="list-style-type: none"> in Summe 178 ha mit hoher und sehr hoher bioklimatischer Belastung (Rang 2), entspricht einem Flächenanteil im Stadtbezirk von 11,0 % (Rang 3) besonders belastete Siedlungsflächen: Gewerbegebiet zwischen Trauttmansdorffstr. und Dortmund-Ems-Kanal; BASF Gelände in Hilstrup potenziell belastete Siedlungsflächen, falls nicht klimaangepasst bebaut: Hansa Business Park (aktuelle Baulücken) wichtigste Maßnahmen: M02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen, M03 Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten, M04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren, M05 Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben



Anhang II: Klimawandel in Münster

BEOBACHTETE KLIMAVERÄNDERUNGEN

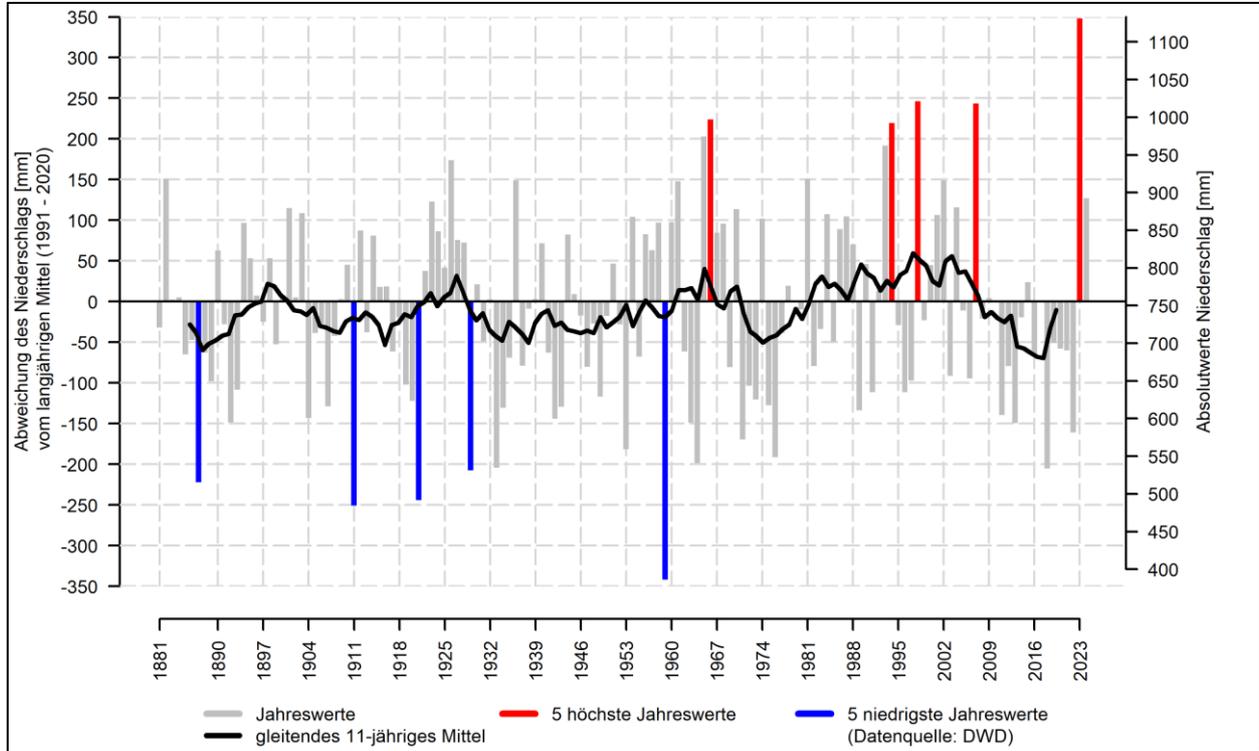


Abb. A 2: Entwicklung des Niederschlags in Münster 1881 -2024 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024b).



TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

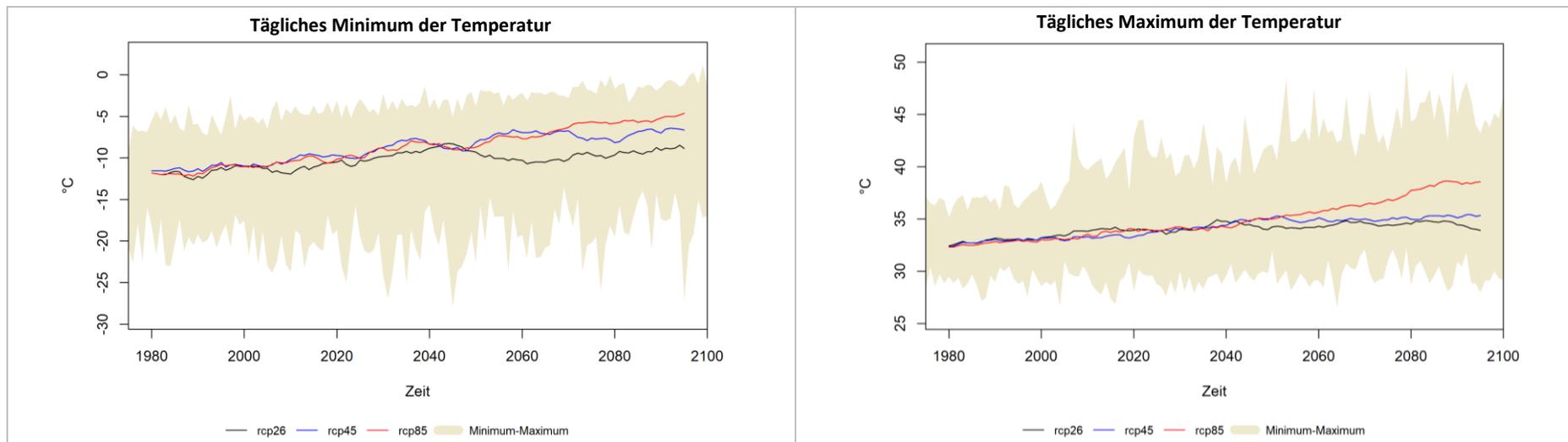


Abb. A 3: Zeitlicher Trend der täglichen Minimumtemperaturen (links) bzw. Maximumtemperaturen (rechts) in Münster (ausgewählte RCP-Szenarien, eigene Berechnung nach EURO-CORDEX-Daten des DWD, 2024c).

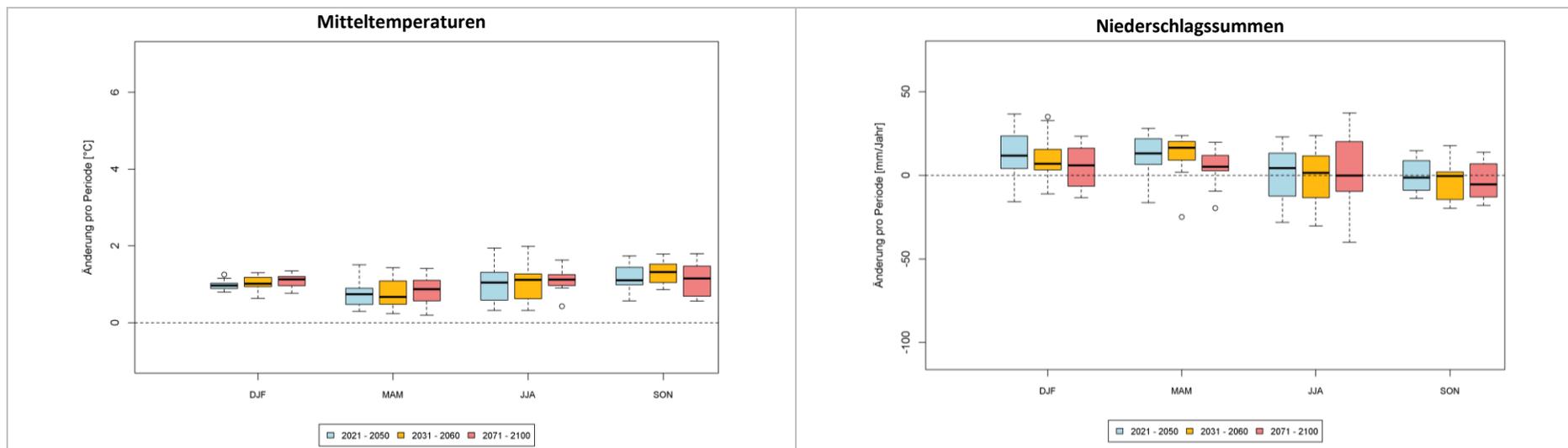


Abb. A 4: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen (links) und mittleren saisonalen Niederschlagssummen (rechts) in Münster für das RCP 2.6 (DWD, 2024c)

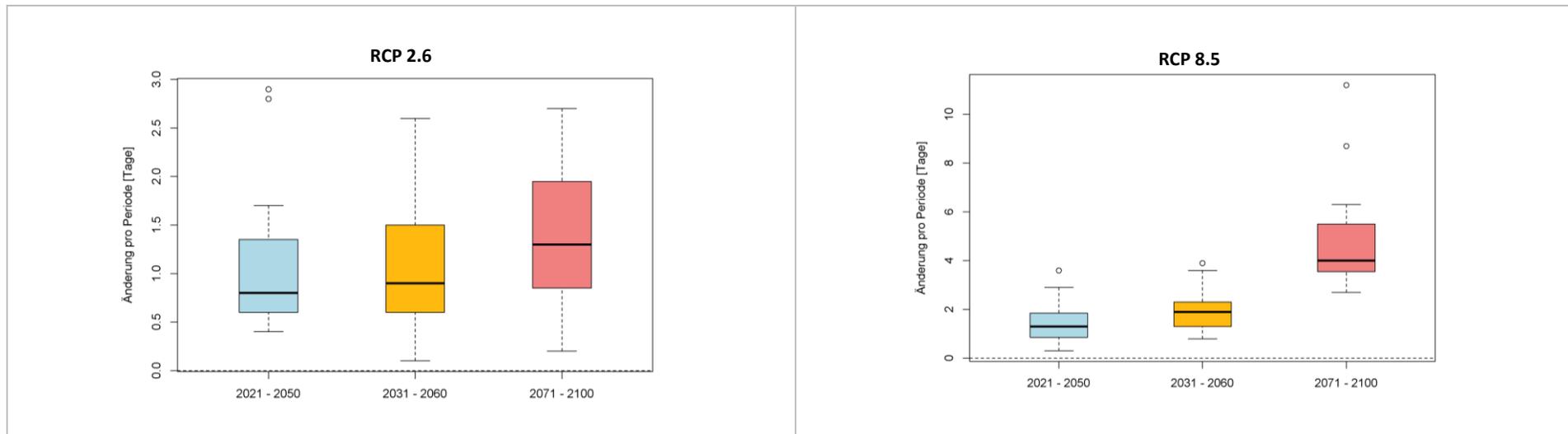


Abb. A 5: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in Münster in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

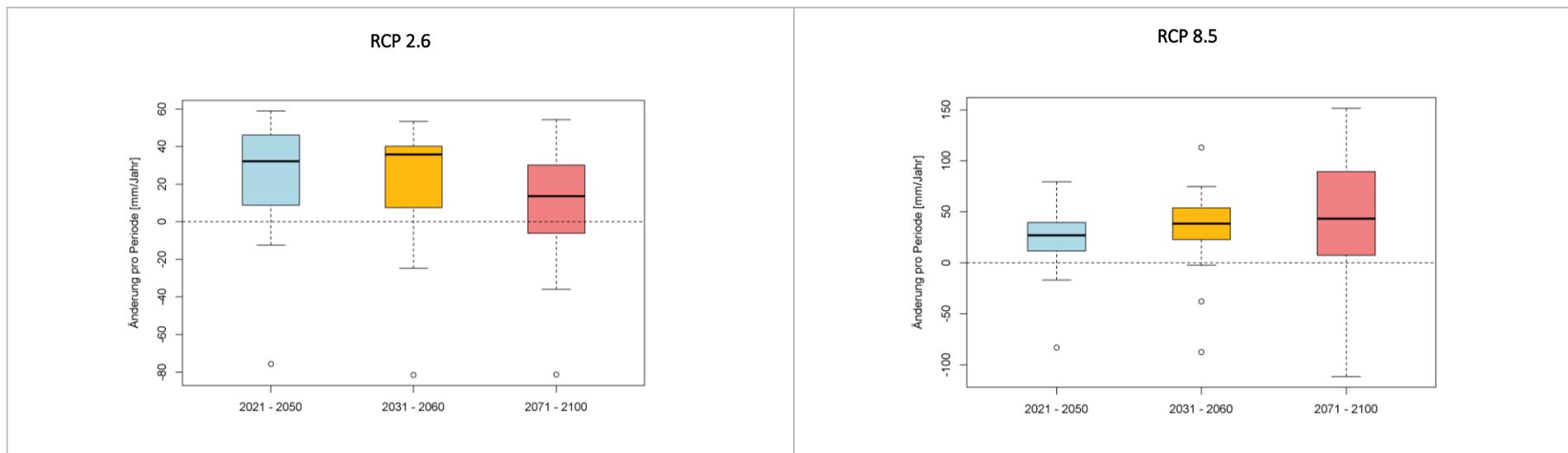


Abb. A 6: Änderung der langjährigen mittleren jährlichen Niederschlagssumme in Münster in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)



TROCKENHEIT

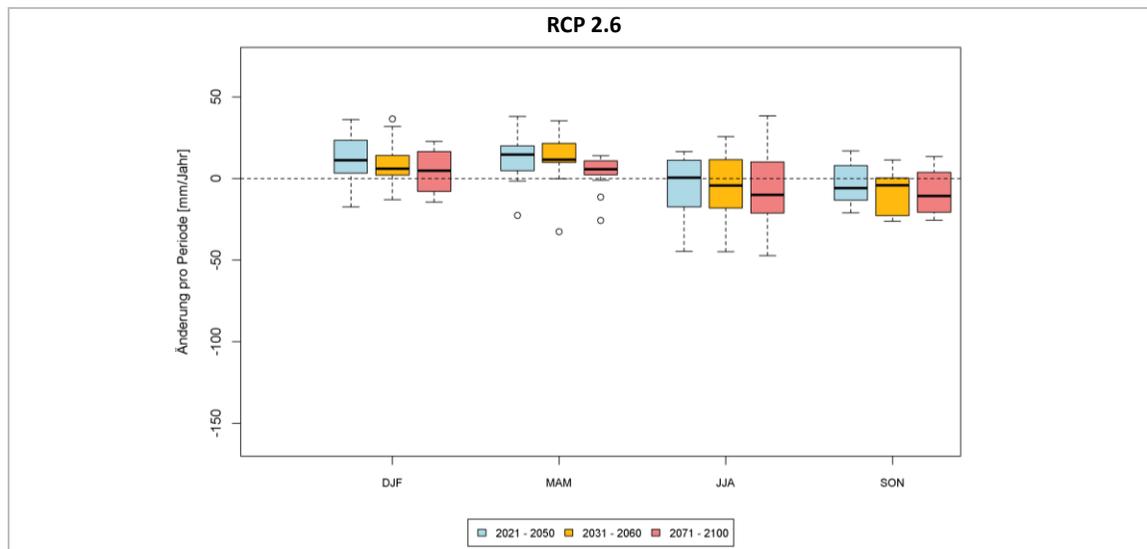


Abb. A 7: Änderung der langjährigen mittleren saisonalen klimatischen Wasserbilanz in Münster für das RCP 2.6 (DWD, 2024c)

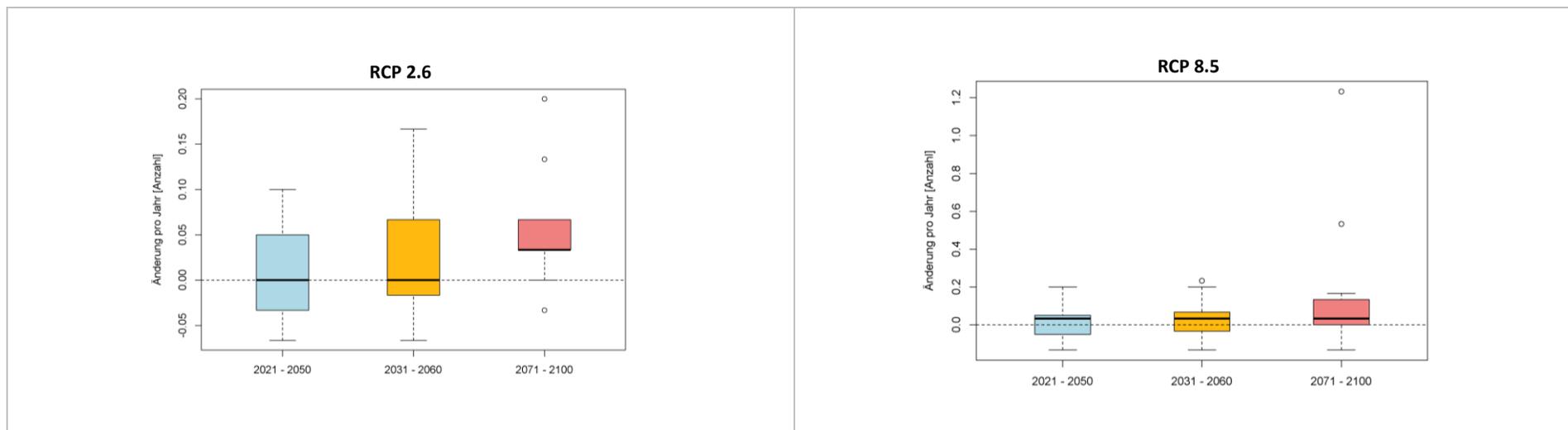


Abb. A 8: Änderung der langjährigen mittleren Anzahl extremer Trockenperioden (mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit < 1 mm Niederschlag) innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Münster in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)



STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG (N ≥ 10 MM/D)

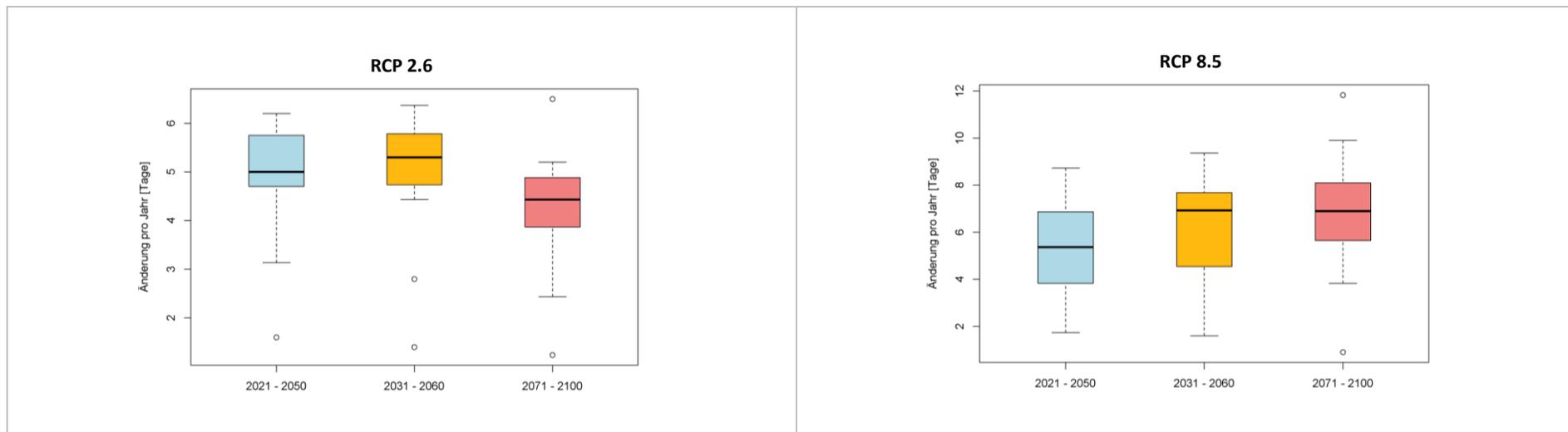


Abb. A 9: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 10$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Münster in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STÄRKERER NIEDERSCHLAG (N ≥ 20 MM/D)

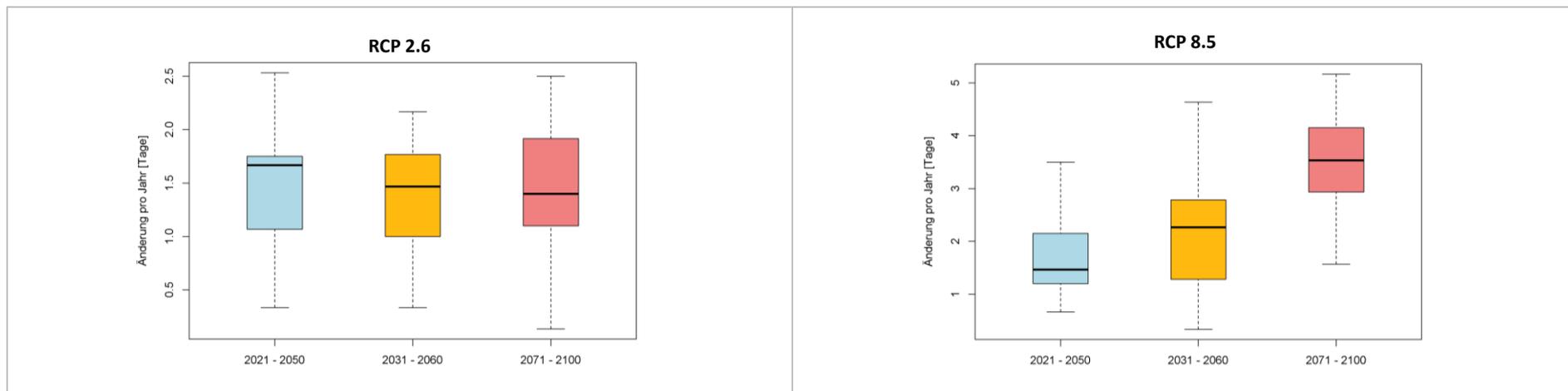


Abb. A 10: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 20$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Münster in den Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)



STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKNIEDERSCHLAG (N ≥ 30 MM/D)

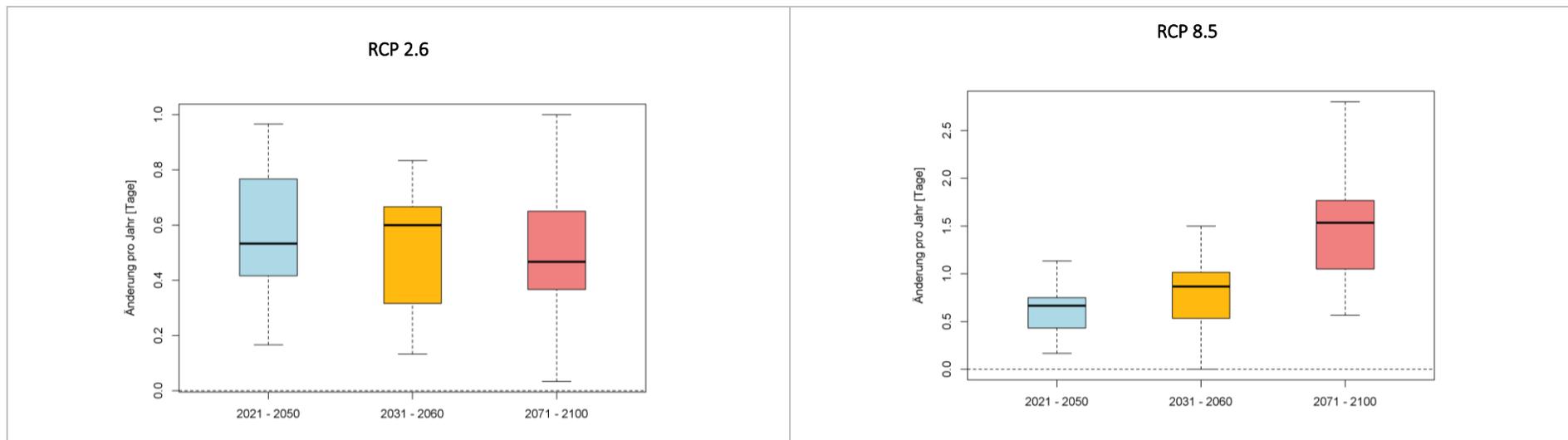


Abb. A 11: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Münster in den Zukunftsperioden für das RCP-Szenario 2.6 (links) und 8.5 (rechts) (DWD, 2024c)

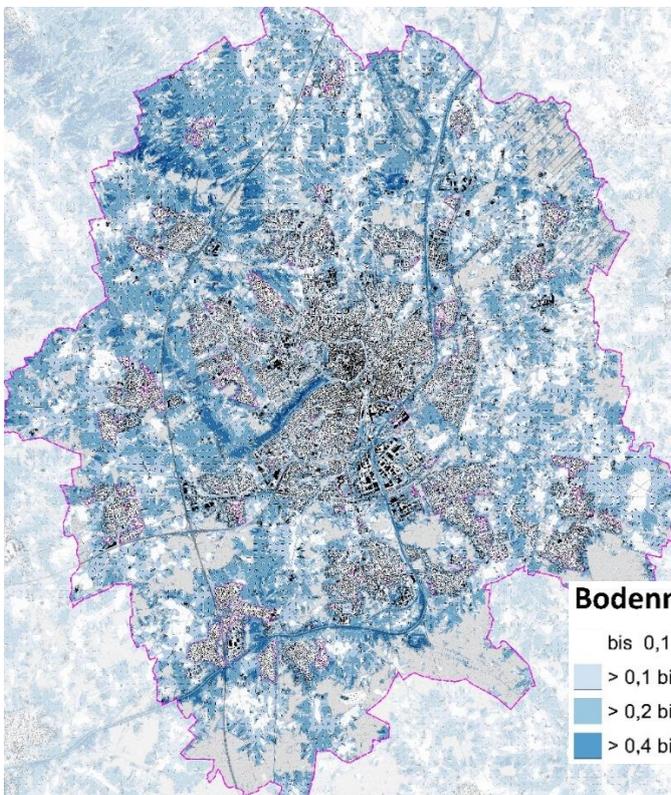
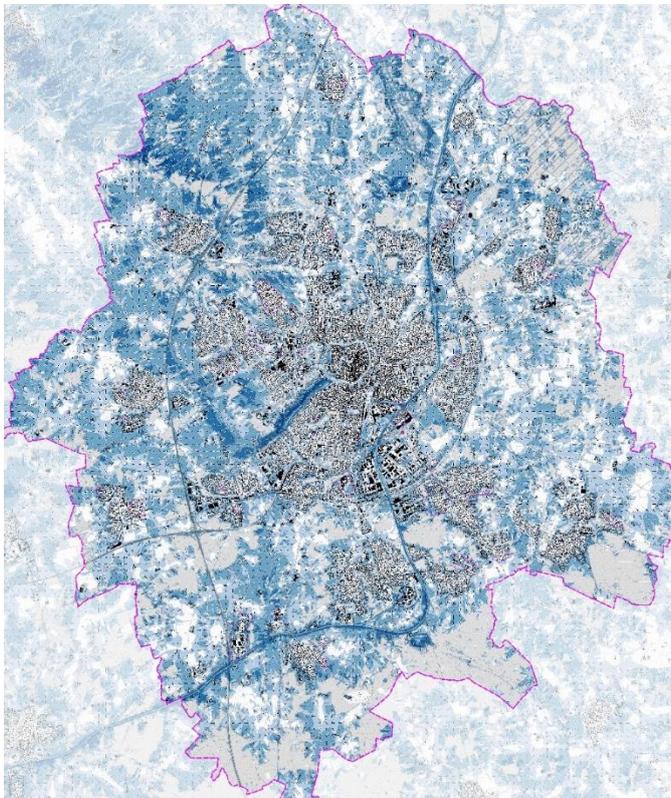
STURM

Die Auswertungen zum Thema Sturm erbrachten aufgrund der hohen Unsicherheit der Ergebnisse keine validen Aussagen. Aus diesem Grund sind die betreffenden Abbildungen und Tabellen an dieser Stelle nicht mit aufgeführt.



Anhang III: Sonstiges

ERGÄNZENDE KARTEN



Bodennahes Strömungsfeld [Windgeschw. in m/s in 2 m ü. Gr. um 04:00 Uhr]

- | | | |
|---------------|---|-------------|
| bis 0,1 | > 0,8 bis 1,2 | Stadtgrenze |
| > 0,1 bis 0,2 | > 1,2 | Planflächen |
| > 0,2 bis 0,4 | Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s
(aggregiert auf 500 m Auflösung) | Gebäude |
| > 0,4 bis 0,8 | | |

Abb. A 12 Bodennahes Strömungsfeld von 4 Uhr für das Stadtgebiet Münster für die Zukunfts-Szenarien (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).

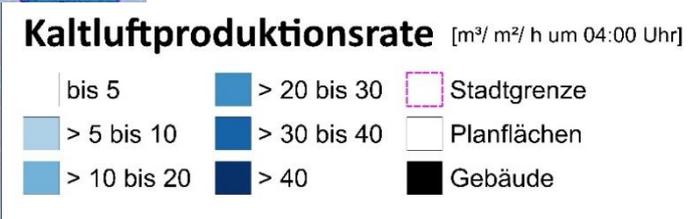
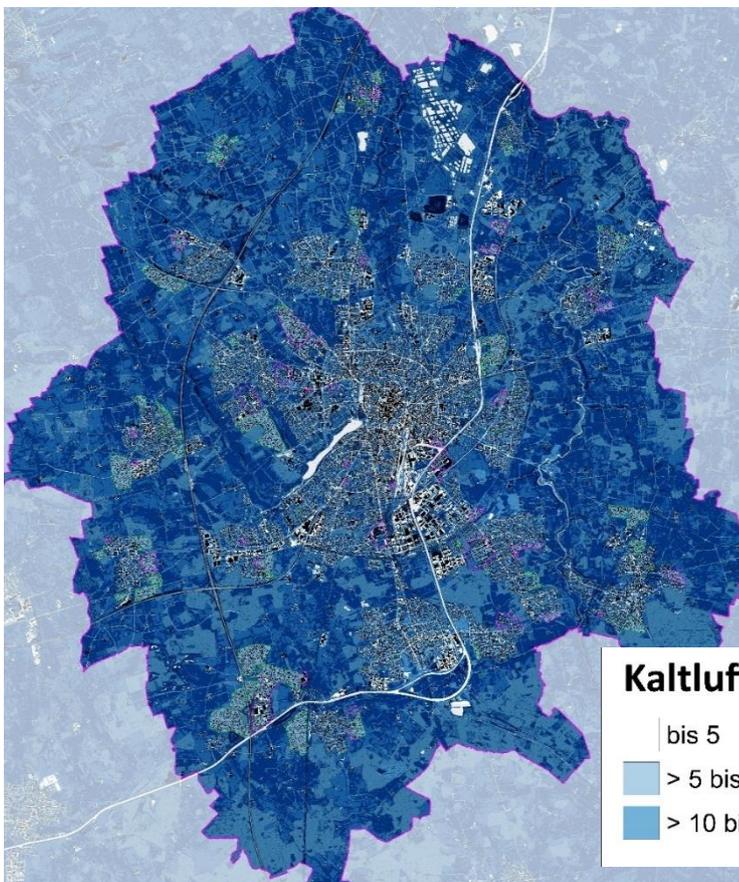
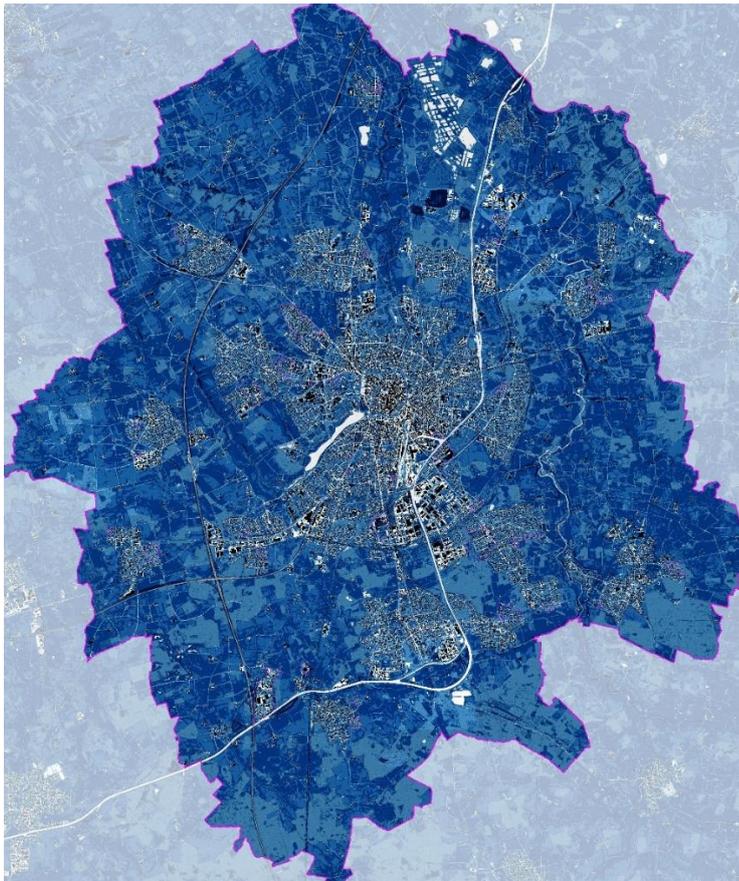


Abb. A 13 Kaltluftproduktionsrate von 4 Uhr für das Stadtgebiet Münster für die Zukunfts-Szenarien (oben = Szenario 2035; unten = Szenario 2045).



ERGÄNZENDE TABELLEN

Tabelle 31: Liste der städtebaulichen Entwicklungsflächen (Typ: W = Wohnen; G = Gewerbe)

ID	Flächenart	Typ	Name	Ggf. Dichteklasse oder Anmerkungen	Berücksichtigung ab dem Szenario...
1	Baulandprogramm 2024 – 2026 (BLP 24-26)	W	Amelsbüren - Nordwestlich Am Dornbusch	0	S1
2		W	Angelmodde - Südlich Hiltruper Str.	I	
3		W	Handorf - Kirschgarten / Bäder	0	
4		W	Gievenbeck - Oxford-Kaserne Abschnitt 4	IV	
5		W	Gremmendorf - York-Kaserne Abschnitte 4 und 5	III	
6		W	Wolbeck / Angelmodde - Südl. Hiltruper Str. / Westl. Am Sandbach	0	
7		W	Mitte - Von-Stauffenberg-Straße	V	
8		W	Sentrup - ehem. Wartburgschule	III	
9		W	Sentrup - Leos Gate	VII	
10		W	Coerde - Kiesekampweg II (ehem. Burlage)	VII	
11		W	Gremmendorf - Gasometer	VII	
12		W	Nienberge - Feldstiege / Beerwiede	II	
13	BLP 26-28	W	Handorf - Nördlich Kötterstraße	II	S1
14		W	Wolbeck - Südlich Berdel	I	
15		W	Gremmendorf - York-Kaserne Abschnitt 6 (ZUE)	III	
16		W	Mitte - Südlicher Dahlweg	VII	
17		W	Mitte - Stadthafen Nord	VII	
18		W	Sprakel - Östl. Sprakeler Str. / westl. DB	I	
19		W	Angelmodde - ehem. Standort Westfalen AG	III	



20		W / G	Gievenbeck - Busso-Peus-Straße (frühe Bauabschnitte)	VI	
21	BLP 28-30	W / G	Gievenbeck - Neues Urbanes Stadtquartier Steinfurter Straße	VI	S1
22		W	Mauritz-Ost - Maikottenweg	I	
23		W / G	Gremmendorf - Neues Urbanes Stadtquartier Theodor-Scheiwe-Straße	VII	
24		W	Hiltrup - Nördlich Osttor	II	
25		W	Mecklenbeck - Hafkhorst	II	
26		W	Häger - Westlich Hägerstraße (ehem. Sägewerk)	0	
27		W	Kinderhaus - Wangeroogeweg (ehem. Sportplatz Westfalia)	II	
28		W	Mitte - Östlich Weseler Str.	V	
29	BLP 30-32	W	Albachten - Lindenallee / nördlichfreie Flur	0	S1
30		W	Roxel - Südlich Tilbecker Str.	II	
31		W	Sprakel - ehem. Grundschule	II	
32		W	Amelsbüren - Böckenhorst	I	
33	Gewerbeflächenentwicklungskonzept GFEK 2016	G	Gelmer - Erw. Hessenweg	IuG	S1
34		G	Gelmer - Heitmannsweg	SOG	
35		G	Gremmendorf - Heumannsweg	IuG	
36		G	Roxel - Südlich Bahnhofpunkt	BDG	
37	Restkapazitäten in Baugebieten	W	Coerde - Kiesekampweg	VI	S1
38		W	Mitte - südl. Roddestraße	VII	
39		W	Mitte - Klosterareal Pluggendorf	VII	
40	Integriertes Flächenkonzept Münster (IFM)	W	Gievenbeck - Südlich Nünningweg	III	S2
41		W	Gievenbeck - Institut*	III	
42		W	Sentrup - West "Zooquartier"	IV	



43	IFM	W	Mecklenbeck - Hafkhorst	III	S2
44		W	Albachten - Steinbreite	II	
45		W	Albachten - Dülmener Straße	I	
46		W	Albachten - Holkenbrink	I	
47		W	Albachten - nördlich und südlich der Bahn	II	
48		W	Roxel - Östlich Tilsiter Straße	II	
49		W	Roxel - Bredeheide	I	
50		W	Roxel - Rohrbusch	II	
51		W	Nienberge - Häger	I	
52		W	Coerde - Edelbach*	III	
53		W	<i>Kinderhaus - Südlich Moorhock</i>	II	<i>Mit modelliert, aber gem. abschließendem Ratsbeschluss nicht Bestandteil des IFM!</i>
54	IFM	W	Kinderhaus / Sprakel - Am Knapp*	II	S2
55		W	Sprakel - Östlich Bahn	II	
56		W	Sprakel - Südlich Landwehr	I	
57		W	Mauritz-Ost - Wilhelmshavenufer/Coppenrathsweg / Dingstiege	IV	
58		W	Gelmer - Südlich Eckernheide	I	
59		W	Handorf-Dorfbaum - Am Kerkamp / Dorbaumstraße*	II	
60		W	Handorf - Dorbaum Ost*	I	
61		W	<i>Gremmendorf - Westlich Frankenweg</i>	II	<i>Mit modelliert, aber gem. abschließendem Ratsbeschluss</i>



					<i>nicht Bestandteil des IFM!</i>
62	IFM	W	Gremmendorf - Südlich Angelmodder Weg	II	S2
63		W	Angelmodde - Homannstraße / Vogelrohrsheide	II	
64		W	Wolbeck - Südlich Gewerbegebiete Wolbeck-Nord*	I	
65		W	Wolbeck - Südlich Petersheide	II	
66		W	Hiltrup - Südlich Tulpenweg	II	
67		W	Amelsbüren - Westlich der Bahn	II	
68		W	Amelsbüren - Böckenhorst (Erweiterung)	I	
69		W / G	Roxel - Stodtbrockweg	I	
70		W / G	Roxel - Südwestlich Bahnhofpunkt	II	
71		G	Gievenbeck - Westlich Steinfurter Straße	BDG	
72		G	Nienberge - Südlich B54 / Rüschausweg	SOG	
73		G	Wolbeck - Nördlich Gewerbegebiet	SOG	
74		G	Amelsbüren - Nördlich Loevelingloh	BDG	
75		G	Amelsbüren - Erweiterung Hansa-BusinessPark	IuG	
76		IFM	W	Albachten - Östliche Erweiterung südlicher Teil (Albachten-Ost)	
77	B-Plan	Sondergebiet	MBST_Preussenstadion	B-Plan	S1
78	B-Plan	G	HansaBusinessPark	Auffüllung des bestehenden B-Plans	S1
79	Sonstige	W	Mecklenbeck - Meckmannweg/Schwarzer Kamp	Weiterentwicklung der Freiflächen	S1