

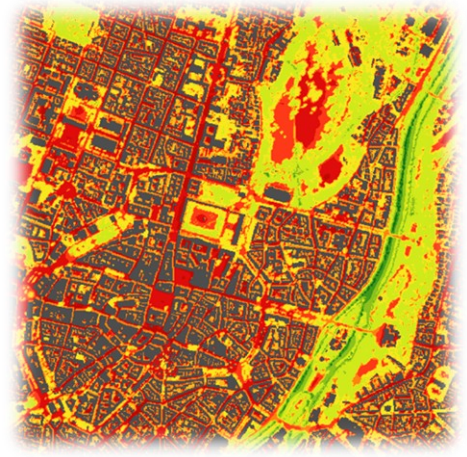
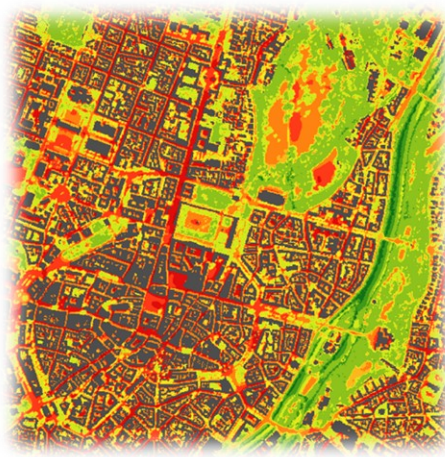


Landeshauptstadt
München
**Referat für Klima-
und Umweltschutz**

Stadtklimaanalyse

Landeshauptstadt München

Fortschreibung der Stadtklimaanalyse 2014



Auftraggeberin

Landeshauptstadt München
Referat für Klima- und Umweltschutz (RKU)
Bayerstraße 28A
80335 München



Landeshauptstadt
München
**Referat für Klima-
und Umweltschutz**

erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

Juni 2026





Impressum

Ansprechpartner*innen

Dr. Teresa Zölch

Dr. Stefan Geiß

Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover



Bearbeitung

Dr. Jens Dahlhausen

Dr. Björn Büter



Inhaltsverzeichnis

Impressum	1
Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis.....	4
Tabellenverzeichnis.....	8
Glossar	10
Zusammenfassung.....	14
1. Hintergrund und Anlass	16
2. Fachliche Grundlagen	18
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	18
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	22
2.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	25
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess	30
4. Klima und Klimawandel im Raum München	33
4.1 Datengrundlage und Methodik	33
4.2 Gegenwärtiges Klima	38
4.3 Autochthone Wetterlagen.....	40
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen.....	42
4.4.1 Temperaturzunahme und Hitze	43
4.4.2 Niederschlagsverschiebung & Trockenheit	48
4.4.3 Starkniederschlag	51
4.4.4 Wind und Sturm	55
5. Analysemethoden	56
5.1 Numerische Modellierung	56
5.1.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D.....	56
5.1.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	61
5.1.3 Szenarienentwicklung.....	65
5.1.4 Rahmen- und Randbedingungen	77
5.1.5 Modellausgabegrößen.....	80
5.2 Qualitätssicherung	82
5.3 Unsicherheiten und Herausforderungen	83
6. Analyseergebnisse	86
6.1 Ergebnisse Status quo, Szenario 1 und Szenario 2	86



6.1.1	Nachtsituation	86
6.1.2	Tagsituation	92
6.2	Klimaanalysekarte.....	96
6.3	Ergebnisse Szenario 3 Baustein „Grüne Stadt“	104
6.3.1	Auswertung Gesamtstadt	104
6.3.2	Auswertung Fokusräume.....	107
6.3.3	Fazit	113
6.4	Ergebnisse Szenario 4 Baustein „Wachsende Stadt“	114
7.	Ergebnisaufbereitung für Bewertung und Planung.....	125
7.1	Grundlagen	125
7.2	Geometrische Basis	126
7.3	Bewertungskarten für Tag- und Nachtsituation	128
7.3.1	Wirkraum.....	128
7.3.2	Ausgleichsraum	130
7.3.3	Zusätzliche Karteninhalte zum Kaltluftprozessgeschehen – Methodik.....	133
7.3.4	Ergebnisse Bewertungskarten: Status quo und Zukunftsszenarien	134
7.3.4.1	Nachtsituation	134
7.3.4.2	Tagsituation	139
7.4	Planungshinweiskarte als zentrales Produkt für die Planung	143
7.4.1	Stadtklimatische Handlungserfordernisse im Wirkraum	144
7.4.2	Stadtklimatische Handlungserfordernisse im Ausgleichsraum	146
7.4.3	Weitere Informationslayer in der Planungshinweiskarte.....	148
7.5	Weiterentwicklung der Stadtklimaanalyse von 2014	149
7.5.1	Notwendigkeit der Fortschreibung.....	149
7.5.2	Vergleich der Ergebnisse (ausgewählte Beispiele)	150
7.5.3	Relevanz für die Planung	154
7.6	Maßnahmenkatalog	155
7.7	Digitales Stadtklimamanagementsystem.....	172
	Quellenverzeichnis	174



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH (VDI 3787, BLATT 4, 2020).	18
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD, 2024C)	19
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN ET AL., 2021).	20
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ & SETT, 2019).	21
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL., 2019).	22
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (QUELLEN: (LINE, 2017) (OBEN), (MVI 2012) (MITTE), (DWD, 2023) (UNTEN))	23
ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015)	26
ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER PLANUNGSHINWEISKARTE GEMÄß (VDI 3787, BLATT 1, 2015).	27
ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG, 2022, S. 18).	28
ABBILDUNG 10: BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE	30
ABBILDUNG 11: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN <i>REPRESENTATIVE CONCENTRATION PATHWAYS (RCP)</i> UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100 (RCP3-PD IST VERGLEICHBAR MIT DEM IM TEXT GENANNTE RCP-SZENARIO 2.6) (QUELLE: (MEINSHAUSEN ET AL., 2011).	34
ABBILDUNG 12: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.	37
ABBILDUNG 13: KLIMADIAGRAMM DER STADT MÜNCHEN FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020 (DWD, 2024B).	38
ABBILDUNG 14: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN MÜNCHEN IM ZEITRAUM 1881 BIS 2022 (EIGENE BERECHNUNG NACH (DWD, 2024B))	39
ABBILDUNG 15: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN MÜNCHEN FÜR DEN ZEITRAUM 1971 – 2000, BASIEREND AUF DER DWD-STATION MÜNCHEN-STADT (DWD, 2024A).	40
ABBILDUNG 16: LUFTSTRÖMUNG IM VORALPENRAUM WÄHREND WOLKENARMER SOMMERLICHER WETTERLAGEN (QUELLE: DWD; BEREITGESTELLT DURCH DIE STADT MÜNCHEN).	41
ABBILDUNG 17: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN MÜNCHEN (77 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER DWD-STATION MÜNCHEN (DWD 2024A).	42
ABBILDUNG 18: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN MÜNCHEN (ALLE SZENARIEN). DIE DURCHGEZOGENEN LINIEN SIND DIE MEDIANE DER EINZELNEN SZENARIEN DES ENSEMBLES. DER MÖGLICHKEITSBEREICH BILDET DIE BANDBREITE ZWISCHEN KLEINSTEM UND GRÖßTEM WERT DES ENSEMBLES.	43
ABBILDUNG 19: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN MÜNCHEN PRO PERIODE IM SZENARIO RCP8.5 IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1991 – 2020.	45



ABBILDUNG 20: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN (AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT $T_{MAX} \geq 30\text{ °C}$) PRO PERIODE IM SZENARIO RCP 8.5 IN MÜNCHEN IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1991 – 2020.	47
ABBILDUNG 21: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER NIEDERSCHLAGSSUMME PRO PERIODE IN MÜNCHEN IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1991-2020 (SZENARIO RCP8.5)	49
ABBILDUNG 22: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ (NIEDERSCHLAG – POTENZIELLE VERDUNSTUNG) PRO PERIODE IN MÜNCHEN IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1991 – 2020 (SZENARIO RCP8.5)	50
ABBILDUNG 23: ZEITLICHER TREND DER ANZAHL AN TAGEN PRO JAHR MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG ($N \geq 20\text{ MM/D}$) IN MÜNCHEN (ALLE SZENARIEN).	52
ABBILDUNG 24: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER ANZAHL AN TAGEN MIT STARKNIEDERSCHLAG ($N > 30\text{ MM}$) PRO JAHR IN MÜNCHEN IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1991-2020 (SZENARIO RCP8.5). SIEHE FARBLICHE EINFÄRBUNGEN IN TABELLE 6.	54
ABBILDUNG 25: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITANH-3D.....	59
ABBILDUNG 26: 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	60
ABBILDUNG 27: DIGITALES GELÄNDEMOMODELL FÜR MÜNCHEN UND DIE NÄHERE UMGEBUNG ..	62
ABBILDUNG 28: MODELLEINGANGSDATEN „NUTZUNGSKLASSEN“ FÜR DEN AUSSCHNITT DER MÜNCHNER KERNSTADT.	63
ABBILDUNG 29: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION.	64
ABBILDUNG 30. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN, 2023)	66
ABBILDUNG 31: DARSTELLUNG DER „STRAßENBEREICHE“ (BLAU), WIE SIE ALS GRUNDLAGE FÜR DIE AUSWAHL DER STRAßEN-RASTERFLÄCHEN BERÜCKSICHTIGT WURDEN.	70
ABBILDUNG 32: DARSTELLUNG DER „STRAßEN“-RASTERFLÄCHEN (BLAU), WIE SIE IN DEN „RANDOMISATOR“ EINGESPEIST WURDEN.	70
ABBILDUNG 33: DARSTELLUNG DER „STRAßEN“-RASTERFLÄCHEN (BLAU) UND DER MITTELS RANDOMISATOR ERMITTELTEN NEUEN BAUMSTANDORTE (ROT) FÜR DAS SZENARIO BAUSTEIN „GRÜNE STADT“.	71
ABBILDUNG 34: NUTZUNGSRASTER „STATUS QUO“ MIT DEN NEUEN BAUMSTANDORTEN (ROT) AUS DEM SZENARIO BAUSTEIN „GRÜNE STADT“.	71
ABBILDUNG 35: VERGLEICH NUTZUNGSRASTER STATUS QUO (OBEN) UND SZENARIO 3 "GRÜNE STADT" (UNTEN).....	73
ABBILDUNG 36: ÜBERSICHT DER IM BAUSTEIN „WACHSENDE STADT“ INTEGRIERTEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN (GRÜN MARKIERT).	74
ABBILDUNG 37: VERGLEICH NUTZUNGSRASTER STATUS QUO (OBEN) UND SZENARIO 4 "WACHSENDE STADT" (UNTEN) AM BEISPIEL EINES GEWERBEGEBIETS IN DER SCHLEIßHEIMER STRAßE.	76
ABBILDUNG 38: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH (GROSS, 1992)).	78
ABBILDUNG 39: AUSGANGSPROFILE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE BESTANDSSITUATION, GRÜNE STADT UND WACHSENDE STADT (BLAUE KURVE) SOWIE FÜR DIE SZENARIEN MÄßIGER KLIMAWANDEL (ORANGE) UND STARKER KLIMAWANDEL (GRÜN).	79
ABBILDUNG 40: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR (T_{04}) IM STATUS QUO SZENARIO IN DER MÜNCHNER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE).....	87



ABBILDUNG 41: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IM SZENARIO 1 „MÄßIGER KLIMAWANDEL 2055“ (LINKS) UND SZENARIO 2 „STARKER KLIMAWANDEL 2055“ (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT DES MÜNCHEN STADTGEBIETS (VERKÜRZTE LEGENDE).....	88
ABBILDUNG 42: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO SZENARIO IN DEM MÜNCHNER STADTGEBIET (VERKÜRZTE LEGENDE).	89
ABBILDUNG 43: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO SZENARIO IN MÜNCHEN (VERKÜRZTE LEGENDE).....	90
ABBILDUNG 44: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM SZENARIO 2 „STARKER KLIMAWANDEL 2055“ IN MÜNCHEN (VERKÜRZTE LEGENDE).....	91
ABBILDUNG 45: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO SZENARIO IN MÜNCHEN (VERKÜRZTE LEGENDE).....	91
ABBILDUNG 46: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM STATUS QUO SZENARIO IN DER MÜNCHNER INNENSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE).	93
ABBILDUNG 47: DETAILANSICHT WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM STATUS QUO SZENARIO IN DER MÜNCHNER INNENSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE).	94
ABBILDUNG 48: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM SZENARIO 1 „MÄßIGER KLIMAWANDEL 2055“ (OBEN) UND SZENARIO 2 „STARKER KLIMAWANDEL 2055“ (UNTEN) IM MÜNCHNER STADTGEBIET (VERKÜRZTE LEGENDE).	95
ABBILDUNG 49: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTE (KARTEN 1 – 3) (VERKÜRZTE DARSTELLUNG)	97
ABBILDUNG 50: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS MIT UND RECHTS OHNE ENTSPRECHENDE AUSWEISUNG) INKLUSIVE LEGENDE (VERKÜRZT). DARGESTELLT IST DAS BODENNAHE WINDFELD IN 50 M AGGREGIERUNG.	99
ABBILDUNG 51: KLIMAANALYSEKARTE 1 DER STADT MÜNCHEN IM STATUS QUO SZENARIO...	100
ABBILDUNG 52: KLIMAANALYSEKARTE 2 DER STADT MÜNCHEN IM SZENARIO 1 „MÄßIGER KLIMAWANDEL 2055“.....	101
ABBILDUNG 53: KLIMAANALYSEKARTE 3 DER STADT MÜNCHEN IM SZENARIO 2 „STARKER KLIMAWANDEL 2055“.....	102
ABBILDUNG 54: KLIMAANALYSEKARTE 4 DER STADT MÜNCHEN IM STATUS QUO SZENARIO...	103
ABBILDUNG 55: ZUSAMMENHANG PET-WERTE IN ABHÄNGIGKEIT DER BAUMKRONENÜBERSCHIRMUNG IN STRAßENBEREICHEN DES MÜNCHNER STADTGEBIETS.	105
ABBILDUNG 56: ZUSAMMENHANG PET-WERTE IN ABHÄNGIGKEIT DER BAUMKRONENÜBERSCHIRMUNG IN STRAßENBEREICHEN DES MÜNCHNER STADTGEBIETS.	106
ABBILDUNG 57: VERGLEICH NUTZUNGSRASTER IM SZENARIO "STATUS QUO" (OBEN) UND IM SZENARIO "BAUSTEIN GRÜNE STADT" (UNTEN) FÜR DEN AUSSCHNITT MAXIMILIANSTRASSE, MAX-JOSEPH-PLATZ UND MARIENHOF.	108
ABBILDUNG 58: VERGLEICH PET-WERTE IM SZENARIO "STATUS QUO" (OBEN) UND IM SZENARIO "BAUSTEIN GRÜNE STADT" (UNTEN) FÜR DEN AUSSCHNITT MAXIMILIANSTRASSE, MAX-JOSEPH-PLATZ UND MARIENHOF.	110
ABBILDUNG 59: VERGLEICH NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR (T04)-WERTE IM SZENARIO "STATUS QUO" (OBEN) UND IM SZENARIO "BAUSTEIN GRÜNE STADT" (UNTEN) FÜR DEN AUSSCHNITT MAXIMILIANSTRASSE, MAX-JOSEPH-PLATZ UND MARIENHOF.....	112
ABBILDUNG 60: VERGLEICH KALTLUFTVOLUMENSTROM IM SZENARIO "STATUS QUO" (OBEN) UND IM SZENARIO "BAUSTEIN WACHSENDE STADT" (UNTEN) FÜR DEN AUSSCHNITT DES B-PLAN-GEBIETS ERWEITERUNG FIZ (ROTE UMRANDUNG).	115



ABBILDUNG 61: VERGLEICH PET IM SZENARIO "STATUS QUO" (OBEN) UND IM SZENARIO "BAUSTEIN WACHSENDE STADT" (UNTEN) FÜR DEN AUSSCHNITT DES B-PAN-GEBIETS ERWEITERUNG FIZ (BLAUE UMRANDUNG).	116
ABBILDUNG 62: NUTZUNGSRASTER VON DER BESTANDSSITUATION (OBEN) UND DER PLANUNG, WIE SIE IM SZENARIO "WACHSENDE STADT" REALISIERT IST (UNTEN).	118
ABBILDUNG 63: LUFTTEMPERATUR UM 4 UHR NACHTS FÜR DAS PLANGEBIET „KIRSCHGÄRTEN“ FÜR DAS BESTANDSSZENARIO (OBEN) UND FÜR DAS SZENARIO „WACHSENDE STADT“ (UNTEN).	120
ABBILDUNG 64: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO SZENARIO (OBEN) UND IM SZENARIO „WACHSENDE STADT“ (UNTEN). DAS PLANGEBIET IST ROT MARKIERT.	122
ABBILDUNG 65: WÄRMEBELASTUNG AM TAG PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM STATUS QUO SZENARIO (OBEN) UND FÜR DAS SZENARIO „WACHSENDE STADT“ (UNTEN). DAS PLANGEBIET IST BLAU MARKIERT (VERKÜRZTE LEGENDE).	124
ABBILDUNG 66: EXEMPLARISCHES BEISPIEL FÜR EIN AUSGANGSRASTER (LINKS) BEISPIEL UND ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE (RECHTS) FÜR DIE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR UM 04:00 UHR NACHTS (T04).	127
ABBILDUNG 67: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE:(VDI 3785, BLATT 1, 2008)).	128
ABBILDUNG 68: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜN- UND FREIFLÄCHEN FÜR DEN WOHSIEDLUNGSRAUM IN DER NACHTSITUATION.	132
ABBILDUNG 69: LEGENDENSYMBOL DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.	133
ABBILDUNG 70: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM STATUS QUO FÜR EINEN AUSSCHNITT DES MÜNCHNER STADTGEBIETS.	136
ABBILDUNG 71: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM SZENARIO 2 (STARKER KLIMAWANDEL 2055) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES MÜNCHNER STADTGEBIETS.	137
ABBILDUNG 72: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM STATUS QUO SZENARIO FÜR EINEN AUSSCHNITT DES MÜNCHNER STADTGEBIETS. LEGENDE VERKÜRZT.	139
ABBILDUNG 73: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO 2 (STARKER KLIMAWANDEL (RCP 8.5) 2055) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES MÜNCHNER STADTGEBIETS. LEGENDE VERKÜRZT.	142
ABBILDUNG 74: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA IN EINEM AUSSCHNITT DER STADT MÜNCHEN (VERKÜRZTE LEGENDE).	143
ABBILDUNG 75: GEGENÜBERSTELLUNG DER NÄCHTLICHEN LUFTTEMPERATUR UM 04:00 AUS DEN ANALYSEN 2014 (LINKS) UND 2025 (RECHTS).	151
ABBILDUNG 76: GEGENÜBERSTELLUNG DES NÄCHTLICHEN KALTLUFTVOLUMENSTROMS AUS DEN ANALYSEN 2014 UND 2025.	152
ABBILDUNG 77: GEGENÜBERSTELLUNG DES NÄCHTLICHEN KALTLUFTVOLUMENSTROMS SOWIE DER KALTLUFTLEITBAHNEN AUS DEN ANALYSEN 2014 UND 2025.	153
ABBILDUNG 78: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB DES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	173



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN.....	29
TABELLE 2: BEWERTUNG DER STATISTISCHEN SIGNIFIKANZ ANHAND DES TREND-/RAUSCHVERHÄLTNISSES.....	36
TABELLE 3: MITTLERE LANGJÄHRIGE TEMPERATUR (IN °C) IN MÜNCHEN (P 0 / 100 = 0. / 100. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).....	44
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE MITTLERE ÄNDERUNG (ANZAHL PRO JAHR) THERMISCHER KENNTAGE IN MÜNCHEN (P 0 / 100 = 0. / 100. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).....	46
TABELLE 5: LANGJÄHRIGE JÄHRLICHE ÄNDERUNG DER MITTLEREN NIEDERSCHLAGSSUMME (IN MM/JAHR) IN MÜNCHEN (P 0 / 100 = 0. / 100. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).....	48
TABELLE 6: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN (ANZAHL TAGE PRO JAHR) SOWIE DES MAXIMALEN TAGESNIEDERSCHLAGS IN MÜNCHEN (P 0 / 100 = 0. / 100. PERZENTIL (MIN./MAX.), P 50 = MEDIAN).....	53
TABELLE 7: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5 M.....	58
TABELLE 8: MODELL-SZENARIEN ZUR ABBILDUNG DES MÜNCHNER STADTKLIMAS (2024 UND 2055) UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	67
TABELLE 9: VERGLEICH DER ANTEILE DER NUTZUNGSKLASSEN IM PLANGEBIET ZWISCHEN DEM NUTZRASTER STATUS QUO UND DEM SZENARIO „WACHSENDE STADT“.....	75
TABELLE 10: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.....	80
TABELLE 11: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT.....	81
TABELLE 12: ERGEBNISSE DER QUALITÄTSSICHERUNG.....	82
TABELLE 13: ÜBERSICHT DER NÄCHTLICHEN LUFTTEMPERATUR ZWISCHEN DEN SZENARIEN UND NUTZUNGEN.....	88
TABELLE 14: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (VDI 3787, BLATT 2, 2022).....	92
TABELLE 15: ÜBERSICHT DER PET-WERTE (STICHPROBEN) ZWISCHEN DEN SZENARIEN UND NUTZUNGEN.....	94
TABELLE 16: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.....	98
TABELLE 17: VERGLEICH KLIMAPARAMETER FÜR DIE SZENARIEN STATUS QUO UND GRÜNE STADT BEZOGEN AUF DIE STRAßENBEREICHE.....	104
TABELLE 18: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH TAGESZEIT UND STRUKTURTYP.....	130
TABELLE 19: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSPUNKT NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP.....	133
TABELLE 20: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM STATUS QUO UND DEN ZWEI ZUKUNFTSSZENARIEN (NACHT- UND TAGSITUATION).....	138
TABELLE 21: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSERFORDERNISSE UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.....	144
TABELLE 22: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZU DEN HANDLUNGSERFORDERNISSEN IM WIRKRAUM.....	145
TABELLE 23: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSERFORDERNISSE UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSPUNKTES.....	146



TABELLE 24: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZUM SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPRAUM.....	147
TABELLE 25: VERGLEICH ZWISCHEN DER STADTKLIMAANALYSE 2014 UND DER STADTKLIMAANALYSE 2025 HINSICHTLICH METHODEN, ERGEBNISSEN UND PRODUKTEN	150
TABELLE 26: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT MÜNCHEN	159



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 → *Wirkraum* 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 Wirkraum 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. Die autochthonen Wetterlage ist das Gegenstück zur → *allochthone Wetterlage*.

Belastungsraum: Kennzeichnet ein Gebiet, welches klimatisch ungünstige Bedingungen, wie hohe Temperaturen und/oder schlechte Durchlüftungsbedingungen aufweist. Demgegenüber steht der Ausgleichsraum (→ *Ausgleichsraum*) oder auch der Gunstraum (→ *Gunstraum*).

Bewertungskarte: Beurteilung der relativen Unterschiede der meteorologischen Parameter zwischen den Blockflächen zur Beschreibung der Belastungen, losgelöst von bestimmten Wetterlagen, für den Wirkraum (→ *Wirkräume*) und den Ausgleichsraum (→ *Ausgleichsraum*). Unterscheidung zwischen der Tag- und der Nachtsituation. Darstellung der humanbioklimatischen Situation im Wirkraum und der bioklimatischen Bedeutung für den Wohnsiedlungsraum in der Nacht, sowie die Aufenthaltsqualität in Wirk- und Ausgleichsraum an Sommergagen.

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.

Grundflächenzahl: Die Grundflächenzahl (GRZ) bezeichnet die maximal zulässige Gebäudegrundfläche pro Grundstücksfläche und wird als Dezimalzahl bis höchstens 1 (= vollständig überbaute Grundstücksfläche) angegeben.

Gunstraum: Kennzeichnet ein Gebiet, welches klimatisch günstige Bedingungen, wie angenehme Temperaturen an heißen Tagen und/oder in der Nacht sowie günstige Durchlüftungsbedingungen aufweist. Demgegenüber steht der Belastungsraum (→ *Belastungsraum*).

IPCC: Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) bezeichnet den zwischenstaatlichen Sachverständigenrat für Klimaänderungen („Weltklimarat“). Dieses wissenschaftliche Gremium sammelt und bewertet aktuelle Informationen der weltweiten Klimaforschung und präsentiert regelmäßige Stellungnahmen und Einschätzungen zu den Folgen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft, Wirtschaft sowie Lösungsansätze und Strategien als Reaktion. Unter der Federführung des IPCC wurden etwa die → *RCP-Szenarien* entwickelt.

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 - Entwurf, 2024).

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

Kaltluftleitbahn: Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (→ *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (→ *Wirkräume*) 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: beschreibt das Volumen an → *Kaltluft*, das über einer Fläche pro Stunde gebildet wird (Einheit $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$).



Kaltluftvolumenstrom: Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der $\rightarrow$ *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer $\rightarrow$ *Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und einer Höhe von bis zu 50 m (vertikale Ausdehnung) und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das $\rightarrow$ *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).

Klimaoase: Eine Klimaoase ist ein Gebiet, das durch besondere Maßnahmen oder natürliche Gegebenheiten eine kühlere und angenehmere Mikroklima bietet, insbesondere in städtischen Umgebungen. Diese Oasen entstehen häufig durch die gezielte Schaffung oder Erhaltung von Grünflächen wie Parks, Gärten und Bäumen, die Schatten spenden und durch Verdunstungskälte zur Abkühlung der Umgebung beitragen.

Physiologisch Äquivalente Temperatur: Die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) ist ein humanbioklimatischer Index zur Kennzeichnung der Wärmebelastung des Menschen, der Aussagen zur Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombiniert und aus einem Wärmehaushaltsmodell für den menschlichen Organismus abgeleitet wird.

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

RCP-Szenarien (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 ($\rightarrow$ *IPCC*) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES (Special Report on Emission Scenarios)-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 (Einheit W/m^2) bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

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



Strahlungsantrieb (engl. "radiative forcing"): Die Änderung der Nettostrahlung (Differenz aus Ein- und Ausstrahlung, Einheit W/m^2) an der Oberseite der Atmosphäre aufgrund der Änderungen eines Klimawandeltreibers (z.B. Änderung der CO_2 -Konzentration oder der von der Sonne abgegebenen Energie).

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*.

Umbaute Park- und Flurwindssysteme: Diese Windsysteme prägen sich dort aus, wo Grünflächen (Parkflächen, Landwirtschaftliche Flächen, Freiflächen) von warmen Strukturen (bspw. Gebäuden) umgeben sind und es somit zu thermisch bedingten kleinräumigen Ausgleichsströmungen (Flurwinden) hin zu den wärmeren Bereichen kommt.

Ventilationsbahn: Leitbahn, die während austauschstärkerer Wetterbedingungen den Gradientwind aufnimmt und zur Be- und Entlüftung des Wirkungsraumes beiträgt.

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

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



Zusammenfassung

Mit der in diesem Bericht dokumentierten Klimaanalyse liegt eine aktualisierte, hochaufgelöste Analyse des Münchner 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 sowie für zwei weitere städtebaulich- und grünplanerisch-modifizierte Szenarien.

Das Szenario Baustein „Grüne Stadt“, welches eine Zielwerterreichung der Kronenüberschirmung stadtwert in den Straßenbereichen und öffentlichen Plätzen von mindestens 30 % berücksichtigt, zeigt sehr eindrucksvoll die positiven thermischen Effekte, welche damit einhergehen. Die größten Effekte zeigen sich am Tage. Hier kann die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), durch die Etablierung von verschattungswirksamen Bäumen um bis zu 14 K reduziert werden. Schlussendlich zeigen die Ergebnisse der Analyse, dass eine sinnvolle Planung von Baumpflanzungen sehr große Wirkung auf die thermischen Bedingungen haben kann und diese somit weiterhin überall dort, wo sie umsetzbar ist im Stadtgebiet zu erfolgen hat.

Städtebauliche Entwicklungen im Stadtgebiet sind unerlässlich, ebenso wie Verkehrs- und Infrastrukturprojekte. Mit den meisten Projekten geht eine Änderung der Landnutzung einher, welche Auswirkungen auf die klimaökologische Situation auf dem Planungsgebiet und auf das unmittelbare Umfeld hat. Eine klimaökologische Begleitung solcher Vorhaben ist wichtig, um mikro- und lokalklimatischen Auswirkungen möglichst gering zu halten bzw. für eine Verbesserung der klimatischen Situation zu sorgen. Das Szenario Baustein „Wachsende Stadt“ hat solche Nutzungsänderungen berücksichtigt und zeigt die lokalklimatischen Auswirkungen, die sich hieraus ergeben.

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess, bestehend aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (s. Abbildung 10 in Kap. 3). Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase (Stufen I und II) handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene, ausgehend von den szenarienbasierten Modellierungen. Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie die Klimaanalysekarten, welche das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte abbilden. In der Phase der planerischen Bewertung (Stufe III) erfolgt eine Beurteilung dieser Prozesse. Als Zwischenprodukte, auf dem Weg zur abschließenden Planungshinweiskarte, werden hier jeweils pro Szenario eine Bewertungskarte für die Tagsituation und eine für die Nachtsituation erstellt. Das Hauptprodukt des Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte. Das Kartenwerk der Planungshinweiskarte macht zum einen die abgestufte Handlungsnotwendigkeit zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) der Münchener 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. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die sich abschließend ergebende Planungshinweiskarte



stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar und berücksichtigt explizit Projektionen zum Klimawandel.

Primäres Anwendungsfeld der Stadtklimaanalyse 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.

Die Planungshinweiskarte gibt die stadtklimatischen Handlungserfordernisse von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern aufgrund ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Weiterhin zeigt die Planungshinweiskarte die Handlungserfordernisse in den Siedlungsbereichen auf, um hier die (mikro-) klimatischen Bedingungen zu optimieren.

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, die Flächennutzungs- und Landschaftsplanung, die Ausweisung von naturschutzrelevanten Gebieten 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 Münchner 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.



1. Hintergrund und Anlass

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte „Fortschreibung Stadtklimaanalyse 2025 – Landeshauptstadt München“ stellt die Fortschreibung der vorangegangenen gesamtstädtischen Klimaanalyse von GEO-NET Umweltconsulting GmbH aus dem Jahr 2014 nach heutigem Stand der Technik dar. Dieser Bericht ist im Zuge der Fortschreibung der Stadtklimaanalyse 2025 (vormals als Klimafunktionskarte bezeichnet) erstellt worden. Die Fortschreibung der Stadtklimaanalyse ist eine von 30 Maßnahmen aus dem Münchner Klimaanpassungskonzept (Sitzungsvorlage Nr. 20-26/V 07027). Die Notwendigkeit einer Aktualisierung hat neben dem Alter der letztmaligen Analyse folgende politische, planerische, fachliche und rechtliche Gründe:

- Mit den Klima-Novellen des Baugesetzbuches (BauGB) im Jahr 2011 sowie des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) im Jahr 2017 haben sich die für die Stadtklimatologie relevanten Rechtsnormen verschärft. Noch deutlicher als zuvor rückten stadtklimatische Fragen mit Blick auf das Schutzgut der menschlichen Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse in den Fokus. Im Rahmen der Bauleitplanung ist es von entscheidender Bedeutung, Prognosen zum Klimawandel systematisch zu berücksichtigen. Gemäß § 1 Abs. 5 BauGB sind die Belange des Umweltschutzes und der nachhaltigen Entwicklung zu berücksichtigen sowie den Klimaschutz und die Klimaanpassung zu fördern. Dies schließt die Berücksichtigung von Klimawandel-Prognosen in die Abwägung ein, um zukunftsfähige und resiliente Siedlungsstrukturen zu schaffen. Eine vorausschauende Planung, die klimatische Veränderungen antizipiert, ermöglicht es, geeignete Maßnahmen zu ergreifen.
- Auch die für Stadtklimaanalysen maßgebliche VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ ist heutzutage ein umweltmeteorologischer Standard, der zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert wurde (VDI 3787, Blatt 1, 2015). Diese gesellschaftlichen ebenso wie die technischen Entwicklungen haben sich in den letzten fünf Jahren fortgesetzt, und entsprechend sind die Ansprüche an die inhaltliche Aussagetiefe und räumliche Aussagegenauigkeit der benötigten Analysen noch einmal deutlich gestiegen.
- Die Landeshauptstadt München ist eine dynamisch wachsende Stadt. Die heutige Stadtstruktur unterscheidet sich aus klimaökologischer Sicht wesentlich von der Grundlage der Klimaanalyse von 2014.
- Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute entsprechende Instrumente zur Verfügung, die einen hohen Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen ermöglichen. Die Modelle sind dabei in der Lage, die meteorologisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen Wärmeineffekt in den besiedelten Wirkungsräumen und (planerisch beeinflussbaren) kühlenden Kaltluftabflüssen und Flurwinden aus dem Ausgleichsraum für bestimmte thermisch belastende Wetterlagen umfassend abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, szenarienbasierte Ansätze (z.B. zur summarischen Wirkung von Stadtentwicklungsvorhaben und/oder Anpassungsmaßnahmen) zu untersuchen und zu bewerten.
- Die Klimafolgenanpassung (hier die Hitzevorsorge und die Bedeutung von Kaltluft) ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. Am 1. Juli 2024 ist das bundesweite Klimaanpassungsgesetz in Kraft getreten, wodurch Deutschland erstmals einen verbindlichen Rechtsrahmen für die Klimaanpassung in Bund, Ländern und Kommunen erhält. Folglich werden erstmals Grundlagen zur Vorsorge gegen die Folgen des Klimawandels gesetzlich verankert.
- Die derzeitige Grundlage für die langfristige räumliche Stadtentwicklung in München stellt der Flächennutzungsplan dar. Die vorliegende Klimaanalyse berücksichtigt die aktuellen, rechtskräftigen



Bebauungspläne in dem Szenarienbaustein „Wachsende Stadt“ und lässt eine erste klimaökologische Einordnung der geplanten Baumaßnahmen zu.

Aus diesen Rahmenbedingungen konnten für die vorliegende Klimaanalyse, welche eine Maßnahme aus dem Klimaanpassungskonzept der Landeshauptstadt München ist, klimaanpassungsrelevante Aspekte wie Hitze und der Umgang mit thermischem Komfort detailliert und räumlich konkret abgeleitet werden. In der Umsetzung bedeutet dies eine computermodellgestützte analytische Fokussierung auf den städtischen Kaltlufthaushalt und die kleinräumige sommerliche thermische Belastungssituation der Stadtbevölkerung sowohl am Tag als auch in der Nacht. Primäres Anwendungsfeld der **Analyseergebnisse** und **insbesondere der Planungshinweiskarte** soll weiterhin die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Darüber hinaus bildet die Stadtklimaanalyse eine wichtige Grundlage für den integrierten Quartiersansatz. Sie ist gleichzeitig eine fundierte und aktuelle Grundlage für die in Planungsprozessen ggf. erforderlichen kleinräumigen Klimamodellierungen. Die Stadtklimaanalyse bildet zudem die wesentliche Grundlage für das Handlungsfeld Klimaanpassung des Stadtentwicklungsplans STEP. Die Handlungsfeldkarte Klimaanpassung wird auf Basis der fortgeschriebenen Stadtklimaanalyse aktualisiert werden. Somit wird die Stadtklimaanalyse weiterhin in der strategischen räumlichen Entwicklungsplanung verankert, wodurch eine integrierte Betrachtung auf gesamtstädtischem Maßstab ermöglicht wird. Zur Konkretisierung der Planungshinweiskarte wurden 21 mögliche klimaökologisch wirksame Einzelmaßnahmen zwecks Verbesserung des Stadtklimas identifiziert und in einem Katalog (s. Kap.7.6) gelistet. Darüber hinaus sollen die übergeordneten Ziele und Visionen für ein Klimaresilientes München 2050 (Sitzungsvorlage Nr. 20-26 / V 15584) konsequent auf allen Planungsebenen (Gesamtstadt, Quartier, Bauleitplanung) umgesetzt werden.

2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kapitel 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kapitel 4) über stadtklimatisch relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kapitel 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 subsummieren:

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

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

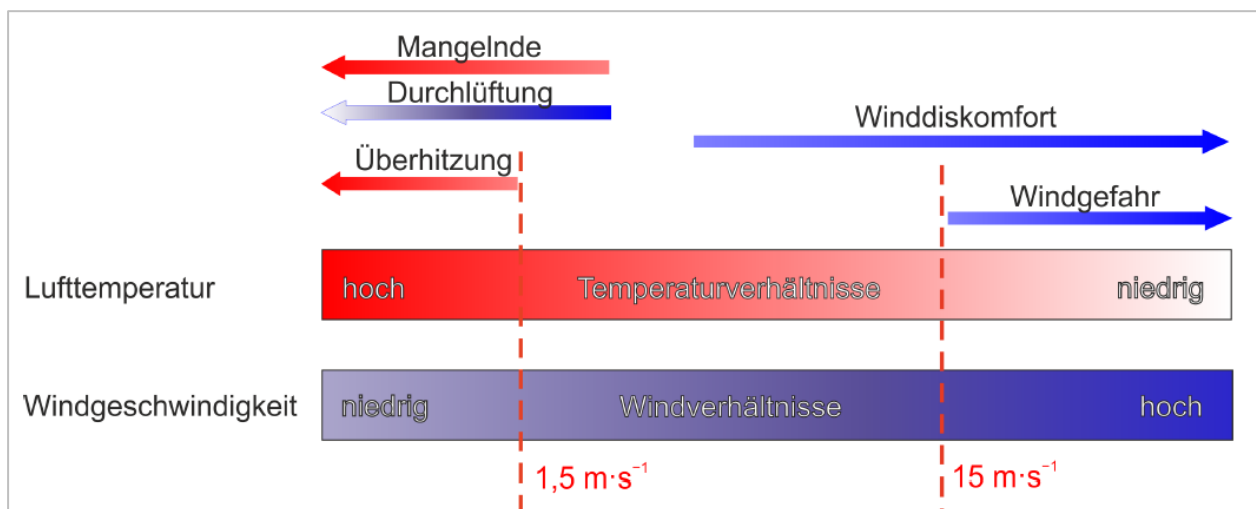


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Blatt 4, 2020).

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

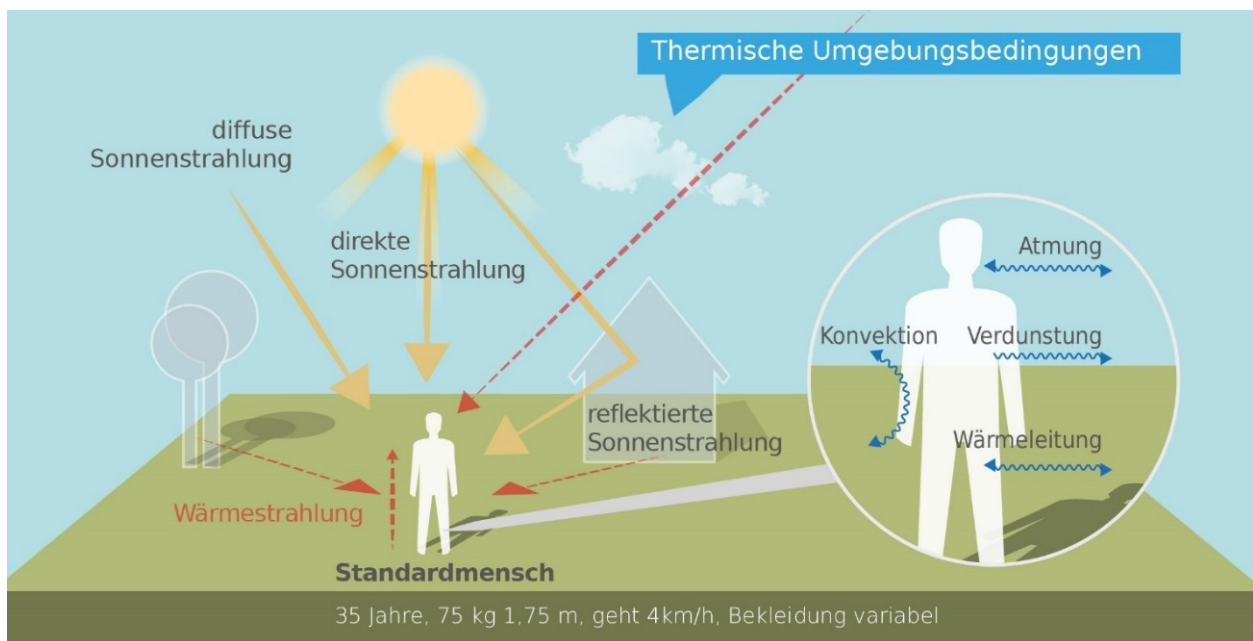


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD, 2024c)

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). Die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV, 2004) fordert daher für Arbeitsräume gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal 26 °C in Arbeits- und Sozialräumen. Hintergrund ist die in §4 der 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.

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). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-18 °C, je nach individuellem Behaglichkeitsempfinden können diese Werte auch höher liegen und bis 20 °C reichen (UBA, 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Münchner: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).

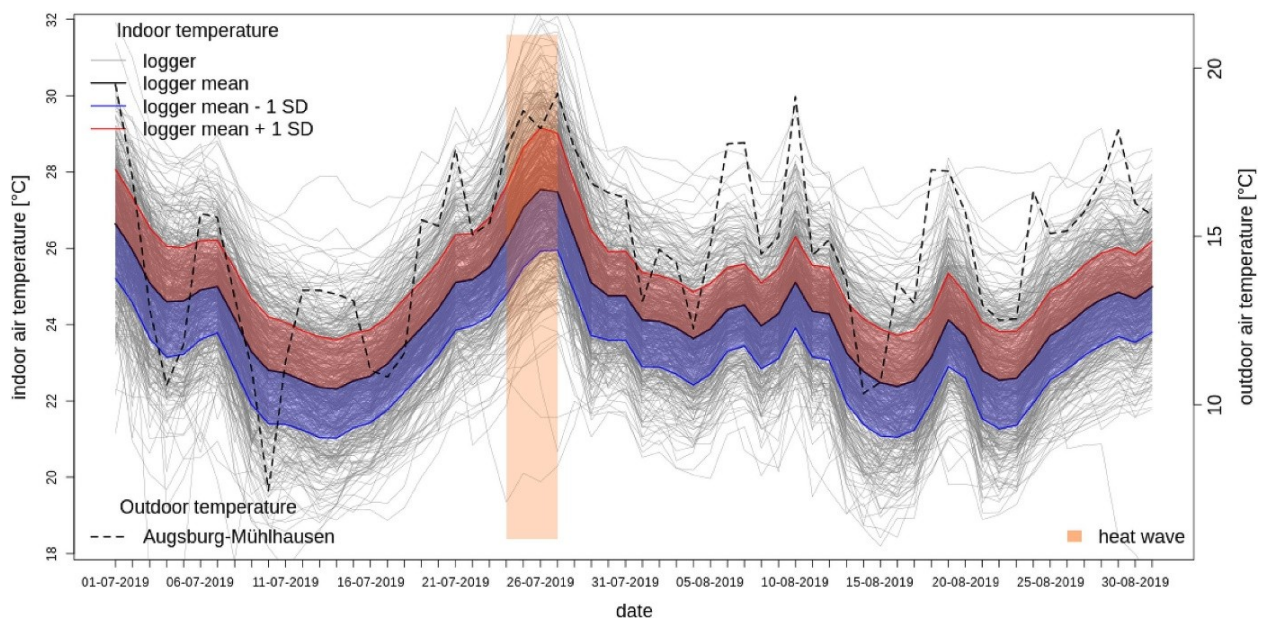


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann et al., 2021).

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 7243:2017 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; VDI 3787, Blatt 4, 2020).

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 Jahren (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). Eine weitere Untersuchung (Sandholz & Sett, 2019) kommt auf Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt und Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

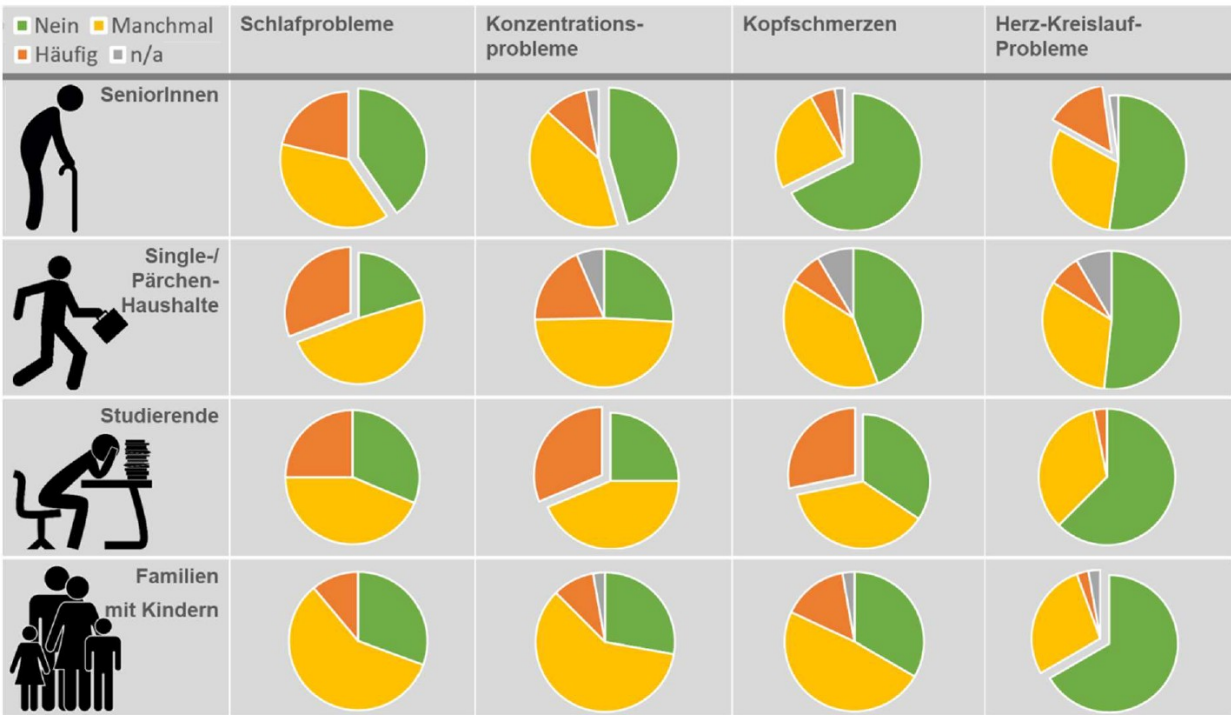


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz & Sett, 2019)

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75–84 und vor allem 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kam. 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 °C Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche bis zu über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA, 2024a).

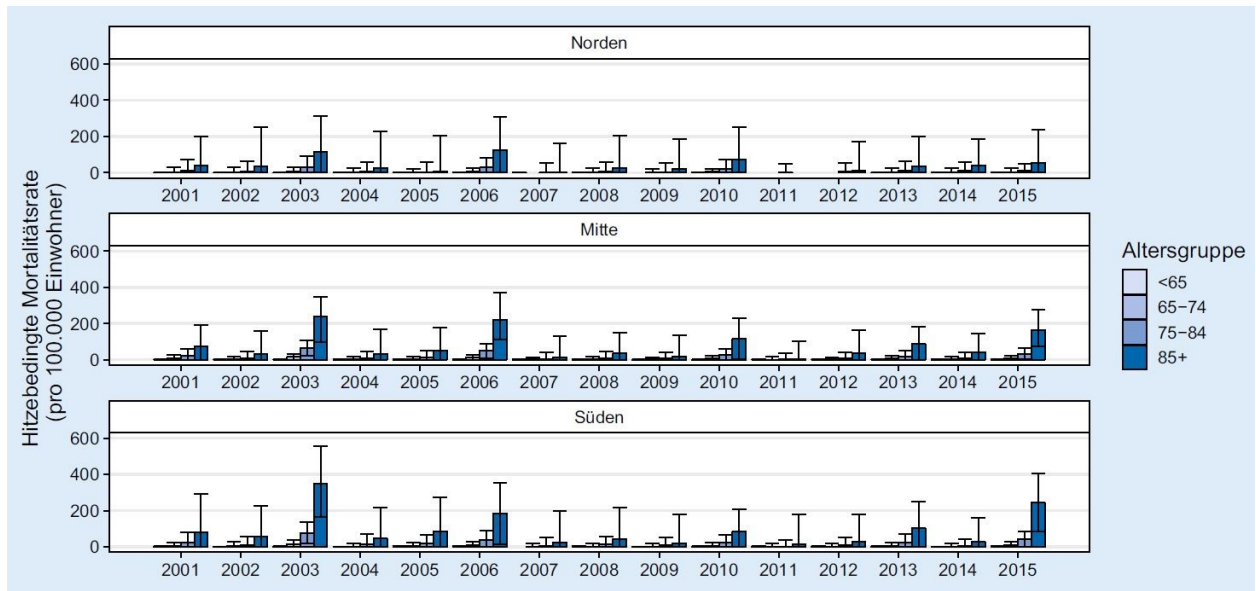


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An Der Heiden et al., 2019).

2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (Gross, 2021a). Auch die VDI Richtlinie 3787, Blatt 5 benennt die Umgebungsluft als eine der zentralen Auswertungsgrößen, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen (VDI 3787, Blatt 5 - Entwurf, 2024). Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet.

Grün- und Freiflächen produzieren unterschiedlich viel Kaltluft durch die Wärmeausstrahlung in der Nacht. Sandige/offene Bodenflächen sowie Rasen-/Wiesenflächen erweisen sich in der Nacht als besonders kaltluftproduktiv. Beim Wald entsteht die Kaltluft über dem Kronendach und sinkt dann aufgrund der Schwere in den Stammraum ein. Die landnutzungstypischen Temperaturunterschiede beginnen sich schon kurz nach Sonnenuntergang herauszubilden und können die ganze Nacht über andauern.

In Abbildung 6 sind die unterschiedlichen Prozesse des Fließens der Kaltluft dargestellt. Hier 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 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 (DWD, 2024e). 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 (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, Wärmeabgabe in der Nacht durch hohe Wärmespeicherkapazität der Baustoffe) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmeffluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft



aus stadtnahen und innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-) Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 m/s sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodisch 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 stärkere 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.

Für die LH München sind in den 80er Jahren umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und veröffentlicht worden. Vor allem BRÜNDL et al. (1987) haben umfangreich den Einfluss von Bebauung und Bewuchs auf das Klima sowie die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten untersucht. Hervorzuheben ist das Forschungsvorhaben STADTKLIMA BAYERN mit den Teilprogrammen Thermalkartierung und Klimamessungen in München.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens STADTLUFT lag der Schwerpunkt auf den stadtklimarelevanten Luftströmungen in München (Teil II; MAYER und MATZARAKIS 1992). Betrachtet wurden dabei sowohl die austauschstärkeren als auch die windschwachen Wetterlagen. Als Ergebnis wurden u.a. die stadtklimatisch wirksamen Frischluftschneisen, Durchlüftungsachsen sowie kleinräumige Austauschzirkulationen ausgewiesen. Diese Bereiche wurden in die vorangegangene Stadtklimaanalyse 2014 (GEO-NET 2014) nachrichtlich in die Klimafunktions- und Bewertungskarte übernommen und ergänzen die auf Grundlage des modellierten Kaltluftströmungsfeldes abgeleiteten Kaltluftleitbahnen. Auch in der vorliegenden Stadtklimaanalyse wurden die „übergeordneten Ventilationsbahnen“ aus der oben genannten Studie in die Planungshinweiskarte übernommen (s. Kap. 7.4 und Kap. 7.5.3). In der vorangegangenen Stadtklimaanalyse wurden Kaltluftleitbahnen basierend auf den damaligen Simulationsergebnissen ausgewiesen. Hierbei kamen damals die folgenden Kriterien zum Einsatz:

- Stadtstrukturtyp mit geringer Überbauung (Gewässer, Grün- bzw. Gleisfläche)
- Ausgeprägtes Einströmen des modellierten Windfeldes über diese Struktur in die Siedlungsfläche
- Eine der Maßstabsebene angemessene Breite von mind. 100 m

Im Rahmen der damaligen Klimaanalyse wurden insgesamt 15 Leitbahnen ausgewiesen. Auch in der vorliegenden Studie wurden, basierend auf den Ausweisungen von 2014 Kaltluftleitbahnen und zusätzlich umlaufende Park- oder Flurwindssysteme ausgewiesen. Detaillierte Erläuterungen hierzu sind in Kapitel 6.2 zu finden und ein Vergleich zwischen den Ausweisungen von 2014 und von der aktuellen Studie finden sich in Kapitel 7.5.2.



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

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

Die in den vorherigen Kapiteln geschilderten Zusammenhänge und Prozesse zum Thermischen Komfort und Kaltlufthaushalt werden als Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse in raumspezifischen Analysen untersucht. Die Analysen sind im Grundsatz seit den frühen 1990er Jahren Stand der Technik. Die 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, Stadt-sanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- (VDI 3785, Blatt 1, 2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- (VDI 3787, Blatt 1, 2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- (VDI 3787, Blatt 2, 2022): Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas
- (VDI 3787, Blatt 5, 2003): Lokale Kaltluft (derzeit in Fortschreibung)
- (VDI 3787, Blatt 5 - Entwurf, 2024): Lokale Kaltluft
- (VDI 3787, Blatt 8, 2020): Stadtentwicklung im Klimawandel
- (VDI 3787, Blatt 9, 2004): Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. (VDI 3787, Blatt 5 - Entwurf, 2024)) bzw. in Zusammenlegung (VDI 3781, Bl.1, Bl.2 und Bl.9 mit VDI 3785, Bl.1). Folglich befindet sich der Stand der Technik in einem stetigen Wandel. Tendenziell ist zudem zu beobachten, dass teilweise mehrere Jahre

vergehen, bis neue methodische Paradigmen und technische Möglichkeiten in die Richtlinien Einzug gehalten haben.

Gemäß VDI 3787 Bl. 1 entsteht als erstes wichtiges Zwischenprodukt einer Stadtklimaanalyse die Klimaanalysekarte (KAK). Sie hat die Aufgabe, „...die räumlichen Klimateigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Analyseergebnisse für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern Überwärmung, Kaltluftentstehung und Kaltluftfluss (Abbildung 7).

Klimateigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck	Klimateigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Klimatepe			Luftaustausch		
Gewässer-, Seenklima		0/127/255 dunkelblau	Luftleitbahn, unbelastet		43/75/155 blau
Freilandklima		190/232/255 hellblau	Luftleitbahn, klimatisch und/oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Waldklima		115/178/115 dunkelgrün	Kaltluftabfluss, unbelastet		43/75/155 blau
Klima innerstädtischer Grünflächen		174/241/176 hellgrün	Kaltluftabfluss, lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Vorstadtklima		255/255/225 hellgelb	Talabwind, unbelastet		18/79/158 blau
Stadttrandklima		254/220/0 hellorange	Talabwind, klimatisch und/ oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Stadtklima		255/165/0 orange	Hindernis für den Kalt- luftabfluss (Barriere)		34/74/126 blau
Innenstadtklima		255/127/127 hellrot	Kaltlufteinzugsgebiet		43/75/155 hellblau
Gewerbe-, Industrieklima		210/210/210 hellgrau			

Abbildung 7: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Klimaanalysekarte gemäß VDI 3787 Bl.1 (VDI 2015)

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 eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehört demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen.

Dies erfolgt im Rahmen der Erstellung einer Planungshinweiskarte (PHK) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse. Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte 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 also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die Menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse (Abbildung 8). Seit der letzten Überarbeitung der Richtlinie sollen bei der Bewertung auch die Themen Klimawandel und Umweltgerechtigkeit Berücksichtigung finden. Auf weitergehende methodische Hinweise verzichtet die Richtlinie jedoch. Somit erfolgt die Erstellung der Planungshinweiskarte auch weiterhin im Spannungsfeld zwischen fachgutachterlichen Empfehlungen, planerischen Zielsetzungen und politischer Willensbildung. Auf dem Weg zur Erstellung der Planungshinweiskarte, wurden im vorliegenden Projekt, in einem wichtigen Zwischenschritt zunächst Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation und nach Modellszenario getrennt erstellt. Schlussendlich wurden diese in der abschließenden Planungshinweiskarte mit einer kombinierten Bewertungsmatrix wieder vereint.

Planungshinweise	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Grün- und Freiflächen		
Ausgleichsraum hoher Bedeutung		115/178/115 dunkelgrün
Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung		174/241/176 grün
Ausgleichsraum geringer Bedeutung		211/255/190 hellgrün
Siedlungsflächen		
Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klimarelevanter Funktion		255/255/225 gelb
Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion		246/197/103 orange
Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion		255/127/127 rot
Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen		138/43/226 violett
Raumspezifische Hinweise		
Begrünung im Stadt- und in Wohngebieten		15/95/44 dunkelgrün
Hauptverkehrsstraße mit Potenzial für hohe bis extreme Schadstoffbelastungen, DTV > 10000		255/0/0 rot

Abbildung 8: Auswahl möglicher Legendenpunkte einer Planungshinweiskarte gemäß (VDI 3787, Blatt 1, 2015).

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten weitere Normen neben die VDI-Richtlinien, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System¹, das für Quartiere, Gebäude und Innenräume u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtlima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert. Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z.T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

Stadtlimaanalysen 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“ (M1), des „Klimatopansatzes“ (M2, bis-

¹ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Online: <https://www.dgnb-system.de>)

weilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (M3) (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 Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	- Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet - Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen	- Klimaeigenschaften der Flächen - Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume - Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft	- Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) - Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	- Kleine und mittlere Kommunen - Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen - Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten.	- 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.	- 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	- Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse oder andere - Bebauungsstruktur/-typ - Flächennutzung	- 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	- 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?	Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich	- Klimatope - Klimaanalysekarte	- 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).

Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

Wie aus der Zusammenstellung bzw. dem zugehörigen Leitfaden der HLNUG hervorgeht, weisen alle Analysemethoden individuelle Stärken und Schwächen auf, wobei die numerische Stadtklimamodellierung (M3) als qualitativ hochwertigste Methode gilt. Numerische Modellierungen weisen gegenüber anderen Analysenverfahren 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 „post processing“ 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.

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 Atmosphärenmodelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch dem Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu wel-



chem 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.

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

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D (Gross, 1992)	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM (Lohmeyer & Schändler, 1998)	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21 (Sievers, 2005)	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3 (DWD, 2014)	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U (Maronga et al., 2020)	3	1 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder

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, grob-skaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

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 Januar 2024 und Dezember 2025. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase (Stufen I und II) handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin im Referat Klima- und Umweltschutz sowie zu speziellen Einzelthemen zusätzlich mit weiteren Fachstellen innerhalb der Stadtverwaltung gelöst.

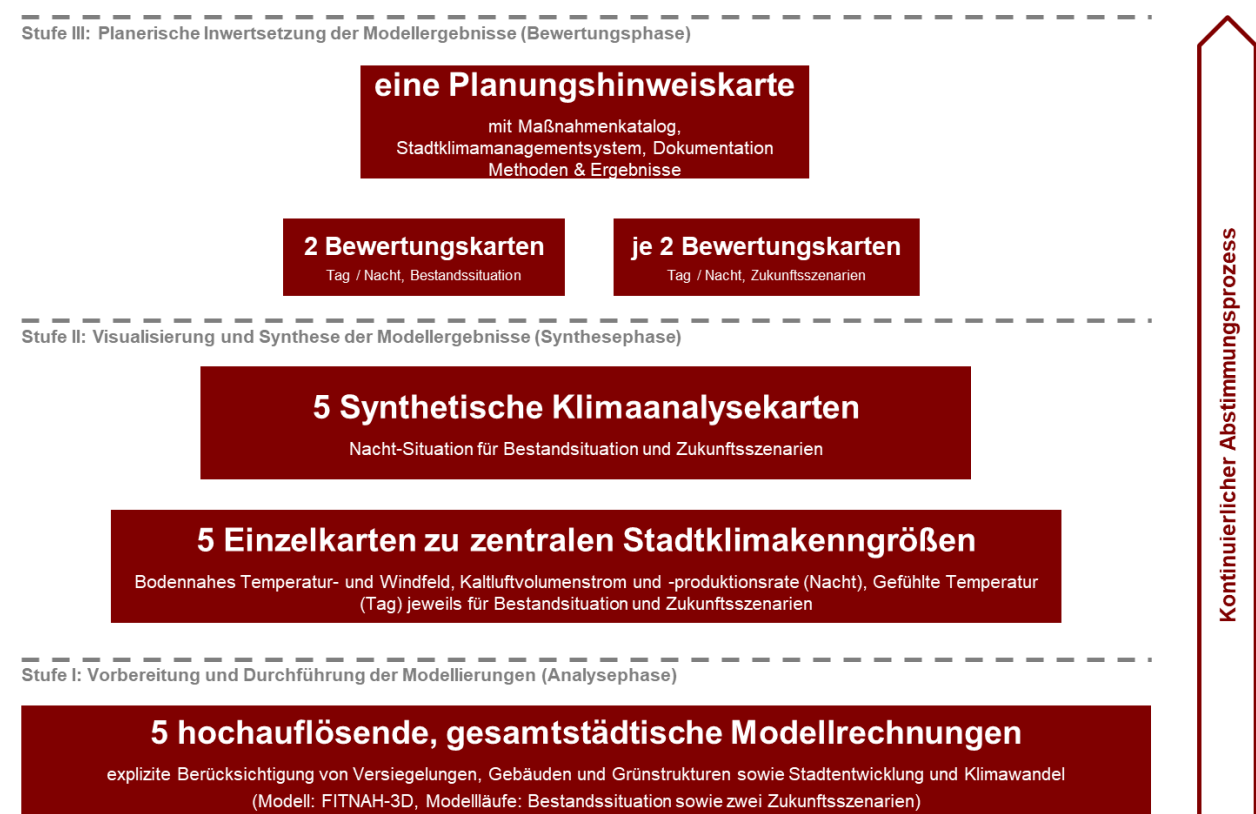


Abbildung 10: Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

In der Phase der planerischen Bewertung (**Stufe III**) 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, S. 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (Fürst & 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 (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 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 Institutionen waren regelmäßiges Mitglied der PAG:

- Referat für Klima- und Umweltschutz (RKU), Geschäftsbereich Umweltvorsorge
Sachgebiet Stadtklima, Grundwasser und Klimaanpassung

Darüber hinaus waren zeitweise und/oder in den Workshops folgende Fachstellen der Landeshauptstadt München beteiligt:

- Baureferat (BAU-G, BAU-J, BAU-T)
- Kommunalreferat, Geodatenservice (KR-GSM))
- Mobilitätsreferat (MOR-GB1)
- Referat für Stadtplanung und Bauordnung (PLAN-HAI, PLAN-HAII)
- Referat für Klima- und Umweltschutz (RKU-I-2, RKU-III-1)

*Die **drei Workshops** fanden referatsübergreifend zu folgenden Terminen mit folgenden Inhalten statt:*

- 22.04.2024: Workshop 1: Szenarienentwicklung – Fortschreibung der Stadtklimaanalyse München
- 04.07.2024: Workshop 2: Finalisierung der Bausteine- Fortschreibung der Stadtklimaanalyse München
- 17.07.2025: Workshop 3: Planungshinweiskarte (Ergebnisvorstellung, Methodik und Diskussion)

Durch die drei Workshops und zahlreiche bilaterale Abstimmungen konnte sichergestellt werden, dass alle Wünsche und Anforderungen nach Möglichkeit frühzeitig berücksichtigt und die Bearbeitung transparent gestaltet werden konnte.



4. Klima und Klimawandel im Raum München

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in München basiert auf interpolierten Stationsdaten („grid germany annual“) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (Kaspar et al., 2013, 2017). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlags-summe). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kenntagen sowie Niederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Münchens wurden die entsprechenden Punkte aus dem regelmäßigen 1 x 1 km-Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können. Unterstützend wurden Daten von einzelnen Messstationen im Umfeld von München ausgewertet.

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

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. *EURO-CORDEX* ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften *IPCC Assessment Reports (AR5)* und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al., 2009). Im Projekt ReKliEs-De wurden insgesamt 28 regionale Klimaprojektionen berechnet, 12 davon mit dynamischen regionalen Klimamodellen (RCMs) für ganz Europa, die restlichen 16 mit statistischen regionalen Klimamodellen (ESDs) nur für Deutschland und die nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebiete (Hübener et al., 2017). Alle Regionalmodelldaten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar. Vom Deutschen Wetterdienst wurden die Regionalmodelldaten biaskorrigiert und mittels geostatistischer Methoden wurde die räumliche Auflösung von ca. 12,5 km auf 5 km erhöht.

Mit numerischen Klimamodellen kann das zukünftige Klima unter der Annahme verschiedener Emissions-szenarien 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 sowie 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.

Um die regionalen Gegebenheiten in Bayern bestmöglich widerzuspiegeln, hat das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) zusammen mit der Fakultät für Geowissenschaften der Ludwig - Maximilians - Universität München das sogenannte „Bayerische Klimaprojektionsaudit“ entwickelt. Dieses „Bayern-Ensemble“ stellt die Grundlage für die Berechnung der meteorologischen Parameter und Kenntage dar (LfU 2020).

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.

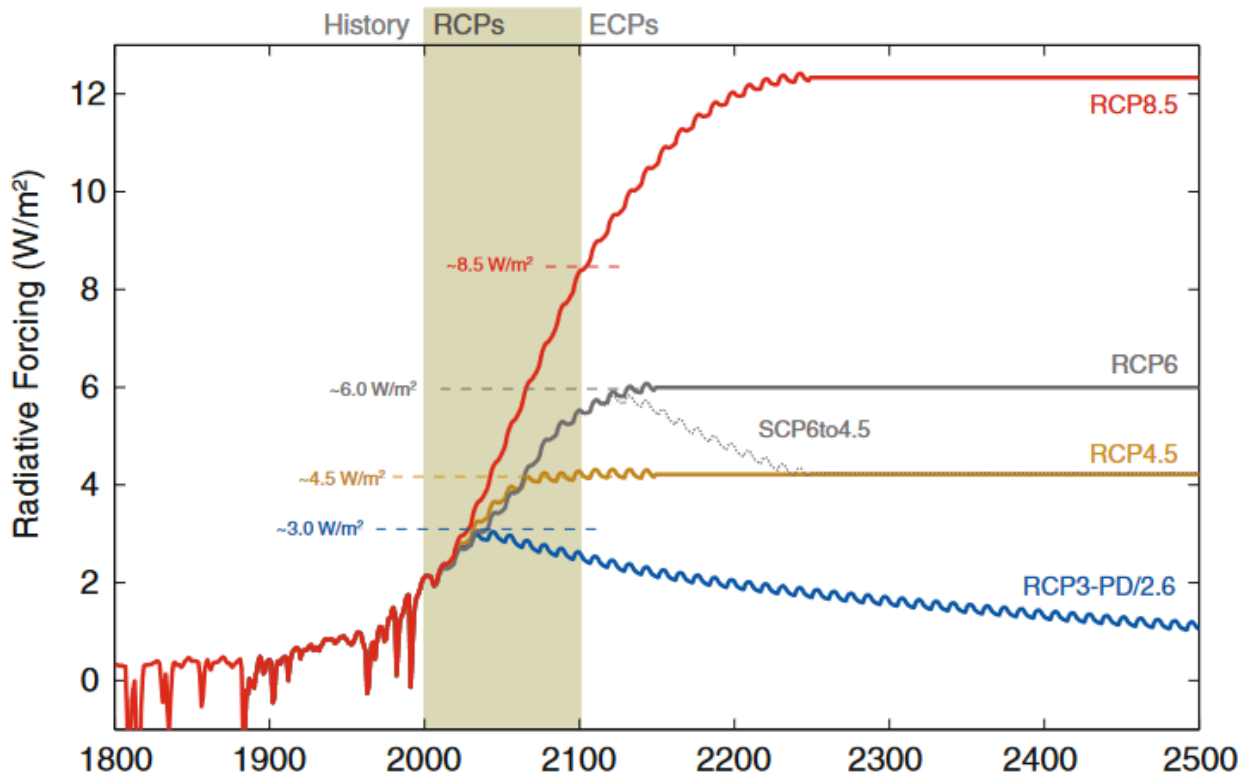


Abbildung 11: Strahlungsantrieb der verschiedenen *Representative Concentration Pathways* (RCP²) und ihre Entwicklung bis 2100 (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6) (Quelle: (Meinshausen et al., 2011).

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. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien (SSP = Shared Socioeconomic Pathways) abgelöst, die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (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, SCP = Supplementary Extensions, sind angepasste Szenarien, basierend auf den ECP

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 (Moss et al., 2010) ; Abbildung 11):

- Das ***RCP*-Szenario 2.6** beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 W/m^2 . Bis zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf $2,6 \text{ W/m}^2$ ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2°C -Ziel nicht überschreiten, sodass *RCP* 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- Das ***RCP*-Szenario 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. Die Zunahme der globalen Mitteltemperatur liegt bei ca. 3°C
- Das ***RCP*-Szenario 8.5** weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4°C gegenüber dem Zeitraum 1986 – 2005 bewirken würde (IPCC, 2013).

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

Eine etablierte Methode zur **Beschreibung von klimatischen Änderungen** ist die Verwendung von Kenntagen. Diese können sowohl auf Basis von Messdaten als auch von projizierten meteorologischen Daten (*RCP*-Szenarien) erstellt werden. Damit ist ein Vergleich der aktuellen klimatischen Situation mit der zukünftig zu erwartenden möglich. Zu den Kenntagen gehören z.B. die Anzahl von Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (oftmals jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$ für Sommertage (schwellenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; (Hübener et al., 2017)). Für die Betrachtung des zukünftigen Klimawandels in München wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

Die verwendeten Daten wurden im Zuge der Regionalisierung einer Bias-Adjustierung⁴ 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 die Referenzperiode in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftsperioden. 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.

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

⁴ Bias-Adjustierung ist ein Korrekturverfahren, bei dem bspw. die Modelldaten mit einem Faktor, der aus dem Versatz zwischen Modell- und Beobachtungsdaten ermittelt wird, zu den Beobachtungswerten hin korrigiert werden, um eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen Modell- und Beobachtungsdaten zu erhalten (Haller et al., 2021; Krähenmann et al., 2021).



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

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

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die *World Meteorological Organisation (WMO)* empfiehlt die Verwendung der sogenannten 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 Zukunftsperioden noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt. Die Referenzperiode 1971 – 2000 wird auch in der aktuellen bundesweiten Klimawirkungs- und Risikoanalyse verwendet (Kahlenborn et al., 2021). In Bezug auf die Klimawandelfolgen betrachtet die Klimawirkungs- und Risikoanalyse zwei Zukunftsperioden in der Mitte und zu Ende des Jahrhunderts, die hier übernommen wurden.

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 (Zeithorizont 2045): 2031 – 2060
- 2. Zukunftsperiode (Zeithorizont 2055): 2041 – 2070
- 3. Zukunftsperiode (Zeithorizont 2085): 2071 – 2100

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. (Linke et al., 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).

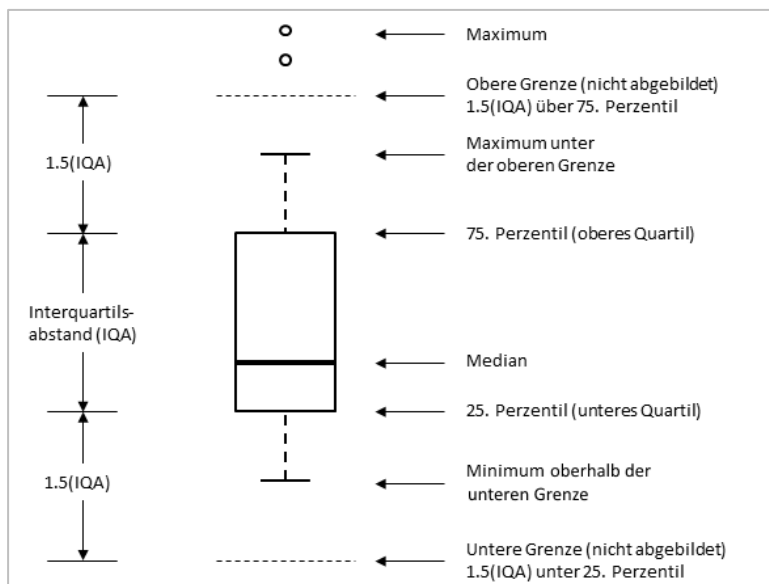


Abbildung 12: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.



4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

München ist gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,5 °C (DWD, 2024b) und eine mittlere Niederschlagssumme von 969 mm/Jahr (DWD, 2024b), wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Monaten Juni, Juli und August auftreten (Abbildung 13).

Damit ist die Stadt leicht wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C (UBA, 2024b). Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge mit 969 mm/Jahr liegt sehr deutlich über dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (UBA, 2024b).

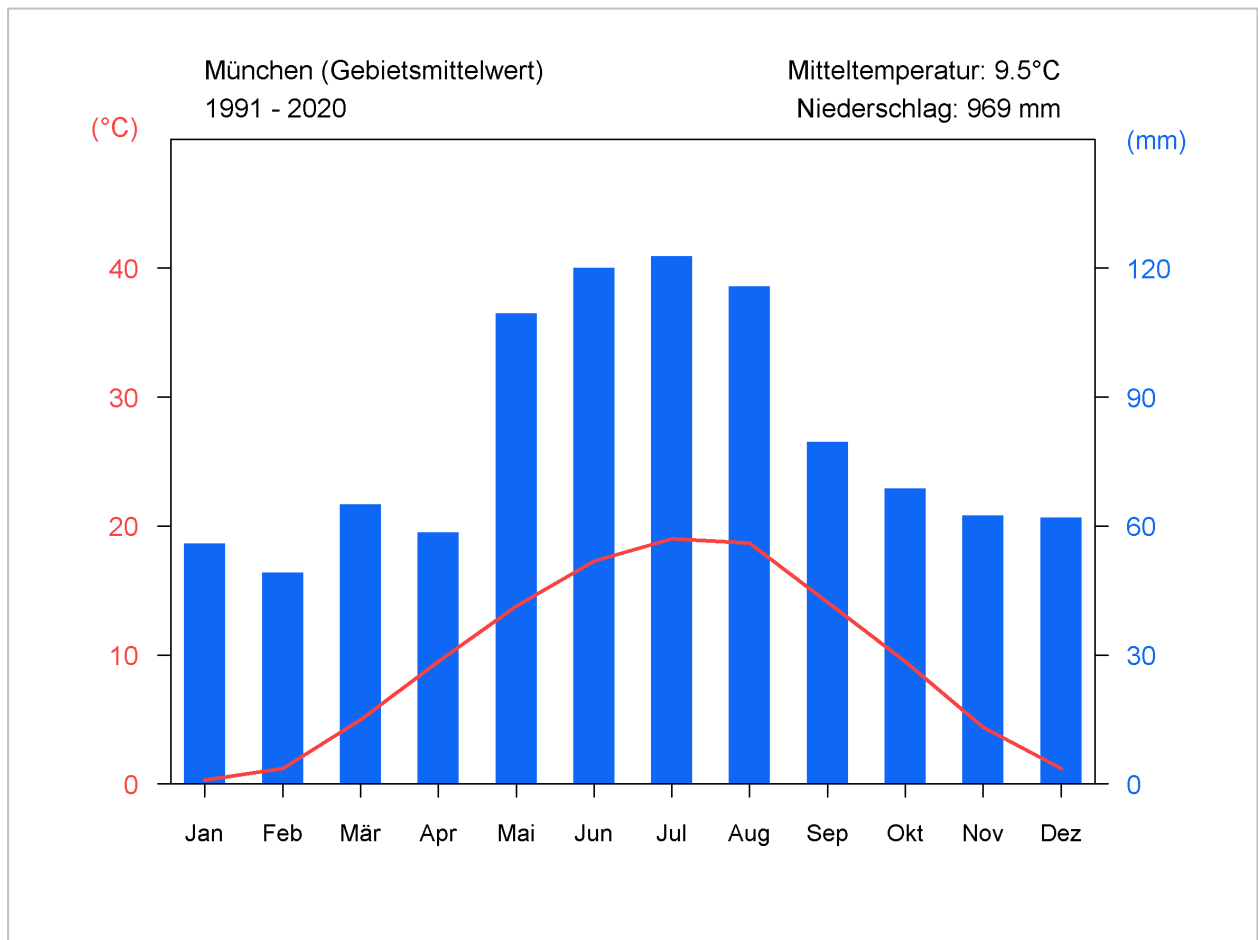


Abbildung 13: Klimadiagramm der Stadt München für den Zeitraum 1991 – 2020 (DWD, 2024b).

Verglichen mit früheren Perioden wird deutlich, dass in München – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen (1881-1910) im Vergleich zur Referenzperiode (1991-2020) um 2,2 °C gestiegen. Zudem sind vier der fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 14).

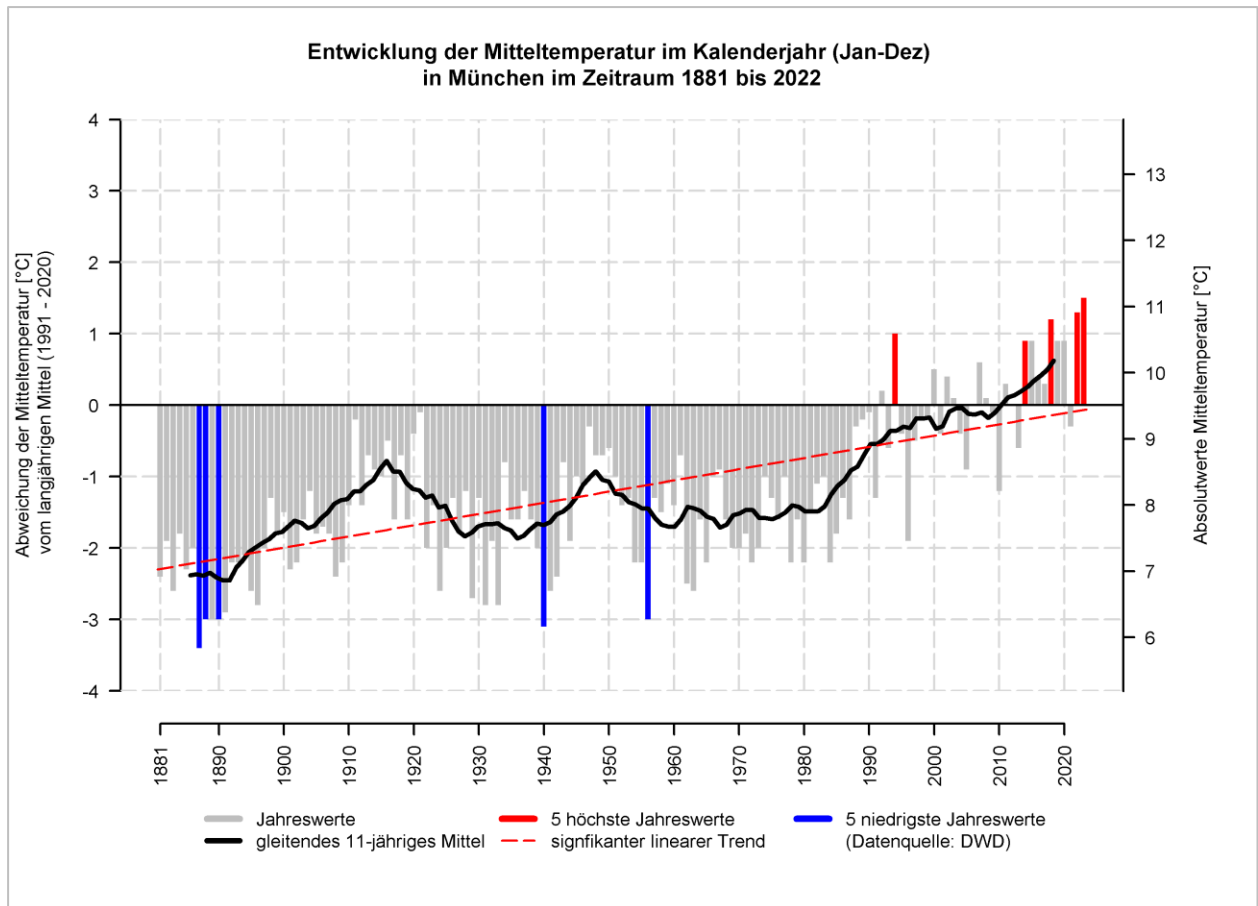


Abbildung 14: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in München im Zeitraum 1881 bis 2022 (eigene Berechnung nach (DWD, 2024b)).

Noch stärker als die „schleichende“ Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) und insbesondere an Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991 - 2020 traten in München 50 Sommertage und 11 Heiße Tage pro Jahr auf, was dem deutschlandweiten Durchschnitt (39 Sommertage bzw. 9 Heiße Tage pro Jahr) entspricht. Die feucht-gemäßigte Lage München zeigt sich in der Anzahl meteorologischer Kenntage im Winter. In München wurden in den letzten drei Dekaden im Mittel 87 Frosttage und 22 Eistage pro Jahr und damit eine höhere Auftrittshäufigkeit im Vergleich zum deutschlandweiten Mittel registriert (81 Frosttage bzw. 19 Eistage pro Jahr).

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station München-Stadt dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in München. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 2,6 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 0,3 – 5,4 m/s am häufigsten auftraten (leiser Zug bis schwacher Wind). In den Nachtstunden dominieren Winde aus süd-südwestlicher Richtung, während tagsüber der Wind am häufigsten aus west-südwestlichen/westnordwestlichen Richtungen weht (Abbildung 15). Die Windrichtungsverteilung für die Sommermonate zeigt ein sehr ähnliches Bild. Bei den autochthonen Nächten sind Winde aus Ost- und Süd-Richtungen vorherrschend.

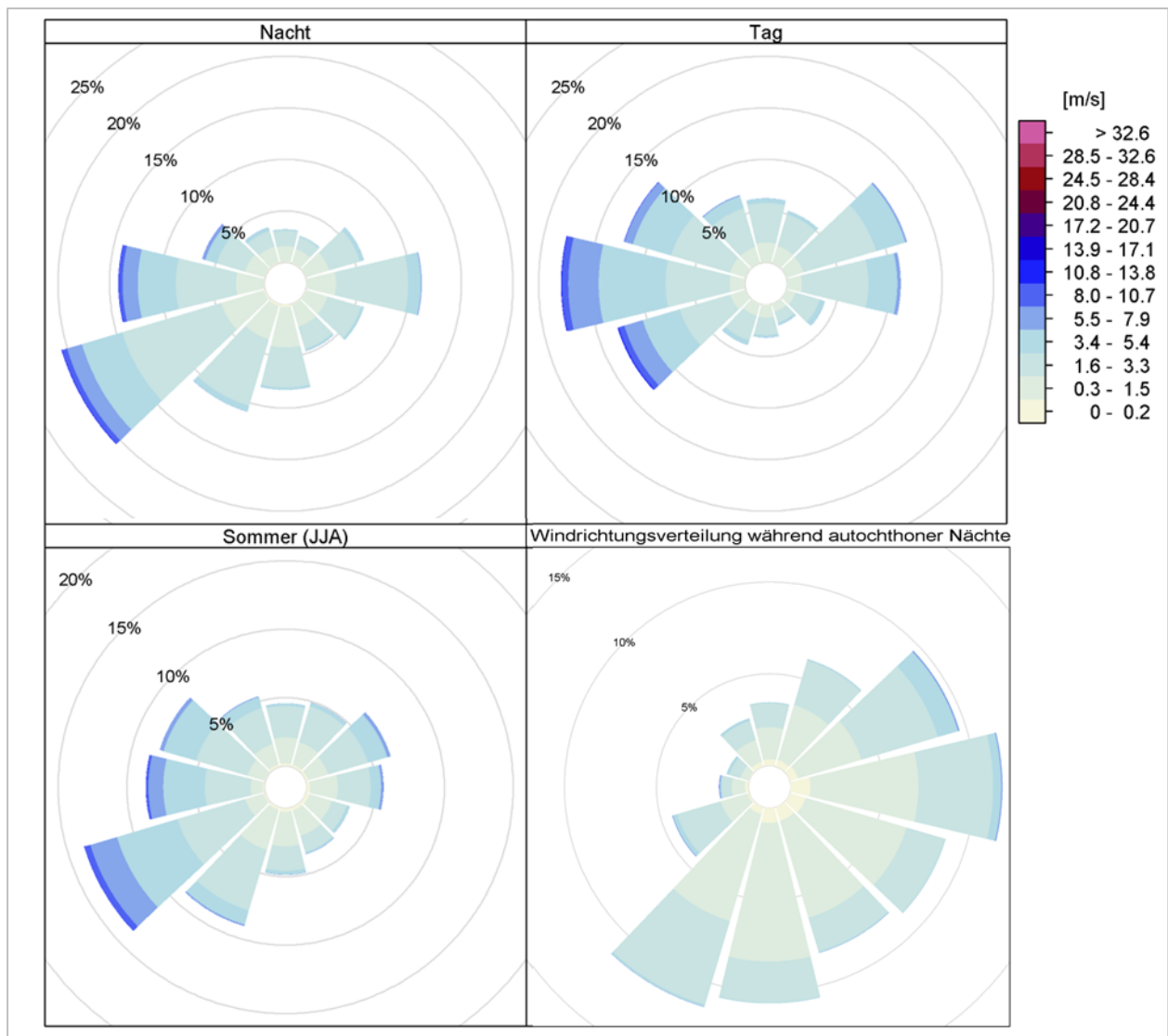


Abbildung 15: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links oben) und am Tag (rechts oben), in den Sommermonaten (links unten) und während autochthoner Nächte (rechts unten) in München für den Zeitraum 1971 – 2000, basierend auf der DWD-Station München-Stadt (DWD, 2024a).

4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

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

Ausgehend von den Geländebedingungen im Großraum München bilden sich regionale Windsysteme aus. Sie können die im Umfeld einer Stadt lokal entstehenden Kaltluftsysteme beeinflussen oder auch überlagern. Während wolkenarmer sommerlicher Wetterlagen ist im Untersuchungsraum das Phänomen des „Alpinen Pumpens“ bekannt und wurde vom DWD ausführlich untersucht (DWD 2020). Das Alpine Pumpen kann während sommerlicher Wetterlagen sowohl am Tage als auch in der Nacht einen Einfluss auf die Durchlüftung der Stadt haben und dabei ist Windzirkulation dadurch gekennzeichnet, dass tagsüber der Wind in Richtung Alpen gerichtet ist und in den Nachtstunden kühle Luft aus den Alpen in Richtung Norden strömt (Abbildung 16). Zurückzuführen ist dieser Vorgang auf eine im Vergleich zur Münchner Schotterebene

schnellere Erwärmung der Luft in den Alpen am Tage, während dort in der Nacht große Mengen an Kaltluft entstehen und in das Alpenvorland abfließen.

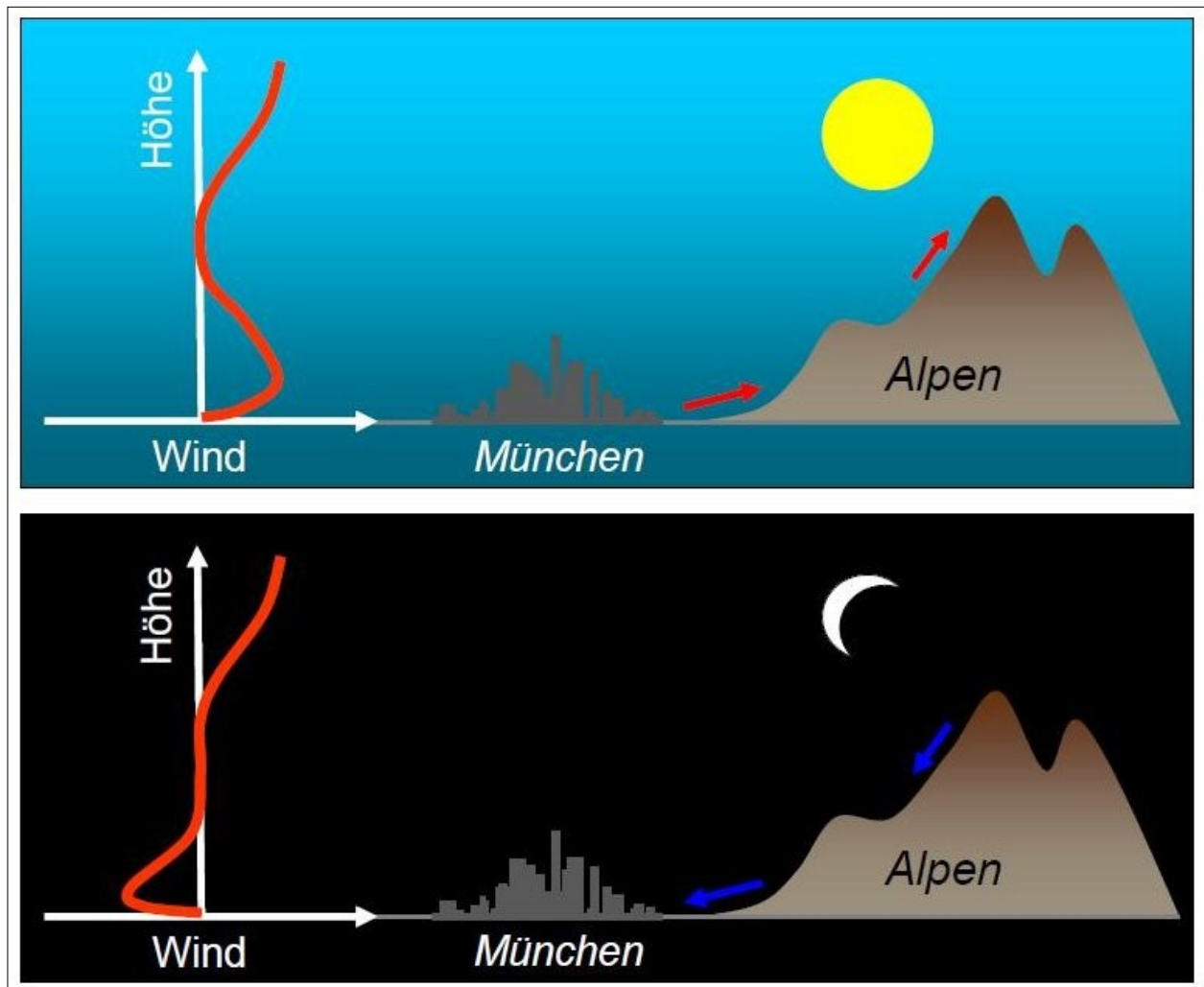


Abbildung 16: Luftströmung im Voralpenraum während wolkenarmer sommerlicher Wetterlagen (Quelle: DWD; bereitgestellt durch die Stadt München).

Die Höhe dieser nächtlichen bodennahen Luftströmung wurde im Zuge des Forschungsvorhabens STADTKLIMA BAYERN (BRÜNDL et al. 1987) auf ca. 500 m beziffert. Dieser Prozess ist in den durchgeführten Modellsimulationen allerdings nicht explizit nachgebildet worden, da dies die Erfassung des Voralpenlandes vorausgesetzt hätte und so das Modellgebiet zu groß geworden wäre. Das modellierte Kaltluftströmungsfeld weist allerdings in der zweiten Nachthälfte zum Analysezeitpunkt 04:00 Uhr eine deutliche Südkomponente auf.

In München traten im langjährigen Mittel von 1991 - 2020 rund 77 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 17). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel knapp 27 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 35 % entspricht – etwas mehr als jede dritte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

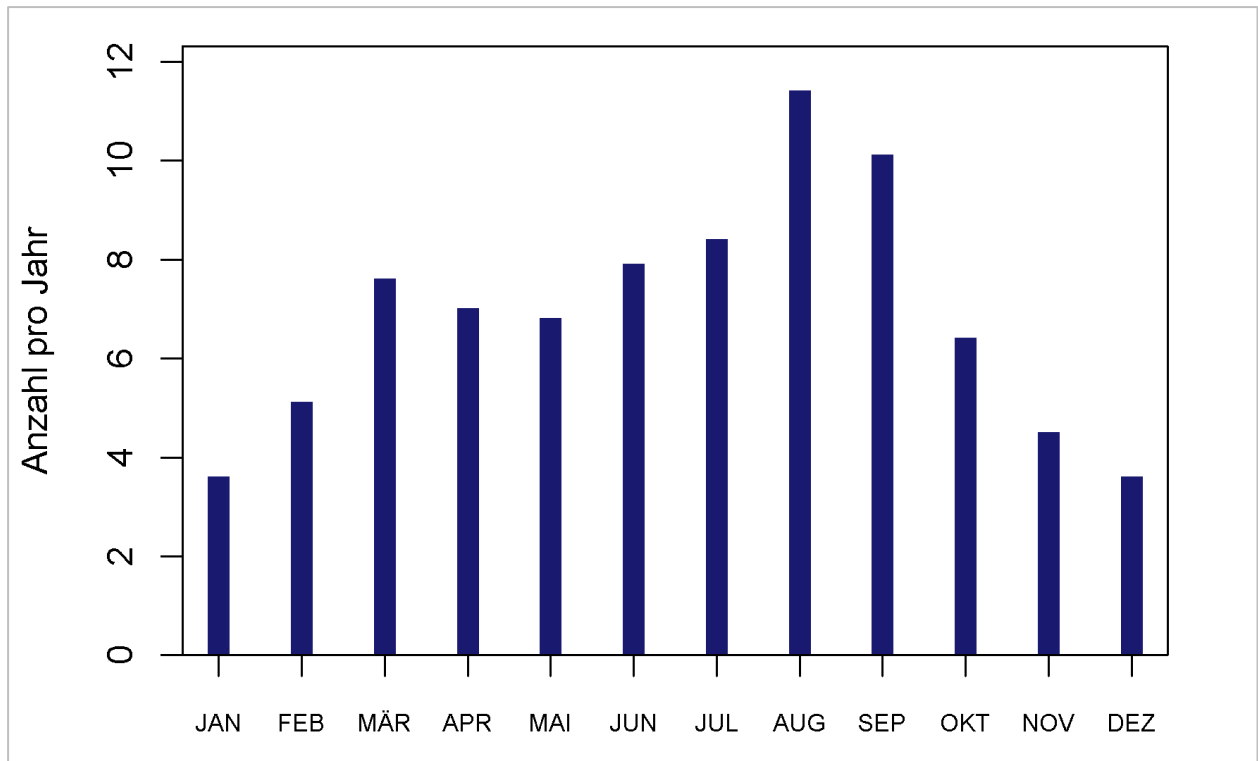


Abbildung 17: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in München (77 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der DWD-Station München (DWD 2024a).

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Der menschengemachte Klimawandel ist bereits heute erkenn-, mess- und spürbar (*AR6 Synthesis Report*, 2023). Besonders im Hinblick auf die Entwicklung von Anpassungsstrategien und Konzepten zum Umgang mit veränderten klimatischen Bedingungen ist es wichtig zu wissen, in welchem Umfang sich die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag und Wind in den nächsten Dekaden verändern.

Analysen für Mitteleuropa und Deutschland zeigen auf, dass zukünftig steigende Temperaturen mit zunehmenden Hitzewellen und Trockenheit sowie veränderten Niederschlägen einhergehen. Beides bedeutet für sowohl den Menschen als auch Flora und Fauna eine Einschränkung in Lebensqualität sowie in der härtesten Konsequenz eine Einschränkung des Lebensraums und der körperlichen Gesundheit. So weisen Studien einen direkten Zusammenhang zwischen dem Andauern von Hitzewellen und einer Abnahme der Leistungsfähigkeit der Bevölkerung bis hin zu einer Zunahme von Hitzeerkrankungen und -toten auf (Urban & Steining, 2015).

Neben der Hitze als Folge des Klimawandels werden abnehmende Niederschläge im Sommer und zunehmende Niederschläge im Winter erwartet. Weiterhin nehmen Starkniederschlagsereignisse zu, die v.a. Abflusssysteme überlasten und für Überschwemmungen sorgen können. Hinzu kommt eine Häufung starker bis extremer Sturmereignisse in den vergangenen Jahren mit teilweise verheerenden Folgen für die Verkehrsinfrastruktur, Gebäude und Stadtbäume. Diese Auswirkungen können regional recht unterschiedlich sein und müssen somit für jeden betrachteten Raum individuell analysiert und bewertet werden (Jacob et al., 2017). Auf Basis dieser Informationen können effektive Maßnahmen entwickelt werden, die auf die jeweiligen lokalen Auswirkungen und Bedürfnisse ausgerichtet sind.



4.4.1 TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

Im zeitlichen Verlauf bis zum Jahr 2100 zeigt der **Median der Jahresmitteltemperaturen** des Regionalmodellensembles einen deutlichen Anstieg beim Szenario RCP 8.5 (Abbildung 18). Dieser Trend ist äußerst robust, ein Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen wird von allen Modellkombinationen des Ensembles bestätigt. Zum Ende des Jahrhunderts nimmt neben der Jahresmitteltemperatur auch die Variabilität zu, dies wird durch die Darstellung der Bandbreite des Modellensembles in Abbildung 18 deutlich (Möglichkeitsbereich). Hierbei sei darauf hingewiesen, dass der im Diagramm abgebildete, bereits vergangene Zeitraum durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

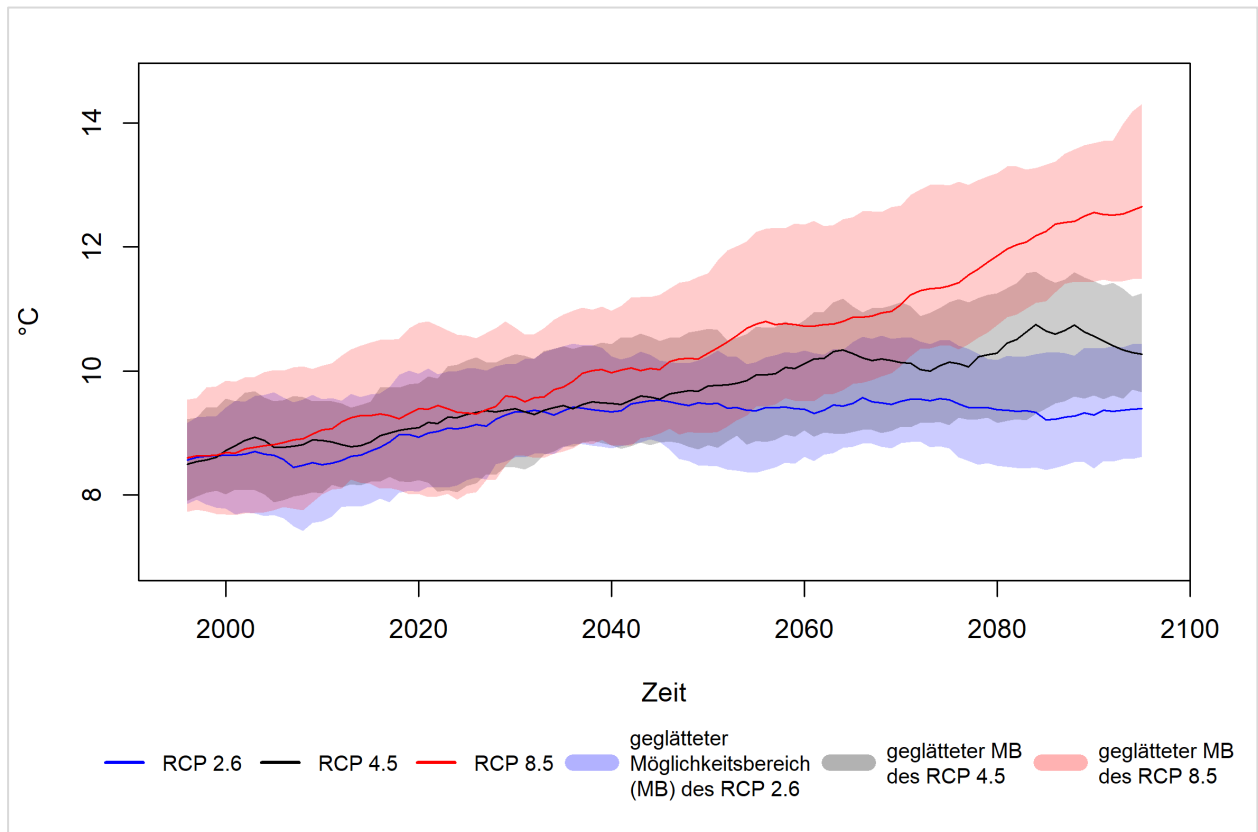


Abbildung 18: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in München (alle Szenarien). Die durchgezogenen Linien sind die Mediane der einzelnen Szenarien des Ensembles. Der Möglichkeitsbereich bildet die Bandbreite zwischen kleinstem und größtem Wert des Ensembles.

Die Änderungen der langjährigen Mittelwerte der Temperatur zeigen für München ebenfalls einen deutlichen Anstieg in allen Zeiträumen, wobei im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts die stärksten Zunahmen zu verzeichnen sind (Tabelle 3). Im RCP 8.5 steigen die jährlichen Minimumtemperaturen am stärksten. Die höchsten Zunahmen der Mitteltemperatur treten in der Zukunftsperiode von 2071 bis 2100 bei den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 auf. Eine prognostizierte zukünftige Temperaturzunahme zeigt auch das Szenario RCP 2.6 (Tabelle 3).



Tabelle 3: Mittlere langjährige Temperatur (in °C) in München (P 0 / 100 = 0. / 100. Perzentil, P 50 = Median)

Parameter	Referenz Periode 1991-2020	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991-2020								
			2031/2060			2041/2070			2071/2100		
			P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Jahresmitteltemperatur [°C]	10,2	RCP 2.6	0,6	0,8	1,1	0,7	0,9	1,2	0,5	0,8	1
		RCP 4.5	0,8	1	1,3	0,9	1,1	1,6	1,4	1,8	2
		RCP 8.5	1	1,4	1,9	1,4	2	2,5	2,9	3,5	4,3
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	6,2	RCP 2.6	0,6	1,4	3,2	0,9	1,5	3,3	0,8	1,7	2,1
		RCP 4.5	0,5	2,2	2,9	0,1	1,9	3,1	1,6	2,4	4,7
		RCP 8.5	0	1,5	3,3	0,3	1,6	4	2,7	4,2	8,1
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	14,6	RCP 2.6	0,4	0,8	1,8	0,3	0,9	2	-0,2	0,9	2,4
		RCP 4.5	0,5	1,4	2,5	0,7	1,6	2,7	0,8	2	3,3
		RCP 8.5	0,6	1,6	3,3	0,9	2,1	3,6	3,2	4,5	6,5

Eine Zunahme der Temperaturen ist in allen Regionen Deutschlands beobachtbar und auch in den regionalen Klimaprojektionen erkennbar (Deutschländer & Mächel, 2017). **In der 3. Zukunftsperiode (2071-2100) liegt die Temperaturänderung des Szenarios RCP 8.5 in München mit 4,3 °C über dem deutschlandweiten Mittelwert von 3,8 °C.** Bei der Annahme dieses Szenarios würde die Jahresmitteltemperatur in München zum Ende des Jahrhunderts somit bei ca. 14 °C bis 15 °C liegen. **Dies entspricht beispielsweise der heutigen Jahresmitteltemperatur von Madrid.**

Abbildung 19 zeigt die langjährige Änderung der mittleren Monatstemperatur für das Szenario RCP 8.5. Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, wobei im Spätsommer (Juni-August), Herbst (September) und Frühwinter (November) vergleichsweise größere Temperaturänderungen auftreten als im Spätwinter (Februar), Frühjahr (März-April) und Frühsommer (Mai).

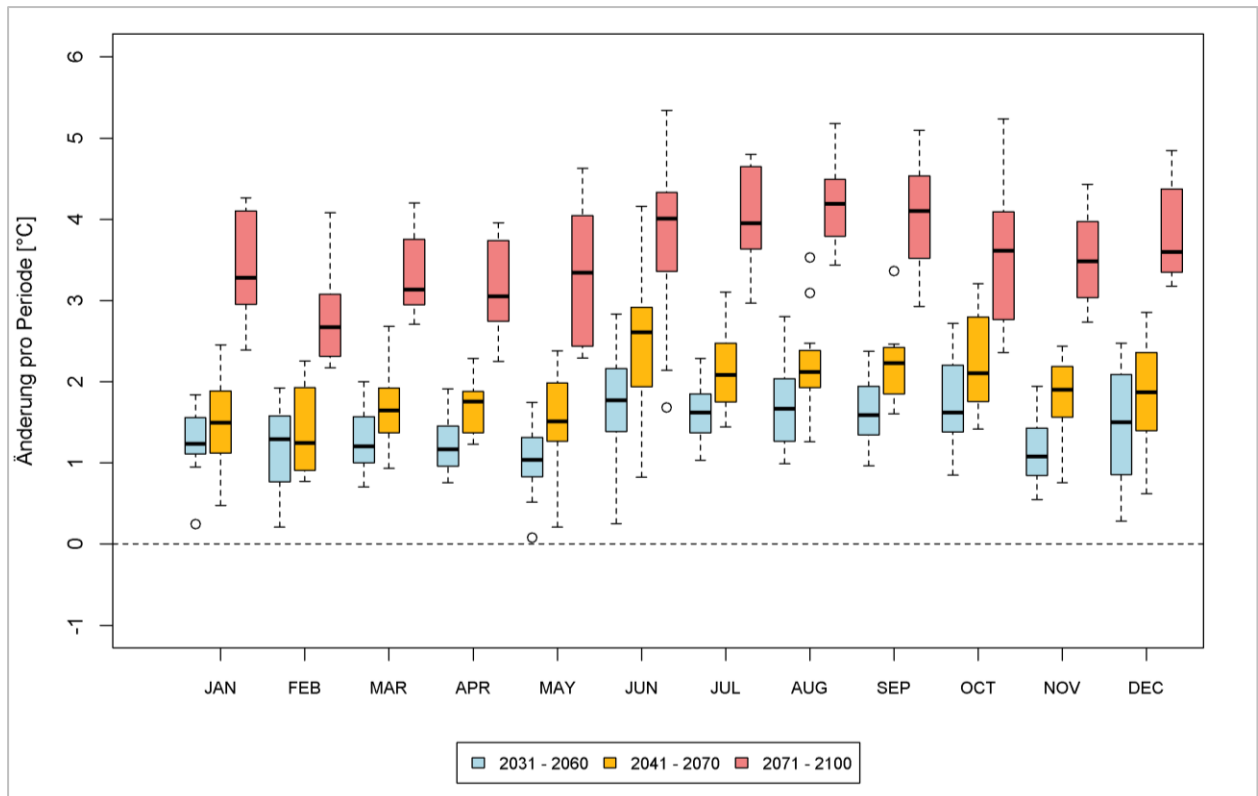


Abbildung 19: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in München pro Periode im Szenario RCP8.5 im Vergleich zur Referenzperiode 1991 – 2020.

Der projizierte Anstieg der Temperatur steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung meteorologischer Kenntage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatischen Änderungen zulassen. In Tabelle 4 sind die langjährigen mittleren Änderungen ausgewählter Kenntage für die betrachteten Szenarien aufgeführt.

Die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich zu. So ist in der Zukunftsperiode 3 beim Szenario RCP 8.5 im Mittel mit 13 zusätzlichen Heißen Tagen zu rechnen. Damit würden zukünftig im Mittel 24 Heiße Tage im Gegensatz zu aktuell 11 Heißen Tagen pro Jahr auftreten. Die Berechnung der zukünftigen Kenntage bezieht sich stets auf Freilandbedingungen und kann aufgrund der räumlichen Auflösung nicht die Situation in den bebauten Arealen repräsentieren. Die tatsächliche Ausprägung kann hier durch stadtklimatische Effekte wie den Wärmeinseleffekt höher sein. Tropennächte treten an den Freilandstationen bislang selten auf und spiegeln nicht den Stadtklimaefekt in den Siedlungsräumen wider. Die beobachteten Änderungen sind mit Blick auf die Tropennächte vor allem im kernstädtischen Bereich statistisch nur unzureichend übertragbar. Im vorliegenden Fall liefern die DWD-Daten in keiner der betrachteten Zeiträume eine Angabe zu den zukünftig zu erwartenden Tropennächten. Dennoch ist mit Blick auf andere Städte in Deutschland davon auszugehen, dass die Anzahl zukünftig steigen wird. Der Kennwert der Tropennächte beschreibt die zunehmende nächtliche Temperaturbelastung besonders in urbanen eng bebauten Räumen sehr gut. (Tabelle 4).



Tabelle 4: Langjährige mittlere Änderung (Anzahl pro Jahr) thermischer Kenntage in München (P 0 / 100 = 0. / 100. Perzentil, P 50 = Median)

Kenntage	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991-2020								
		2031/2060			2041/2070			2071/2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Tropennächte [n/Jahr] (Tmin ≥ 20 °C)	RCP 2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RCP 4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RCP 8.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Heiße Tage [n/Jahr] (Tmax ≥ 30 °C)	RCP 2.6	0	0,1	0,9	0	0,1	1	-0,1	0,2	2
	RCP 4.5	0	0,3	1,1	0	0,4	1,7	0	0,9	3,3
	RCP 8.5	0,1	0,8	2,8	0,1	1,1	3,9	0,9	4,8	13
Sommertage [n/Jahr] (Tmax ≥ 25 °C)	RCP 2.6	0,7	4	8,9	0,7	3,7	10	-0,8	3,6	10,4
	RCP 4.5	6,3	8,8	11,1	8	11,3	13,7	9,5	13,7	17,4
	RCP 8.5	5,9	9,6	17,4	9	14,2	24,4	25,1	35,8	42,8
Frosttage [n/Jahr] (Tmin < 0 °C)	RCP 2.6	-20,2	-13,4	-9,9	-21,6	-14	-10,7	-18,3	-8,4	-3,9
	RCP 4.5	-24,7	-15,8	-11,7	-29,2	-20,8	-12,6	-38,6	-25,1	-19,9
	RCP 8.5	-38	-21,8	-15,3	-51,5	-28,9	-22,6	-78,9	-56,6	-42,7
Eistage [n/Jahr] (Tmax < 0 °C)	RCP 2.6	-13,7	-5,9	-3,6	-13,6	-8,4	-5,5	-11,9	-7,2	-2,7
	RCP 4.5	-10,6	-7,9	-2,1	-11,8	-8,1	-4,7	-16,8	-13,9	-8,7
	RCP 8.5	-15,3	-9	-5	-18,1	-9,8	-5,2	-30,8	-21,3	-17,2

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen steht eine intensive Zunahme der Minimumtemperaturen im Zusammenhang mit einer Abnahme an Frost- und Eistagen. Dies lässt ein häufigeres Auftreten wesentlich milderer Winter und eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechseln erwarten. In München treten im langjährigen Mittel ca. 87 Frosttage pro Jahr auf. Darin enthalten sind etwa 22 Eistage pro Jahr. Beim Szenario RCP 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel nur noch 45 Frosttage und 5 Eistage pro Jahr auftreten (Tabelle 4).

Die Zunahme der Heißen Tage lässt in Zukunft eine zunehmende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzeperioden erwarten. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition, was nicht deren eigentliche Relevanz in der Belastung der Bevölkerung widerspiegelt. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden, ungewöhnlich hohen Temperaturen und damit einer extremen Hitzebelastung für die Bevölkerung. Wird der Schwellenwert einer Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Wert erreicht oder überschritten haben, zeigt sich für München, dass die Länge von Hitzeperioden in Zukunft zunimmt (Abbildung 20). Grundsätzlich besteht eine Hitzeperiode ab einer Länge von mindestens 3 aufeinander folgenden Tagen mit Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C. Je nach Szenario erhöht sich die Länge der Hitzeperioden in München von ca. 4 Tagen in 1991 – 2020 auf bis zu 9 Tage (im Mittel 2 Tage mehr) bis zum Ende des Jahrhunderts (RCP 8.5).

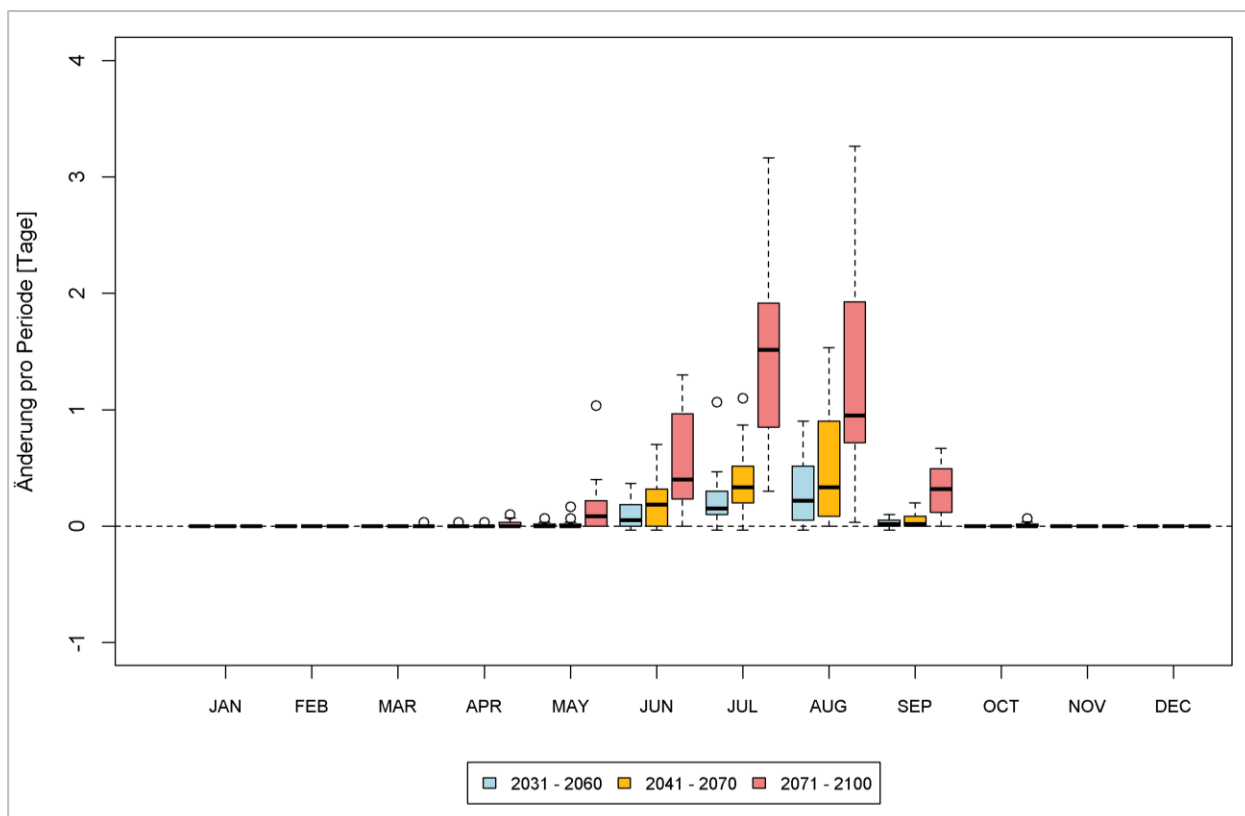


Abbildung 20: Langjährige Änderung der Länge von Hitzeperioden (Aufeinanderfolgende Tage mit Tmax ≥ 30 °C) pro Periode im Szenario RCP 8.5 in München im Vergleich zur Referenzperiode 1991 – 2020.



4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG & TROCKENHEIT

Niederschlagsverschiebung

In Bezug auf die Jahresniederschlagssumme sind für München Auswirkungen durch den Klimawandel zu erwarten, quantitativ jedoch nur näherungsweise auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigen alle drei Szenarien steigende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert. (Tabelle 5). Allerdings sind die Zunahmen als eher gering zu bewerten.

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann es (wieviel) regnet entscheidend u.a. für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Der Blick auf den Jahresgang offenbart saisonale Unterschiede in der zukünftigen Entwicklung des Niederschlags. In allen RCP-Szenarien ist eine Tendenz geringerer Niederschläge in den Monaten Juli und August sowie im Monat März und leicht höherer Werte in den übrigen Monaten zu erkennen. Am stärksten treten diese Effekte bei langfristiger Betrachtung bis Ende des Jahrhunderts und im RCP-Szenario 8.5 auf, das gerade für die Monate, März, Juli und August, deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abbildung 21). Die in den Abbildungen wahrnehmbare Niederschlagsverschiebung mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, sollte jedoch als auffallende Tendenz mindestens Erwähnung finden.

Tabelle 5: Langjährige jährliche Änderung der mittleren Niederschlagssumme (in mm/Jahr) in München
(P 0 / 100 = 0. / 100. Perzentil, P 50 = Median)

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-97	30,9	141,9	-152,5	-26,1	106,5	-99,1	20,6	118,1
	RCP 4.5	-26	80,2	179,9	-23,5	73,8	140,8	63,9	103,2	149
	RCP 8.5	-140,4	-13,4	153,7	-170,6	31,5	121,6	-291,8	-27,4	151,5

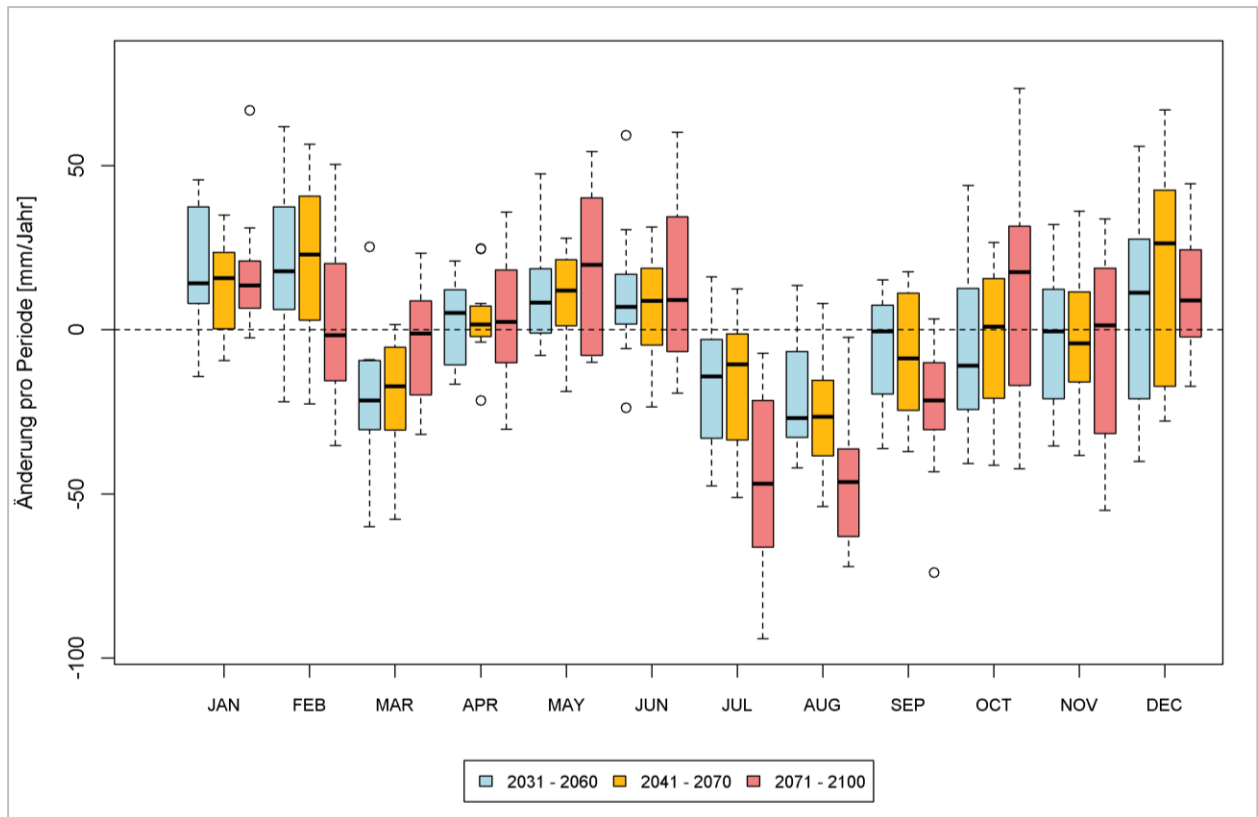


Abbildung 21: Langjährige Änderung der Niederschlagssumme pro Periode in München im Vergleich zur Referenzperiode 1991-2020 (Szenario RCP8.5)

Niederschlagsverschiebung

Begriffe wie Trockenheit oder Dürre sind nicht eindeutig definiert und die Bewertung dieser Ereignisse hängt oftmals von der jeweiligen fachlichen oder individuellen Sichtweise ab. Im allgemeinen Verständnis sind Trockenheit und Dürre durch einen Mangel an Wasser oder Feuchtigkeit gekennzeichnet, der aus einem Niederschlagsdefizit resultiert und über einen längeren Zeitraum zu Wasserknappheit führen kann. Ein Indikator für Trockenheit ist die klimatische Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag (Wasserdargebot) zu potenzieller Verdunstung (Wasserverlust).

In der Jahressumme sind keine relevanten Änderungen der klimatischen Wasserbilanz in München feststellbar. **Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf.** Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend (leicht) positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz zeigen, sind im RCP 8.5 in den Monaten Mai bis August Abnahmen erkennbar (Abbildung 22). Diese saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz gilt für alle drei Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. In der 1. Zukunftsperiode fallen die Änderungen in den Sommermonaten noch relativ gering aus. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die genannten Ergebnisse wiederum mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Variabilität des Niederschlags mitentscheidend für die klimatische Wasserbilanz wirkt.



Die abnehmende klimatische Wasserbilanz im Sommer lässt häufigere bzw. länger anhaltende Trockenperioden vermuten, jedoch sind die in den Modellen projizierten Änderungen zu gering, um valide Aussagen treffen zu können.

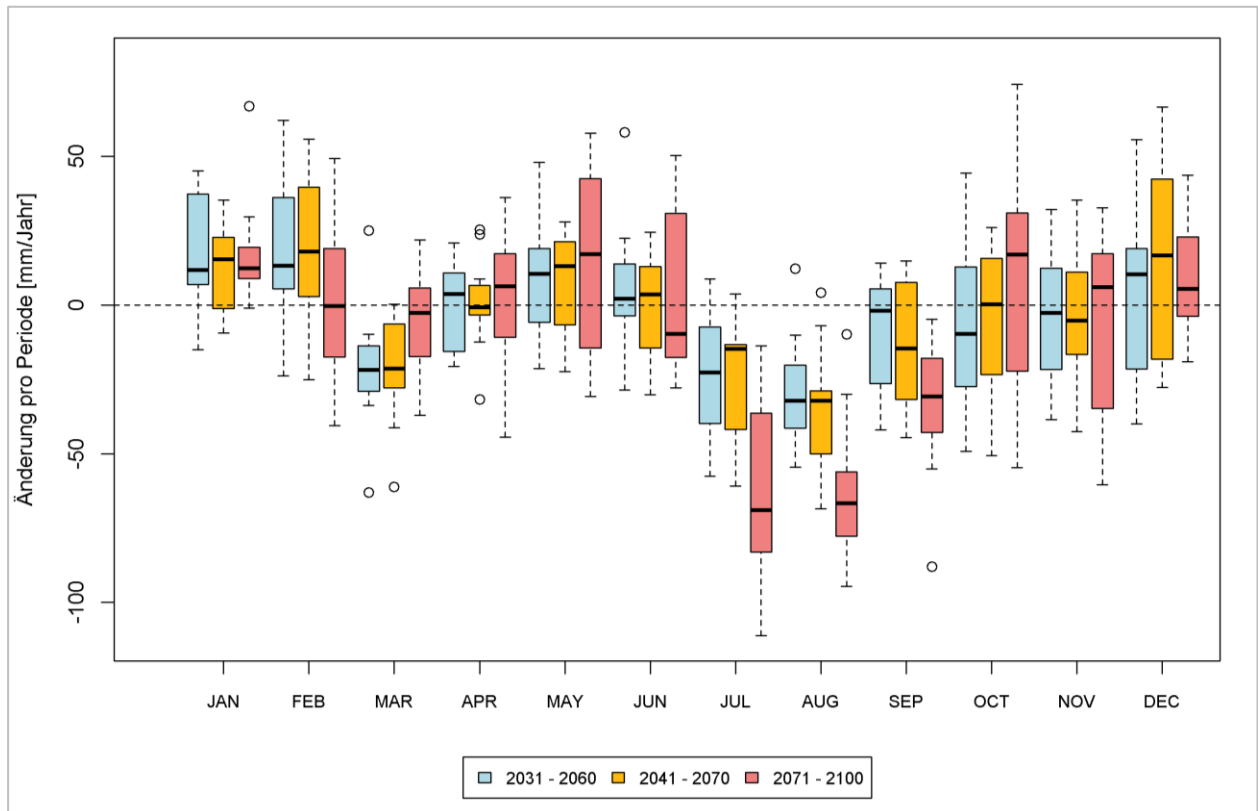


Abbildung 22: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz (Niederschlag – potenzielle Verdunstung) pro Periode in München im Vergleich zur Referenzperiode 1991 – 2020 (Szenario RCP8.5)



4.4.3 STARKNIEDERSCHLAG

Mehr noch als die mittleren Niederschlagssummen ist für Städte und Gemeinden die Frage der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen besonders relevant. Verschiedene Ereignisse in jüngster Vergangenheit haben gezeigt, dass diese ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotenzial besitzen. München ist die Großstadt mit mehr als 300.000 Einwohner*innen, die am stärksten von extremen Niederschlagsereignissen betroffen ist (Winterrath et al., 2023).

Als Starkniederschläge (synonym: Starkregen) werden Niederschläge bezeichnet, die eine hohe Intensität, d.h. eine im Verhältnis zu ihrer Dauer große Niederschlagssumme aufweisen. Starkregenereignisse können dabei sowohl Niederschläge kurzer Dauer als auch mehrerer Stunden oder über Tage hinweg anhaltende Niederschläge sein (Rauthe et al., 2014). Neben der Dauer eines solchen Ereignisses ist die Größe der betroffenen Fläche wesentlich.

Der DWD warnt vor Starkregen in zwei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge ≥ 10 mm/1 h bzw. ≥ 20 mm/6 h (Markante Wetterwarnung) oder Regenmenge ≥ 25 mm/1 h bzw. ≥ 35 mm/6 h (Unwetterwarnung; DWD 2020d). In der Klimaforschung wird meist die Tagesniederschlagssumme betrachtet. Dabei werden Schwellenwerte festgelegt (z.B. $N \geq 20$ mm/d), deren Überschreitung als Starkniederschlag verstanden werden kann. Diese sind jedoch nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze zu deren Bestimmung existieren. In diesem Bericht werden folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:

- Starker Niederschlag: $N \geq 10$ mm/d
- Stärkerer Niederschlag: $N \geq 20$ mm/d
- Starkniederschlag: $N \geq 30$ mm/d

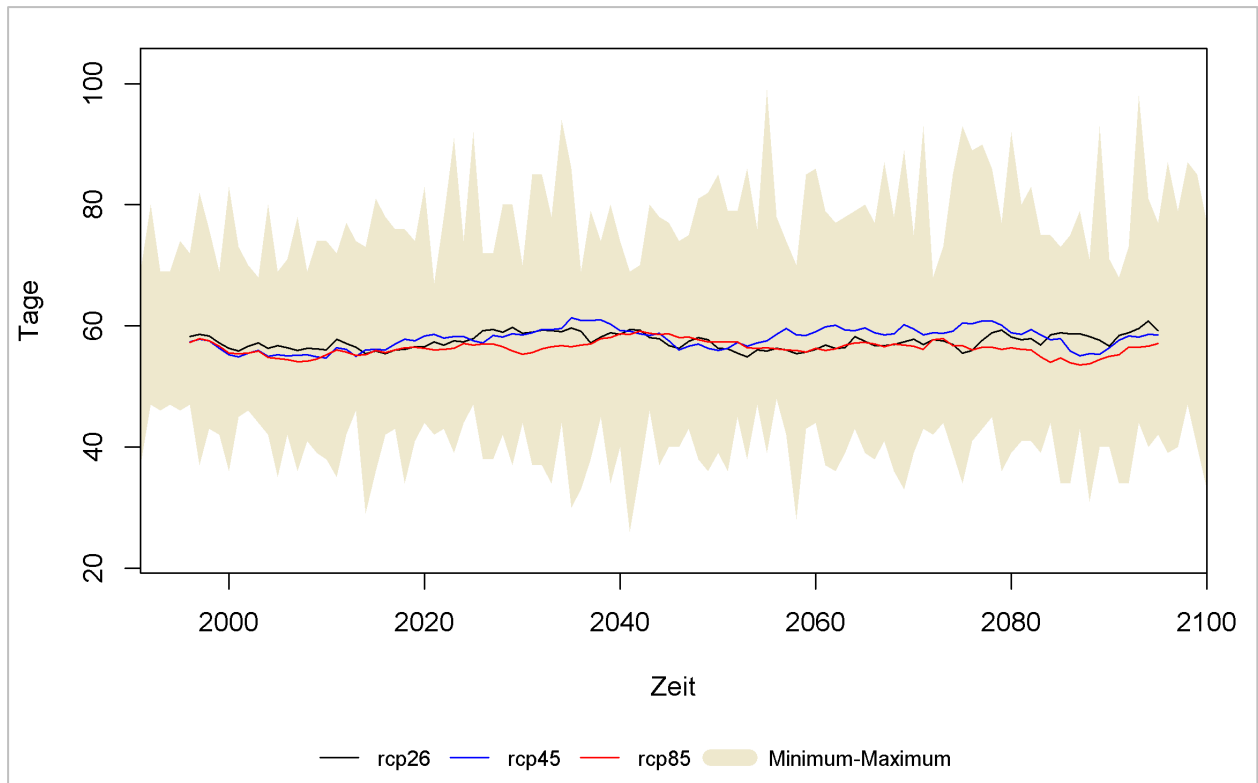


Abbildung 23: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d) in München (alle Szenarien).

Starkregenereignisse treten relativ selten auf, sodass auch die mittleren jährlichen Änderungen der Häufigkeit solcher Ereignisse äußerst gering ausfallen und statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Dies wird bspw. bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge ($N \geq 20$ mm/d) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Abbildung 23).

Aufgrund des enormen Schadenspotenzials sollten jedoch geringe Änderungen (in absoluten Zahlen für Einzelereignisse) nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse $N \geq 10$ mm/d und $N \geq 20$ mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind (Tabelle 6). Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen um 2-3 Ereignisse in den jeweiligen Zukunftsperioden. Starkniederschläge ≥ 30 mm/d treten momentan sehr selten auf (im Mittel 1 Ereignis pro Jahr) und haben eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, sodass valide Prognosen derzeit kaum möglich sind. Gerade langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit ca. 1-2 zusätzlichen Starkniederschlagsereignissen pro Jahr gerechnet (Tabelle 6 und Abbildung 24).



Tabelle 6: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in München (P 0 / 100 = 0. / 100. Perzentil (Min./Max.), P 50 = Median)

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100	P 0	P 50	P 100
Starker Niederschlag (N ≥ 10 mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-3,8	1,4	7,4	-5,6	-0,5	7	-5,8	2,4	9,9
	RCP 4.5	-1,7	2,5	8,2	-0,8	2,2	4,7	0,4	3,3	8,8
	RCP 8.5	-4,9	0,4	6,6	-6,6	1,7	6,6	-11,9	-3,1	4,4
Stärkerer Niederschlag (N ≥ 20 mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-2,5	2	5,2	-3,7	1,1	3,8	-3,4	2,3	9,4
	RCP 4.5	-0,8	3,2	6	-0,3	2,3	5	1,7	3,2	4,3
	RCP 8.5	-2,1	1,2	4,9	-2,1	1,7	5,1	-5,8	1,3	2,9
Starkniederschlag (N ≥ 30 mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-2,4	-0,2	2,5	-3,7	-0,4	2,2	-2,7	1,2	5,7
	RCP 4.5	-0,3	1,3	3,4	-0,3	1,1	2	-0,9	2,1	3,5
	RCP 8.5	-1,8	0,7	2,1	-1,1	1,3	3,1	-2,7	1,6	3,5
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-4,8	8,1	19,8	-2,3	5,6	26,8	-6,1	10	24,5
	RCP 4.5	11,9	13,2	15,8	5,5	12,9	15,8	2,4	11,7	19,9
	RCP 8.5	-6,8	4	24,7	-6,5	4,2	19,9	-5,4	13,2	36,7

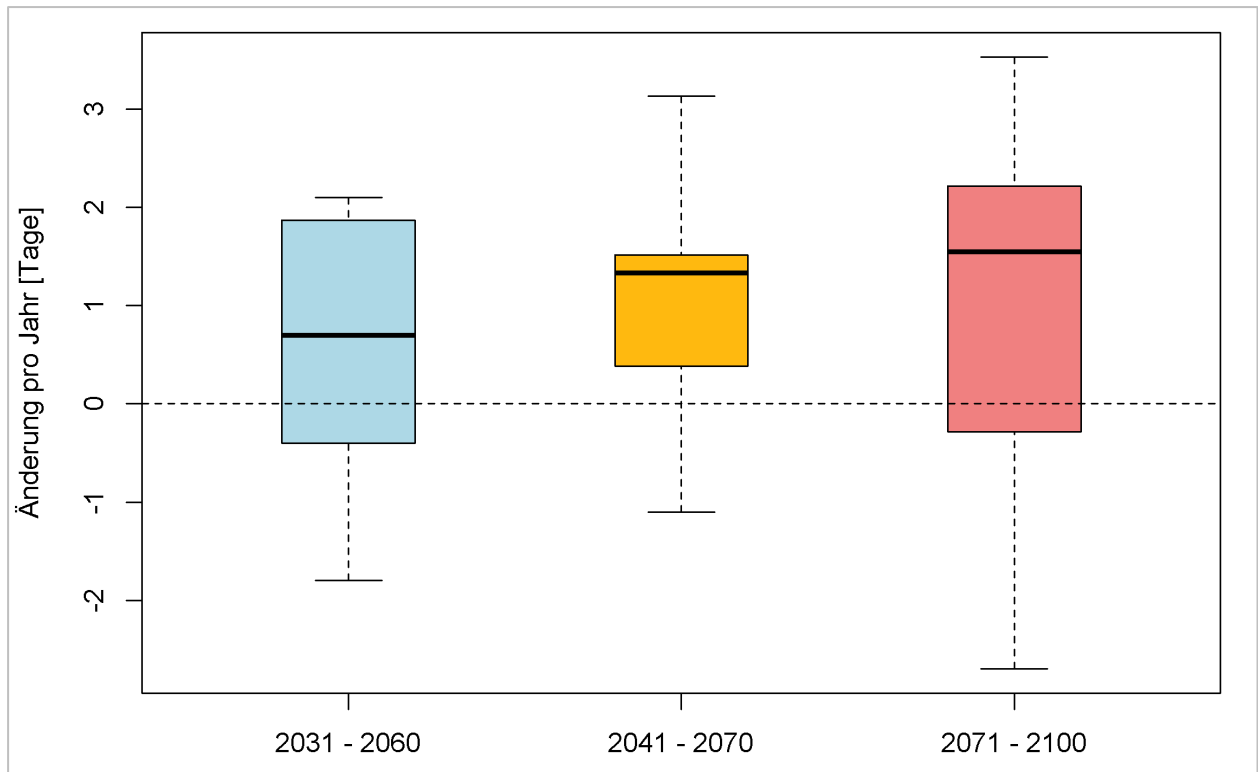


Abbildung 24: Langjährige Änderung der Anzahl an Tagen mit Starkniederschlag ($N > 30$ mm) pro Jahr in München im Vergleich zur Referenzperiode 1991-2020 (Szenario RCP8.5). Siehe farbliche Einfärbungen in Tabelle 6.

Angesichts kaum veränderter oder gar zunehmender Jahresniederschlagssummen kann im Mittel die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag bei zunehmender Niederschlagsintensität abnehmen. Die Zunahme von Tagen mit mindestens starkem Niederschlag ist daher tendenziell mit einer Abnahme von Tagen mit Niederschlägen < 10 mm/d verbunden. Das bedeutet voraussichtlich: Es regnet seltener, aber wenn, dann stärker als im Referenzperiode.

Die genannten Unsicherheiten bezüglich der von den Regionalmodellen abgebildeten (insb. extremen) Niederschläge ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite muss erwähnt werden, dass Starkregenereignisse oftmals kleinräumig auftreten und somit von den obgleich relativ hoch aufgelösten Regionalklimamodellen nicht erfasst und potenziell unterschätzt werden (DWD, 2024a). Eine wärmere Atmosphäre kann zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, was dazu führt, dass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (ZAMG 2025). Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Zunahme starker Niederschlagsereignisse angesichts steigender Temperaturen. In Ansätzen deutet sich dieser Effekt in den bisherigen Ergebnissen an, die insb. langfristig und im RCP-Szenario 8.5 einen Anstieg der mittleren maximalen täglichen Niederschlagsmenge verzeichnen.



4.4.4 WIND UND STURM

Sturmereignisse besitzen, ebenso wie Starkniederschläge, ein sehr hohes Schadenspotenzial. Der DWD definiert Sturm folgendermaßen: „Bezeichnung für Wind von großer Heftigkeit, nach der Beaufort-Skala der Stärke 9 bis 11 (74 bis 117 km/h), die erheblichen Schäden und Zerstörungen anrichten kann“. Folgende Sturmklassen werden anhand ihrer Windstärke eingeteilt (DWD, 2024a).

- Sturm: Beaufort 9 (75 bis 88 km/h)
- schwerer Sturm: Beaufort 10 (89 bis 102 km/h)
- orkanartiger Sturm: Beaufort 11 (103 bis 117 km/h)
- Orkan: Beaufort 12 (> 117 km/h)

Genau wie Starkregen gehören Stürme zu den seltenen Ereignissen, sodass sie nur bedingt statistisch auswertbar sind. Hinzu kommt, dass die regionalen Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind, Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich in einer wärmeren Atmosphäre aufgrund von mehr verfügbarer latenter Wärme, die beim Phasenübergang von Wasserdampf zu Flüssigwasser frei wird, potenziell stärkere Stürme ausbilden können (Fink et al., 2012; Pinto et al., 2009; Pinto & Meyers, 2017). Dies hätte eine Zunahme der Sturmaktivität über Westeuropa zur Folge, wobei noch nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob die Häufigkeit der Sturmereignisse zunehmen oder ob bei gleichbleibender Häufigkeit die Intensität, also die Stärke der auftretenden Windgeschwindigkeiten, steigen würde (Donat et al., 2010; McDonald, 2011; Pinto et al., 2009; Pinto & Meyers, 2017).

Für München ergab die Trendanalyse für die Anzahl von Sturmereignissen pro Jahr bei allen drei Klimaszenarien keine eindeutige Ab- oder Zunahme bis zum Jahr 2100. Dementsprechend weist auch kaum eines der Modelle des Ensembles einen signifikanten Trend auf. Somit lassen sich aus den Ergebnissen keine verwendbaren Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Stürmen ableiten.



5. Analysemethoden

5.1 NUMERISCHE MODELLIERUNG

5.1.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Produkte der vorliegenden Stadtklimaanalysen basieren auf numerischen Modellsimulationen. Eingesetzt wurde das etablierte hochaufgelöste Stadtklimamodell FITNAH-3D. Die Grundgleichungen von FITNAH sind in der Literatur beschrieben (Gross, 2012a). 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 (Gross, 1987, 1989, 1992, 1993, 2012b, 2014, 2016, 2017, 2021a, 2021b; 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 (Gross, 1987).

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

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3783, Bl.7 definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern (VDI 3783, Blatt 7, 2017).

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamstädtische 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 München und angrenzendes Umland über 27 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 7 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.



Tabelle 7: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5 m

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
7	Gleis	0
9	niedrige Vegetation	0,5
14	Gewässer	0
20	Gebäude	individuell
21	Gebäude mit Dachbegrünung	individuell
22	unbebaut versiegelt	0
23	Niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5
24	Baum über Versiegelung	individuell
25	Baum über Rasen	individuell
26	Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden*	individuell
28	Sandboden	0
* naturferne Böden sind anthropogen stark überprägte, aber unbebaute städtische Oberflächen		

Abbildung 25 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 grundsätzlich ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 Uhr morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin 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.

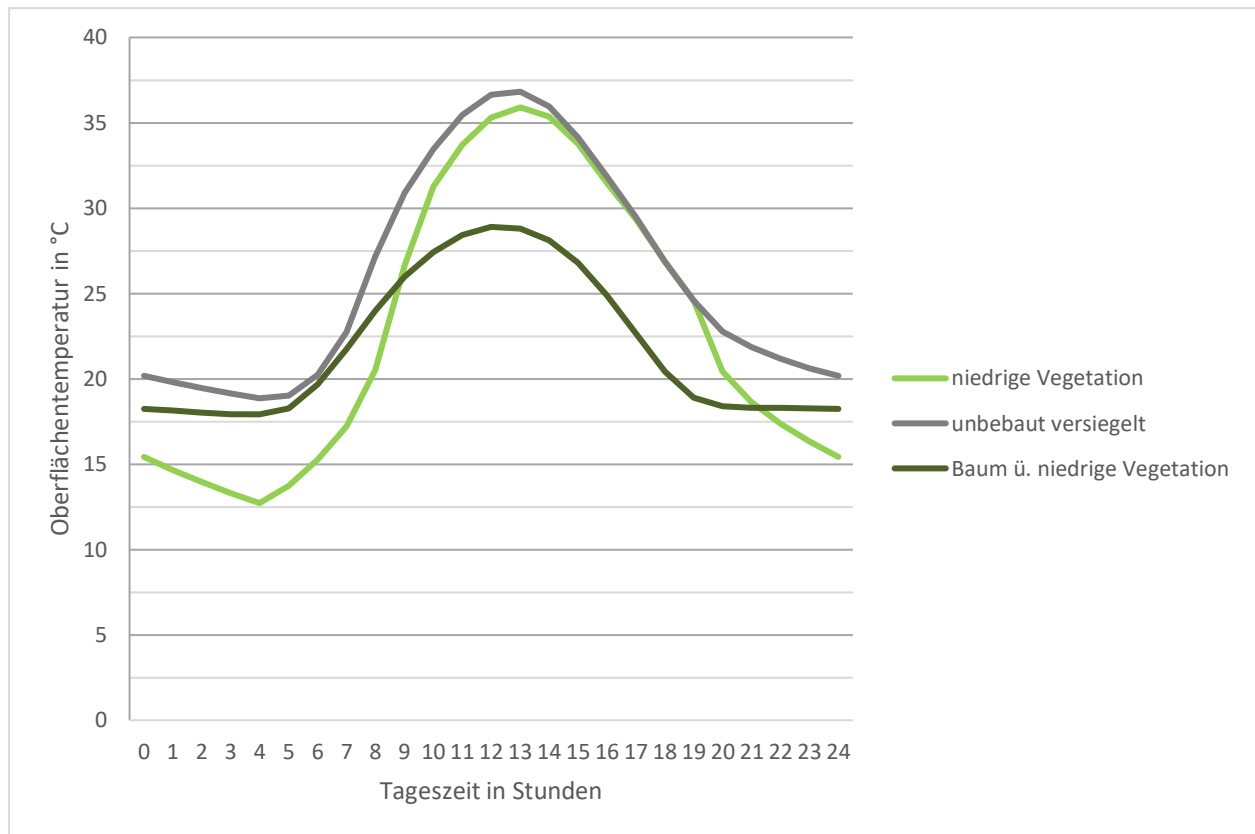


Abbildung 25: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITANH-3D

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 deutlich 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 26 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, wobei die Kurve im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen bleibt. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse



spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

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

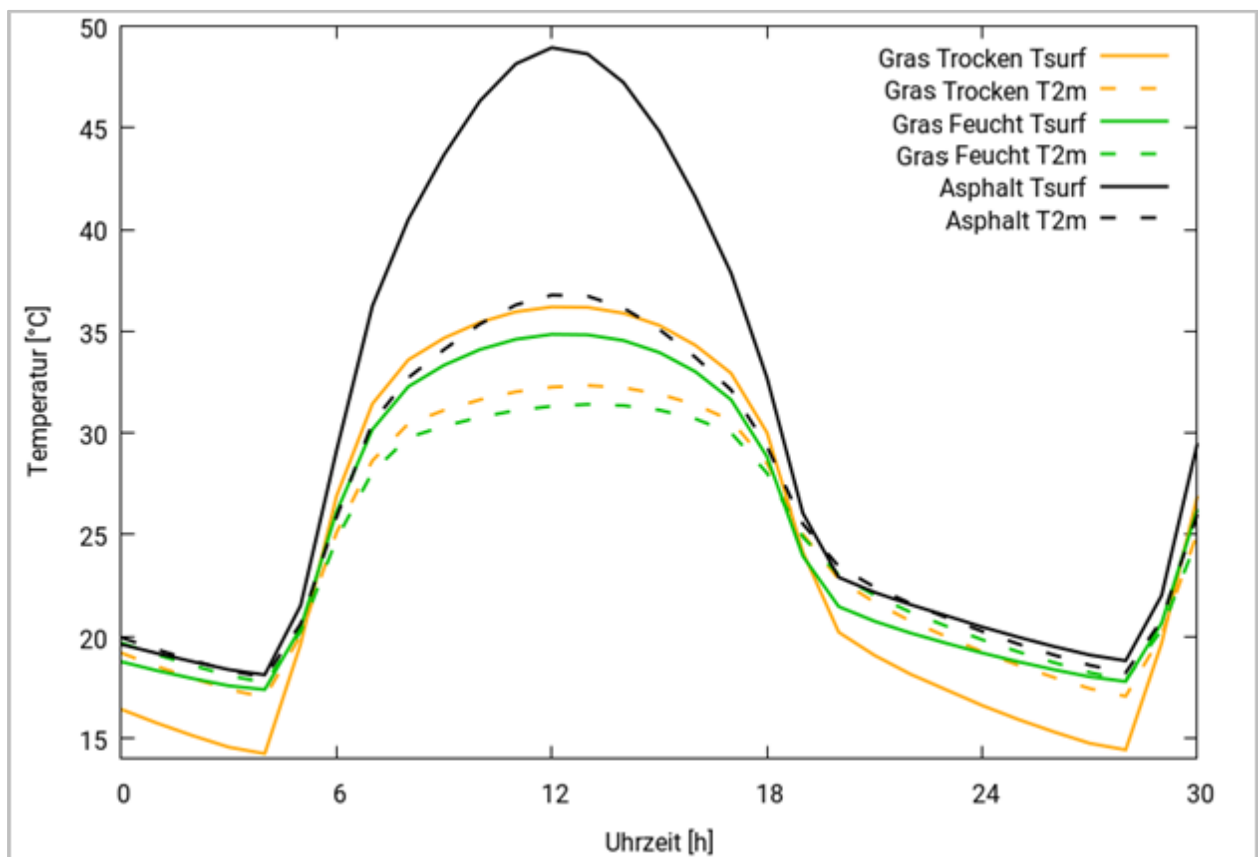


Abbildung 26: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages



5.1.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

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

- Geländehöhe
 - Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2023)
- Landnutzung
 - Landbedeckungsklassifizierung der Landeshauptstadt München (Stand 2023)
 - ALKIS-Gebäudeumrisse (Stand 2025)
 - Nutzungsflächen im Straßenraum (Stand 2024)
 - ALKIS-Nutzung (Stand 2025)
 - RGBI-Luftbilder⁵ (Stand 2023)
- Strukturhöhe
 - Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Stand 2023)
 - Lage von Lärmschutzwänden (Stand 2024)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Münchens wird aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens dem Jahr 2023 aufweisen. Da die Eingangsdaten zudem mittels der in der Software ESRI ArcGIS integrierten Luftbildern hinsichtlich ihrer Plausibilität verglichen wurden, kann **2024 als Bezugsjahr für den Status quo der Klimaanalyse** verstanden werden.

Außerhalb des Stadtgebiets wurde auf online frei verfügbare Daten aus dem Geoportal Bayern zurückgegriffen.

Untersuchungsgebiet

Das Stadtgebiet München erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 26,9 km in Ost-West- und 20,8 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von ca. 310 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet überspannt eine Fläche von rund 630 km² auf (ca. 29,4 km x 21,3 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Münchner Stadtklima berücksichtigt werden können.

⁵ Red Green Blue Intensity (RGBI) – Farbige Orthofotos mit der Kanalbelegung (Rot, Grün, Blau und Nahes Infrarot)

Geländehöhe

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

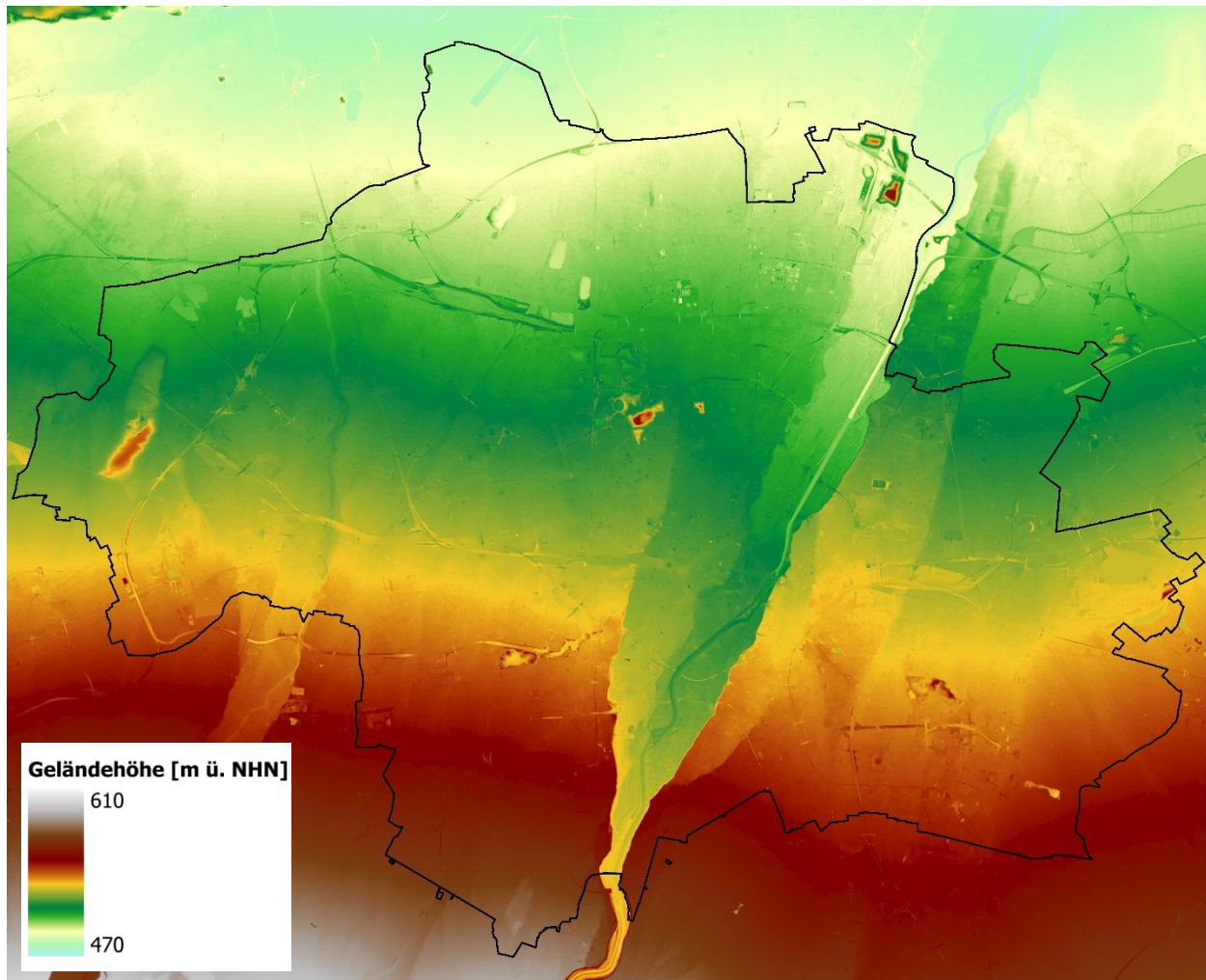


Abbildung 27: Digitales Geländemodell für München und die nähere Umgebung

Das Münchner Stadtgebiet liegt auf einer Höhe von im Mittel 520 m. Das Stadtgebiet steigt von Nord nach Süd an und weist dabei eine maximale Höhendifferenz von rund 100 m auf. Der höchste Punkt im Stadtgebiet ist mit ca. 580 m in Solln und der tiefste Punkt im Bereich der Isar bei der Fröttmaninger Heide bei etwa 480 m. Es ergeben sich somit teils deutliche Höhenunterschiede im Modellgebiet (Abbildung 27).

Die Topografie nimmt Einfluss auf die nächtliche Kaltluftströmung. In den benannten Bereichen der Erhebungen sowie im Isarauen Bereich treten Kaltluftabflüsse auf, die das klimatische Geschehen im Münchner Stadtgebiet beeinflussen.

Landnutzung

Die Münchner Landnutzung wird über verschiedene Landnutzungsklassen definiert, die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 28). Mit der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m ist es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsclassifizierung aufzulösen (vgl. Tabelle 7 auf Seite 58).

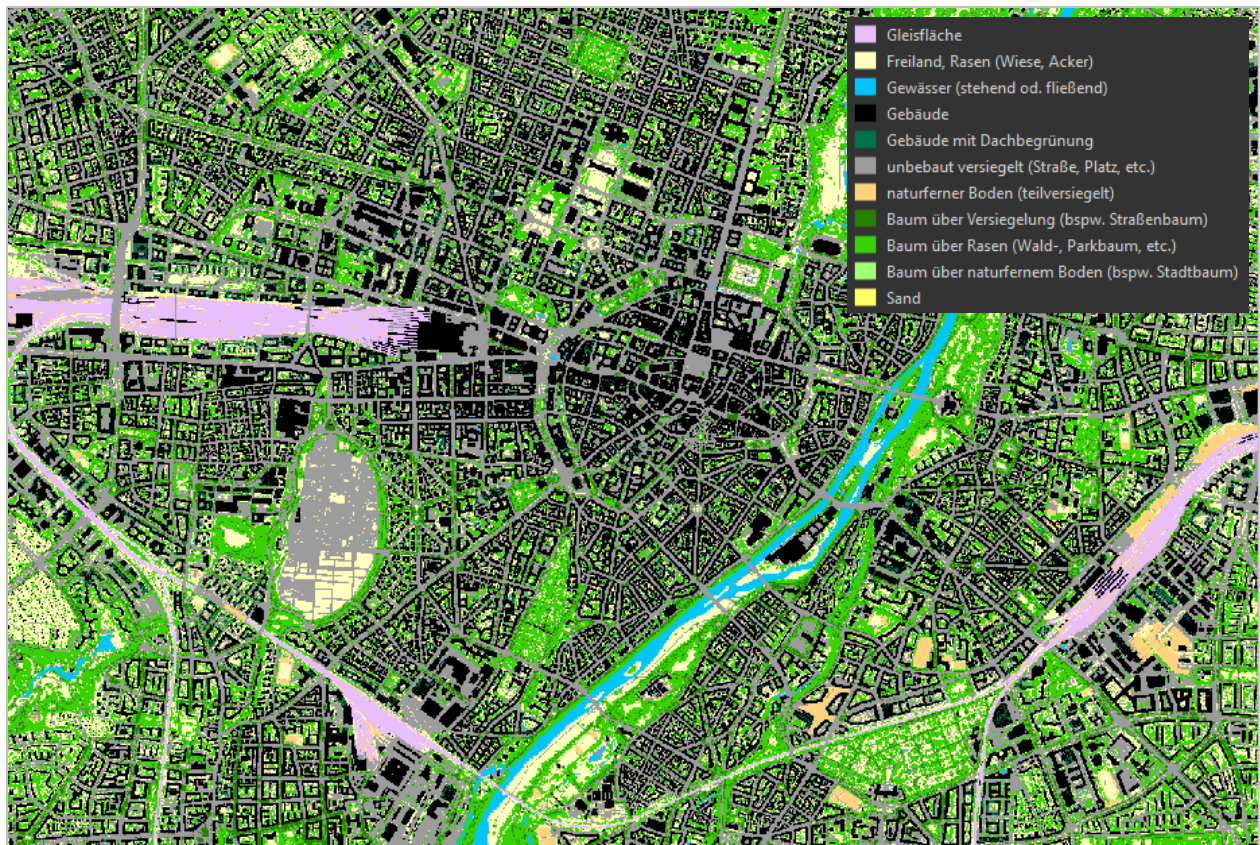


Abbildung 28: Modelleingangsdaten „Nutzungsklassen“ für den Ausschnitt der Münchner Kernstadt.

Zur Erfassung der Bäume wurde auf das Klassifikationsraster der Landbedeckungsdaten zurückgegriffen und die Baumhöhen wurden über das Digitale Oberflächen Modell (DOM) abgeleitet.

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 29). Aus diesen punkthaften Eingangsdaten ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet.

Geometrische Basis (Blockflächenebene)

Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnliche Flächeneinheiten erfolgen. Diese **Blockflächen** sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem; Stand 2023), die auf Basis von digitalen Orthophotos (Stand 2023) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

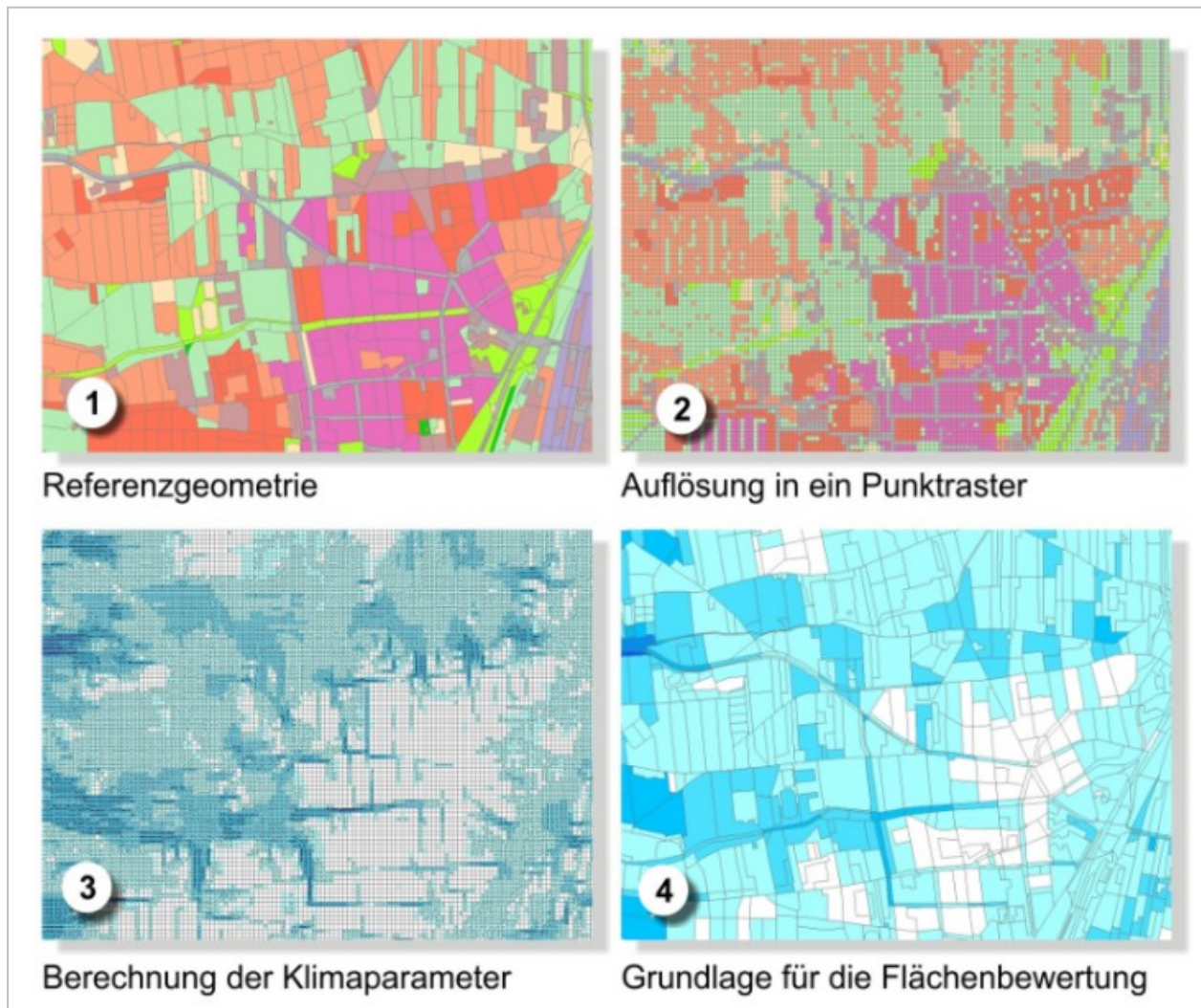


Abbildung 29: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation.

Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Klimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum (Kapitel 6), zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten (Verwendung z.B. in der Planungshinweiskarte in Kapitel 7).



5.1.3 SZENARIENENTWICKLUNG

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

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

Neben eigenentwickelten – und ggf. projektindividuellen - Analyse- und Auswerteroutinen werden im Rahmen der Delta-Methode auch bereits in der Planungspraxis/-theorie bzw. der Umweltmeteorologie etablierte Methoden eingesetzt. Hierzu gehören diskursorientierte Ansätze wie die Szenariotechnik (Fürst & Scholles, 2008) ebenso wie mathematisch-statistische Bewertungsverfahren (z.B. die Z-Transformation), die in verschiedenen umweltmeteorologischen Richtlinien beschrieben sind (VDI 3785, Blatt 1, 2008; VDI 3787, Blatt 1, 2015).

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

- Modul 1: Auswirkungen des Klimawandels (allmähliche Temperaturzunahme sowie reduzierte Bodenfeuchten aufgrund zunehmender Trockenheit (Seneviratne et al., 2021, Samaniego et al. 2018))
- Modul 2: Auswirkungen von Flächennutzungsänderungen (Stadtentwicklung, Stadtsanierung, Verkehrs-/Grünflächenplanung, Waldumbau)
- Modul 3: Auswirkungen von gebäude- und boden-/flächenbezogenen Anpassungsmaßnahmen

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

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu projizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Zukunft aufmerksam zu machen, ohne dabei davon auszugehen, dass diese Szenarien tatsächlich real werden. Eine Hauptfunktion von Szenarien ist, auf Alternativen und Varianten von Entwicklungen aufmerksam zu machen, um gegensteuern zu können (Abbildung 30, (Kosow & Gaßner, 2008; Wilms, 2006)). Es

gibt unterschiedliche Ansätze der Szenarienentwicklung, im Projekt kommt die vorausschauende (forecasting) Szenariomethodik zum Tragen.

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente - eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmaßnahmen in einem Szenariotrichter mit vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten (Abbildung 30). In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen - hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern 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.

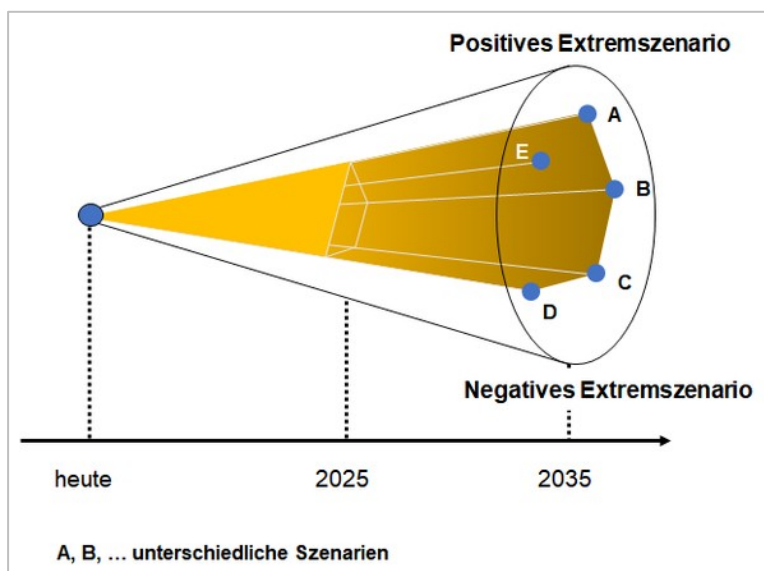


Abbildung 30. Der Szenariotrichter (Quelle: Business Wissen, 2023)

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das zukünftige Münchner Stadtklima in 4 weiteren Szenarien simuliert, zwei für das Jahr 2024 mit Änderungen an der Landnutzung und zwei für das Jahr 2055 (Tabelle 8). Als Stellschrauben zur Bestimmung des zukünftigen Stadtklimas wurden alle drei Module verwendet.



Tabelle 8: Modell-Szenarien zur Abbildung des Münchner Stadtklimas (2024 und 2055) und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in München (Stand 2024) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung⁶: 22,08 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 1 Mäßiger Klimawandel 2055	■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in München (Stand 2024) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 23,44 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 2 Starker Klimawandel 2055	■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in München (Stand 2024) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 24,99 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 %
Szenario 3 Baustein „Grüne Stadt“	■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in München (Stand 2024) ■ Ca. 3500 Baumstandorte im Verkehrsraum und öffentlichen Grünanlagen, welche von den Bezirksausschüssen gemeldet wurden ■ Straßenbereiche und öffentliche Plätze wurde mit mind. 30 % Kronenüberschirmung versehen ■ Max-Joseph-Platz, Sendlinger Tor Platz und Augustenstraße wurden in ihrer Nutzung umgestaltet/begrünt ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,08 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 4 Baustein „Wachsende Stadt“	■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in München (Stand 2024) ■ Zusätzliche B-Pläne (gesetzt seit 2014, aber bis August 2023 noch nicht baulich umgesetzt) inkl. Verkehrs- und Infrastrukturprojekte und LSW wurden eingearbeitet (ca. 30 Stück) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,08 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %

Szenario 1 und 2

Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für München Aussagen getroffen werden können, wie sich der Klimawandel etwa auf die Temperatur, Trockenheit oder den Niederschlag auswirkt (vgl. Kapitel 4.4). Dennoch besteht beim Blick in die Zukunft zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit, wie stark die jeweiligen Klimaänderungen tatsächlich auftreten. Aus diesem Grund wird für das zukünftige Stadtklima in München in zwei verschiedene Szenarien „Mäßiger Klimawandel 2055“ (Szenario 1) und „Starker Klimawandel 2055“ (Szenario 2) unterschieden. Die Auswahl bzw. Festlegung der beiden Szenarien erfolgte in Abstimmung mit der Stadt München (Auftraggeber der Untersuchung). Die Beobachtungen liegen oberhalb der projizierten Temperaturänderungen und es scheint so,

⁶ Lufttemperatur und Bodenfeuchte zum Start der Modellierung entsprechen den Standard-Werten, die bei stadtklimatischen Modellierungen mit FITNAH-3D angenommen werden. Die Starttemperatur wurde den aktuellen Stationswerten (langjähriges Mittel) entnommen.



dass selbst RCP 8.5 („Starker Klimawandel“) die Temperaturzunahmen unterschätzt. Im Szenario 1-Fall, dem „Mäßigen Klimawandel 2055“ wird die Lufttemperatur zu Beginn der Modellrechnung um 1,36 K, im Szenario 2-Fall „starker Klimawandel 2055“ um 2,91 K erhöht⁷. Diese Aufprägung des Temperatursignals basiert auf dem in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatz (Schär et al., 1996).

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 0,9 °C bzw. +1,9 °C). Zum anderen wird dem Modell für die Zukunftsszenarien eine geringere **Bodenfeuchte** infolge zunehmender sommerlicher Trockenheit vorgegeben: In Szenario 2 sinkt die Bodenfeuchte von 60 % auf 30 %. Die Bodenfeuchte zählt zu den Antriebsgrößen des Modells, wird durch das Modell aber nicht verändert, d.h. das Modell gibt keine Ergebnisse zur zukünftigen Bodenfeuchte in München aus. Eine geringere Bodenfeuchte beeinflusst aber die stadtklimatischen Modellergebnisse und sorgt insbesondere der Tagsituation für eine höhere bodennahe Lufttemperatur. Diese ist auf die wegfallende Verdunstung von Landnutzungsklassen mit niedriger Vegetation zurückzuführen, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein größeres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (Caissie, 2006; IPCC, 2013). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von 1/2 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 0,68 °C bzw. 1,45 °C).

Neben den oben genannten drei Szenarien wurden noch zwei weitere Szenarien für das Münchner Stadtgebiet simuliert, welche beide die klimatischen Randbedingungen wie die Simulation für den „Status quo“ verwenden (s. Tabelle 8). Die Details zu den Szenarien 3 und 4 werden nachfolgend näher erläutert.

⁷ Die Ergebnisse zum erwarteten Klimawandel stützen sich auf ein Modellensemble der EURO-CORDEX-Initiative, das die RCP-Szenarien des Weltklimarates (IPCC) als verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.4).

Das für die Modellierung verwendete Klimaänderungssignal der Temperatur ergibt sich als Differenz der sommerlichen Temperaturen zwischen der Zukunftsperiode 2041-2070 (Bezugsjahr 2055) und jeweils der Referenzperiode 1991-2020. Für den „mäßigen Klimawandel“ beruht das Änderungssignal auf dem 15. Perzentil aller Modellläufe des RCP 4.5, für den „starken Klimawandel“ auf dem 85. Perzentil des RCP 8.5.



Szenario 3 Baustein „Grüne Stadt“

Im Szenario 3 Baustein „Grüne Stadt“ wurden ca. 3.500 Bäume im öffentlichen Straßenraum und in öffentlichen Grünanlagen angenommen. Anschließend ist eine gesamtstädtische Begrünung durch Bäume in den Straßenbereichen und Plätzen mit Aufenthaltsqualität erfolgt, sodass für alle Straßenräume und Plätze eine Baumkronenüberschirmung von mindestens 30 % erreicht wurde. Somit kann in diesem Szenario die Wirkung der Vision 2 „30 % Kronenüberschirmung auf öffentlichen Straßen und Plätzen“ aus dem Beschluss Klimaresilientes München 2050 simuliert und dargestellt werden. Dabei war die Vorgabe für den zur Verteilung der Bäume eingesetzten sogenannten Randomisator, Kreuzungsbereiche und Brücken so weit wie möglich freizuhalten. In Einzelfällen sind jedoch aus technischen Gründen Fehler aufgetreten und es wurden Bäume auf Plätzen und Brücken gesetzt, welche aber nicht realisierbar sind. Zusätzlich wurden ausgewählte Bereiche wie der Marienhof, der Max-Joseph-Platz, der Sendlinger Tor Platz und die Augustenstraße in ihrer Erscheinung umgestaltet / teilweise entsiegelt und begrünt.

Um die Straßenbereiche eindeutig definieren zu können wurde von Seiten der Stadt München ein entsprechender Layer mit den Straßengeometrien zur Verfügung gestellt (s. Abbildung 31). Auf dieser Basis konnten in einem nächsten Schritt die Rasterzellen mit dem Attribut „Straße“ eindeutig zugewiesen werden (s. Abbildung 32). Zur Realisierung der stadtweiten Begrünung der Straßenbereiche wurde mittels eines „Randomisators“ die neuen Standorte der Bäume festgelegt und im Nutzungsraster verankert (s. Abbildung 33 und Abbildung 34). Bei der Auswahl der Baumstandorte gab es stets bestimmte Prüfschritte bzw. Regeln:

- Prüfung der Nachbargitterpunkte: links daneben, darunter und schräg links darunter ebenfalls Baumstandort möglich?
- Die drei folgenden Bäume werden unabhängig voneinander gesetzt
- Es können an einem Ort durch das Clustering also 1 bis 4 Bäume direkt nebeneinanderstehen
- Im Anschluss Wiederholung mit dem ersten Baum und dann den drei Folgebäumen, bis alle neu zusetzenden Bäume platziert sind



Abbildung 31: Darstellung der „Straßenbereiche“ (blau), wie sie als Grundlage für die Auswahl der Straßen-Rasterflächen berücksichtigt wurden.

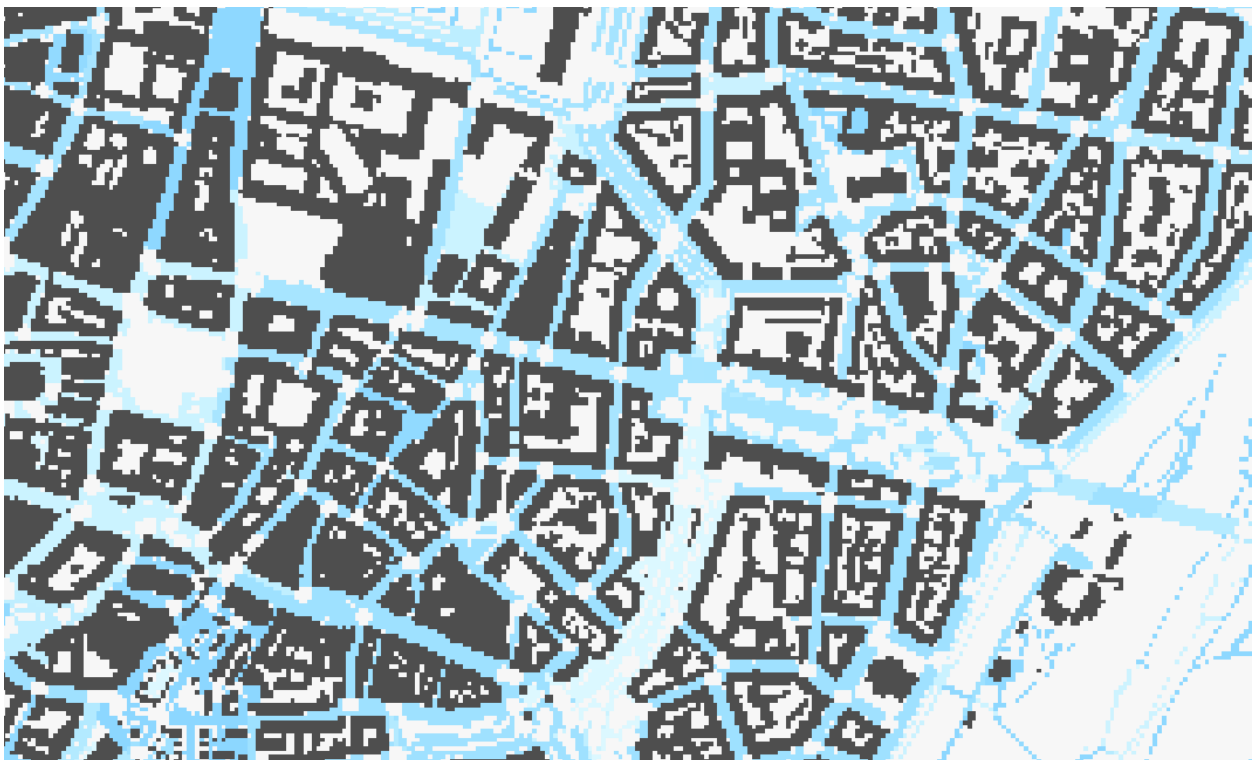


Abbildung 32: Darstellung der „Straßen“-Rasterflächen (blau), wie sie in den „Randomisator“ eingespeist wurden.

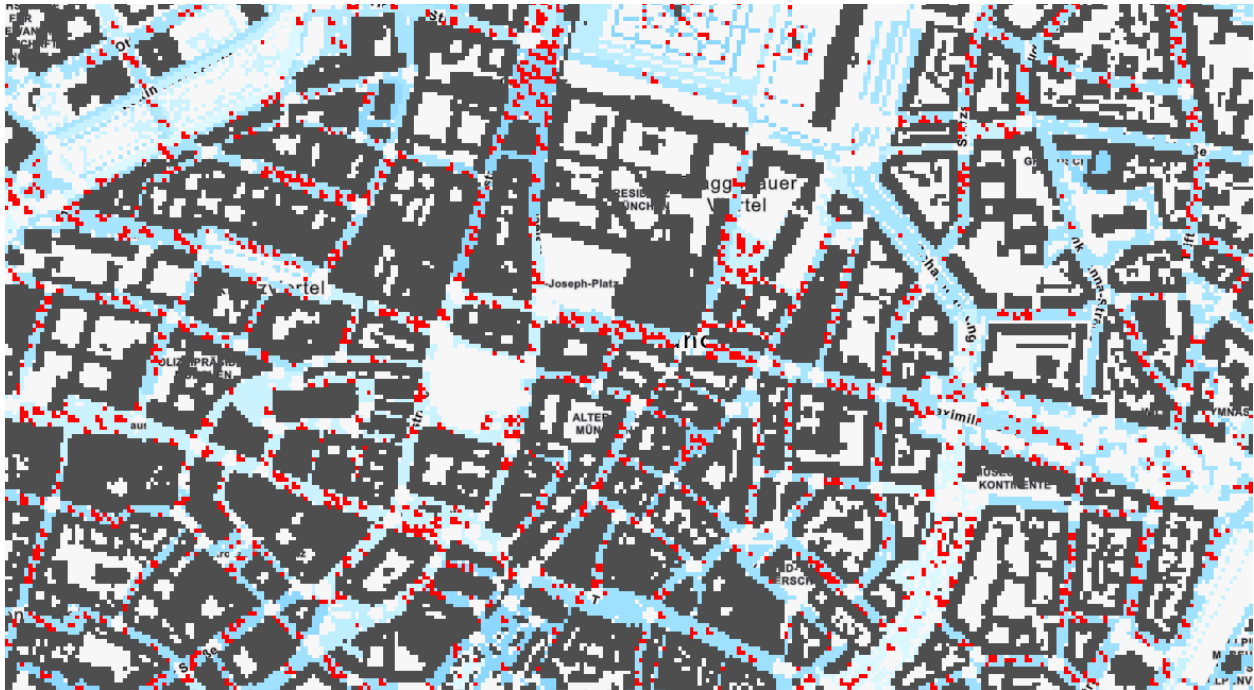


Abbildung 33: Darstellung der „Straßen“-Rasterflächen (blau) und der mittels Randomisator ermittelten neuen Baumstandorte (rot) für das Szenario Baustein „Grüne Stadt“.



Abbildung 34: Nutzungsraster „Status quo“ mit den neuen Baumstandorten (rot) aus dem Szenario Baustein „Grüne Stadt“.



Ein Vergleich der beiden Nutzungsraster von dem Szenario „Status quo“ und dem Szenario „Grüne Stadt“, zeigt die Änderungen wie die Umgestaltung im Bereich des Marienhofs und des Max-Joseph-Platz sowie die zusätzlichen Baumstandorte in den Straßenbereiche, wie bspw. entlang der Ludwigstraße. Der Max-Joseph-Platz am Westende der Maximilianstraße stellt sich im Bestand als komplett versiegelt dar. Die Interims-Umgestaltung im Szenario „Grüne Stadt“ (als zeitweiser Ersatz für die Baustelle am Marienhof) sieht neben Baumstandorten (in Kübeln) im gesamten Platzbereich eine Entsiegelung im runden Zentrumsbereichs des Platzes vor. Die unmittelbar südwestlich befindliche Fläche „Marienhof“ ist im Bestand ebenfalls als komplett versiegelt angenommen. Hier befindet sich gegenwärtig eine Großbaustelle. Im „Grünen Szenario“ ist diese Fläche gänzlich begrünt, sowie sie auch bis zum Jahr 2017 bereits vorhanden/gestaltet war, als öffentliche Grünfläche. Zusätzlich wird die Fläche mit Bäumen bestellt.

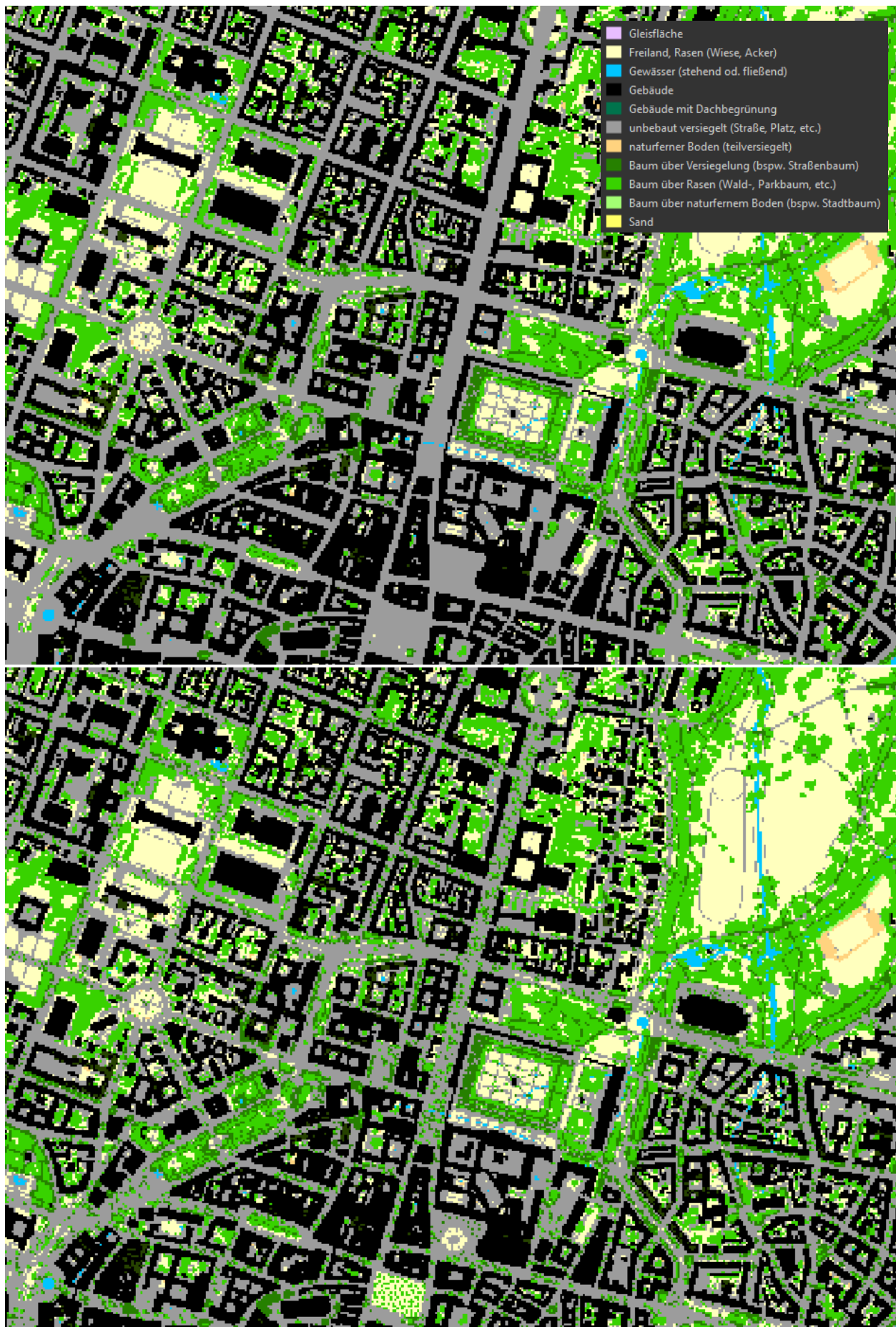


Abbildung 35: Vergleich Nutzungsraster Status quo (oben) und Szenario 3 "Grüne Stadt" (unten).

Szenario 4 Baustein „Wachsende Stadt“

Beim Szenario 4 Baustein „Wachsende Stadt“ wurden zusätzlich 30 Bebauungspläne (Bedingung: seit 2014 gesetzt, aber bis August 2023 noch nicht umgesetzt) inkl. Verkehrs- und Infrastrukturprojekte inkl. Lärmschutzwände im Münchner Stadtgebiet realisiert. Die Ausgestaltung wurde vom Auftraggeber vorgegeben. Eine Übersicht der räumlichen Lage und Verteilung der berücksichtigten Vorhaben sind in der nachfolgenden Abbildung für das gesamte Stadtgebiet dargestellt.

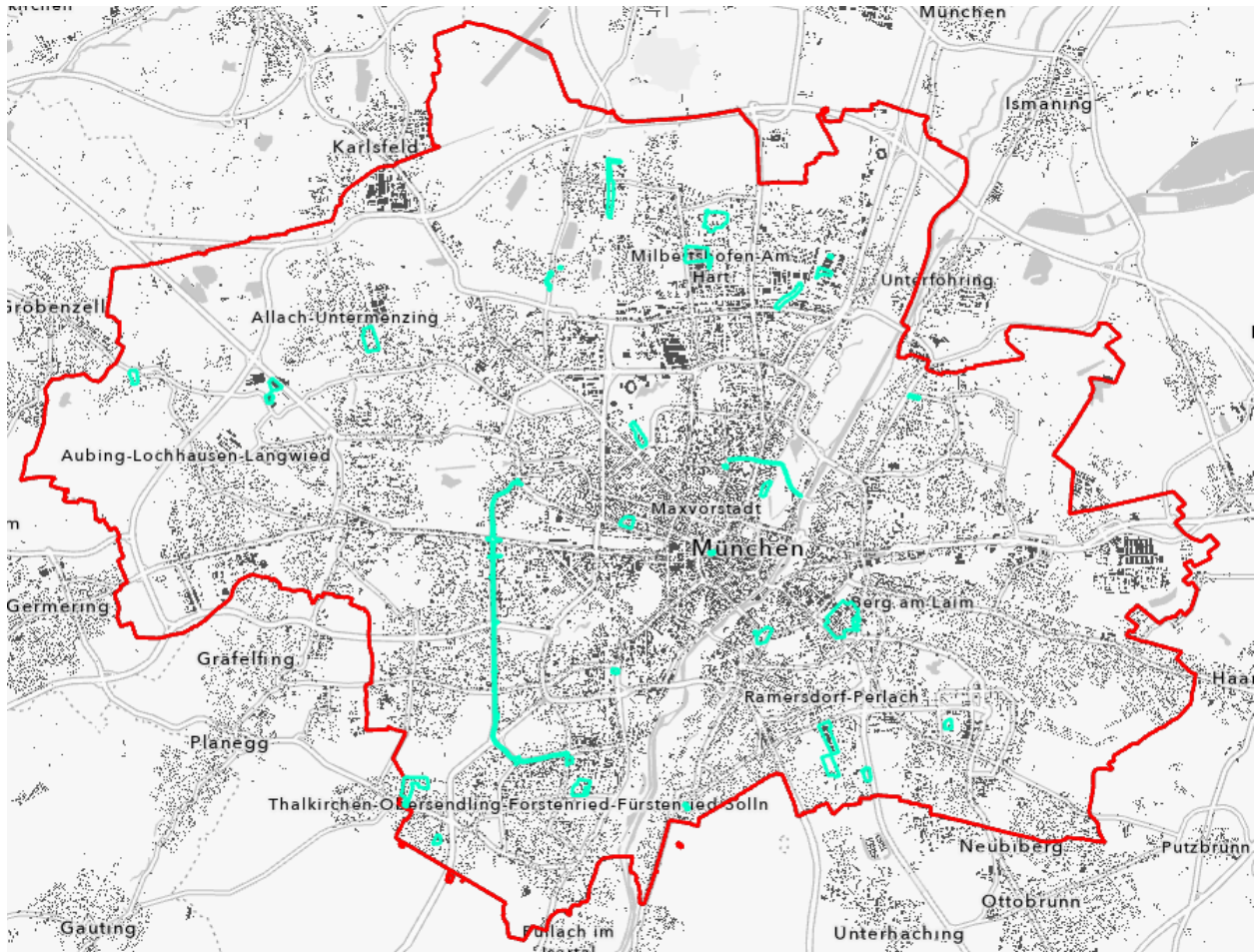


Abbildung 36: Übersicht der im Baustein „Wachsende Stadt“ integrierten Entwicklungsflächen (grün markiert).

Bezogen auf das gesamte Stadtgebiet fallen die Änderungen in den Nutzungsklassen sehr klein aus und liegen deutlich unterhalb von 0,1 %. Dennoch lässt sich feststellen, dass die stärkste Zunahme in der Klasse „Gebäude“ gibt, gefolgt von den Klassen „Freiland“, „Gleis“ und „Baum über Versiegelung“. Abnahmen der Klassenanteile gegenüber dem Status quo gab es am stärksten in der Klasse „versiegelt“ gefolgt von „teilversiegelt“ und „Baum über Rasen“.

Es ist anzumerken, dass großflächige Stadtentwicklungsmaßnahmen wie der Münchner-Norden oder der Münchner-Nordosten, welche bereits eine klimaökologische Begleitung erfahren, hier nicht mit in die Untersuchung aufgenommen wurden. Diese befinden sich im Stadium vorbereitender Untersuchungen, deren Planungsansätze im weiteren Verlauf konkretisiert werden.



Nachfolgend ist das Beispiel für ein Gewerbegebiet an der Schleißheimer Straße dargestellt. Ein Blick auf die Änderung der Nutzungsklassen zeigt, dass sich mit der Entwicklung des Gewerbegebietes die Klasse „versiegelt“ mit rund 30 % hin zu der Klasse „Gebäude“ verlagert. Dies ist auf die großflächige Errichtung der Plangebäude zurückzuführen. Gleichzeitig bleibt der „Freiland“-Anteil gleich. Der Anteil von „Baum über Rasen“ geht um ca. zwei Drittel zurück.

Eine Übersicht der Anteile ist in

Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Vergleich der Anteile der Nutzungsklassen im Plangebiet zwischen dem Nutzraster Status quo und dem Szenario „Wachsende Stadt“

Nutzungsklasse	Status quo	„Wachsende Stadt“
Gebäude	11 %	44 %
Versiegelt	49 %	29 %
Teilversiegelt	1%	0 %
Baum über Versiegelung	0 %	2 %
Baum über Rasen	22 %	8 %
Freiland	17 %	17 %



Abbildung 37: Vergleich Nutzungsrastraster Status quo (oben) und Szenario 4 "Wachsende Stadt" (unten) am Beispiel eines Gewerbegebiets in der Schleißheimer Straße.

5.1.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sog. **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 München jeden Sommer mehrfach auf. In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel knapp 27 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 29 % entspricht – etwas mehr als jede vierte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen. (s. Kapitel 4.3). Diese Wetterlage ist durch lokale und regionale Einflüsse bestimmt und zeichnet sich durch schwache Windströmungen und ungehinderte Ein- und Ausstrahlungsbedingungen aus. Somit herrschen ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung vor. Am Tage resultiert dies in einer Situation, die durch eine hohe Hitzebelastung gekennzeichnet ist.

Um die regionalen Winde im Großraum (hier: „Alpines Pumpen“) berücksichtigen zu können, wurde ein sog. Nesting-Verfahren eingesetzt. Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus der landesweiten Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsplanung in Bayern (Bayerisches Landesamt für Umwelt/GEO-NET 2021). Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungsgeschehen an den kleineren Untersuchungsraum weitergegeben. Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 Uhr bis um 14:00 Uhr des Folgetages zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Dabei wird der dreidimensionale Atmosphärenzustand alle 2 Sekunden neu berechnet. Die Wetterlage wird durch einen wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen (typisch, lokalen) Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in München 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 38 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und die 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.

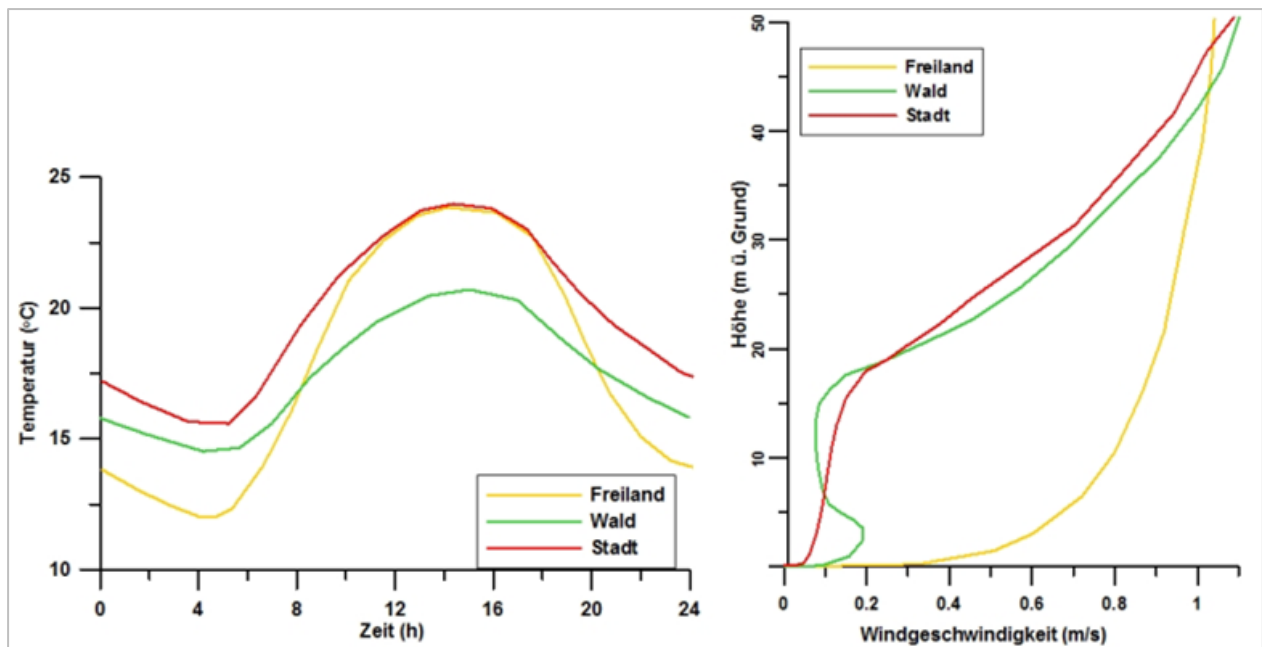


Abbildung 38: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach (Gross, 1992)).

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die vier Modellrechnungen erfolgte auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes (Schär et al., 1996). Demnach wurden die **zwei Modellsimulationen** mit einem entsprechenden Delta von +1,36 K (Ensemble zum RCP 4.5; Szenario „mäßiger Klimawandel 2055“) und +2,91 K (Ensemble zum RCP 8.5; Szenario „starker Klimawandel 2055“) versehen. Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert (Abbildung 39). Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 19,9 °C bzw. 20,8 °C bzw. 22,3 °C.

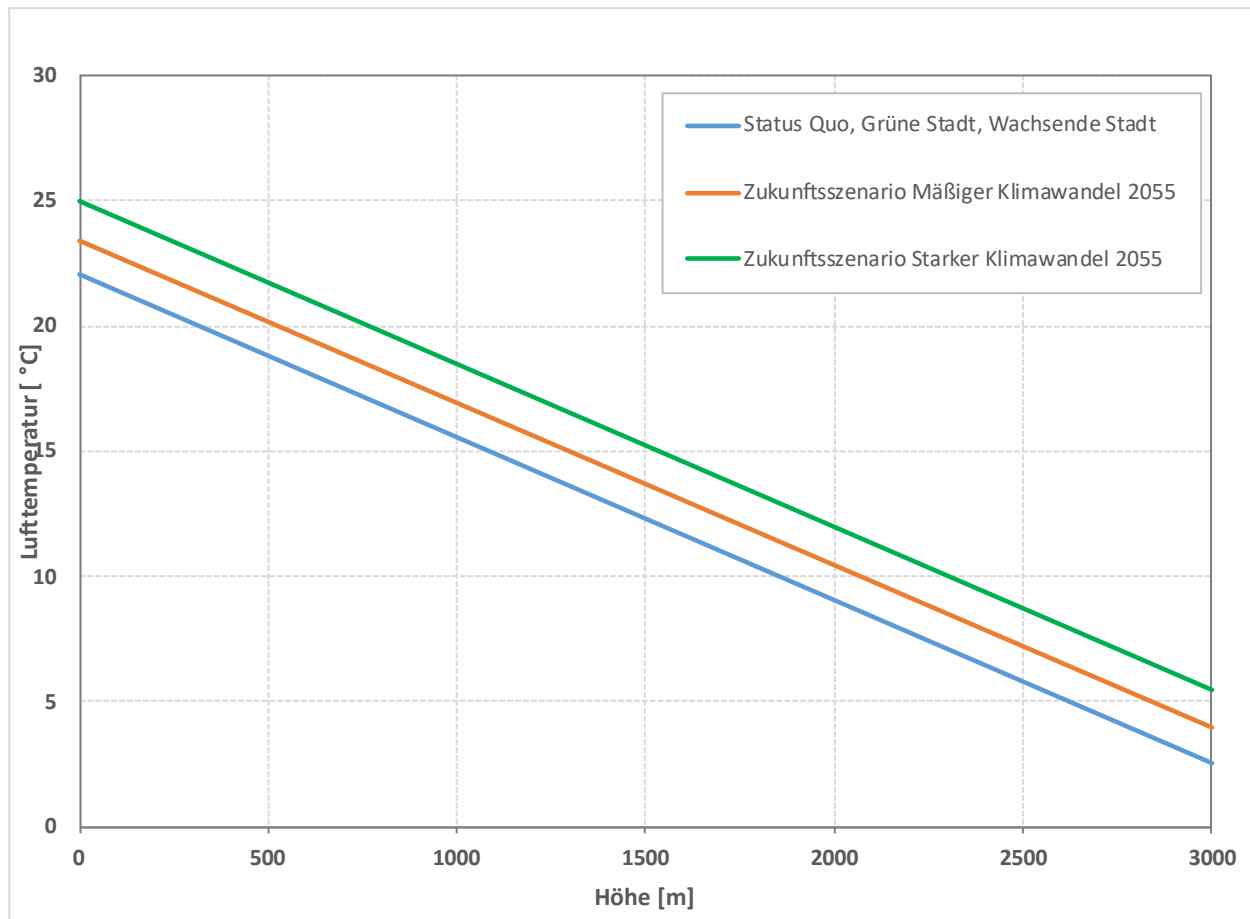


Abbildung 39: Ausgangsprofile der Lufttemperatur für die Bestandssituation, Grün Stadt und Wachsende Stadt (blaue Kurve) sowie für die Szenarien Mäßiger Klimawandel (orange) und Starker Klimawandel (grün).

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Erdbodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von $\frac{2}{3}$ des Deltas berücksichtigt. Zum anderen wurde die Bodenfeuchte im grünen Szenario (Szenario „Starker Klimawandel 2055“) unter den Welkepunkt gesenkt. In Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation ist nicht mehr ausreichend Wasser vorhanden, welches dann nicht mehr verdunsten kann, sodass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt. Demgegenüber liegt die Bodenfeuchte in der Referenzsituation bei 60 % und damit deutlich über dem Welkepunkt. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein größeres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (IPCC 2014). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von $\frac{1}{2}$ des Deltas berücksichtigt.

Die gewählten Startbedingungen repräsentieren bewusst 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 auf Basis der, in klassi-

schen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen, betrachteten Maßnahmenets entschärft werden zu können. Dennoch besitzen selbstverständlich die in dem Szenario 1 („Mäßiger Klimawandel 2055“) durchgeführten Maßnahmen, die zum Erreichen des RCP 4.5 – Pfades notwendig sind, das Potential, auch absolute Extremwetterlagen in ihrer gesundheitlichen Wirkung zu reduzieren. Ergänzend sind hier allerdings zusätzliche sozial-medizinische Maßnahmen im Rahmen eines Hitzeaktionsplans angeraten (BMU 2017). Im Münchner Klimaanpassungskonzept werden drei Maßnahmen in der Arbeitsgruppe „Gesundheit“ umgesetzt.

5.1.5 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 auch für noch kürzere - Zeitschnitte aus (Tabelle 10). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte (GB). Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W Komponenten des Windes) sowie die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 10: Von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter

Parameter und Einheit	Einheit	Dimensionalität
U-Komponente des Windes	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
V-Komponente des Windes	[m/s]	
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	
Potenzielle Lufttemperatur	[K]	
Diffusionskoeffizient Momentum	[m ² /s ²]	
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	
Luftdruck	[N/m ²]	
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	
		Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sog. post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar.

Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 11). In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt - handelt es sich dabei insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit



existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert (das Integral/das Volumen berechnet) wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.

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

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension	Im Projekt ausgewertet
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja
Kaltluftproduktionsrate	$\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftvolumenstromdichte	$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftmächtigkeit	m	Individuell ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja



5.2 QUALITÄTSSICHERUNG

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

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den fünf Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung der Stadtstruktur im Wirkgefüge mit dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Demnach durchliefen alle Modellläufe erfolgreich die Qualitätssicherung.

Tabelle 12: Ergebnisse der Qualitätssicherung

Modellauf	Ergebnis der Qualitätssicherung
Bestandsfall „Status quo“	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel 2055“	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario 2 „Starker Klimawandel 2055“	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario 3 „Grüne Stadt“	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario 4 „Wachsende Stadt“	Qualitätssicherung erfolgreich



5.3 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätze der Fachdisziplin (Messungen, klimatopbasierte GIS-Analysen) aufgrund ihres physikalischen, flächendeckenden und das Kaltluftprozess-geschehen berücksichtigenden Outputs überlegen. Dennoch sind Modell Anwendungen mit Unsicherheiten verbunden, auf die im Sinne eines umfassenden, auf Transparenz und Akzeptanz ausgerichteten Analyse-ansatzes hingewiesen werden muss. Die Unsicherheiten lassen sich unter den folgenden Überschriften ein-ordnen:

- 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 wol-len dieses lediglich hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das an-visierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Auf-gabe notwendig sind. FITNAH erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie (VDI 3783, Blatt 7, 2017) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben kön-nen. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Rey-nolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei den Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ist.

Zu den **internen Unsicherheiten** gehört darüber hinaus auch das sog. „**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 insbeson-dere dann von Bedeutung, wenn die entsprechende Analyse auch Szenarienrechnungen enthält – also z.B. die Auswirkungen des zukünftig zu erwartenden Klimawandels, von Stadtentwicklungsszenarien und/oder Maßnahmenzenarien abzubilden hat. Für das bodennahe Temperaturfeld in FITNAH-3D liegt das Modell-rauschen bei +/- 0,1 - 0,2 K pro Rasterzelle und Zeitschnitt. Das ist eine sehr geringe Unsicherheit, die sich bei der geostatistischen Aggregation auf größere Flächeneinheiten noch einmal verringert. Analog gilt dies auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltlufthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der Basisgeometrie. 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. 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 auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

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

Vergleichbares gilt auch für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer flächendeckenden Stadtbodenkartierung abgeleitet werden und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Ein städtischer Geodatenatz ist aber 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 zu einem Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K führen kann, was wiederum auch 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 dann auch modelltechnisch abgebildet werden können.

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und den Szenarien differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.1.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation muss attestiert werden, dass deren Veröffentlichung zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Analysetätigkeit bereits ca. 2 Jahre in der Vergangenheit lag.

Darüber hinaus existiert keine groß- oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die hätten Berücksichtigung finden können. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist.

Zusammenfassend kann also 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 auch deutlich geworden, dass diese Unsicherheiten allenfalls kleinräumig relevant sind und folglich auf die zentralen Ergebnisse der vorliegenden Analyse einen zu vernachlässigenden Einfluss haben dürften. Nichtsdestotrotz wird es die Aufgabe des gesamten Fachgebiets der kommenden Jahre sein, die bestehenden Unsicherheiten weiter zu reduzieren und die Modellergebnisse auf einem sehr hohen Niveau noch weiter zu verbessern.

6. Analyseergebnisse

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter **Lufttemperatur**, **Kaltluftvolumenstrom** und **Strömungsfeld** (Nachtsituation) sowie **Physiologisch Äquivalente Temperatur** (PET; Tagsituation) für den Status quo und die vier Zukunftsszenarien beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kapitel 4.3). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet.

Zusätzlich wird die **Klimaanalysekarte** als „Synthesekarte“, welche das nächtliche Strömungsgeschehen und die thermischen Bedingungen darstellt als parameterübergreifendes Kartenwerk erläutert und dargestellt.

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt wurden in gelayouteten Karten als QGIS- Kartenpaket visualisiert und inkl. Legenden sowie als hochauflösende .pdf-Dokumente/Karten der Stadt München übergeben (s. Kapitel 7.7). Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug: ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben.

6.1 ERGEBNISSE STATUS QUO, SZENARIO 1 UND SZENARIO 2

6.1.1 NACHTSITUATION

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

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Status quo von ca. 15 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis über 21 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in München damit eine Spannweite von mehr als 6 °C (Abbildung 40). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 17,5 °C.

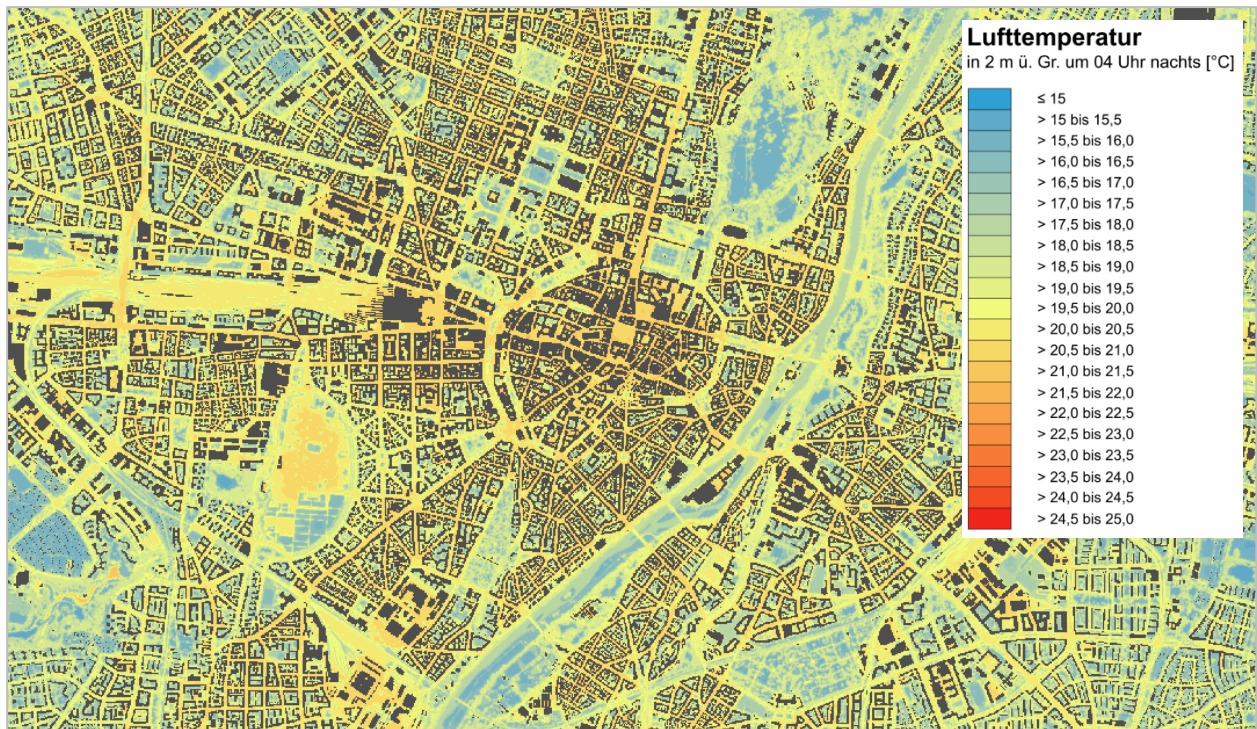


Abbildung 40: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur (T04) im Status quo Szenario in der Münchner Kernstadt (verkürzte Legende)

Die höchsten nächtlichen Belastungen (über 21 °C) treten vorwiegend in der Münchner Innenstadt (bspw. Marienplatz, Kaufingerstraße, im Bereich der hoch versiegelten und großflächig überbauten Gewerbe- und Industriegebiete auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum mit Werten zwischen 16 – 18 °C finden sich in den vielen umliegenden Stadtteilen mit aufgelockerten Wohnbebauungen und in vielen Bereichen der Außenstadtteile.

Grünflächen (wie Isarauen, Hofgarten, Königsplatz oder der Olympiapark) wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen (vorwiegend die Ackerflächen) am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 15,5 - 18 °C auf. In Wäldern bzw. dicht mit Bäumen bestandenen Flächen mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit die Auskühlung der Oberfläche, sodass im (hier betrachteten) bodennahen Bereich Werte um 17 – 19 °C erreicht werden. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüneten Siedlungsräumen bedeutet, nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden.

In den Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine flächendeckende Erwärmung des Münchner Stadtgebiets (Abbildung 41). **Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben bestehen und damit bleibt auch der Wärmeinseleffekt auf einem vergleichbaren Niveau erhalten.** Die bereits oben erwähnten Innenstadtbereiche von München, sowie die Industrie-/Gewerbeflächen, sind nach wie vor die am stärksten überwärmten Bereiche und im Szenario 2 „Starker Klimawandel“ werden nächtliche Temperaturen über 23 °C erreicht. Begrünte innerstädtische Flächen sowie die aufgelockert bebauten Bereiche stellen dagegen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar und siedlungsferne Freiflächen kühlen am stärksten aus. Ein Vergleich verschiedener Bereiche zwischen den drei Szenarien zeigt Tabelle 13.

Tabelle 13: Übersicht der nächtlichen Lufttemperatur zwischen den Szenarien und Nutzungen

Szenario	T04 Freifläche nördlich Feldmoching [°C]	T04 Innenstadt Marienplatz [°C]	T04 Gewerbe Euro-Industriepark [°C]	T04 Waldgebiet Obersendling [°C]
Status quo	16,1	21,0	20,6	18,3
Szenario Zukunft 1	17,4	22,3	21,9	19,7
Szenario Zukunft 2	18,9	23,9	23,5	21,2

Es zeigt sich, dass sich in allen Bereichen (Freiflächen, hoch versiegelte Innenstadt, Waldfläche) Temperaturzunahmen durch die beiden berücksichtigten Klimasignale in ähnlicher Weise ausprägen.

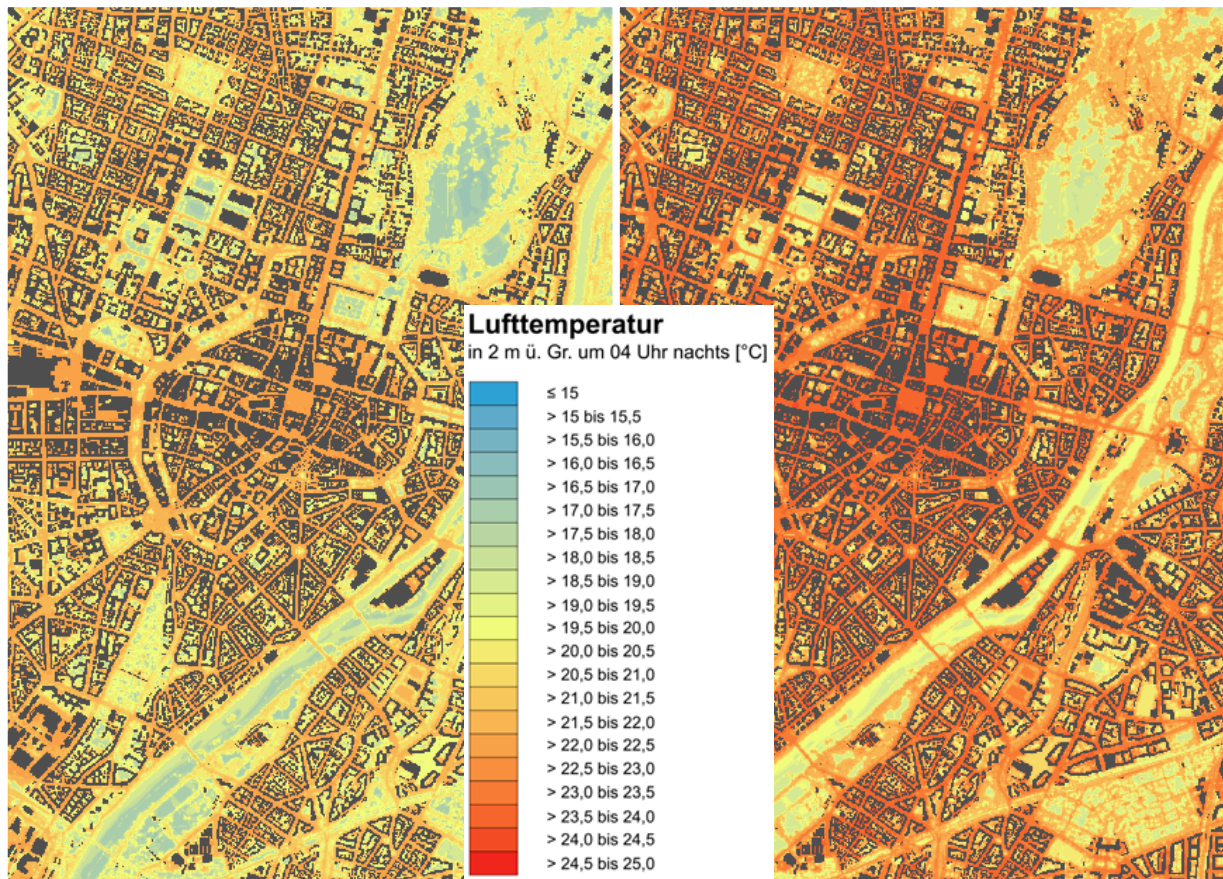


Abbildung 41: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel 2055“ (links) und Szenario 2 „Starker Klimawandel 2055“ (rechts) in einem Ausschnitt des München Stadtgebiets (verkürzte Legende).

Der **Kaltluftvolumenstrom** wird im Münchner Stadtgebiet durch das Relief bestimmt, durch den Anstieg nach Süden hin ergibt sich eine große Variabilität und reicht von sehr geringen bis zu maximalen Werten über $40 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$. Die Höchstwerte werden am Südrand, außerhalb des Stadtgebietes bspw. im Bereich von Planegg, sowie am Nordostrand im Bereich östlich der Allianz Arena erreicht. Im übrigen Stadtgebiet werden die Werte von $20 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{m})$ kaum überschritten.

Die gesamthafte Betrachtung des Stadtgebietes, wie in Abbildung 42 dargestellt, zeigt, dass es Bereiche mit erhöhtem Kaltluftvolumenstrom im Stadtgebiet gibt. Dazu zählen die bereits erwähnten Randbereiche im Süden und im Norden, sowie weitere an der Westgrenze des Stadtgebietes. Außerdem zeigen sich inmitten des Stadtgebietes zwei „Cool-spots“ mit der Theresienwiese und dem Olympiapark.

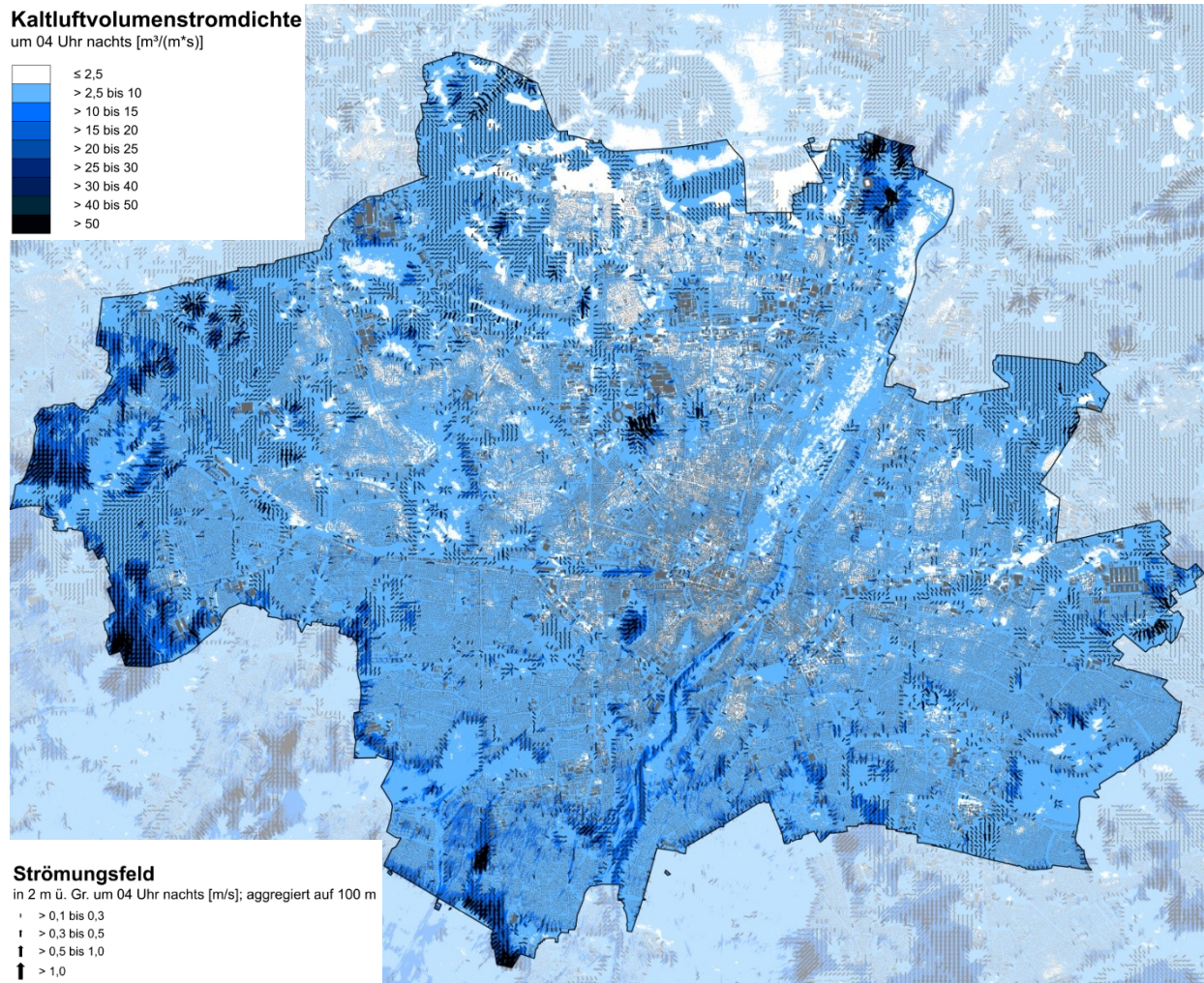


Abbildung 42: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo Szenario in dem Münchner Stadtgebiet (verkürzte Legende).

Die für den Münchner Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte in Form von Kaltluftleitbahnen etc. hervorgehoben (Kapitel 6.2).

Die Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht auf, sodass in vielen Hangbereichen auch bodennah eine Durchströmung mit Kaltluft stattfindet. In Abbildung 43 ist das **Strömungsfeld der bodennahen Kaltluftströmung** über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 100 m aggregiert wurden. Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe

Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert (z.B. Gebäude umströmt) und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

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

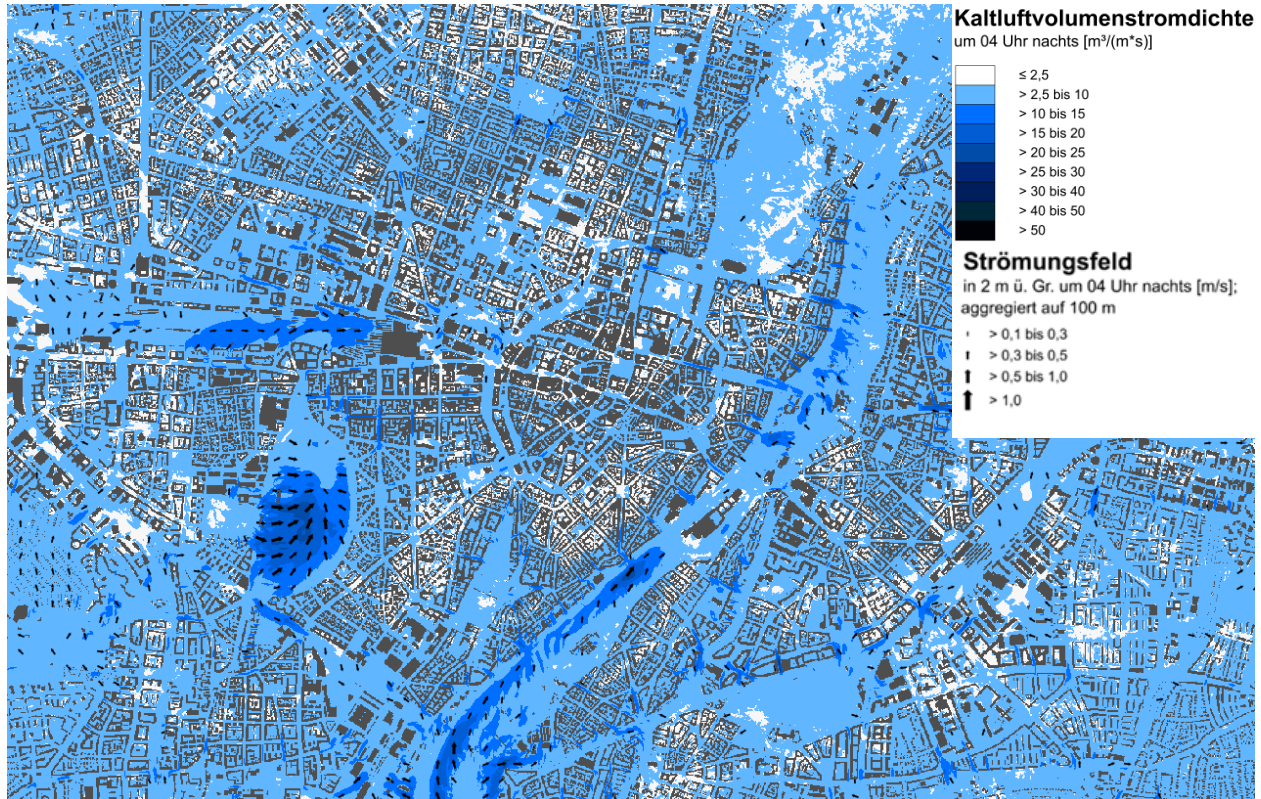


Abbildung 43: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo Szenario in München (verkürzte Legende).

Infolge des Klimawandels ergeben sich keine nennenswerten Änderungen des Kaltluftprozessgeschehens, da das Relief als wesentlicher Antrieb unverändert ist und die nächtliche Temperatur flächendeckend in einem ähnlichen Ausmaß steigt, sodass sich keine neuen temperaturinduzierten Flurwinde ausbilden (vgl. Abbildung 44 und Abbildung 45).

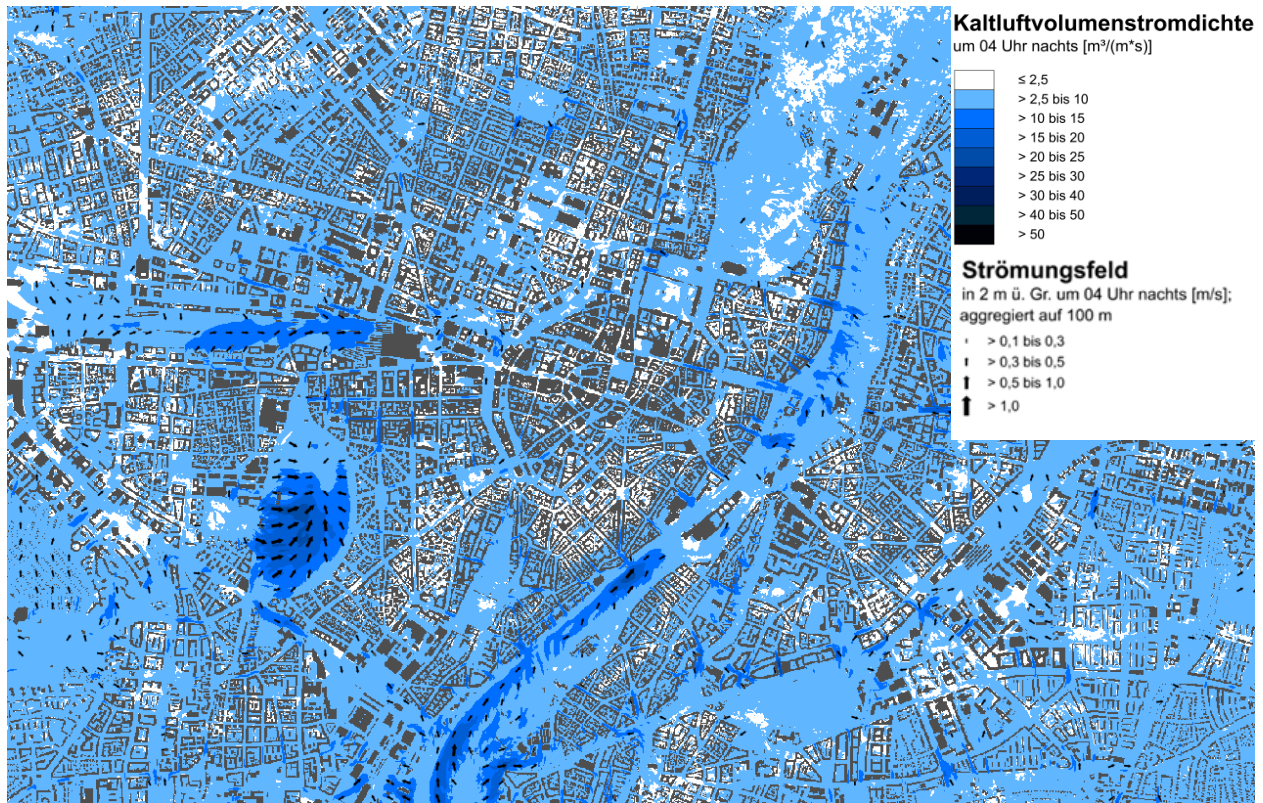


Abbildung 44: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Szenario 2 „Starker Klimawandel 2055“ in München (verkürzte Legende).

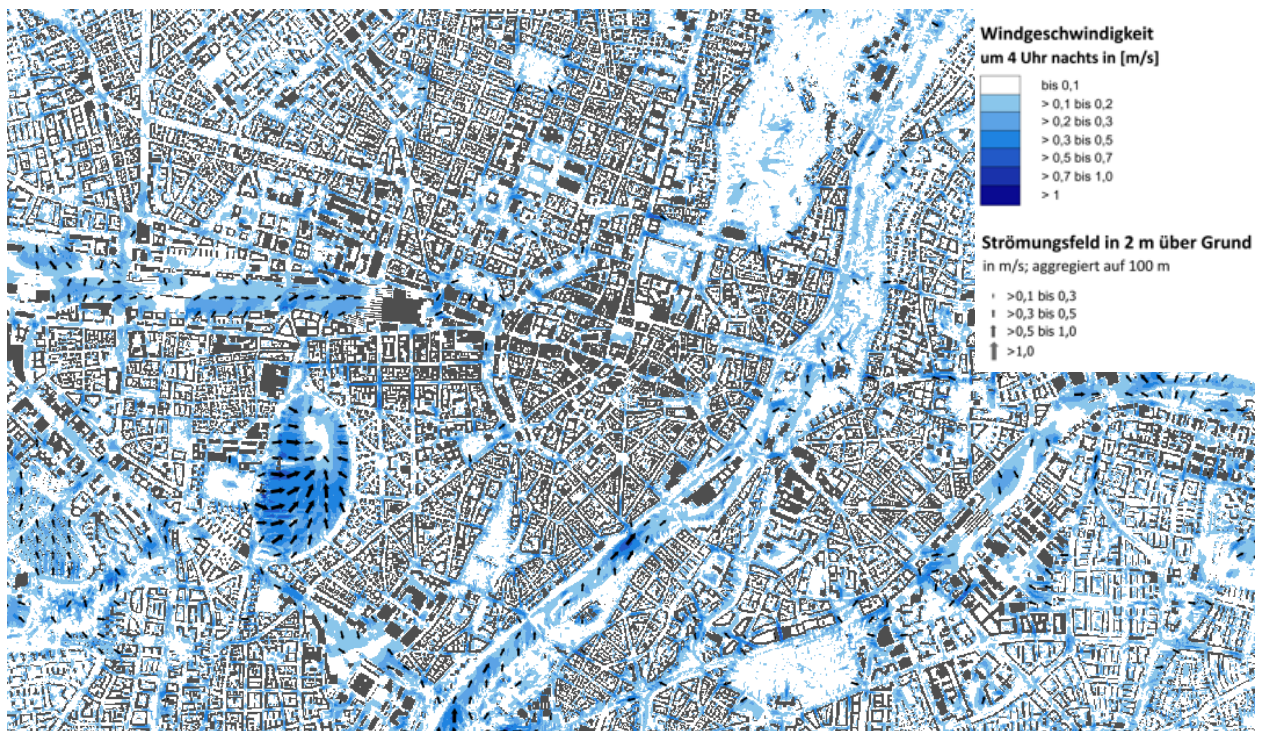


Abbildung 45: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status quo Szenario in München (verkürzte Legende).



6.1.2 TAGSITUATION

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist der PET-Wertebereich eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von unter 27 °C ab und sind so der Belastungsstufe „leichte Wärmebelastung“ zuzuordnen (Tabelle 14).

Tabelle 14: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (VDI 3787, Blatt 2, 2022)

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
< 4 °C	Sehr kalt	Extremer Kältestress
> 4 °C	Kalt	Starker Kältestress
> 8 °C	Kühl	Moderater Kältestress
> 13 °C	Leicht kühl	Leichter Kältestress
> 18 °C	Komfortabel (neutral)	Kein thermischer Stress
> 23 °C	Leicht warm	Leichte Wärmebelastung
> 29 °C	Warm	Moderate Wärmebelastung
> 35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
> 41 °C	Sehr heiß	Extrem starke Wärmebelastung

Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder über waldähnliche Strukturen bis hin zu größeren Baumgruppen als Rückzugsorte dienen können (z.B. Hofgarten, Promenadeplatz, Maximilianplatz, Alter Botanischer Garten, Nußbaumpark, Alter Südfriedhof, Frühlingsanlagen, Maximiliansanlagen etc.; Abbildung 46). Auch Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung (bspw. Isarauenbereiche, Olympiasee).

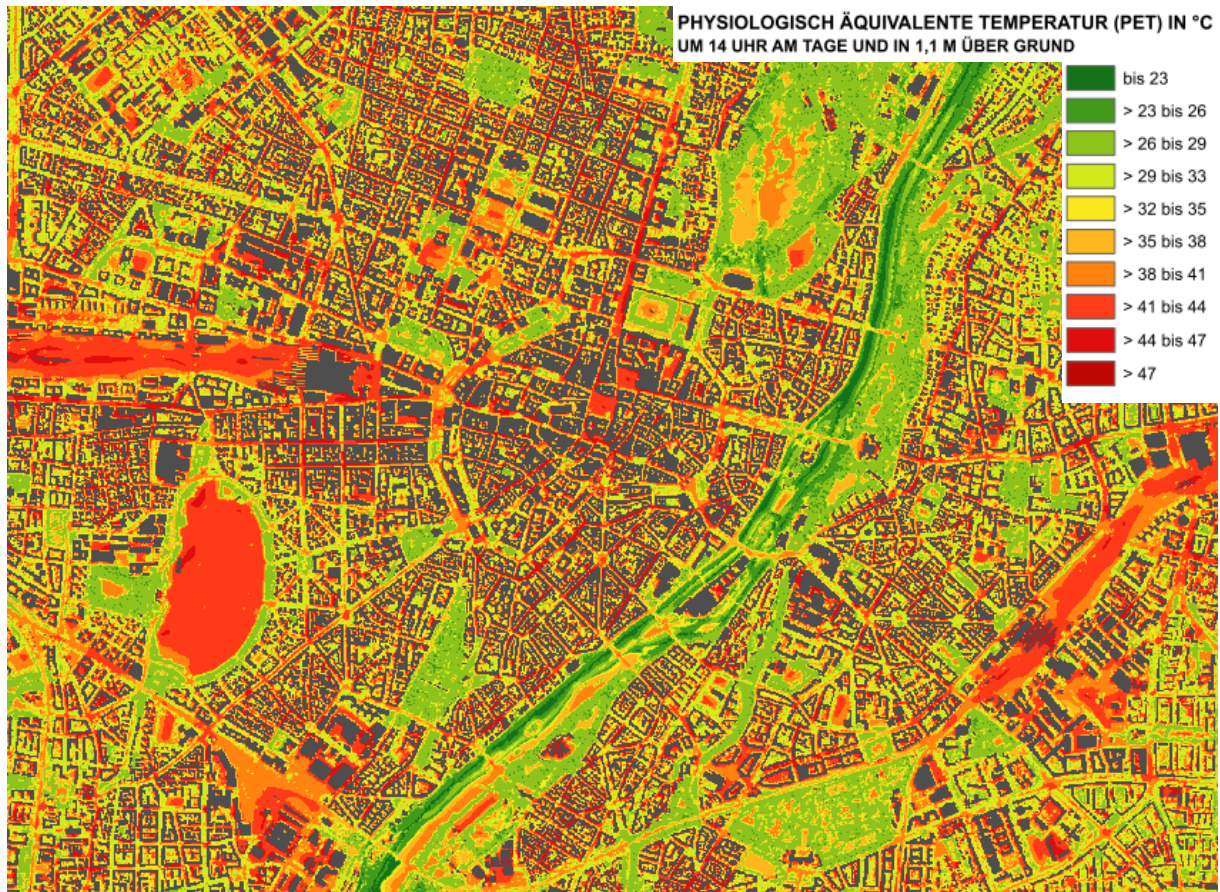


Abbildung 46: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Status quo Szenario in der Münchner Innenstadt (verkürzte Legende).

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt und vielen Gewerbegebieten zu finden sind. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Außenstadtteilen (teils ohne Abbildung hier im Bericht; siehe separate Detailkarten im pdf-Format/WebGIS). Viele Wohngebiete bieten zwar einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume als in vielen Teilen der zentrumsnah gelegenen Stadtteile, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann, weil er „durch das 5 m-Raster fällt“, mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.



Abbildung 47: Detailansicht Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Status quo Szenario in der Münchner Innenstadt (verkürzte Legende).

Innerhalb des Stadtgebiets stellen mit Bäumen bestandene Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge, sowie begrünte Innenhöfe aufgrund ihrer geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar (z.B. Hofgarten, Promenadeplatz, Maximilianplatz, Alter Botanischer Garten, Nußbaumpark, Alter Südfriedhof, Frühlingsanlagen, Maximiliansanlagen etc.). Wie der obige Detailausschnitt der PET-Karte zeigt, bieten oft auch kleinere baumbestandene „Grünstreifen“, wie am Promenadeplatz eine Verschattungsleistung und sorgen dafür, dass größere zusammenhängende Bereiche mit starker oder gar extremer Wärmebelastung „aufgebrochen“ werden durch die deutlich kühleren verschatteten Bereiche. Solche „Cool-Spots“ sind an heißen Tagen sehr wichtig, vor allem im Innenstadtbereich.

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend in München, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann. Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst in dem Szenario 2 „Starker Klimawandel“ gibt es noch viele Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen. (Abbildung 48 und Tabelle 15).

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Entwicklung der PET zwischen den Szenarien im Bereich verschiedener Landnutzungen.

Tabelle 15: Übersicht der PET-Werte (Stichproben) zwischen den Szenarien und Nutzungen

Szenario	PET Freifläche nördlich Feldmoching [°C]	PET Innenstadt Marienplatz [°C]	PET Gewerbe Euro-Industriepark [°C]	PET Waldgebiet Obersendling [°C]
Status quo	38,1	44,6	43,0	26,9
Szenario Zukunft 1	39,8	46,0	44,5	28,3
Szenario Zukunft 2	44,3	47,7	46,6	31,5

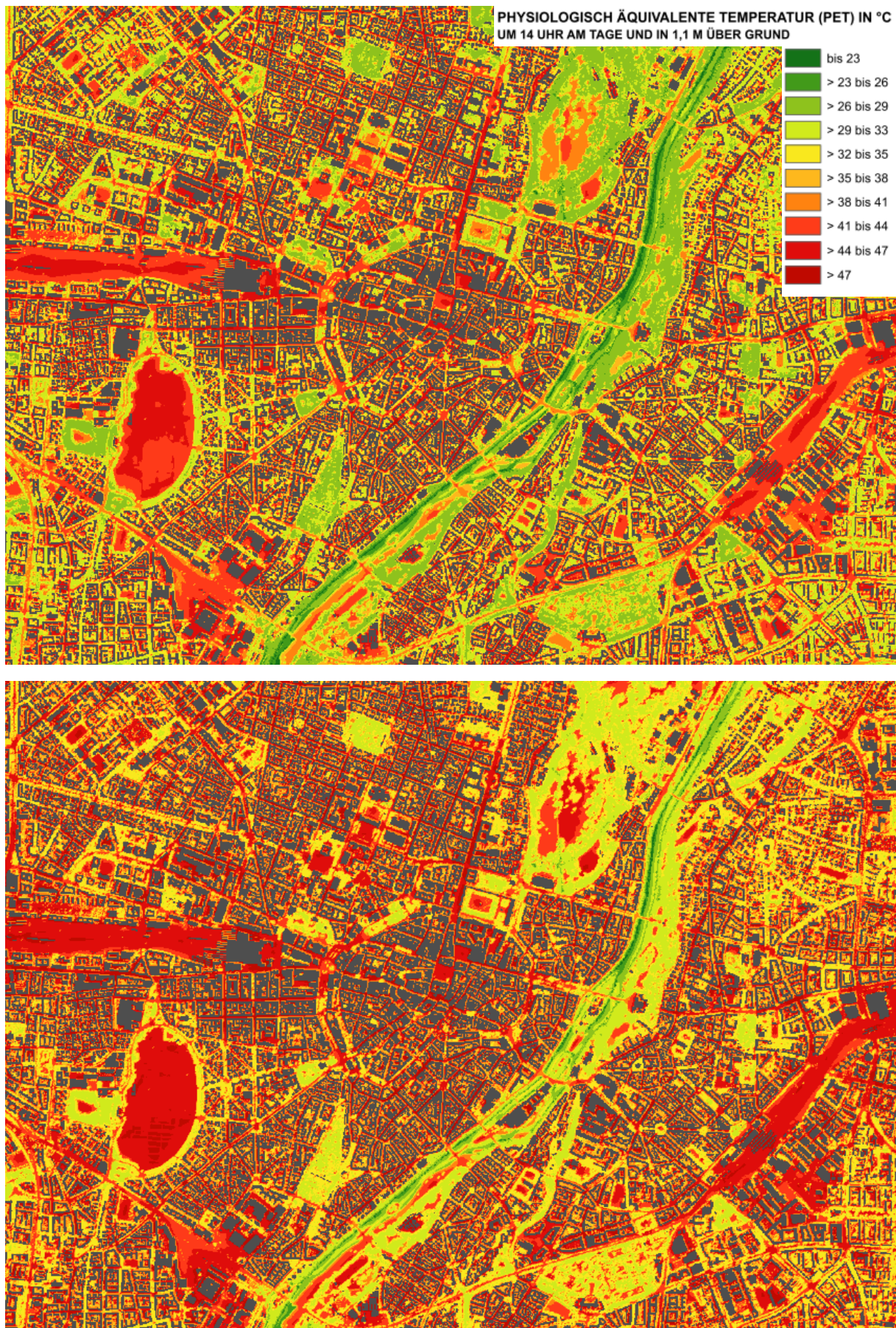


Abbildung 48: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel 2055“ (oben) und Szenario 2 „Starker Klimawandel 2055“ (unten) im Münchner Stadtgebiet (verkürzte Legende).



6.2 KLIMAANALYSEKARTE

Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen – für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert 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). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling, 2010). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein 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 benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte. Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte 1 für die Bestandssituation (Status quo)
- Klimaanalysekarte 2 für das Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel (2055)“
- Klimaanalysekarte 3 für das Szenario 2 „Starker Klimawandel (2055)“
- Klimaanalysekarte 4 für die Bestandssituation mit Darstellung des Wärmeinseleffekts

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der 3 bzw. 4 Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 49). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im **Ausgleichsraum** ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 5 m der Modellausgabe. Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung der Ergebnisse über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier nächstgelegenen Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte. Im **Wirkraum** ist die Lufttemperatur für das 2 m Niveau flächenhaft dargestellt. Bei der Klimaanalysekarte mit Wärmeinseleffekt ist die Differenz aus der mittleren Lufttemperatur der Freiflächen im Umland gegenüber dem Wirkraum dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.



Abbildung 49: Legende der Klimaanalysekarte (Karten 1 – 3) (verkürzte Darstellung)

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 16). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Um die Kaltluftströmungen in den Höhen über Dachniveau aufzuzeigen, wurde auf das Windfeld in 20 m über Grund zurückgegriffen. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Die als **Kaltluftentstehungsgebiet** gekennzeichneten Räume sind Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 23,9 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$. Dieser Schwellenwert bezeichnet den Mittelwert der Kaltluftproduktionsrate.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in München 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 bis 100 m; (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.

Bei der Ausweisung der Kaltluftleitbahnen wurde zudem ein Augenmerk auf die Ausweisung der lokalen Leitbahnen aus der vorangegangenen Stadtklimaanalyse (GEO-Net, 2014) gelegt. Vereinzelt sind lokale Leitbahnen entfallen und tauchen in der aktuellen Studie nicht mehr auf oder sie wurden als Parkwind ausgewiesen. Mit der Aktualisierung der Stadtklimaanalyse zeigen sich lokal teilweise andere Windverhältnisse, die nun Grundlage für die Ausweisung der Kaltluftprozesselemente darstellt. Eine detaillierte Darstellung mit Erläuterungen hierzu findet sich in Kapitel 7.5.2.



Tabelle 16: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Strömungsrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1$ m/s in 2 m Höhe sowie in 20 m Höhe
Kaltluftentstehungsgebiet	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 23,9$ m ³ /m ² h
Kaltluftleitbahn (übergeordnet)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Umbautes Park- und Flurwindssystem	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, der Kaltluftentstehungsgebiete, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der **Leitbahnen** und der umbauten **Park- und Flurwindssysteme** erfolgte gutachterlich unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen und der Orographie. Unter **Leitbahn** wird eine Verbindung von Kaltluftentstehungsgebiete und Belastungsbereichen miteinander verstanden. Diese Bereiche sind mit ihren hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Die **umbauten Park- und Flurwindssysteme** prägen sich dort aus, wo Grünflächen (Parkflächen, Landwirtschaftliche Flächen, Freiflächen) von warmen Strukturen (bspw. Gebäuden) umgeben sind und es somit zu thermisch bedingten kleinräumigen Ausgleichsströmungen hin zu den wärmeren Bereichen kommt.

Abbildung 50 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für das Gebiet „München-Untergiesing“ einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

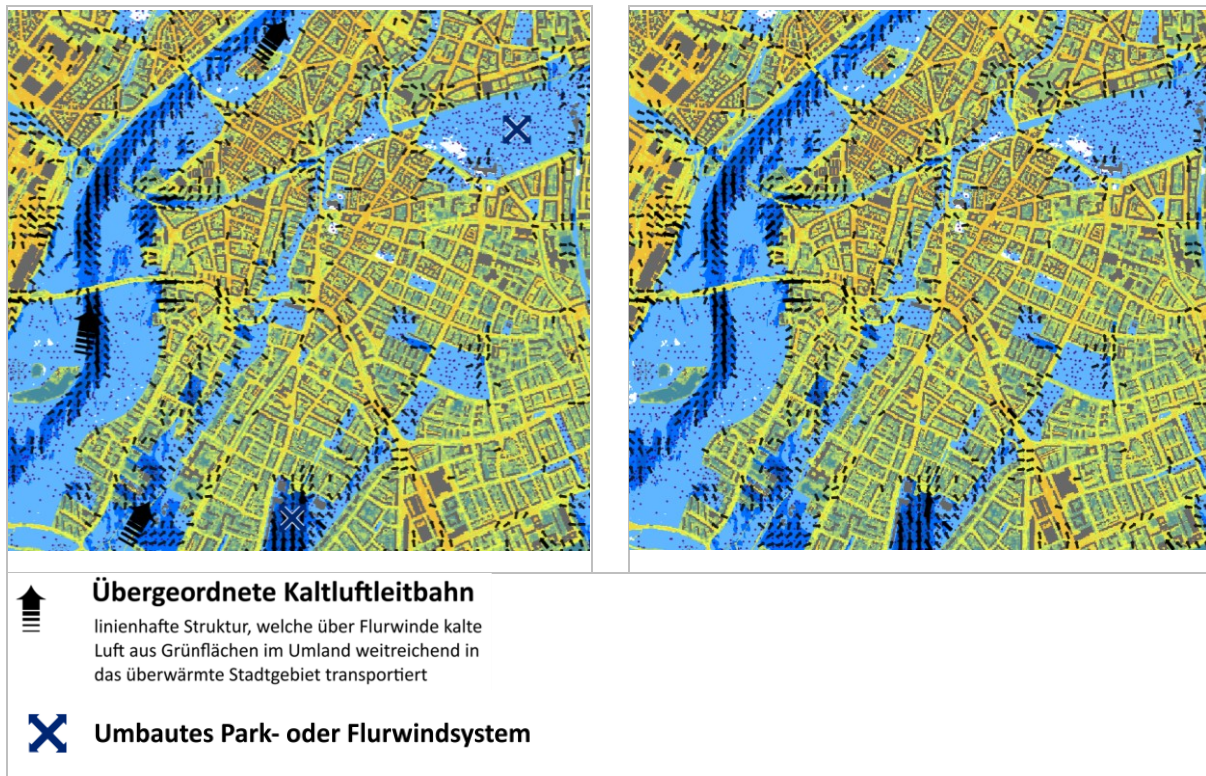


Abbildung 50: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links mit und rechts ohne entsprechende Ausweisung) inklusive Legende (verkürzt). Dargestellt ist das bodennahe Windfeld in 50 m Aggregation.

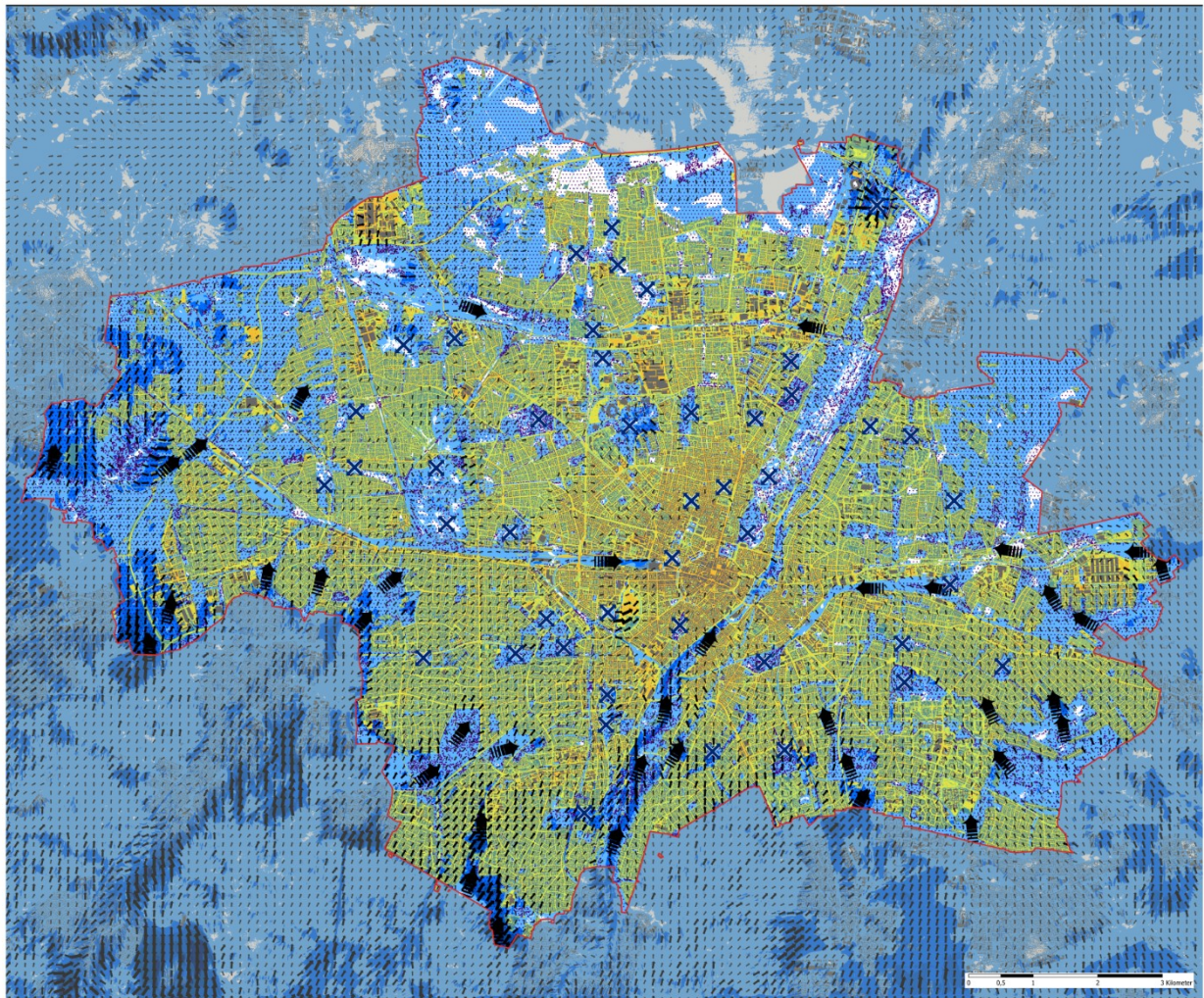
Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, wenn sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können Bereiche mit höheren Belastungen besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte (siehe Kapitel 7). In den folgenden Karten ist die Klimaanalysekarte für den Status quo (Abbildung 51 und Abbildung 54) und für die Szenarien 1 und 2 (Abbildung 52 und Abbildung 53) dargestellt. In Abbildung 54 ist anstelle der nächtlichen Lufttemperatur der Wärmeinseleffekt im Wirkraum dargestellt. Dieser wird über die Differenz der nächtlichen Temperatur im Wirkraum zu der mittleren nächtlichen Temperatur im Ausgleichsraum ermittelt. Er stellt somit ein Maß der nächtlichen Überwärmung des Wirkraums dar.

Aufgrund der Tatsache, dass allen Klimawandel-Szenarien dieselbe Bebauung zugrunde liegt und der Klimawandel zu keinen relevanten Änderungen des Kaltlufthaushalts führt (vgl. Kapitel 6.1), sind die ausgewiesenen besonderen Kaltluftprozesse in den Szenarien 1 bis 4 sowie dem Status Quo Szenario identisch.

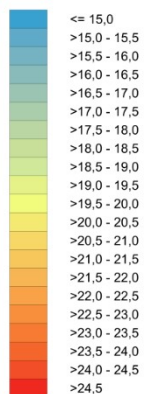
STADTKLIMAANALYSE MÜNCHEN 2025

ERGEBNISPARAMETER DER MODELLIERUNG

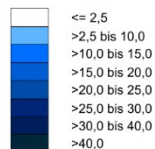
Klimaanalysekarte - Status quo



Siedlungs- und Verkehrsflächen Nächtliche Lufttemperatur in 2 m ü.Gr. [°C]



Grün- und Freiflächen Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(s*m)$



Sonstiges

- Stadtgebiet
- Gebäude

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN

BASISDATUM: 21.06. [Sonnenhöchststand]
 MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 Uhr Folgetag
 STARTTEMPERATUR: 22,08°C
 BODENFEUCHTE: 60%
 WETTERLAGE: autochthon [0/8 Bewölkung]

VERWENDETES MODELL: FITNAH-3D
 HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG: 5 m

Kaltluftprozesse

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
 linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftentstehungsgebiet**
- Umbautes Park- oder Flurwindssystem**
 kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Windfeld in 20 m ü. Grund

Windgeschwindigkeit in m/s;
 aggregiert in 200 m Auflösung

↑ >0,1 bis 0,3
↑ >0,3 bis 0,5
↑ >0,5 bis 1,0
↑ >1,0



GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH
 GROSSE PFÄHLSTR. 5A
 30161 HANNOVER



Landeshauptstadt
 München
 Referat für Klima-
 und Umweltschutz

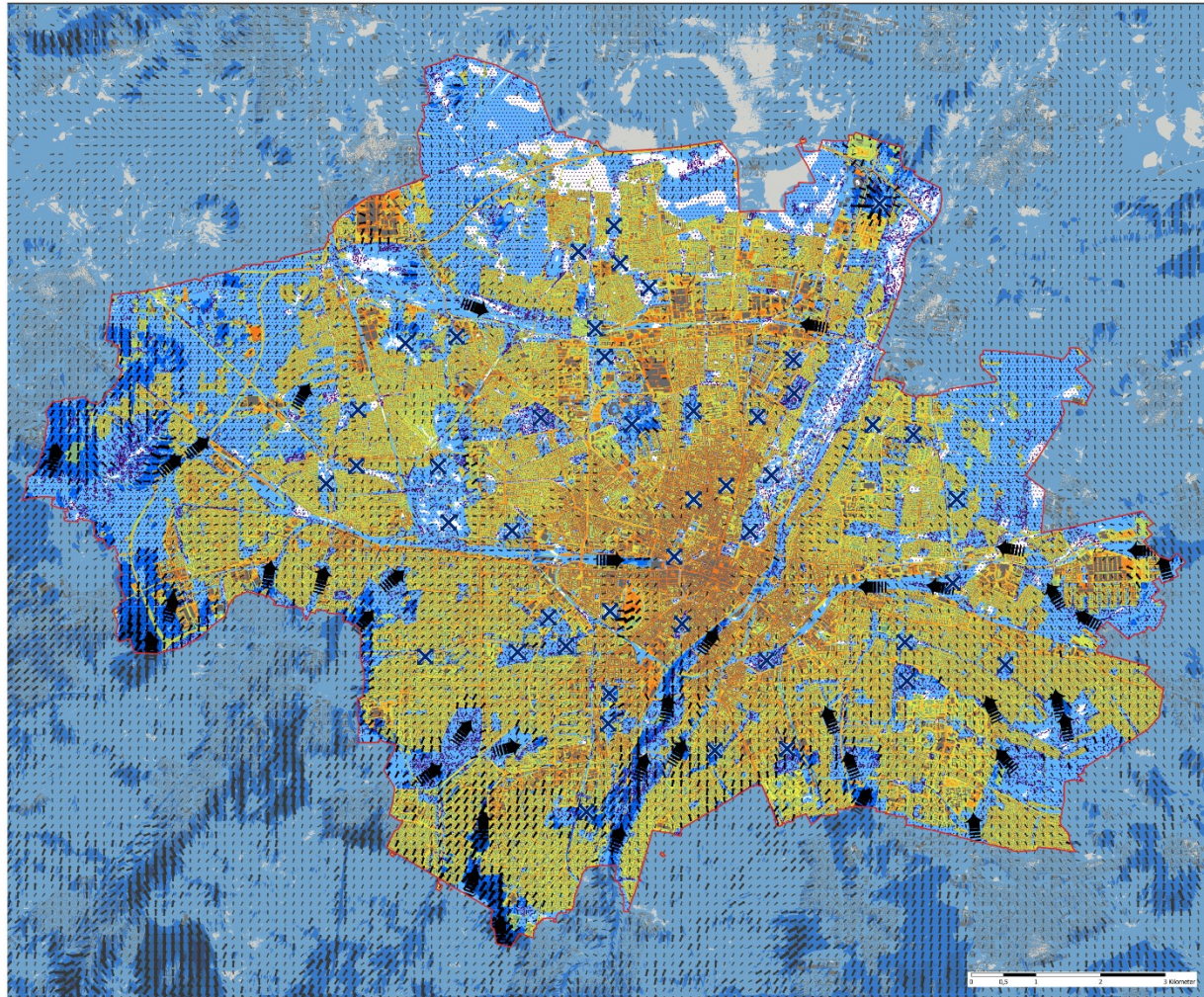
Abbildung 51: Klimaanalysekarte 1 der Stadt München im Status quo Szenario.



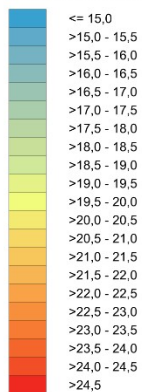
STADTKLIMAANALYSE MÜNCHEN 2025

ERGEBNISPARAMETER DER MODELLIERUNG

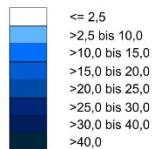
Klimaanalysekarte - Mäßiger Klimawandel (+ 1,36 K)



Siedlungs- und Verkehrsflächen Nächtliche Lufttemperatur in 2 m ü.Gr. [°C]



Grün- und Freiflächen Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(s \cdot m)$



Kaltluftprozesse



Übergeordnete Kaltluftleitbahn
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert



Kaltluftentstehungsgebiet



Umbautes Park- oder Flurwindssystem
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Sonstiges

- Stadtgebiet
- Gebäude

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN

BASISDATUM: 21.06. [Sonnenhöchststand]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 Uhr Folgetag
STARTTEMPERATUR: 22,08°C + Klimasignal
BODENFEUCHTE: 60%
WETTERLAGE: autochthon [0/8 Bewölkung]

VERWENDETES MODELL: FITNAH-3D
HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG: 5 m

KLIMASIGNAL: + 1,36 K
ZIELHORIZONT: 2055

Windfeld in 20 m ü. Grund

Windgeschwindigkeit in m/s;
aggregiert in 200 m Auflösung

- ↑ >0,1 bis 0,3
- ↑ >0,3 bis 0,5
- ↑ >0,5 bis 1,0
- ↑ >1,0



GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH
GROSSE PFAHLSTR. 5A
30161 HANNOVER



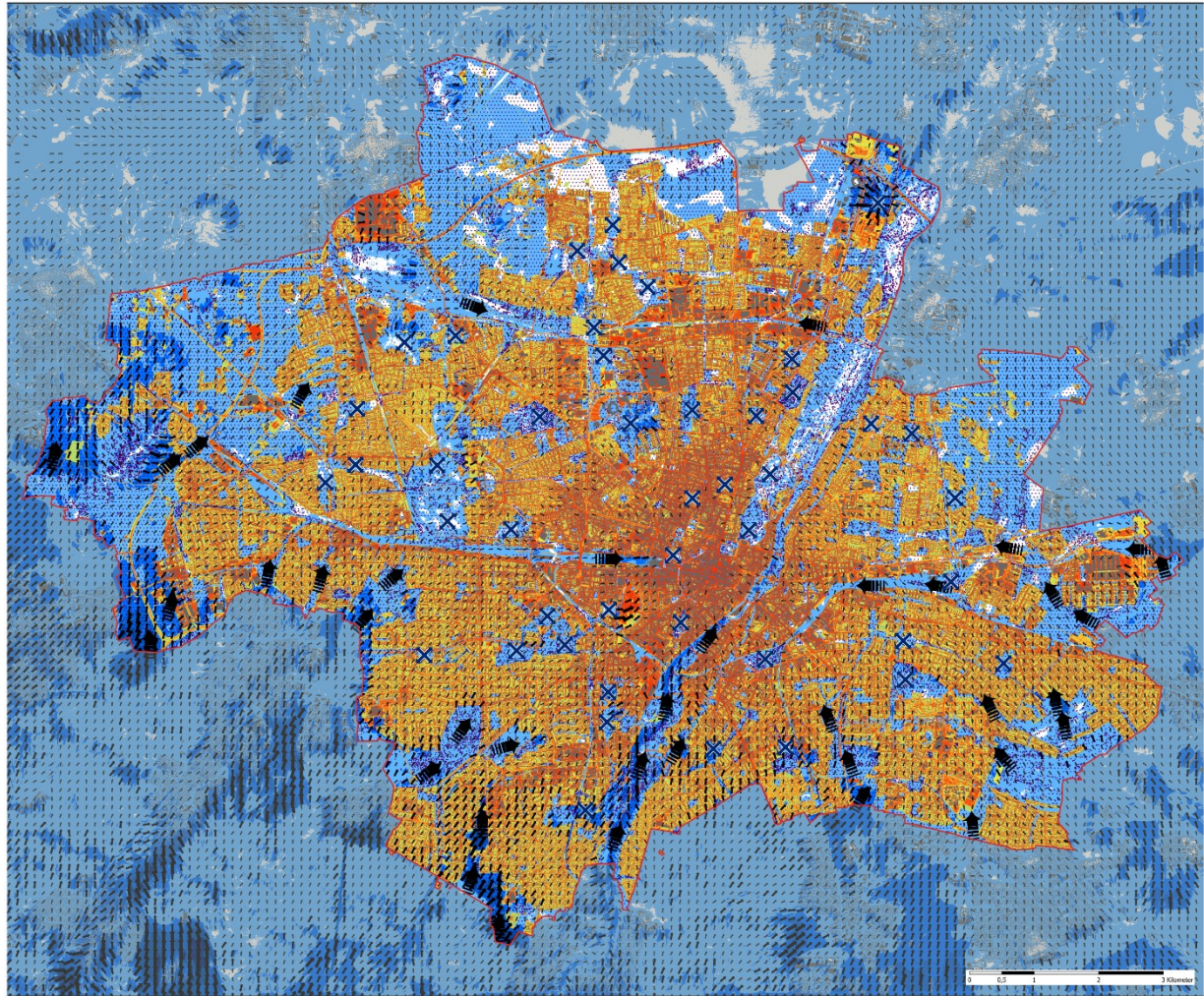
Landeshauptstadt
München
Referat für Klima-
und Umweltschutz

Abbildung 52: Klimaanalysekarte 2 der Stadt München im Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel 2055“.

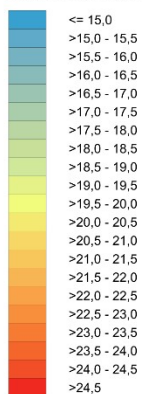
STADTKLIMAANALYSE MÜNCHEN 2025

ERGEBNISPARAMETER DER MODELLIERUNG

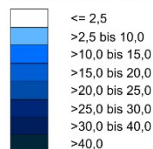
Klimaanalysekarte - Starker Klimawandel (+ 2,91 K)



Siedlungs- und Verkehrsflächen Nächtliche Lufttemperatur in 2 m ü.Gr. [°C]



Grün- und Freiflächen Kaltluftvolumenstromdichte in m³/(s*m)



Kaltluftprozesse



Übergeordnete Kaltluftleitbahn
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert



Kaltluftentstehungsgebiet



Umbautes Park- oder Flurwindssystem
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Sonstiges

- Stadtgebiet
- Gebäude

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN

BASISDATUM: 21.06. [Sonnenhöchststand]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 Uhr Folgetag
STARTTEMPERATUR: 22,08°C + Klimasignal
BODENFEUCHTE: 30%
WETTERLAGE: autochthon [0/8 Bewölkung]

VERWENDETES MODELL: FITNAH-3D
HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG: 5 m

KLIMASIGNAL: + 2,91 K
ZIELHORIZONT: 2055

Windfeld in 20 m ü. Grund

Windgeschwindigkeit in m/s;
aggregiert in 200 m Auflösung

- ↑ >0,1 bis 0,3
- ↑ >0,3 bis 0,5
- ↑ >0,5 bis 1,0
- ↑ >1,0



GEO-NET UMWELTCONSULTING GMBH
GROSSE PFÄHLSTR. 5A
30161 HANNOVER



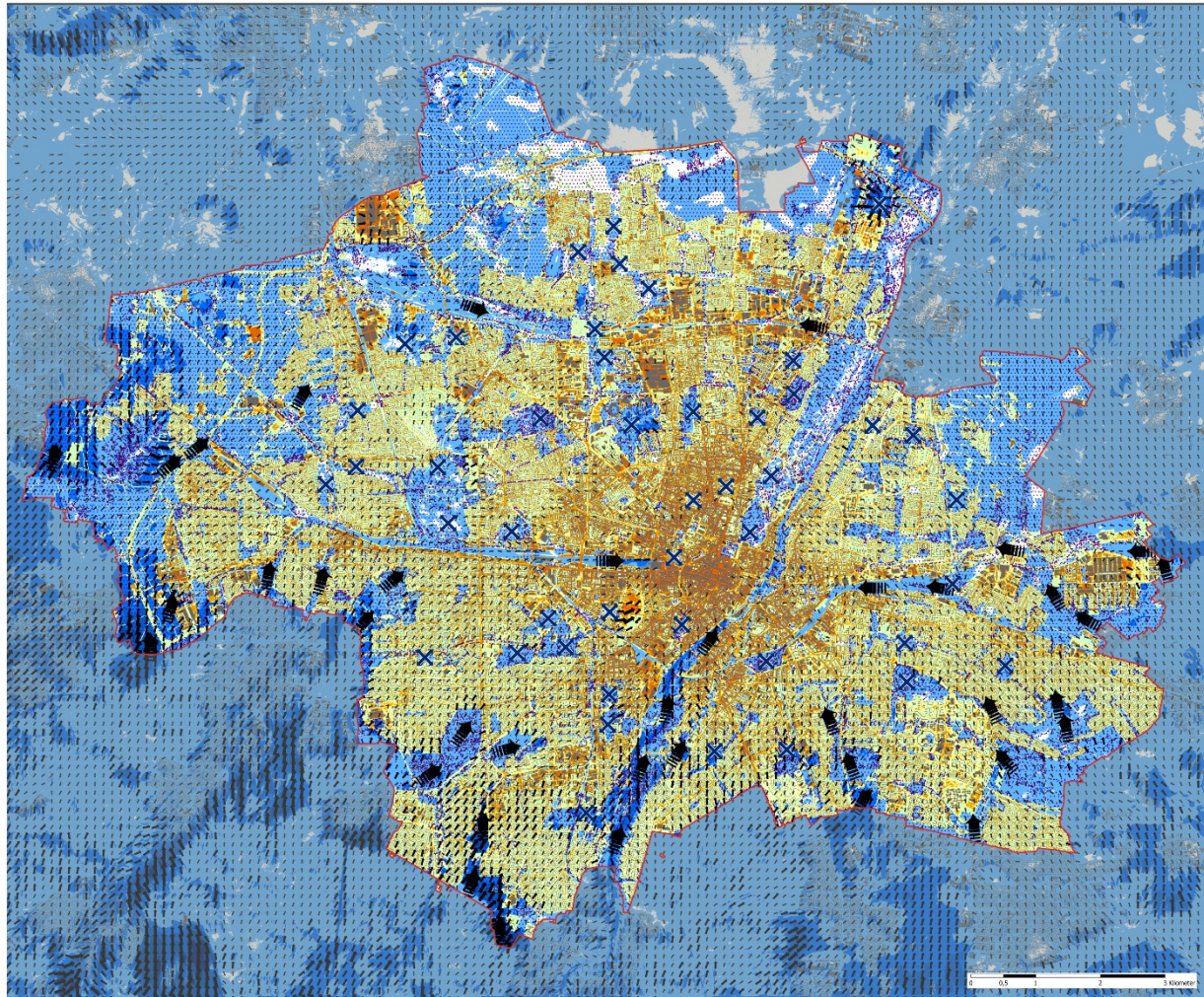
Landeshauptstadt
München
Referat für Klima-
und Umweltschutz

Abbildung 53: Klimaanalysekarte 3 der Stadt München im Szenario 2 „Starker Klimawandel 2055“.

STADTKLIMAANALYSE MÜNCHEN 2025

ERGEBNISPARAMETER DER MODELLIERUNG

Klimaanalysekarte - Status quo

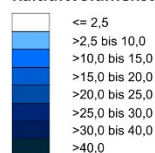


Siedlungs- und Verkehrsflächen Wärmeineffekt von Siedlungsflächen

Nächtliche Überwärmung gegenüber Grünflächen [°C]



Grün- und Freiflächen Kaltluftvolumenstromdichte in $m^3/(s \cdot m)$



Sonstiges

- Stadtgebiet
- Gebäude

METEOROLOGISCHE RANDBEDINGUNGEN

BASISDATUM: 21.06. [Sonnenhöchststand]
MODELLIERUNGSZEIT: 21:00 bis 14:00 Uhr Folgetag
STARTTEMPERATUR: 22,08°C
BODENFEUCHTE: 60%
WETTERLAGE: autochthon [0/8 Bewölkung]

VERWENDETES MODELL: FITNAH-3D
HORIZONTALE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG: 5 m

Kaltluftprozesse

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftentstehungsgebiet**
- Umbautes Park- oder Flurwindssystem**
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Windfeld in 20 m ü. Grund

Windgeschwindigkeit in m/s;
aggregiert in 200 m Auflösung

- >0,1 bis 0,3
- >0,3 bis 0,5
- >0,5 bis 1,0
- >1,0

Abbildung 54: Klimaanalysekarte 4 der Stadt München im Status quo Szenario.



6.3 ERGEBNISSE SZENARIO 3 BAUSTEIN „GRÜNE STADT“

Der Baustein „Grüne Stadt“ beschäftigt sich, wie bei der Szenarienentwicklung (s. Kap. 5.1.3) dargestellt, mit einem gesamtstädtischen Zuwachs, um in allen öffentlichen Straßen und Plätzen mindestens 30 % Kronenüberschirmung zu erreichen. An den neuen Baumstandorte kommt es zu Entsiegelungen. Durch den daraus resultierenden Zuwachs an Verschattung in den Straßenbereichen sollen günstigere Aufenthaltsbedingungen (niedrigere Temperatur/PET-Werte) am Tag geschaffen und der thermischen Belastung entgegengewirkt werden. Gleichzeitig stellt sich die Frage, inwiefern sich der Zuwachs an Baumkronen im Stadtgebiet reduzierend auf den Luftaustausch und Lufttemperatur auswirkt.

6.3.1 AUSWERTUNG GESAMTSTADT

Durch die Etablierung von zusätzlichen Straßenbäumen im gesamten Stadtgebiet mit einer Höhe von 15, entspricht der Zuwachs an Grünvolumen in dem hier betrachteten Szenario etwa 51.000.000 m³. Über die vereinzelte Wirksamkeit wurde zu Beginn des Kapitels bereits berichtet. Auf die stadtweite Wirkung soll nachfolgend kurz eingegangen werden.

Die nachfolgende Tabelle stellt die mittleren Werte für die Parameter PET, nächtliche Lufttemperatur und Temperatur um 14 Uhr am Tag für die Straßenbereiche in der Bestandssituation sowie für die Simulation der „Grünen Stadt“ für den gesamten Stadtbereich dar. Beim Vergleich der PET – Werte zeigt sich, dass die mittlere PET in den Straßenbereichen durch die stadtweite Aufwertung der Straßenbereiche durch verschattungswirksame Bäume um rund 1,7 °C gesenkt werden kann. Bei der Lufttemperatur am Tage beträgt die mittlere Reduktion 0,7 °C.

Bei der Situation in der Nacht zeigt sich nur eine sehr geringe Veränderung von unter 0,1 K. Die leichte Temperaturreduktion im Baustein „Grüne Stadt“ war zu erwarten, da es aufgrund der zusätzlichen baumbestandenen Flächen auch zu Bereichen mit verringerter nächtlicher Ausstrahlung kommt, was in einer leichten Temperaturerhöhung resultiert.

Die Frage nach der Einflussnahme der Baumneupflanzungen auf die Durchlüftungsfunktion lässt sich mit Blick auf die Auswertung für den Kaltluftvolumenstrom für den Straßen (und auch die angrenzenden Bereiche) beantworten. Der Rückgang liegt im Mittel bei unter 7 % und ist somit als mäßig einzustufen (VDI 3787 Blatt 5), sodass hierdurch keine deutliche Einflussnahme auf das Kaltluftgeschehen zu erwarten ist. Zumal es sich um Bereiche handelt, in denen lediglich ein Transport stattfindet, jedoch keine Kaltluftentstehung im großen Stil. Ebenso in der Tabelle sind die Straßenbereiche inklusive der direkt angrenzenden Flächen mit ihren Werten dargestellt. Es zeigen sich die gleichen Trends zwischen den beiden Szenarien für die einzelnen Parameter. Aufgrund der meist etwas weiteren räumlichen Entfernung von den berücksichtigten Maßnahmen ist der Trend in Absolutwerten nicht so stark ausgeprägt.

Tabelle 17: Vergleich Klimaparameter wie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET), Lufttemperatur am Tag (T14) und in der Nacht (T04) und Kaltluftvolumenstrom (KVS) für die Szenarien Status quo und Grüne Stadt bezogen auf die Straßenbereiche

	Status quo (Straßen)	Grüne Stadt (Straßen)	Status quo (Straßen + Umgebung)	Grüne Stadt (Straßen + Umgebung)
PET [°C]	37,55	35,80	36,57	35,74
T14 [°C]	32,63	31,96	32,20	31,87
T04 [°C]	19,36	19,31	18,64	18,60
KVS [m ³ /(m*s)]	5,66	5,29	5,16	4,94



Die nachfolgende Abbildung stellt die prozentualen Anteile verschiedener Nutzungsklassen für die Szenarien „Status quo“ und „Grüne Stadt“ gegenüber. Es zeigt sich, dass durch die Begrünungsmaßnahmen im „grünen Szenario“ der Anteil von der Klasse „Baum über Rasen“ um ein Drittel von rund 8 % auf 12 % erhöht. Die Klasse „Baum über Versiegelung“, welche am häufigsten zur Zielwerterreichung der 30 % Kronenüberschirmung im Szenario „Grüne Stadt“ eingesetzt wird, steigt um gut 4 %. Damit im Zusammenhang steht der deutliche Rückgang von 8 % bei der versiegelten Fläche. Dieser wird durch die zuvor genannten „Baum-Klassen“ im grünen Szenario ersetzt.

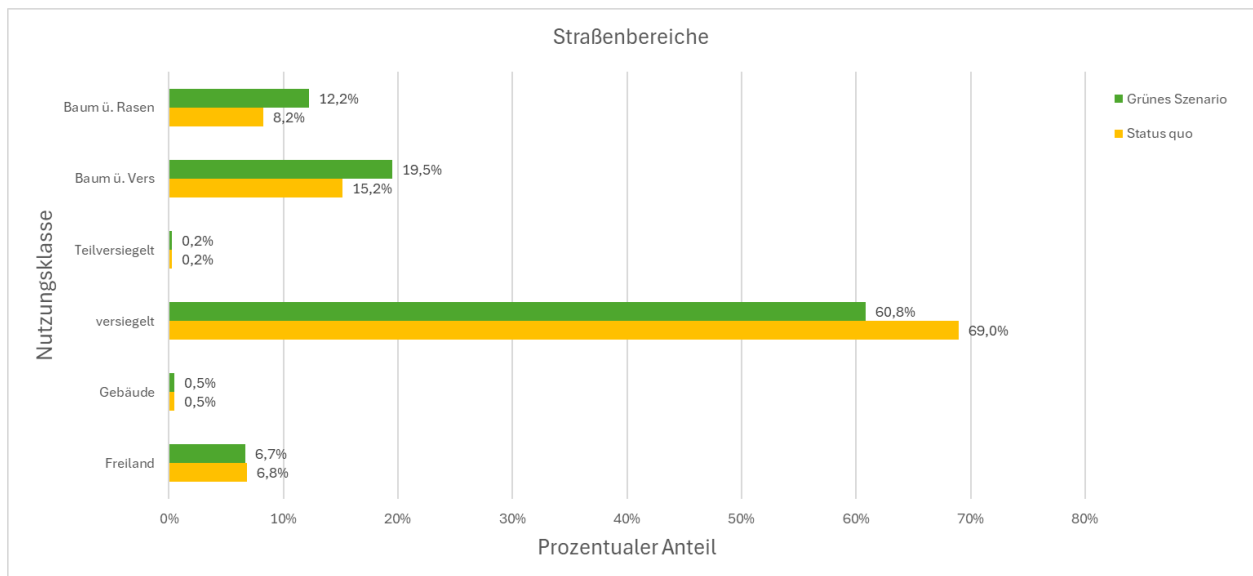


Abbildung 55: Vergleich der Nutzungsklassen (in Prozent) in den Straßenbereichen Münchner Stadtgebiets zwischen den Szenarien „Status quo“ und „Grünes Szenario“.

Verhältnis von PET zu Baumkronenüberschirmung in den Straßenbereichen (gesamtstädtische Betrachtung)

Das Verhältnis von PET und Baumkronenüberschirmung soll nachfolgend auf einer gesamtstädtischen Ebene analysiert werden. In der nachstehenden Abbildung sind für alle Straßenbereiche die mittlere PET und die prozentuale Kronenüberschirmung dargestellt. Wie zu erwarten, zeigt sich ein quasi-linearer Zusammenhang. Bei nahezu keiner Kronenüberschirmung und somit auch keiner Verschattungswirkung werden die höchsten PET-Werte von im Mittel ca. 40,5 °C erreicht. Die Streuung der Werte ist ebenfalls dargestellt. Deutlich geringere Temperaturen können in den Bereichen durch Verschattung von anderen Elementen wie bspw. Benachbarten Gebäudekörpern hervorgerufen werden (Minimum bei ca. 33°C). Noch heißere Bedingungen durch zusätzliche Einstrahlung durch bspw. Reflexion an Glasscheiben o.Ä. entstehen (Maximum bei ca. 44°C). Je höher die Kronenüberschirmung einer Straßenfläche ist, desto geringer sind die PET-Werte. Verstärkt werden kann auch hier der Effekt durch zusätzliche Verschattungen von umliegenden Bauwerken (Minimum bei 26 °C). Gleiches gilt wie zuvor erläutert auch für wärmere Temperaturen, die durch Reflexionen und zusätzliche Einstrahlung zustande kommen können (Maximum bei ca. 30 °C). Über das gesamte Spektrum der Verschattung betrachtet, lässt sich die PET bei 100 % Kronenüberschirmung im Mittel um bis zu 14 °C reduzieren. Dies deckt sich mit den Ergebnissen, die zuvor für die PET-Auswertung der betrachteten Fokusräume erläutert wurde. Hierbei handelt es sich um den Effekt, den ein Stadtbaum/Straßenbaum mit seiner Verschattungswirkung am Tage liefern kann gegenüber einer nicht verschatteten, versiegelten Fläche.

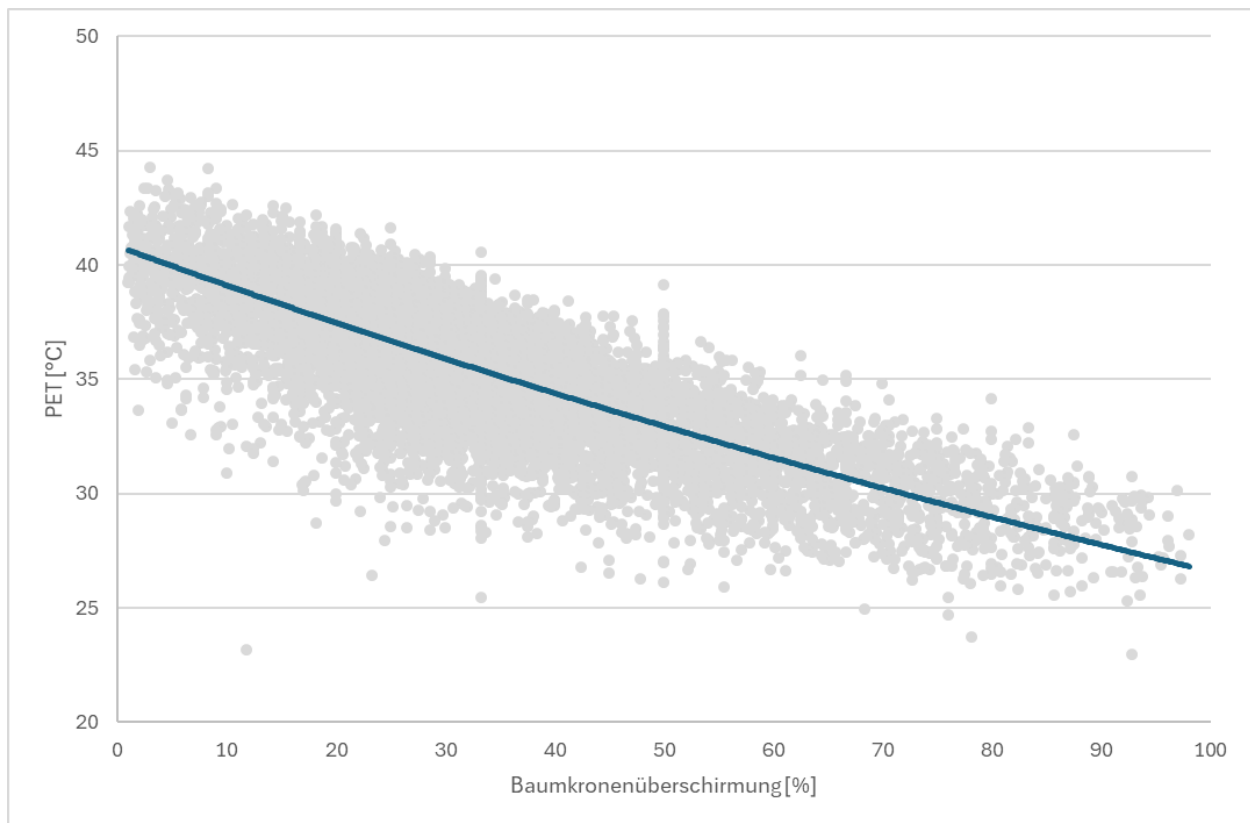


Abbildung 56: Zusammenhang PET-Werte (Physiologisch Äquivalente Temperatur) in Abhängigkeit der Baumkronenüberschirmung in Straßenbereichen des Münchner Stadtgebiets.



6.3.2 AUSWERTUNG FOKUSRÄUME

Nachfolgend sollen verschiedene Fokusräume beispielhaft analysiert und diskutiert werden. Es soll zunächst auf die Wirkung der zusätzlichen Kronenüberschirmung im Bereich der zentral im Stadtgebiet gelegenen Bereiche der **Maximilianstraße**, dem **Max-Joseph-Platz** und dem **Marienhof** eingegangen werden. Der Straßenbereich der Maximilianstraße erstreckt sich von der Isar im Osten bis hin zum Max-Joseph-Platz im Westen. Der isarnahe Straßenabschnitt weist einen breiten Straßenquerschnitt auf, welcher mit Bäumen und Grünflächen ausgestattet ist. Der Westbereich ist schmaler und weist keine Grünstrukturen auf. Im hier betrachteten Szenario wird der Straßenbereich, insbesondere der westliche Teil, aufgrund der zusätzlichen Bäume zu einer Allee umgestaltet. Aber auch im Ostteil kommen neue Baumstandorte hinzu.

Zu erkennen ist das in der nachfolgenden Abbildung, welche die Nutzungsstrukturen des Szenarios der „Grünen Stadt“ und dem Bestandsszenario gegenüberstellt.



Abbildung 57: Vergleich Nutzungsraaster im Szenario "Status quo" (oben) und im Szenario "Baustein Grüne Stadt" (unten) für den Ausschnitt Maximilianstraße, Max-Joseph-Platz und Marienhof.

Am Westende der Maximilianstraße befindet sich der **Max-Joseph-Platz**, welcher komplett versiegelt und ohne Grünstrukturen im Bestand versehen ist. Die Interims-Umgestaltung im Szenario „Grüne Stadt“ (als zeitweiser Ersatz für die Baustelle am Marienhof) sieht neben Baumstandorten (in Kübeln) im gesamten Platzbereich eine Entsiegelung im runden Zentrumsbereichs des Platzes vor.



Als dritte Fläche, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft von den zuvor genannten befindet (südwestlich vom Max-Joseph-Platz) handelt es sich um den **Marienhof**. Im Bestandsituation ist diese Fläche als versiegelt angenommen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in diesen Bereich aktuell eine Großbaustelle für die zweite S-Bahn-Stammstrecke mitsamt neuer Haltestelle befindet. Im „Grüne Stadt Szenario“ ist diese Fläche gänzlich begrünt, sowie sie auch bis zum Jahr 2017 bereits vorhanden/gestaltet war, als öffentliche Grünfläche. Zusätzlich wird die Fläche im hier betrachteten Szenario noch mit Bäumen bestellt. Die Umsetzung im „Grüne Stadt Szenario“ entspricht damit keiner konkreten Planung, nimmt aber Begrünung durch Grasflächen und Bäume gleichermaßen an.

Nachfolgend sollen die Ergebnisse des Szenarios „Grüne Stadt“ für die drei angesprochenen Bereiche betrachtet werden. Dabei liegt der Fokus auf den thermischen Bedingungen, allen voran der PET, welche Aufschluss über die thermische Belastung am Tage gibt. Diese ist für die beiden relevanten Szenarien nachfolgend erläutert und dargestellt.

Ergebnisse PET

Die nachfolgende Abbildung 58 zeigt die Verteilung der PET-Werte im Bereich der Fokusräume. Im Westteil der Maximilianstraße kommt es zu einer deutlichen Verbesserung der Situation am Tage, da die verschattungswirksamen Bäume die PET heruntersetzen. Im Mittel liegt hier die Temperatur für den westlichen Straßenbereich bei 40-41 °C. Durch die Begrünung des Straßenraums wird die PET hier im Mittel um ca. 5 K abgesenkt. Ein Blick auf die Verteilung der PET-Werte im Straßenbereich zeigt, dass durch die Verschattung der Bäume die heißen Bereiche am Nordrand aufgebrochen werden und so für kühlere Bedingungen sorgen. Vereinzelt kommt es hier zu Herabsetzungen des PET-Niveaus von im Bestand > 45 °C zu Werten von 31 °C. Somit wird die höchste physiologische Belastungsstufe (s. Tabelle 14) „Extrem starke Wärmebelastung“ um zwei Stufen hin zu „Moderate Wärmebelastung“ herabgesetzt. Es zeigt sich hier eine sehr deutliche Wirkung durch die Errichtung der Bäume. Im Ostteil der Straße werden die bereits guten Bedingungen durch die zusätzlichen Bäume verstärkt. Hier kommt es zu einer Reduktion der PET von im Mittel ca. 2 Kelvin, bezogen auf den gesamten östlichen Straßenbereich. Auch hier zeigt sich, dass größere Flächenbereiche mit hohen PET-Werten durch die neuen Bäume aufgebrochen werden und sich kühlere kleinflächige Bereiche ausprägen. Vereinzelt kommt es hier am stark belasteten Nordrand des Straßenbereichs zu PET-Reduktionen von 9 K. Dies ist als sehr wichtig für die thermischen Bedingungen zu werten.

Im Bereich des Max-Joseph-Platz wird auf zwei Weisen für kühlere Bedingungen gesorgt. Zum einen durch die verschattende Wirkung der Bäume, als auch durch die Wirkung der Grünflächen, welche den Hitzearealchipel inmitten des Platzes, wie es im Bestand der Fall ist reduzieren. Denn aufgrund der Freiflächenbereiche kann im gesamten Platzbereich weniger Wärme gespeichert werden und sorgt bereits tagsüber für leicht reduzierte Temperaturen im Platzzentrum. Im Mittel über die gesamte Platzfläche beläuft sich die Reduktion der PET um 2,3 K. Lokal, unterhalb der Bäume sind die Differenzen deutlich größer und betragen bis zu 10 K.

Die nahegelegene Fläche des Marienhofs stellt eine großflächige Umnutzung dar und sorgt bei der PET im Mittel für eine deutliche Reduktion von 7,7 K. Auch hier kommt es unterhalb der Bäume zu Reduktionen der PET von sogar bis zu 14 K. Zudem ist zu erwähnen, dass hier eine große Erholungsfläche in der Stadtmitte geschaffen wird, die aufgrund der Erreichbarkeit und der sehr hohen umliegenden Hitzebelastung

von enormer Bedeutung für den menschlichen Aufenthalt ist und als kühle Oase an heißen Tagen dienen kann.

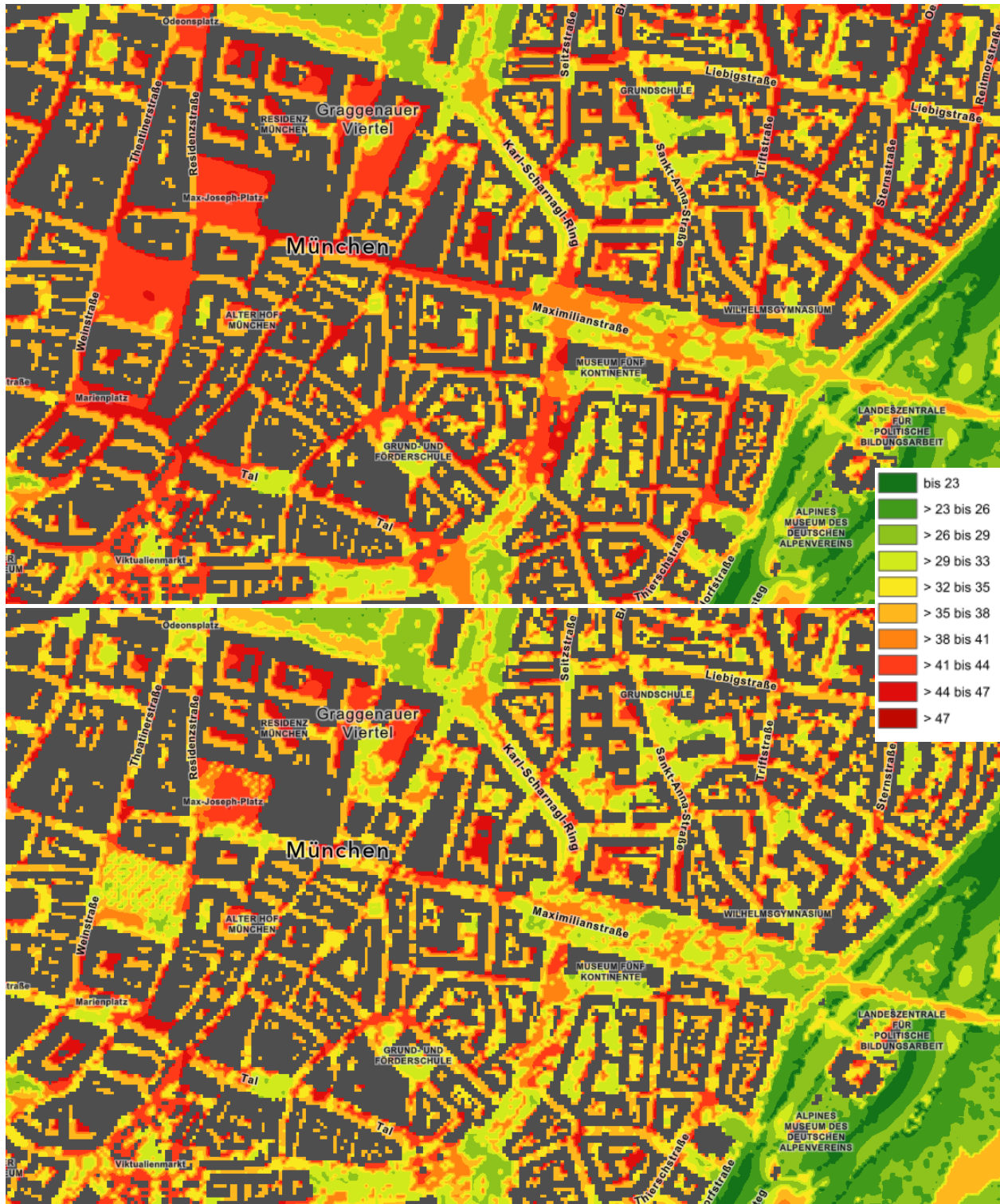


Abbildung 58: Vergleich PET-Werte (Physiologisch Äquivalente Temperatur) [°C] im Szenario "Status quo" (oben) und im Szenario "Baustein Grüne Stadt" (unten) für den Ausschnitt Maximilianstraße, Max-Joseph-Platz und Marienhof.

Ergebnisse nächtliche Lufttemperatur (T04)

Bei der nächtlichen Lufttemperatur ergeben sich nicht so deutliche Änderungen wie bei der PET. Dies ist auf den kleineren Wertebereich der nächtlichen Temperaturen zurückzuführen. Dennoch zeigt sich, wie in Abbildung 59 dargestellt, dass eine Reduktion des westlichen Straßenbereichs der Maximilianstraße von im Mittel bis zu 0,4 K durch die Etablierung von Baumstandorten und damit verbundener Entsiegelung erreicht werden kann. Dort sinkt die mittlere nächtliche Temperatur für den westlich gelegenen Straßenabschnitt von 21 °C auf 20,6 °C. Durch die neuen Baumstandorte werden Flächen entsiegelt und es können sich am Tage weniger Flächen aufheizen, da mehr Flächen beschattet werden. Infolgedessen kann nachts weniger Wärme in Form von langwelliger Strahlung abgegeben werden. Dies sorgt für verbesserte Schlafbedingungen auch in den angrenzenden Bereichen. Im östlichen, im Bestand bereits begrünten Straßenbereich, ergeben sich im Mittel Reduktionen von bis zu 0,2 K. Lokal können die Änderungen Werte von über 1 K betragen.

Im Bereich des Max-Joseph-Platzes prägt sich die nächtliche Temperatur aufgrund der zentral gelegenen Entsiegelungsmaßnahme unterschiedlich aus. Im Bereich der Freifläche, welche nicht baumbestanden ist, kann eine stärkere nächtliche Auskühlung stattfinden als auf den umliegenden Flächen. In diesen begrünten Zentrumsbereichs des Platzes sinkt die Temperatur lokal um bis zu über 3 K. Im umliegenden Bereich liegt die Abkühlung zumeist bei unter 0,5 K. Insgesamt über die gesamte Platzfläche gemittelt sinkt die Temperatur um 1 K, allerdings wie schon erwähnt mit einer sehr heterogenen räumlichen Temperaturverteilung.

Im großflächigen Bereich des Marienhofs kommt es nachts zu einer gemittelten Temperaturreduktion durch die Begrünungsmaßnahmen von 20,8 °C im Bestand zu 17,5 °C im „Grünen Szenario“. Hier zeigt sich eindrücklich die Wirkung der Entsiegelung und die nächtliche Abkühlung der Grünfläche. Lokal kommt es hier zu Temperaturreduktionen in der Nacht von über 5 K.

Generell zeigt sich bei der nächtlichen Temperatur eine durchweg leichte Reduktion der Temperaturen in den Straßenbereichen, was auf die reduzierte Abgabe von Wärme in Form von langwelliger Strahlung und fühlbarer Wärme zurückzuführen ist. Dieser Effekt wirkt bei versiegelten Bereichen, welche mit Bäumen bestellbar werden. Bei den bereits im Bestand begrünten Bereichen, kann eine leichte Temperaturerhöhung in der Nacht auftreten, da die Baumkronen die nächtliche Ausstrahlung / Auskühlung leicht vermindern. Hintergrund ist hier ein reduziertes Vermögen zum Luftaustausch, welches durch das Vorhandensein von Bäumen und deren Funktion als Barriere, gegeben ist. Hier wirken insbesondere die Baumkronen als Hindernis für den nach oben gerichteten Luftaustausch und schränken diesen ein.

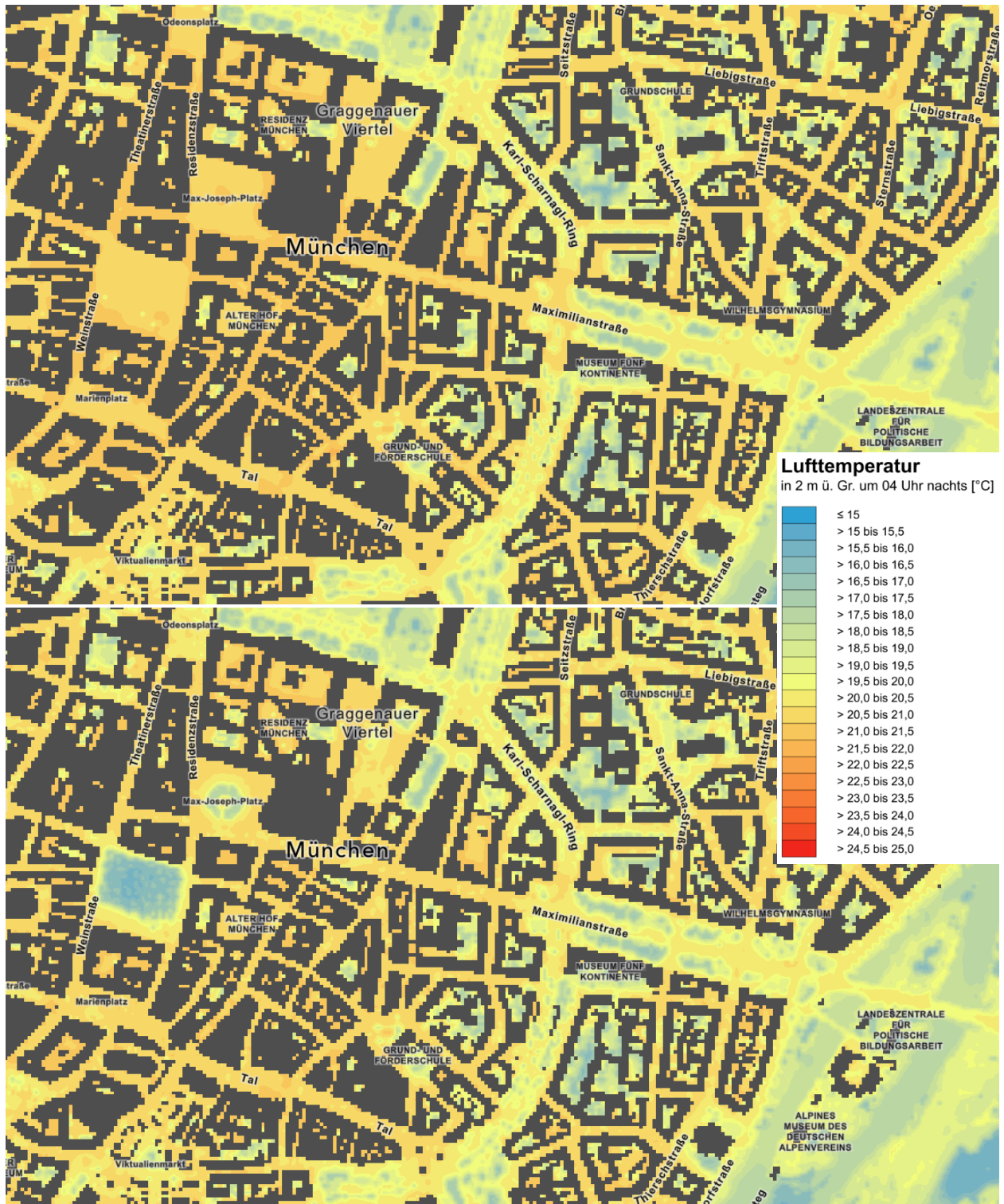


Abbildung 59: Vergleich Nächtliche Lufttemperatur (T04) -Werte im Szenario "Status quo" (oben) und im Szenario "Baustein Grüne Stadt" (unten) für den Ausschnitt Maximilianstraße, Max-Joseph-Platz und Marienhof.



6.3.3 FAZIT

Die Analyse dieses sehr spannenden Szenarios, welches eine Zielwerterreichung der Kronenüberschirmung stadtweit in den Straßenbereichen und Plätzen von mindestens 30 % berücksichtigt, zeigt sehr eindrucksvoll die positiven thermischen Effekte, welche damit einhergehen. Die größten Effekte zeigen sich am Tage. Hier kann die PET, durch die Etablierung von verschattungswirksamen Bäumen um bis zu 14 K bzw. um zwei Belastungsstufen reduziert werden. Am effektivsten gestalten sich die Maßnahmen am Nordrand von Straßen / Gehwegbereichen (bei einem West-Ost-Straßenverlauf). Es zeigt sich auch ein kühlender Effekt von stark versiegelten Straßenbereichen in der Nachtsituation. Hier können die Bäume, aufgrund ihrer Kühlleistung am Tage und die kleinflächigen Entsiegelungsbereiche zu einer Reduktion der nächtlichen Temperatur beitragen (bis zu ca. 1 K).

Schlussendlich zeigen die Ergebnisse der Analyse, dass eine sinnvolle Planung von Baumpflanzungen sehr große Wirkung auf die thermischen Bedingungen hat und diese somit weiterhin überall dort, wo sie umsetzbar ist im Stadtgebiet erfolgen sollte. Nicht zuletzt, sei noch auf die hier nicht betrachteten Synergieeffekte von Stadtbäumen hingewiesen u.a. die Aufwertung der Ästhetik des Straßenraums, die Schaffung von Habitaten sowie die Reduktion des Oberflächenabflusses durch die Entsiegelung der Pflanzgruben.

6.4 ERGEBNISSE SZENARIO 4 BAUSTEIN „WACHSENDE STADT“

Städtebauliche Entwicklungen im Stadtgebiet sind unerlässlich, ebenso wie Verkehrs- und Infrastrukturprojekte. Mit den meisten Projekten geht eine Änderung der Landnutzung einher, welche Auswirkungen auf die klimaökologische Situation auf dem Planungsgebiet und auf das unmittelbare Umfeld hat. Eine klimaökologische Begleitung solcher Vorhaben ist wichtig, um mikro- und lokalklimatischen Auswirkungen möglichst gering zu halten bzw. für eine Verbesserung der klimatischen Situation zu sorgen.

Vor diesem Hintergrund sollen nachfolgend exemplarisch für zwei Bebauungspläne die Ergebnisse der Einzelparameter (auszugsweise) dargestellt werden. Dabei dient das Szenario „Status quo“ zum Vergleich. Als die beiden Exempel-Flächen wurden zum einen die Erweiterung FIZ (B-Plan Nr. 1939d) als Gewerbeerweiterung und die Fläche Kirschgelände (B-Plan Nr. 2146) als Beispiel für die Umnutzung einer bestehenden Gewerbefläche hin zu einer Wohnbebauung.

Beispiel: Erweiterung FIZ (B-Plan Nr. 1939d) „Schleißheimer Straße“

Bei der „Erweiterung des Forschungs- und Innovationszentrums (FIZ)“ handelt es sich um eine Gewerbeerweiterung des bestehenden Areals in unmittelbarem Umfeld. Wie in Abbildung 37 in Kapitel 5.1.3 dargestellt ist die Fläche gegenwärtig größtenteils versiegelt und nur vereinzelt mit Gebäuden versehen. Durch Realisierung des Vorhabens beläuft sich der Anteil, welcher entweder versiegelt oder gebäudebestanden ist auf über 70 % und wächst somit um über 10 %, wobei der Gebäudeanteil sich vervierfacht. Der Freiland-Anteil bleibt gleich und der Baum-Anteil halbiert sich.

Da es sich beim Vorhaben, um einen Gewerbebereich handelt, soll der Fokus der Auswertung auf der Situation am Tag liegen. Dennoch soll zuvor ein kurzer Blick auf die Verhältnisse des Kaltluftvolumenstroms geworfen werden.

Wie die nachstehende Status quo – Situation für das Plangebiet zeigt, durchströmen die mächtigsten Kaltluftvolumenströme das Gebiet von Norden her, sowohl in der Gebietsmitte als auch am Ostrand. Am Nordrand gibt es vereinzelte Ströme, welche in Richtung Norden in die benachbarte Bebauung fließen. Der Blick auf die Plansituation zeigt, dass es durch die Errichtung der Plangebäude zu Einbußen des Kaltluftvolumenstroms in diesen beiden Bereichen kommt, aber die Versorgung nicht gänzlich zum Erliegen kommt. Hingegen kommt es im Südbereich der Planfläche sowie in dem südlich daran angrenzenden Bestandsgelände aufgrund der modifizierten Strömungsverhältnisse und der Entsiegelung, wodurch neue kleinflächige kaltluftproduzierende Grünflächen etabliert werden, zu einer Zunahme des Kaltluftvolumenstroms. Diese Auswirkungen beschränken sich jedoch überwiegend auf den Bereich des bestehenden Gewerbegebietes.

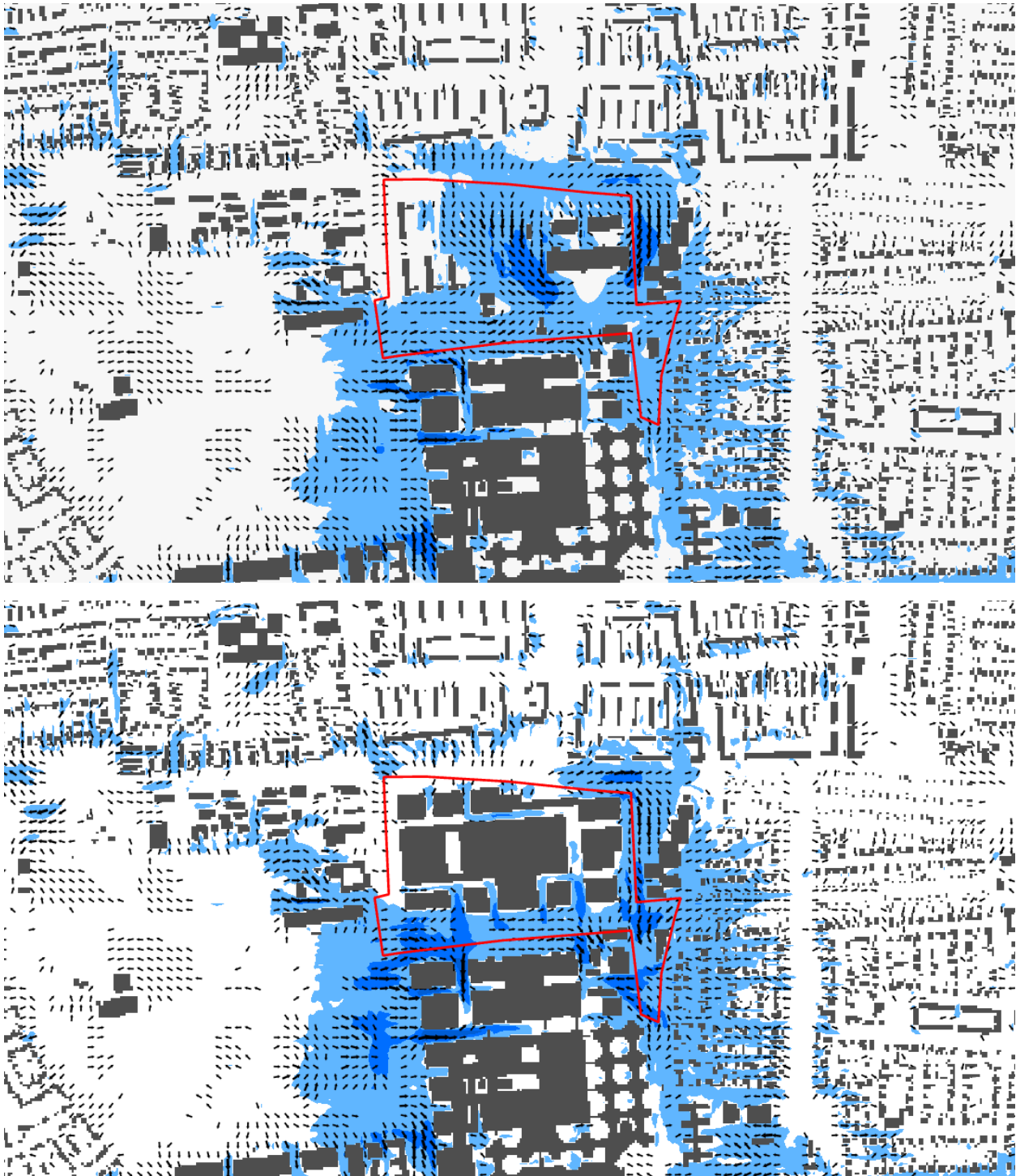


Abbildung 60: Vergleich Kaltluftvolumenstrom im Szenario "Status quo" (oben) und im Szenario "Baustein Wachsende Stadt" (unten) für den Ausschnitt des B-Plan-Gebiets Erweiterung FIZ (rote Umrandung).

Der Blick auf die PET-Karten, wie sie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt sind, zeigt dass es gegenwärtig am Nordrand sowie am Westrand und in der Westhälfte aufgrund der baumbestandenen zu großflächigen Verschattungen kommt, die für niedrige PET-Werte ($< 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) sorgen. Auf den bebauten und versiegelten Flächen kommt es zu hohen PET-Werten ($> 40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Der Blick auf die Bedingungen nach Umsetzung des geplanten Vorhabens zeigt, die Auswirkungen des Entfalls von Baumstandorten am Nordrand und in der Westhälfte des Plangebiets. Aufgrund der großflächigen neuen Bebauung entfallen hier Bäume, wodurch sich die kühlen Bereiche in den angesprochenen Gebieten etwas schmälern. Hingegen verbessern sich die thermischen Bedingungen durch die neuen Grünstreifen entlang der Süd- und Ostgrenze des

Vorhabengebietes. Hier kommt es auf den Grünstreifen teils zu Baumneupflanzungen, wodurch Schattenbereiche entstehen, die im gegenwärtigen Zustand nicht vorhanden sind, weil dort Gebäude (Teile des Ostrands) oder Versiegelung vorhanden ist. Vereinzelt kommt es durch die Neuplanungen in diesen Bereichen zu Temperaturerhöhungen, da bspw. bislang begrünte und baumbestandene Bereiche nun als Wege fungieren und versiegelt werden (bspw. an der Südgrenze des Vorhabengebiets.). Eine Überwärmung ist auch im Nahbereich der Gebäude erkennbar, da sich die unverschatteten Fassaden aufheizen und in Form langwelliger Strahlung und als fühlbarer Wärmestrom (Lufttemperaturzunahme) an die Umgebung abgeben.



Abbildung 61: Vergleich PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur) im Szenario "Status quo" (oben) und im Szenario "Baustein Wachsende Stadt" (unten) für den Ausschnitt des B-Plan-Gebiets Erweiterung FIZ (blaue Umrandung).



In Summe kommt es durch ein solches Vorhaben, mit welchem Nutzungsänderungen verbunden sind, zu Änderungen im Strömungsregime, wie auch in der thermischen Ausbreitung innerhalb und teils auch außerhalb des Plangebietes. In Summe ist das Vorhaben aus klimaökologischen Gesichtspunkten darstellbar und weist keine erheblichen negativen Auswirkungen auf. Gerade entsiegelnde bzw. verschattende Maßnahmen durch Baumpflanzungen, wie am Ost- und Südrand des Plangebietes können ein Teil der negativen Auswirkungen, bedingt durch den höheren Versiegelungsanteil, kompensieren. In der umliegenden Bestandsbebauung kommt es durch das Vorhaben zu keinen erheblichen klimatischen Veränderungen. Im Nordbereich kommt es zu leichten Reduktionen des Kaltluftvolumenstroms, aber die Funktionalität der Durchlüftung bleibt gewährleistet. Am Südrand kommt es zu leichten Erhöhungen der Kaltluftvolumina. Für die Situation am Tage zeigt sich ein ähnliches Bild, teils verbesserte Bedingungen und teils leichte Zunahmen der Hitzebelastung.

Beispiel: Umnutzung Gewerbebestand zu Wohnbebauung „Kirschgelände (B-Plan Nr. 2146)“

Am nachfolgenden Beispiel soll die Umnutzung eines existierenden Gewerbeareals hin zu Wohnbebauung klimaökologisch betrachtet werden. Es handelt sich um das „Kirschgelände“ in der Kirschstraße im Stadtteil Allach-Untermenzing. Im Osten wird das derzeitige Gewerbegebiet durch eine Bahntrasse abgegrenzt. Östlich der Bahntrasse sowie südlich, südwestlich und nordwestlich des Plangebietes befinden sich locker bebaute Siedlungsbereiche mit einem hohen Grünanteil. Die Blockflächen zentral-westlich sowie nördlich des Planvorhabens unterliegen gewerblicher Nutzung. Im erweiterten Umfeld des Plangebietes befinden sich vor allem im Westen größere Grün- bzw. Freiflächen die landwirtschaftlich genutzt werden, während nordöstlich ein größeres Gewerbegebiet mit hohem Gebäudeanteil angesiedelt ist. Es soll ein städtebauliches Wohnquartier von ca. 1200 Wohneinheiten inklusive sozialer Infrastruktureinrichtungen wie Kindergarten, Kinderkrippe und Schulgelände mit Sporthalle geschaffen werden.



Abbildung 62: Nutzungsraaster von der Bestandssituation (oben) und der Planung, wie sie im Szenario "Wachsende Stadt" realisiert ist (unten).



Die in Abbildung 62 dargestellten Landnutzungsraster verdeutlichen die räumlichen Unterschiede der jeweiligen Klassenausprägung, welche mit dem Vorhaben einhergehen. Das stark versiegelte und bebaute Gewerbeareal soll künftig als Wohnquartier genutzt werden. In diesem Zuge gehen der Gebäude und Versiegelungsanteil um 30 % zurück. Der Freilandanteil hingegen wächst von gegenwärtig 7 % auf 35 %. Der Baumanteil im Vorhabengebiet wächst um 5 %. Hinsichtlich der geplanten Gebäudekörper/-ensembles ist anzumerken, dass diese nicht zu großflächig sind und von ihrer Gestaltung und Ausrichtung her überwiegen ein um-/oder einströmen von Frischluft ermöglichen.

Nachfolgend sollen sowohl die nächtlichen klimaökologischen Bedingungen, sowie auch die thermischen Bedingungen am Tage und die damit einhergehenden Änderungen durch das Vorhaben betrachtet werden.

Ein Blick auf die nächtlichen Temperaturbedingungen zeigt, dass sich im Planungsgebiet im Bestand, welches überwiegend von Versiegelung und Bebauung geprägt ist, im Vergleich zur umliegenden Bebauung hohe Temperaturverhältnisse von über 20 °C ausprägen, insbesondere zwischen den großflächigen Gebäudeköpern. Der Blick auf die nächtlichen thermischen Bedingungen im Falle des Planvorhabens zeigt ein anderes Bild. Aufgrund der kleinteiligeren Bebauung und der Zunahme an Freiflächen kommt es, mit Ausnahme der neuen Straße im Plangebiet, zu Temperaturabsenkungen gegenüber dem Bestandsfall. Die Entsiegelungsmaßnahmen auch unmittelbar bis zu den Gebäuden zeigen einen deutlichen Effekt und senken die nächtlichen Temperaturen von teils deutlich unter 20 °C, sodass komfortable Schlafbedingungen vorherrschen im Quartier. Teils kommt es auch zu leichten Temperaturreduktionen über das Plangebiet hinaus. Dies betrifft insbesondere die westliche, wie auch teils die südöstliche Vorhabengebietsgrenze.

Temperaturzunahmen treten kleinräumig vor allem dort auf, wo im Bestandsszenario unversiegelte Bereiche mit erhöhter nächtlicher Abkühlung vorhanden sind. Die geringfügige Verschiebung des zentralen Verkehrsweges nach Osten und die damit einhergehende Versiegelung wirken sich daher an diesen Stellen vergleichsweise stark aus. Allerdings sind diese Zunahmen nur lokal ausgeprägt.

Insgesamt betrachtet wird das nächtliche Temperaturregime durch die Planung auf der Vorhabenfläche herabgesetzt und hat noch positive Auswirkungen auf die umliegenden Bereiche. Negative Auswirkungen auf die Umgebung hinsichtlich der nächtlichen Temperatur sind nicht zu erkennen.

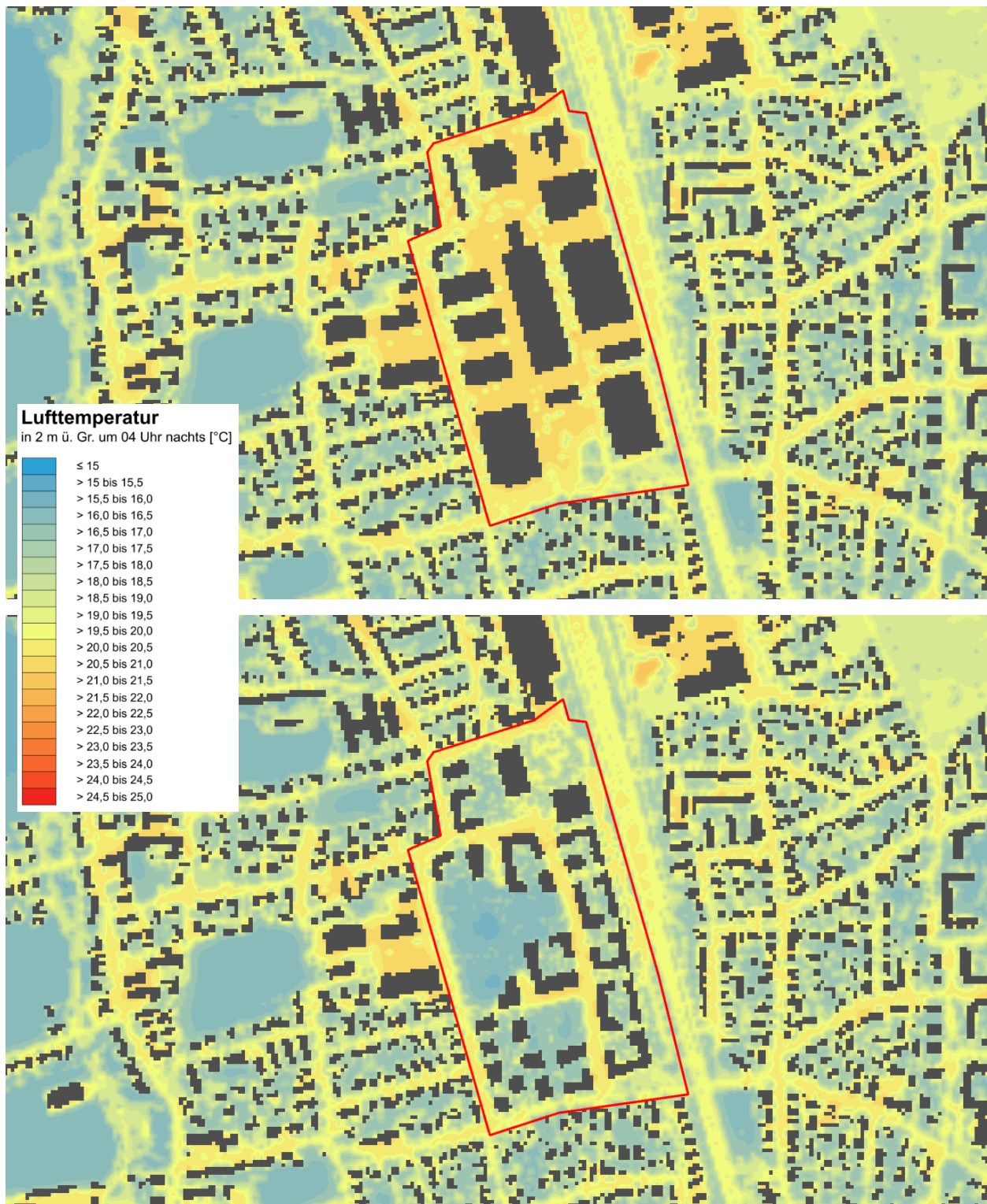


Abbildung 63: Lufttemperatur um 4 Uhr nachts für das Plangebiet „Kirschgärten“ für das Bestandsszenario (oben) und für das Szenario „Wachsende Stadt“ (unten).

Die Ausprägung der Kaltluftströmung ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Es zeigt sich in der Bestandssituation (oben) ein deutliches Einströmen kalter Luftmassen von den Randbereichen kommend in das Plangebiet. Zurückzuführen ist dies auf die zuvor gezeigten warmen nächtlichen Bedingungen im Plangebiet. Die kalten Luftmassen werden förmlich angesogen von dem „Hot-Spot“ (Plangebiet) und sorgen für ein Einströmen und für Kaltluftvolumina von teils über $10 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Gleichzeitig wird die Kaltluft,



allerding auch aus den Wohnbebauungen abgezogen. Aus Bereichen wo das Vorhandensein von Kaltluft als wichtiger zu bewerten ist als auf der Planfläche, welche keinen Daueraufenthalt von Menschen darstellt.

Die Kaltluftvolumina für den Planfall hingegen zeigen ein anderes Bild. Im Großteil des Plangebiets sind Kaltluftvolumina von $< 5 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ vorherrschend. Somit ist das Niveau teils deutlich niedriger als im Bestandsfall. Zudem zeigt das Strömungsfeld ein Ausströmen aus dem Plangebiet, also umgekehrte Verhältnisse gegenüber der gegenwärtigen Situation. Erklärt werden kann diese Tatsache mit den vorherrschenden Temperaturverhältnissen. Diese sind durch die Entsiegelungsmaßnahmen und die Begrünungsmaßnahmen modifiziert gegenüber dem Status quo. Auf dem Plangebiet herrschen, wie zuvor bereits erläutert, deutlich kühlerer nächtliche Temperaturen vor und es kommt zur Kaltluftbildung auf den Freiflächen. Diese Kaltluft strömt nun zu den wärmeren außerhalb des Plangebiets gelegenen Strukturen hin und kann somit für eine Abkühlung bzw. Durchlüftung in diesen Bereichen sorgen. Das gegenüber dem Status quo verringerte Kaltluftvolumen im Planszenario ist für das Vorhabengebiet vor dem zuvor erläuterten Hintergrund nicht als negativ zu bewerten, denn es herrschen in diesem Bereich deutlich kühlere Bedingungen und somit schwächere Ausgleichsströme vor. Wichtig ist jedoch in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass ein Strömungsregime auf dem Areal vorhanden ist. Dies ist wie zuvor beschrieben existent und sorgt insbesondere am West-, Ost- und Nordrand für ein Ausströmen aus dem Plangebiet.

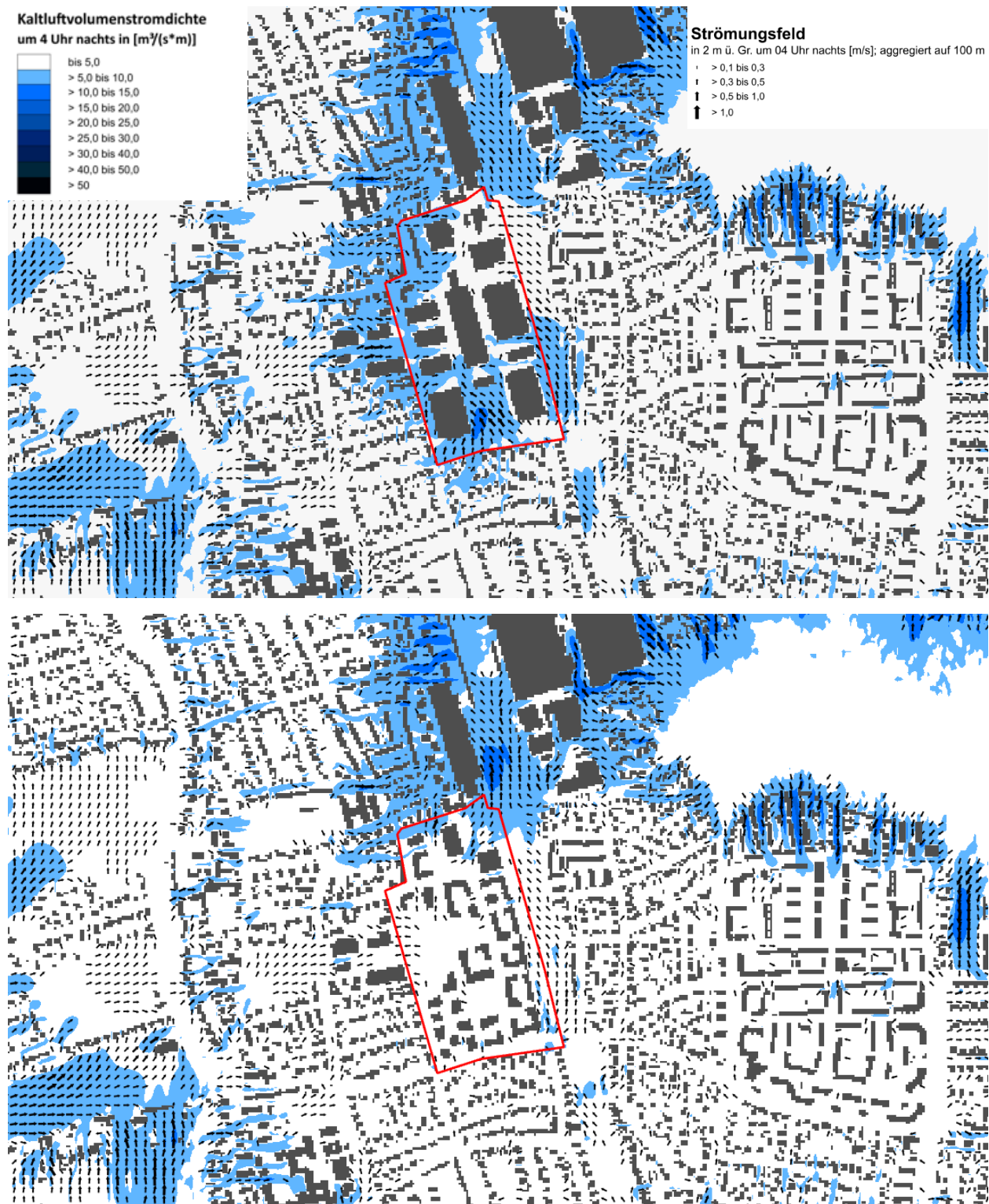


Abbildung 64: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo Szenario (oben) und im Szenario „Wachsende Stadt“ (unten). Das Plangebiet ist rot markiert.

Abschließend soll ein Blick auf die thermische Situation am Tag geworfen werden. Hierfür wird die PET als Parameter herangezogen. Die Ausprägung der PET ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Hier zeigt sich für den Status quo, dass auf dem Plangebiet am Tage durchweg hohe bis sehr hohe Wärmebelastungen anzutreffen sind. Einzig die Gebäudeschatten und vereinzelt Bäume sorgen für punktuell verschattete Bereiche. Im Gegensatz hierzu steht der baumbestandene Bereich am Südostende des Areals.



Zwischen den Gebäuden werden teils PET-Werte von über 45 °C ausgegeben. Diese fallen in die höchste Kategorie „Extrem starke Wärmebelastung“ der dazugehörigen VDI-Belastungsstufen (s. Tabelle 14).

Demgegenüber steht die Situation im Szenario „Wachsende Stadt“ wo die Umnutzung des Areals realisiert ist. Die deutlich kleinteiligeren Gebäude, zusammen mit den entsiegelten und teils baumbestandenen Flächen sorgen für ein deutlich niedrigeres PET-Niveau. Nur vereinzelt werden in Bereichen zwischen den Gebäuden PET-Werte oberhalb von 40 °C erreicht. Hervorzuheben ist auch die Wirkung der Straßenbäume, die einer großflächigeren Erwärmung im Bereich der Planstraße, inmitten des Plangebiets, entgegenwirkt und für kühle Bereiche unterhalb der Bäume sorgt. Kleinräumige PET-Zunahmen sind in den Bereichen einer zukünftigen Oberflächenversiegelung bzw. wegfallender Bestandsvegetation (Bäume oder Büsche) zu beobachten.

Insgesamt zeigt sich, dass die Nutzungsänderung durch das Vorhaben zu starken Positiveffekten an Sommertagen mit potenziell hoher Wärmebelastung führen. Die bioklimatische Situation stellt sich im Plan-Szenario als signifikant besser dar als im Bestandsszenario. Vorallem die Verschattungselemente innerhalb der Bewegungs- und Verkehrsflächen erlauben einen Aufenthalt/Vorankommen im Schatten innerhalb des gesamten Quartiers. Innerhalb der Wohnbereiche und Grünanlagen stellen Baumpflanzungen in den Aufenthalts-, Hof- und Straßenräumen wichtige Maßnahmen zur Sicherstellung einer verträglichen bioklimatischen Situation für die Anwohner dar.

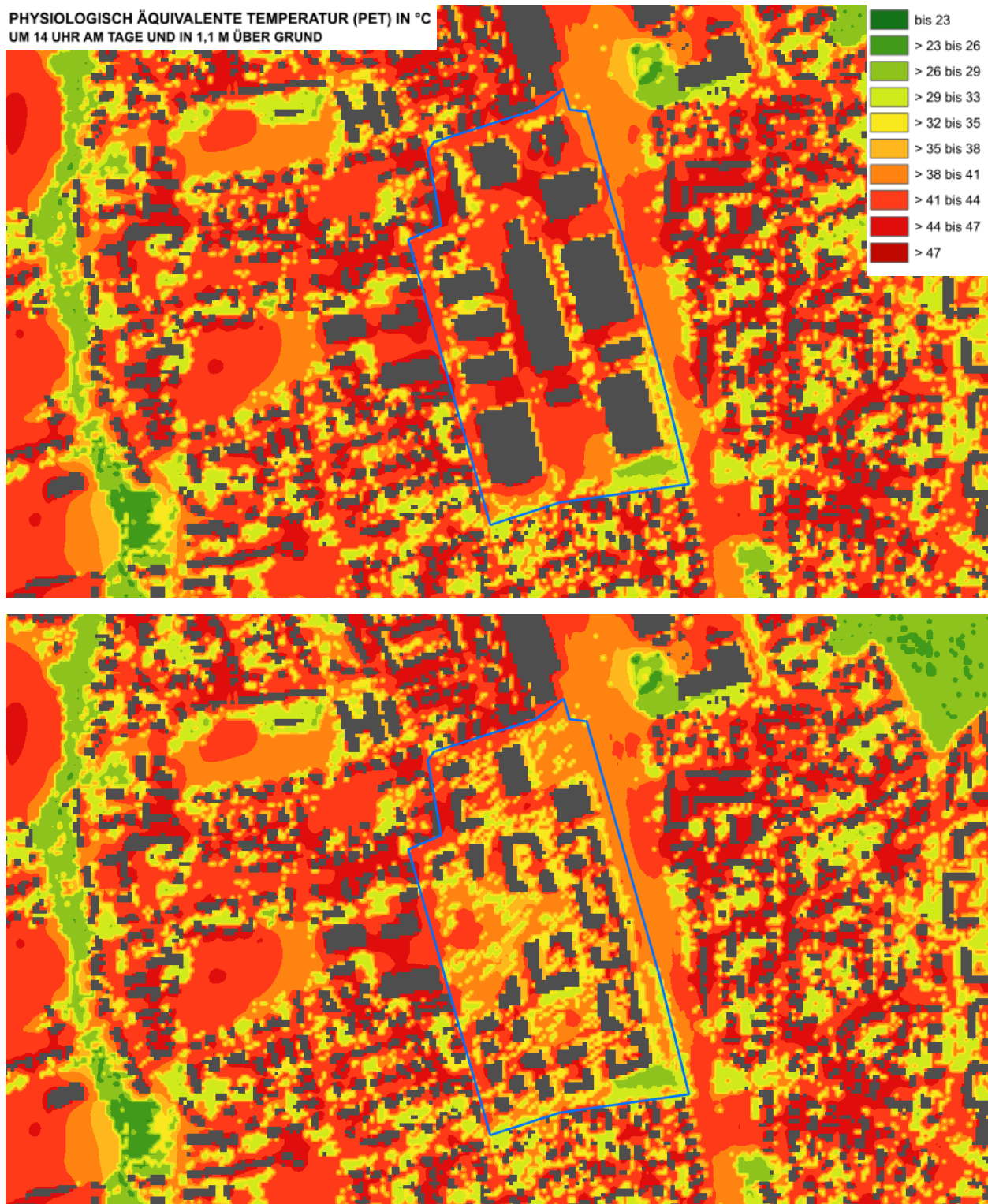


Abbildung 65: Wärmebelastung am Tag Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Status quo Szenario (oben) und für das Szenario „Wachsende Stadt“ (unten). Das Plangebiet ist blau markiert (verkürzte Legende).

Das hier ausgewählte Beispiel zeigt sehr eindrücklich, wie eine Umnutzung von Gewerbe hin zu Wohnfläche vollzogen werden kann. Aus dem hochversiegelten und dicht bebauten Areal, welches einen Hitze-Hotspot in der Nacht, wie am Tage darstellt, wird durch die Umnutzung eine deutliche „Abkühlung“ in beiden Tageszeiten zugeführt. Wichtig hierbei sind ein hoher Anteil von Grünflächen und von Baumstandorten, genauso wie die Ausrichtung und nicht zu massige Gestaltung der Gebäudekörper. Bei Gebäudeensembles ist auf eine Um-/Durchströmbarkeit zu achten.

7. Ergebnisaufbereitung für Bewertung und Planung

7.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die **Planungshinweiskarte** (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl. 1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte 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). 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).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist also 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 dabei zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen („Wirkraum“) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum vor, gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung und schlägt auch RGB-Farbcodes vor. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Es wird darauf hingewiesen, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, eine darüberhinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte stellt eine wichtige Fachgrundlage für die Bauleitplanung dar und liefert zudem wichtiges Abwägungsmaterial. Es ist empfehlenswert, dass Inhalte gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan mit integrierter Landschaftsplanung oder insbesondere dem Bebauungsplan mit Grünordnung) übernommen werden. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann. Zudem stellt die Karte eine wichtige Grundlage für Baugenehmigungen sowie Planfeststellungsverfahren dar.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zum Status Quo Szenario und Zukunftsszenario in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellt, ist es nötig, gemäß der Produktpyramide (Abbildung 10) vorgelagert sog. Bewertungskarten auszugeben. Die sechs Bewertungskarten („Nacht Status quo“, „Tag Status quo“, „Nacht Szenario 1“, „Tag Szenario 1“, „Nacht Szenario 2“, „Tag Szenario 2; Tabelle 8) bauen auf den zugehörigen nächtlichen Klimaanalysekarten bzw. PET-Karten des Tages auf und sind der Planungshinweiskarte hierarchisch untergeordnet. Der Erstellung dieses Kartenwerks liegt ein mit vielen beteiligten Akteuren ein referatsübergreifender abgestimmter Aushandlungsprozess zugrunde (s. Kapitel 3).



7.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (Kapitel 6) 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 auf im Stadtraum eindeutig identifizierbare, räumliche und stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

- flächendeckend für das Stadtgebiet vorliegen,
- möglichst aktuell sein und einer möglichst 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 und
- einem standardisierten Grundgerüst entsprechen, um eine einfache und flächenscharfe Überlagerung mit anderen Kartenwerken zu ermöglichen, z.B. die Integration der Stadtklimaanalyse in die Leitlinie Freiraum.

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene per se nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine gute Grundlage, die durch eine gutachterliche Tätigkeit entsprechend weiterqualifiziert wurde. Die Modifikation betrifft dabei sowohl die Zusammenfassung von sehr kleinräumigen Strukturen (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch die Aufteilung größerer zusammenhängender Flächen in kleinere Funktionseinheiten (vorrangig im Wirkraum). Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen) sowie 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 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 66).

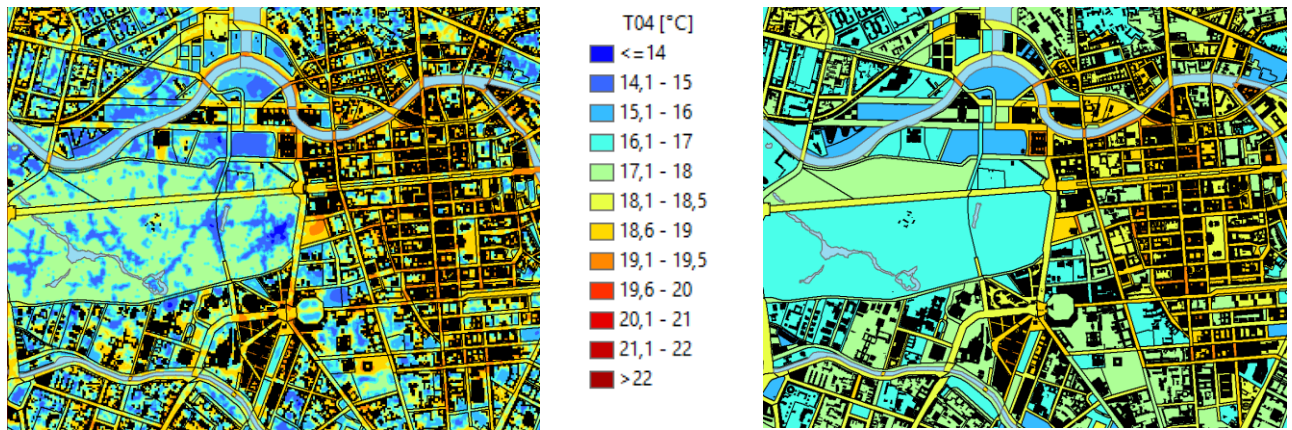


Abbildung 66: Exemplarisches Beispiel für ein Ausgangsraster (links) Beispiel und Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie (rechts) für die nächtliche Lufttemperatur um 04:00 Uhr nachts (T04).

Es sei darauf hingewiesen, dass die einzelnen Teilflächen der Basisgeometrie bei entsprechenden fachlichen Fragestellungen in ihrer Gesamtheit (bspw. inkl. ihrer Nachbarflächen) zu betrachten sind und nicht isoliert in deine Bewertung einbezogen werden sollten. Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich die hier vorgenommenen stadtklimatischen Bewertungen auf klimatische Prozesse zurückführen lassen, die nicht isoliert auf einer Teilfläche stattfinden. Gleichwohl kann es durch die Nutzart (Nutzungsrastraster der Modelleingangsdaten) der entsprechenden Fläche zu unterschiedlichen Ausprägungen von klimatischen Parametern kommen, womit sich Unterschiede in der Bewertung erklären lassen.

7.3 BEWERTUNGSKARTEN FÜR TAG- UND NACHTSITUATION

Die **Modellergebnisse** und die **Klimaanalysekarte** bilden das Prozessgeschehen in Form **absoluter Werte** ab – diese gelten immer für eine autochthonen Sommerwetterlage. Die Beurteilung in den **Bewertungskarten** (und später auch der **Planungshinweiskarte** „PHK“) fußt dagegen auf **relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter** (Kapitel 6) zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

Dabei wurden separate Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation, jeweils für den Status quo und die Zukunftsszenarien erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Wirkraum sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien (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 Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar. Im Folgenden wird die Herleitung der Bewertungsklassen für die drei Rechenszenarien und Tageszeiten geschildert.

7.3.1 WIRKRAUM

Wertgebend für die Wirkraumklassen sind die PET um 14:00 Uhr für die Tagsituation sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 Uhr als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kapitel 5.1.5). Bei der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie mithilfe der oben beschriebenen Methode aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein. Eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet sich fachlich.

In der VDI-Richtlinie (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 resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0, sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 67).

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

Dabei ist

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

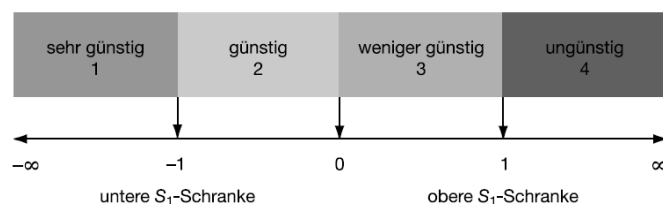


Abbildung 67: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: (VDI 3785, Blatt 1, 2008)).



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 (Kapitel 7.4). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten oder in kalten Klimaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Die Methode ist jedoch entwickelt und optimiert für eine vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die drei zu betrachtenden Situationen (Status quo Szenario, Zukunftsszenario 1 „Mäßiger Klimawandel 2055“ und Zukunftsszenario 2 „Starker Klimawandel 2055“) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden die Statistiken jeweils für die Tag- und Nachtsituation des Status Quo Szenarios und der Zukunftsszenarien berechnet, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für sechs verschiedene Bewertungskarten ergaben. 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 alle sechs Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für München 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 (Tabelle 18). Für die Tagsituation wurde eine Unterscheidung in Wirkraum 1 (Wohnen/Arbeiten) mit vorrangig stationärem Aufenthalt und Wirkraum 2 (Straßenraum) mit vornehmlich mobilem Aufenthalt des Langsamverkehrs wie Fußgängern und Radfahrern getroffen. Nachts steht der Schlafkomfort im Fokus, weshalb hier ausschließlich Wohn- und Gewerbeflächen bewertungsrelevant waren. Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.



Tabelle 18: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Tageszeit und Strukturtyp

Tageszeit	Bewertungsstufen In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1	Mittlerer z-Wert	Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Wirkraum	1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = weniger günstig 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	PET 14:00 Uhr (IST/Zukunft) z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und ≤ -0,33 z-Wert > -0,33 und ≤ 0,33 z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Siedlung, Industrie/Gewerbe
Tagsituation Wirkraum	1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = weniger günstig 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	PET 14:00 Uhr (IST/Zukunft) z-Wert < -1 z-Wert ≥ -1 und ≤ -0,33 z-Wert > -0,33 und ≤ 0,33 z-Wert > 0,33 und ≤ 1 z-Wert > 1	Öffentliche Straßen, Wege und Plätze
Nachtsituation Wirkraum	1 = sehr günstig 2 = günstig 3 = weniger günstig 4 = ungünstig 5 = sehr ungünstig	T 04:00 Uhr (IST/Zukunft) z-Wert < -0,75 z-Wert ≥ -0,75 und ≤ -0,25 z-Wert > -0,25 und ≤ 0,25 z-Wert > 0,25 und ≤ 0,75 z-Wert > 0,75	Siedlung, Industrie/Gewerbe/ Öffentliche Straßen, Wege und Plätze

7.3.2 AUSGLEICHSPRAUM

Als Ausgleichsräume werden vegetationsgeprägte, unbebaute Flächen bezeichnet. Diese sind vornehmlich in der Nacht durch die Bildung kühlerer und frischerer Luft über funktionsfähige Austauschbeziehungen dazu in der Lage, humanbioklimatische oder lufthygienische Belastungen in Wirkräumen zu vermindern oder abzubauen. Am Tage können sie durch ihre Schattenwirkung als wertvolle Naherholungsräume sowie Rückzugsorte an heißen Tagen dienen. Durch diese unterschiedlichen Kerneigenschaften der Ausgleichsräume zu unterschiedlichen Tageszeiten war es notwendig, die Tag- und Nacht-Situation in einem teilautomatisierten Verfahren getrennt zu bewerten und wie bereits im Wirkraum in fünf Stufen von „sehr geringe“ bis „sehr hohe“ bioklimatische Bedeutung (nachts) bzw. Aufenthaltsqualität (tags) einzuteilen. Sowohl für das Status Quo Szenario als auch die Zukunftsszenarien wurden hierbei jeweils dieselben Methodiken angewandt.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen bzw. umbaute Park- und Flurwindssysteme stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion) und eine hohe Bedeutung, wenn sich in deren direktem Nachlauf befanden (Sekundärfunktion). 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 68 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Kaltluftfunktion:
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 6,16 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (identisch in den Zukunftsszenarien) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,14 \text{ m/s}$ (identisch in den Zukunftsszenarien) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate von $23,9 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (identisch in den Zukunftsszenarien)
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
 - Direkt angrenzende Grünflächen sind in ihrer klimatischen Wirkung relevant
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
 - Räumliches Abschneidekriterium, um nahegelegene Siedlungsbereiche und deren Benefit durch die Nähe zu den Grünflächen (bspw. daher ausgehende Flurwinde / Parkwinde) zu erfassen

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

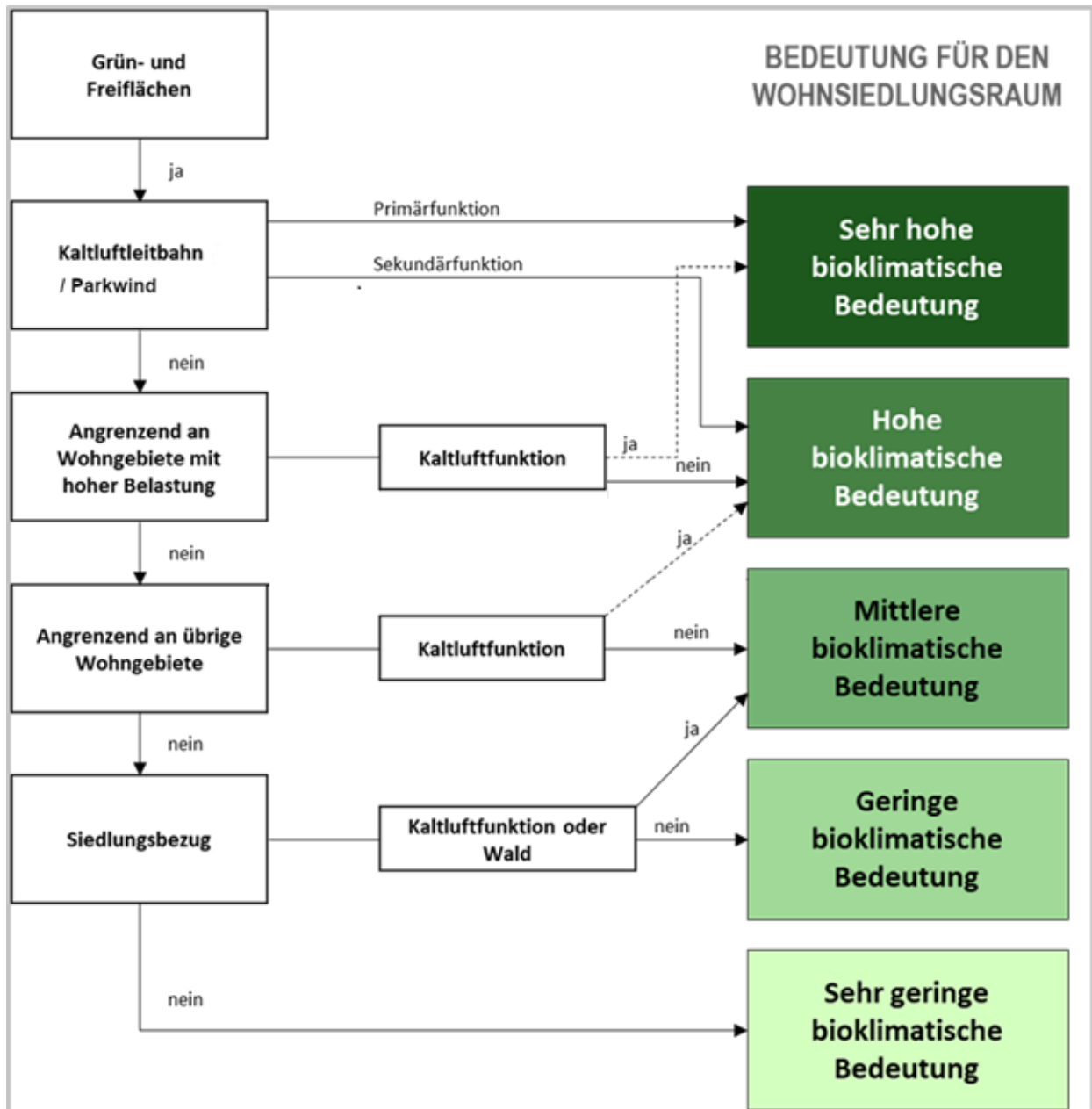


Abbildung 68: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grün- und Freiflächen für den Wohnsiedlungsraum in der Nachtsituation.

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 19 listet die festgelegten z-Werte und die zugehörigen PET-Bereiche für das Status Quo Szenario und die Zukunftsszenarien für alle Ausgleichsflächen im Münchner Stadtgebiet auf und stellt die in Anlehnung an VDI-Richtlinie (VDI 3785, Blatt 1, 2008) erarbeiteten Bewertungsstufen gegenüber.

Tabelle 19: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen <i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i>	Mittlerer z-Wert <i>PET 14:00 Uhr (Ist/Zukunft)</i>	Strukturtyp
Tagsituation Ausgleichsraum	5= sehr hoch 4= hoch 3= mittel 2= gering 1= sehr gering	bis -1 > -1 bis ≤ -0,33 > -0,33 bis ≤ 0,33 > 0,33 bis ≤ 1 > 1	Grün-/Freiflächen, Wald

7.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 51 und Abbildung 52) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und umbaute Park- und Flurwindssysteme aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten entspricht (Kapitel 6.2.).

Neben diesen, die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Zum einen zeigt der Kaltlufteinwirkungsbereich in hellblauer, rasterbasierter Schraffur an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann, zum anderen sind Wohnraumsiedlungsbereiche mit Klimafunktion (vgl. folgender Abschnitt) durch eine blaue Umrandung hervorgehoben (Abbildung 69).

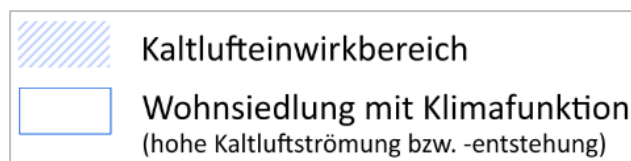


Abbildung 69: Legendensymbol der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von $6,2 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (für die Zukunft identisch) oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von $0,14 \text{ m/s}$ (für die Zukunft identisch) erreichen oder überschreiten. Sollten mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufteinwirkungsbereiche ausgewiesen worden sein, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Klimafunktion“ gekennzeichnet. Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.



7.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN: STATUS QUO UND ZUKUNFTSSZENARIEN

7.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 70 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für München im Status quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden.

Etwa 55 % aller Wirkräume im Stadtgebiet sind in der Bestandssituation (Status quo) durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören nahezu alle Stadtbezirke, außer die im Zentrum des Stadtgebietes, wie Altstadt-Lehel, Au-Haidhausen, Ludwigsvorstadt-Isarvorstadt, Schwanthalerhöhe und Maxvorstadt zu dieser Kategorie. Im Allgemeinen weisen die Bereiche innerhalb dieser Kategorie einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte am Tage bereits dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt werden kann. Es zeigt sich eine stärkere Ausprägung dieser Kategorie in den weiter südlich gelegenen Stadtbezirken.

Knapp ein Drittel (ca. 29 %) der Münchner Wirkraumflächen weisen eine günstige thermische Situation auf. Diese Flächen erstrecken sich über das gesamte Stadtgebiet und schließen teils auch die Kerngebiete von München mit ein, wie die zuvor bereits erwähnten Stadtbezirke und nahezu sämtliche außen gelegenen Bezirke des Stadtgebietes. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die dennoch über einen hohen Grünanteil verfügen. Es zeigt sich eine etwas stärkere Ausprägung dieser Klasse in den nördlich gelegenen Bezirken.

13,6 % der Wirkraumflächen weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete der bereits angesprochenen zentral im Stadtgebiet gelegenen Stadtbezirke mit einem mittleren bis hohen Versiegelungsgrad. Ein weiterer Teil entfällt auf die Industrie- und Gewerbeflächen der etwas dezentraler gelegenen Stadtteile wie bspw. Obersendling, Riem, Milbertshofen, Aubing und Obermenzing.

Lediglich rund 3 % der Wohn- und Gewerbeflächen Münchens gehören der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Darunter entfallen große Teile der Innenstadt im Bereich zwischen Viktualienmarkt und der Residenz, sowie in Richtung Westen zum Hauptbahnhof sowie die unmittelbar südlich daran angrenzenden Bereiche. Ein weiterer Teil entfällt auf Gewerbe-/ Industriegebiete wie bspw. das BMW-Werk, das Krauss Maffei oder das MAN-Gelände. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt und verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Darüber hinaus stehen in unmittelbarer Umgebung oftmals nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

Im Status quo sind keine der Wohn- und Gewerbeflächen mit der sehr ungünstigen thermischen Situation charakterisiert.



Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand eine Ausweisung von 10 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen.

Ausgleichsflächen von „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung, finden sich zu 28 % innerhalb der Münchner Stadtgrenzen wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Peripherie o.g. Kaltluftprozesse bzw. im Bereich der Parkwindareale. Zusätzlich gehören einige weitere städtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an, z.B. der Maximiliansplatz, Hofgarten, Promenadeplatz, Herzog-Wilhelmstraße.

Rund 42 % der Ausgleichflächen entfallen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befinden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrar- und vor allem Waldflächen, welche einen direkten Siedlungsbezug zur Stadt haben, in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit geringer humanbioklimatischer Bedeutung nimmt mit ca. 14 % den drittgeringsten Teil aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Grünflächen fernab des Stadtzentrums, die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen (bspw. Teile der Isarauen im Bereich Schwabing-Freimann).

In die Klasse mit der „sehr geringen“ bioklimatischen Bedeutung entfallen rund 5 % der Flächen. Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um Ackerflächen und Waldareale mit allenfalls bedingtem Bezug zu Siedlungsflächen, überwiegend im Bereich des Nord- oder Westrandes des Stadtgebiets. Abbildung 70 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für München im Status quo und Abbildung 71 für das Szenario 2.

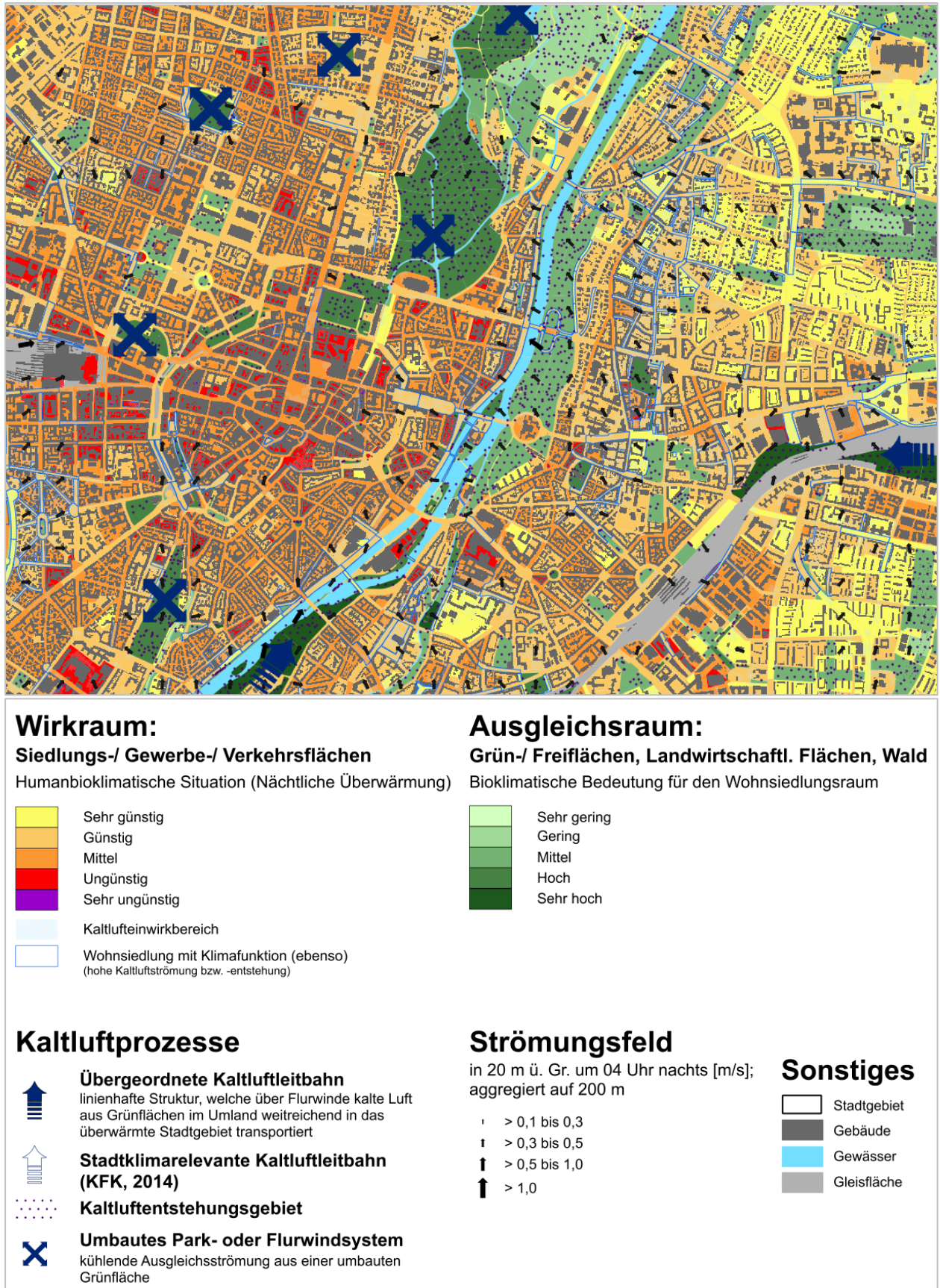
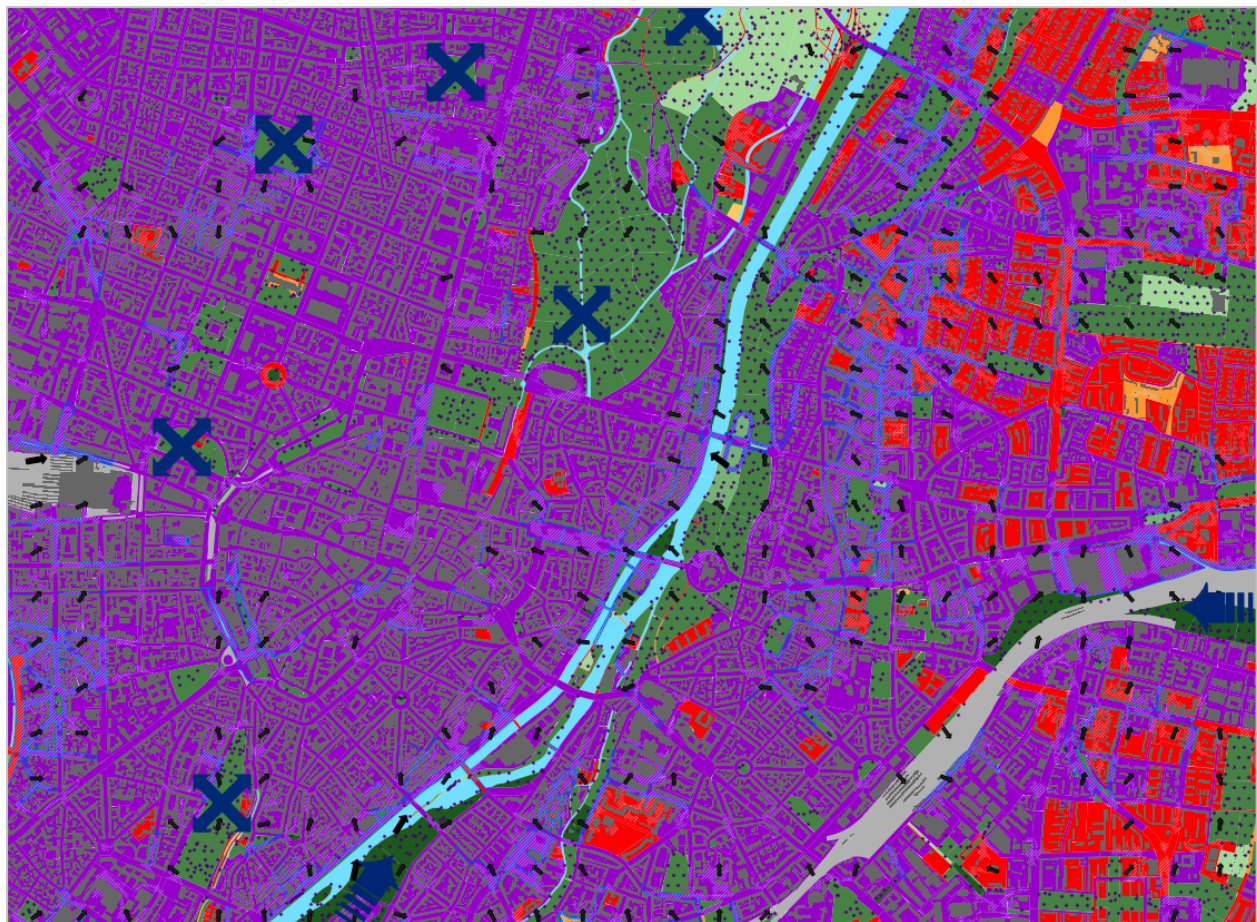


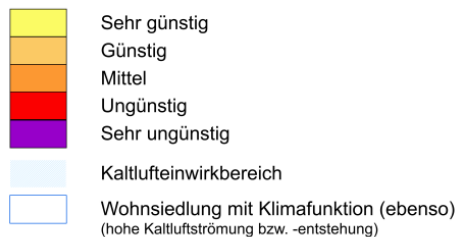
Abbildung 70: Bewertungskarte der Nachtsituation im Status quo für einen Ausschnitt des Münchner Stadtgebiets.



Wirkraum:

Siedlungs-/ Gewerbe-/ Verkehrsflächen

Humanbioklimatische Situation (Nächtliche Überwärmung)



Ausgleichsraum:

Grün-/ Freiflächen, Landwirtschaftl. Flächen, Wald

Bioklimatische Bedeutung für den Wohnsiedlungsraum



Kaltluftprozesse

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**
linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Stadtklimarelevante Kaltluftleitbahn (KFK, 2014)**
- Kaltluftentstehungsgebiet**
- Umbautes Park- oder Flurwindsystem**
kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche

Strömungsfeld

in 20 m ü. Gr. um 04 Uhr nachts [m/s];
aggregiert auf 200 m

- > 0,1 bis 0,3
- > 0,3 bis 0,5
- > 0,5 bis 1,0
- > 1,0

Sonstiges

- Stadtgebiet
- Gebäude
- Gewässer
- Gleisfläche

Abbildung 71: Bewertungskarte der Nachtsituation im Szenario 2 (starker Klimawandel 2055) für einen Ausschnitt des Münchner Stadtgebiets.



Die größten Unterschiede im Vergleich zum Status Quo sind in der nächtlichen Bewertungskarte des hier betrachteten zweiten Zukunftsszenarios („starker Klimawandel 2055“) durch das Klimawandelsignal zu beobachten (s. Abbildung 71). Im Wirkraum ergeben sich bei der Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen, die bereits im Status Quo existierten, eine deutliche Verschiebung hin zu schlechteren Bedingungen (Tabelle 20). Hier kehren sich die Verhältnisse nahezu um und die prozentualen Anteile von den beiden sehr günstigen bzw. günstigen Klassen wandern zukünftig zu den beiden ungünstigsten Klassen und die Klassen „sehr günstig“ und „günstig“ sind nahezu nicht mehr belegt.

Bei den Ausgleichsraumflächen zeigen sich die Änderungen hinsichtlich der prozentualen Flächenanteile beim Vergleich zwischen Status Quo und Zukunftsszenario 2 vor allem im Bereich der mittleren Klasse. Hier verschieben sich die Anteile hin zu der sehr hohen und hohen Klasse, welche in Zukunft mehr Anteile erhalten. Die übrigen Klassen bleiben unverändert. Tabelle 20 zeigt zusammengefasst die prozentualen Veränderungen der Bewertungsstufen in Wirk- und Ausgleichsraumflächen im Vergleich von Status Quo zu den zwei Zukunftsszenarien.

Tabelle 20: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Status Quo und den zwei Zukunftsszenarien (Nacht- und Tagsituation)

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen <i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i>	Flächenanteile [%] Status quo	Flächenanteile [%] Szenario 1	Flächenanteile [%] Szenario 2
Nacht	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	55,0	0,7	0,0
		2= günstig	28,6	26,2	0,2
		3= mittel	13,6	49,0	3,1
		4= ungünstig	2,8	18,0	53,8
		5= sehr ungünstig	0,0	6,1	42,8
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	1= sehr gering	5,1	5,1	5,1
		2= gering	14,4	14,4	14,4
		3= mittel	41,9	36,0	14,7
		4= hoch	28,4	31,3	39,5
		5= sehr hoch	10,2	13,3	26,3
Tag	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (Aufenthaltsqualität)	1= sehr günstig	8,0	2,5	0,0
		2= günstig	41,2	27,8	4,3
		3= mittel	44,8	51,2	39,9
		4= ungünstig	6,0	18,4	50,5
		5= sehr ungünstig	0,0	0,1	5,3
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (Aufenthaltsqualität)	1= sehr günstig	15,1	8,3	1,9
		2= günstig	31,0	23,4	11,4
		3= mittel	40,6	39,0	30,4
		4= ungünstig	13,2	28,7	43,1
		5= sehr ungünstig	0,0	0,6	13,2
	Ausgleichsraum (Aufenthaltsqualität)	1= sehr gering	0,0	0,9	31,3
		2= gering	25,4	37,7	23,5
		3= mittel	27,6	19,8	16,6
		4= hoch	16,6	19,0	28,5
		5= sehr hoch	30,3	22,5	0,2

7.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für München, die im Status quo Szenario in Abbildung 72 aufgetragen ist, werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und Ausgleichsräume im Hinblick auf ihre Aufenthaltsqualität und 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.

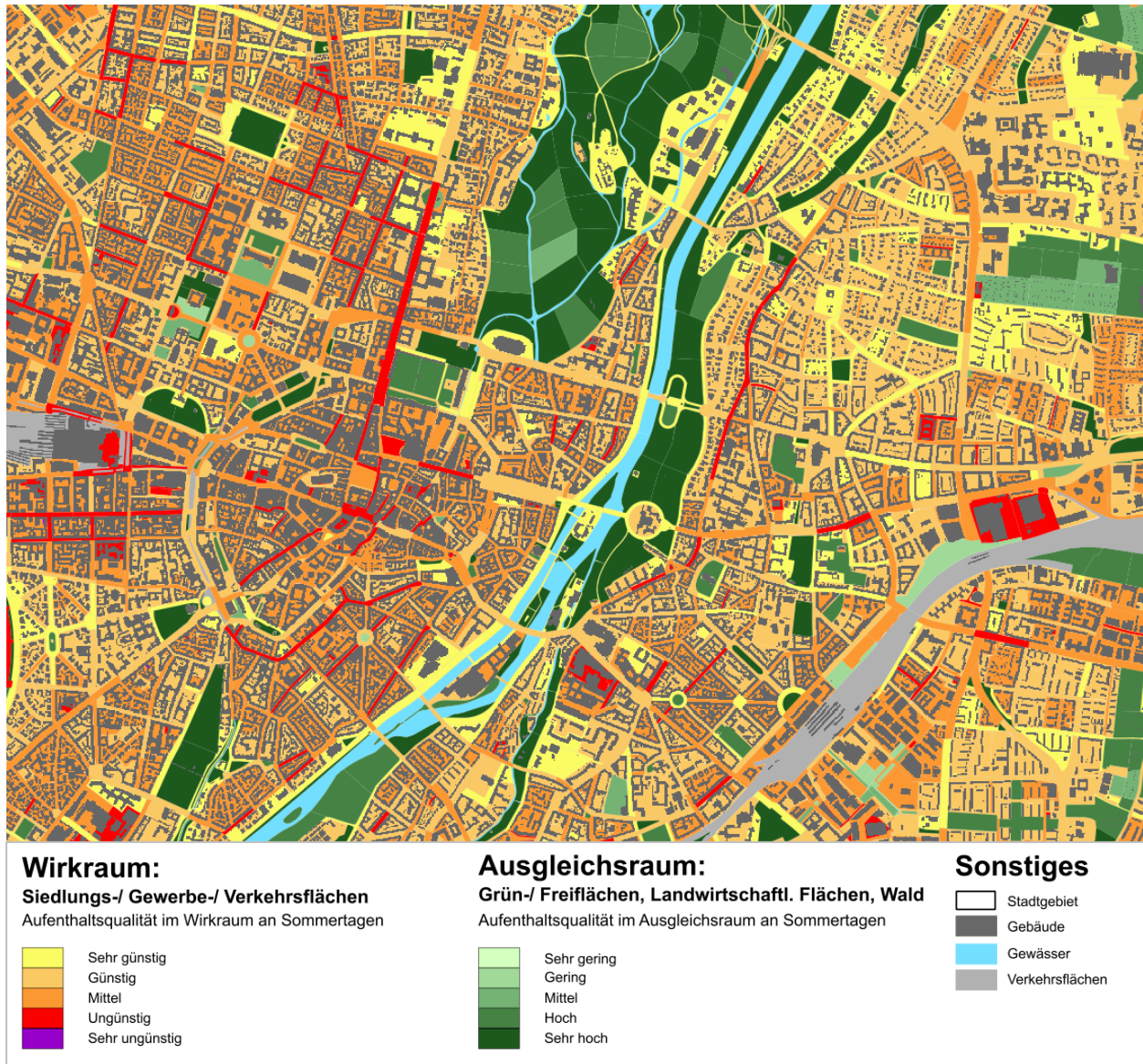


Abbildung 72: Bewertungskarte der Tagsituation im Status quo Szenario für einen Ausschnitt des Münchner Stadtgebiets. Legende verkürzt.



In München sind 8 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 15 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet (**Wirkraum**). Vor allem die durchgrüneten, zumeist waldnahen Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbauung gehören dieser Kategorie an. Solche Flächen finden sich vereinzelt im gesamten Stadtgebiet und vermehrt in den äußeren Lagen der Stadt. Am Tage sorgt der hohe Grün- (insbesondere Baum-) Anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum. Beispiele für den Verkehrsraum mit günstiger thermischer Situation sind die zu großen Teilen mit Bäumen bestandenen Straßen wie bspw. die Straßen entlang des alten Nördlichen/Südlichen oder Ost-Friedhofs oder entlang der Theresienwiese, Straßen entlang der Isar wie bspw. die Steinsdorfstraße oder die Wittelsbacherstraße und etliche weitere Straßen, welche über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind.

41 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt München wurden der Kategorie der günstigen humanbioklimatischen Situation zugeordnet. Diese locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Beispielflächen hierfür sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt. Bei den Verkehrsflächen weisen 31 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf, wie Teile der Prinzregentenstraße, der Maximilianstraße oder der Sonnenstraße.

Mit knapp 45 % ist der größte Anteil der Wohn- und Gewerbeflächen heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Bei den Verkehrsflächen und öffentlichen Flächen sind es rund 41 %. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Obwohl die Grünausstattung hier oftmals gering ausfällt, erzeugt die enge Gassenbebauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen. Diese Bereiche finden sich im gesamten Stadtgebiet. Außerdem finden sich Wirkraumflächen mit mittlerer Belastung bei niedrigerer Bebauung und etwas höherem verschattenden Grünanteil. Viele der Gewerbeareale wie das Gewerbegebiet in Freiam, das BMW-Werksgelände oder der Euro-Industriepark fallen mit dem Großteil ihrer Flächen in diese mittlere Klassifizierung. Dies rührt auch daher, dass es zwischen den großen und flächigen Gebäuden zu Verschattungen kommt.

Nur 6 % der Münchner Wohn- und Gewerbeflächen und 13 % der Verkehrsflächen sind am Tage durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Dabei befindet sich der Großteil der Flächen nicht im Innenstadtbereich, sondern in den nördlichen Stadtbezirken, wie bspw. in Freiam oder Feldmoching-Hausenberg oder in Allach-Untermenzing. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die zumeist mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen und teils außen gelegenen Stadtteile. Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils ist vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 5 m Einzugsbereich in die Modellrechnung zu erhalten. Bei Teilen der Industrie- und Gewerbearealen (bspw. Gewerbegebiet Freiam oder Zamdorfer Straße) 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 z.B. Teile der Ludwigstraße, der Ismaninger Straße sowie große Teile der Innenstadt-Straßenbereiche, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr mit sich bringen.

Im Status quo entfallen keine Flächen auf die Kategorie „sehr ungünstige“ thermischen Situation.



Anders zeigt sich der Vergleich mit dem Szenario 2 „starker Klimawandel“. Ein Blick in Tabelle 20 zeigt, dass dort 5 % der Wohn- und Gewerbeflächen und 13 % der Verkehrsflächen in diese Kategorie fallen. Es kommt insgesamt im Wirkraumbereich bei den Zukunftsszenarien, verglichen zum Status Quo Szenario, zu einer Verschiebung der Flächenanteile hin zu den ungünstigeren Klassen. Zurückzuführen ist dies auf die Temperaturerhöhungen in den Zukunftsszenarien, welche für deutlich heißere und somit ungünstigere Bedingungen sorgen.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher Aufenthaltsqualität (30,3 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In die höchste Bewertungsstufe fallen die weitläufigen Grün- und Waldflächen des Stadtgebietes, wie die Isarauen, der Schlosspark Nymphenburg oder die Friedhofsbereiche sowie größere Waldareale. Weiterhin weisen einige der bereits erwähnten innenstadtnahen Grünflächen wie Maximilianplatz, Nußbaumpark, Alter botanischer Garten oder der Dichtergarten sehr hoch bewertete Ausgleichsflächen auf. Alle diese Flächen stellen einen idealen Rückzugsort für die Bewohner der belasteten (Innen-) Stadtbezirke dar.

Rund 16 % der Ausgleichsflächen sind einer hohen Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den umliegenden Grün- und Waldbereichen zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichtereren Baumbestand, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Auch im Innenstadtbereich sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. Hofgarten, Westfriedhof; Teile der Isaraue), die ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume wirken.

Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (27 % der Grünflächen) sind überwiegend in den zentrumsferneren Bereichen des Stadtgebiets verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wegebeziehungen, die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit geringer (25 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen des Münchner Stadtgebietes ausmachen.

Die Bewertungskarte für den Tag im Szenario 2 „starker Klimawandel“ ist in Abbildung 73 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier das Klimawandelsignal, wie auch in den Wirkraumflächen, deutliche Auswirkungen auf die Klassifizierung hat, was auch an den Prozentsätzen in Tabelle 20 erkennbar wird. Eine Zunahme der Flächenanteile im Zukunftsszenario 2 gegenüber dem Status Quo Szenario, erfahren die Klassen „hoch“ mit ca. 12 %. Die Klasse „sehr gering“ legt um über 30 Prozentpunkte zu. Die Trends hin zur „schlechteren“ Aufenthaltsqualität bzw. höheren humanbioklimatischen Belastung zeigt sich durchweg in beiden Zukunftsszenarien. Die Ausprägung ist stärker in Abhängigkeit vom Klimawandelsignal.

Da am Tage die Priorität auf Verschattung liegt, diese Effekte aber anders als das nächtliche Kaltluftprozessgeschehen nicht überörtlich, sondern lokal stattfinden, ist die Bewertung einzelner Ausgleichsräume nur von ihrer eigenen Umgestaltung abhängig, nicht jedoch von der Entwicklung benachbarter Flächen.

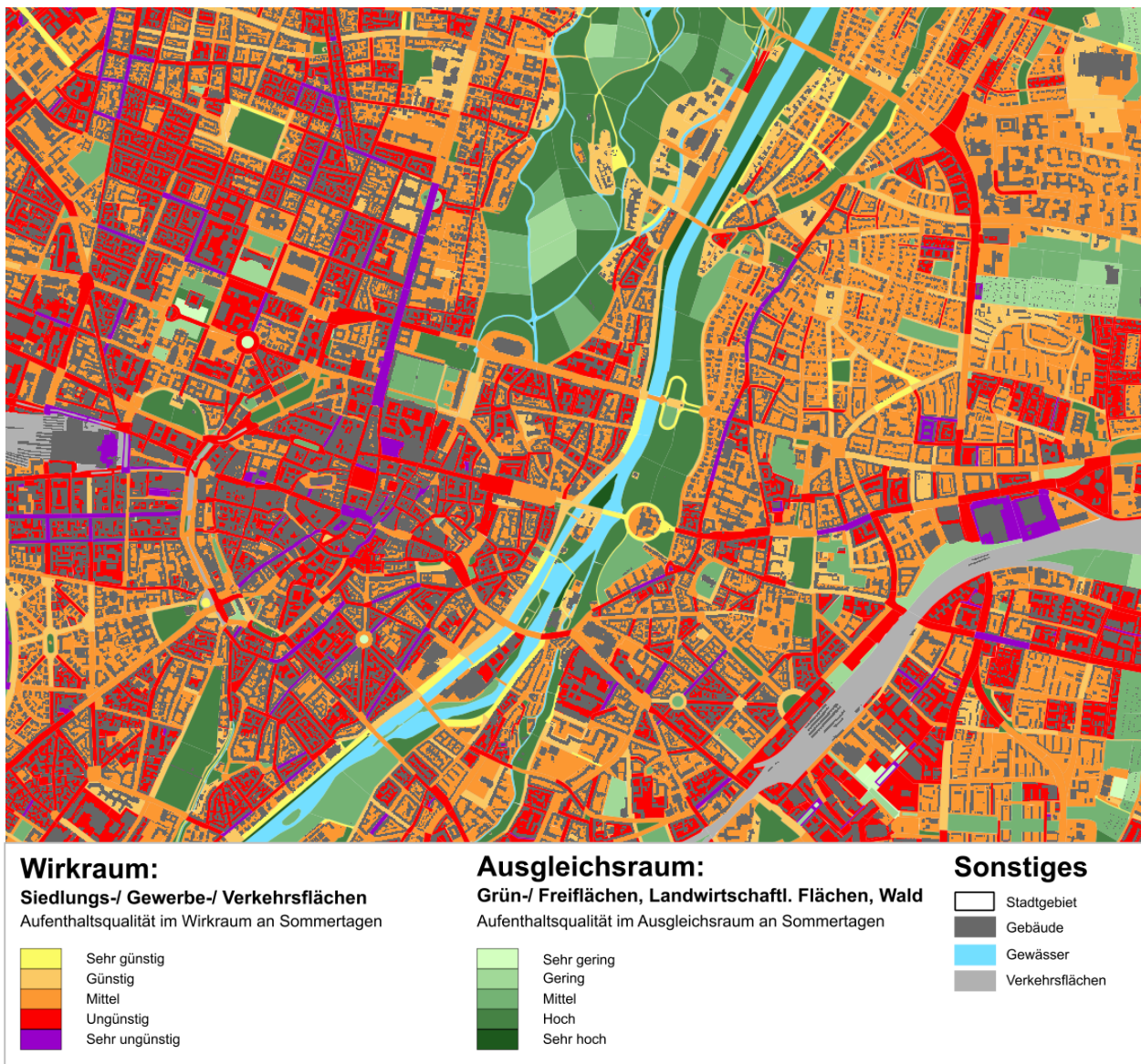


Abbildung 73: Bewertungskarte der Tagsituation im Zukunftsszenario 2 (Starker Klimawandel (RCP 8.5) 2055) für einen Ausschnitt des Münchner Stadtgebiets. Legende verkürzt.

7.4 PLANUNGSHINWEISKARTE ALS ZENTRALES PRODUKT FÜR DIE PLANUNG

In der *Planungshinweiskarte Stadtklima* wurden die Ergebnisse der sechs Bewertungskarten zusammengefasst. Die Karte macht auf den ersten Blick ersichtlich, welche Flächen ein sehr hohes Handlungserfordernis haben (z.B. Erhalt von Grünflächen oder Verbesserung der bioklimatischen Situation in Siedlungsbereichen) und wo in München Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden müssen (Abbildung 74). Damit entspricht die vorliegende Planungshinweiskarte der Flächenkulisse Luftaustausch, mit deren Entwicklung das Referat für Klima- und Umweltschutz durch den Stadtratsantrag „Erhalt der Lebensqualität und Schutz vor Überhitzung durch klimaangepasste Gestaltung der Stadtentwicklung: Langfristige Sicherung von Münchens Frischluftschneisen!“ (Sitzungsvorlage Nr. 20-26 / A 04083) beauftragt wurde.

Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte die Weiterentwicklung der Planungshinweiskarte (damals als „Bewertungskarte“ bezeichnet) aus der Stadtklimaanalyse München 2014 (GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2014) dar.

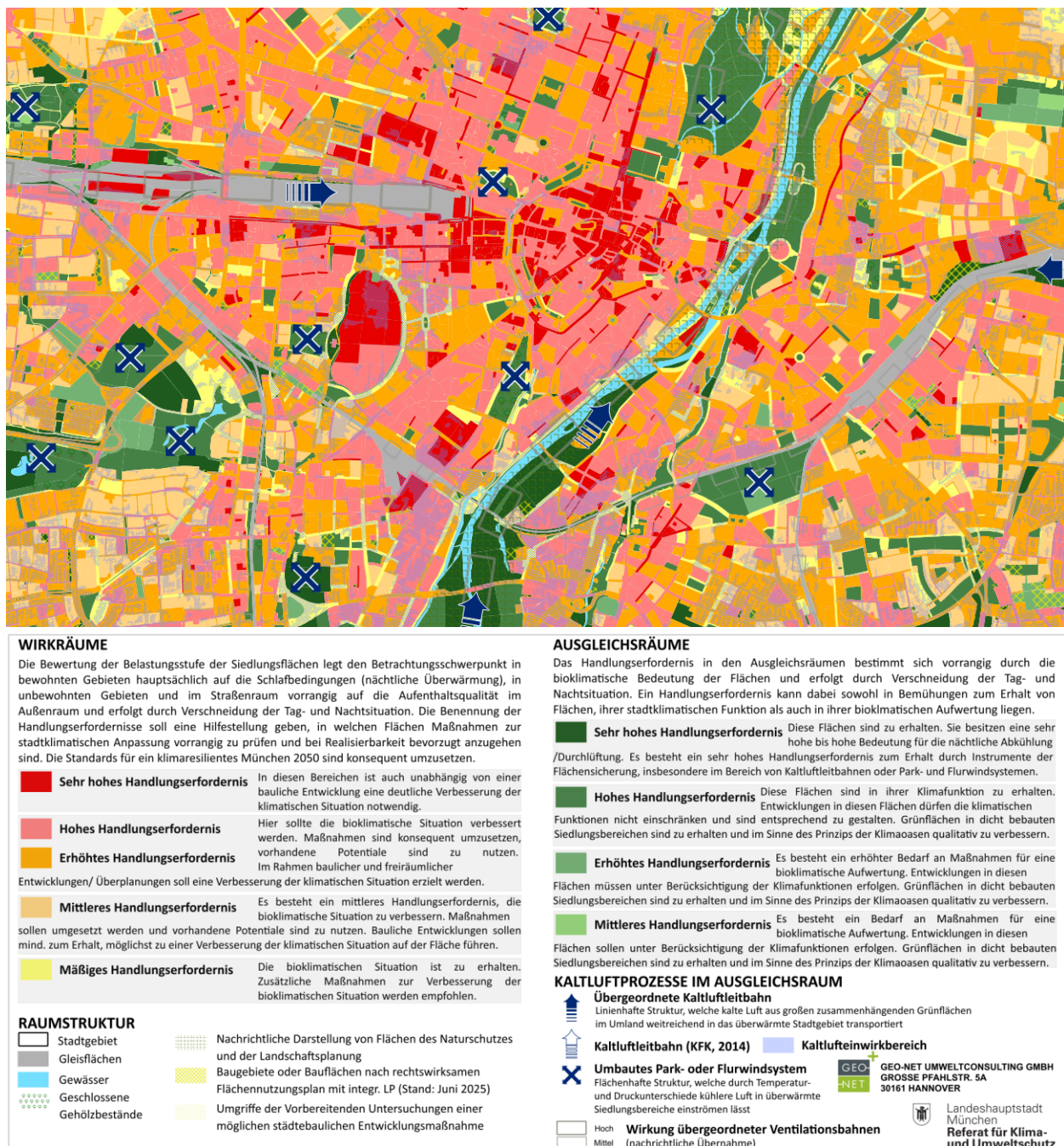


Abbildung 74: Planungshinweiskarte Stadtklima in einem Ausschnitt der Stadt München (verkürzte Legende)



7.4.1 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSERFORDERNISSE IM WIRKRAUM

Im bebauten Wirkraum werden die **stadtklimatischen Handlungserfordernisse** dargestellt. Für die Einteilung der Handlungserfordernis-Kategorien wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität) (60 %: 40 %), in unbewohnten Gebieten (Gewerbe-/Industriegebiete) und im Straßenraum sowie auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum) (60 %: 40 %). Somit wurde die 5-stufige Bewertungsklassifikation aus den Bewertungskarten aufrecht erhalten.

Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und auf die Klimafunktion (bzw. Belastungssituation) der Siedlungsflächen bezogen. Das höchste Handlungserfordernis erhalten Flächen, die bereits heute (Status quo) oder in den als *base case* anzusehenden Szenarien „mäßiger Klimawandel 2055“ die höchste bioklimatische Belastung aufweisen. In der Klasse „Hohes Handlungserfordernis“ liegen ebenfalls die Siedlungsflächen, die unter dem Einfluss der Szenarien „Starker Klimawandel 2055“ die höchste Belastung verzeichnen. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 21 skizziert für die weiteren Handlungserfordernisse fort, bis aus stadtklimatischer Sicht kein vorrangiges Handlungserfordernis mehr abzuleiten ist.

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

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Sehr hohes Handlungserfordernis	IST = Höchste oder sehr hohe Belastung ODER P1 = Höchste Belastung	2,4 %
Hohes Handlungserfordernis	IST = Hohe Belastung ODER P2 = Höchste Belastung	26,9 %
Erhöhtes Handlungserfordernis	IST = Mäßige Belastung ODER P1 = sehr hohe Belastung	44,8 %
Mittleres Handlungserfordernis	P2 = Sehr hohe Belastung	18,7 %
Mäßiges Handlungserfordernis	Übrige Flächen	7,2 %
IST = Status quo; P1 = Szenario mäßiger Klimawandel; P2 = Szenario starker Klimawandel, Belastungsstufen beziehen sich auf die kombinierte Bewertung		

Die Handlungserfordernisse sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind. Eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung ist jeweils für den spezifischen Vorhabensfall festzulegen. Dafür wurden die Handlungserfordernisse in Tabelle 22 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen sowie ein Maßnahmenkatalog in Kap. 7.6 zur Verfügung gestellt. Grundsätzlich sind bei baulichen Entwicklungen Verschlechterungen der klimatischen Situation im direkten Umfeld zu vermeiden.

Tabelle 22: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zu den Handlungserfordernissen im Wirkraum

Bewertung im Wirkraum	Stadtklimatische Planungshinweise
Sehr hohes Handlungserfordernis	In diesen Bereichen ist auch unabhängig von einer baulichen Entwicklung eine deutliche Verbesserung der klimatischen Situation notwendig.
Hohes und erhöhtes Handlungserfordernis	Hier sollte die bioklimatische Situation verbessert werden. Maßnahmen sind konsequent umzusetzen, vorhandene Potentiale sind zu nutzen. Im Rahmen baulicher und freiräumlicher Entwicklungen / Überplanung soll eine Verbesserung der klimatischen Situation erzielt werden.
Mittleres Handlungserfordernis	Es besteht ein mittleres Handlungserfordernis, die bioklimatische Situation zu verbessern. Maßnahmen sollen umgesetzt werden und vorhandene Potentiale sind zu nutzen. Bauliche Entwicklungen sollen mindestens zum Erhalt, möglichst zu einer Verbesserung der klimatischen Situation auf der Fläche führen.
Mäßiges Handlungserfordernis	Die bioklimatische Situation ist zu erhalten. Zusätzliche Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen.

In Flächen der drei höchsten Handlungserfordernisse, die in München ca. 74 % des Siedlungsraums ausmachen, soll *bei baulichen Entwicklungen / Überplanungen eine klimatische Verbesserung erzielt werden. Es besteht ein sehr hohes Handlungserfordernis durch Maßnahmen die bioklimatische Situation zu verbessern. Maßnahmen sind prioritär umzusetzen, vorhandene Potentiale sind zu nutzen. Im Rahmen baulicher und freiräumlicher Entwicklungen / Überplanung soll eine Verbesserung der klimatischen Situation erzielt werden.* Bei sehr hohem Handlungserfordernis (ca. 3 % Flächenanteil) ist unabhängig von einer baulichen Entwicklung eine Optimierung der klimatischen Situation anzustreben.

Bei knapp 19 % der Siedlungsflächen in München besteht ein „mittleres Handlungserfordernis“. Maßnahmen sollen umgesetzt werden und vorhandene Potentiale sind zu nutzen. Bauliche Entwicklungen sollen mindestens zum Erhalt, möglichst zu einer Verbesserung der klimatischen Situation auf der Fläche führen.

In rund 7 % des Münchner Siedlungsraums besteht ein mäßiges stadtklimatisches Handlungserfordernis, für die im Sinne des Vorsorgegedankens die *Einhaltung klimaökologischer Mindeststandards bei Entwicklungen zu beachten* sind. Dabei ist die *bioklimatische Situation zu erhalten und nach Möglichkeit zu verbessern*. Hierzu werden entsprechende *Maßnahmen empfohlen*.

Mit „*klimaökologischen Mindeststandards*“ sind u.a. eine möglichst geringe Versiegelung, das Einplanen von genügend klimaresilienten und heimischen Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung mit genügend Substratschichtdicke gemeint. Konkretisierungen der Mindeststandards finden sich im Beschluss „Klimaresilientes München 2050“ Zu den „*Anpassungsmaßnahmen*“ zählen je nach Vorhaben bspw. die Schaffung öffentlicher kühler Orte, das Freihalten von Durchlüftungssachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume Fontänen bzw. Brunnen. Zudem hebt die Karte Kaltlufteinwirkbereiche im Siedlungsraum hervor, also Bereiche mit einer hohen Kaltluftströmung bzw. -entstehung, die potenziell auch auf angrenzende Räume günstig wirken, sodass bei Vorhaben in diesen Bereichen die Kaltluft-Funktion der Flächen zu beachten ist (Grünflächen erhalten, Gebäudestellung beachten, etc.).



7.4.2 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSERFORDERNISSE IM AUSGLEICHSPAUM

Die Planungshinweiskarte gibt die stadtklimatischen Handlungserfordernisse von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern aufgrund ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Das Handlungserfordernis in Ausgleichsräumen gibt Aufschluss darüber, welche Flächen aus stadtklimatischer Sicht besonders wertvoll sind und somit zwingend erhalten bleiben sollen. Je höher das Handlungserfordernis, desto wirkungsvollere oder restriktivere Maßnahmen zum Erhalt der Flächen sollen umgesetzt werden. Je geringer das Handlungserfordernis, desto höher kann der Bedarf an und das Potential von Maßnahmen sein, Flächen bioklimatisch aufzuwerten. Zur Ableitung des Handlungserfordernis wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert. Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass die Bewertung in der Nacht mit 60 % (Fokus auf den Kaltlufthaushalt) und am Tag mit 40 % (Aufenthaltsräume/Rückzugsorte am Tag) berücksichtigt wurde.

Flächen im Ausgleichsraum, die im Status quo die höchste stadtklimatische Bedeutung aufweisen, wird das höchste Handlungserfordernis (Kategorie „Sehr hohes Handlungserfordernis“) zugewiesen. Zusätzlich erhalten auch Flächen, die unter Einfluss der Klimawandel-Szenarien die höchste stadtklimatische Bedeutung erlangen, das höchste Handlungserfordernis (Tabelle 23). Die Abstufung der Handlungserfordernisse ist auf den Siedlungsraum bezogen, sodass siedlungsfernen Flächen, die keine relevanten stadtklimatischen Funktionen aufweisen, die Kategorie „mittleres Handlungserfordernis“ zugewiesen wird (8,6 % der Flächen im Ausgleichsraum in München). Dennoch gilt es auch diese Flächen grundsätzlich zu erhalten. Stadtklimatische Hinweise zu den Bewertungsklassen sind in Tabelle 24 enthalten.

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

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Sehr hohes Handlungserfordernis	IST oder P1 oder P2 = Höchste Bedeutung	26,3 %
Hohes Handlungserfordernis	IST oder P1 oder P2 = Sehr hohe Bedeutung	29,4 %
Erhöhtes Handlungserfordernis	IST oder P1 oder P2 = Hohe Bedeutung	35,7 %
Mittleres Handlungserfordernis	Übrige Flächen	8,6 %
IST = Status quo; P1 = Szenario mäßiger Klimawandel; P2 = Szenario starker Klimawandel		

Als mögliche Maßnahmen zum Schutz und Erhalt der Ausgleichsräume können bspw. Schutzgebiet wie geschützte Landschaftsbestandteile ausgewiesen werden. Insbesondere Kaltluftleitbahnen, deren Quellgebiete sowie Flächen mit umbauten Park- und Flurwindssystemen sollen grundsätzlich freigehalten und gesichert werden. Auch über Festsetzungen in Bebauungsplänen mit Grünordnung oder durch die Ausweisung von Parkmeilen und öffentlichen Grünflächen oder Kleingartengebieten können Flächen bzw. deren Klimafunktionen für die Zukunft erhalten bleiben. Die entsprechende Signatur für die ausgewiesenen Kaltluftprozesse gilt für die gesamte darunter liegende Fläche. Die Eintragung von Gartendenkmälern sowie Maßnahmen in städtebaulichen Sanierungsgebieten stellen weitere Möglichkeiten dar. Der Flächennutzungsplan mit integrierter Landschaftsplanung als vorbereitender Bauleitplan kann zwar keinen Schutzstatus vorgeben, aber er kann Ziele darstellen, die in den nachfolgenden verbindlichen Bebauungsplänen berücksichtigt werden müssen. Dies erfolgt bereits heute über die verschiedenen Schraffuren, die die Bauflächen



überlagern und "Maßnahmen" bzw. "Vorrangige Maßnahmen zur Verbesserung der Grünausstattung" darstellen. Auf Freiflächen gibt es zudem die Schraffuren für "Nutzungsbeschränkungen zum Schutz, zur Pflege und Entwicklung von Boden, Natur und Landschaft".

Ebenso sind klimaökologische Aufwertungen durch bspw. Baumpflanzungen bei den Arealen mit der Ausweisung „mittleres Handlungserfordernis“ bei Grünstrukturen in dichter bebauten Siedlungsbereichen gute Maßnahmen, um den Ausgleichsraum zu erhalten bzw. zu erweitern.

Tabelle 24: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zum Schutzbedarf im Ausgleichsraum

Bewertung im Ausgleichsraum	Stadtklimatische Planungshinweise
Sehr hohes Handlungserfordernis	Diese Flächen sind zu erhalten. Diese Flächen besitzen eine sehr hohe bis hohe Bedeutung für die nächtliche Abkühlung/ Durchlüftung. Diese Flächen müssen durch Instrumente der Flächensicherung, insbesondere im Bereich einer Kaltluftleitbahn oder eines umbauten Park- und Flurwindsystems, erhalten bleiben.
Hohes Handlungserfordernis	Diese Flächen sind in ihrer Klimafunktion zu erhalten. Entwicklungen in diesen Flächen dürfen die klimatischen Funktionen nicht einschränken und sind entsprechend zu gestalten. Grünflächen in dicht bebauten Siedlungsbereichen sind zu erhalten und im Sinne des Prinzips der Klimaoasen qualitativ zu verbessern.
Erhöhtes Handlungserfordernis	Es besteht ein erhöhter Bedarf an Maßnahmen für eine bioklimatische Aufwertung. Entwicklungen in diesen Flächen müssen unter Berücksichtigung der Klimafunktionen erfolgen. Grünflächen in dicht bebauten Siedlungsbereichen sind zu erhalten und im Sinne des Prinzips der Klimaoasen qualitativ zu verbessern.
Mittleres Handlungserfordernis	Es besteht ein Bedarf an Maßnahmen für eine bioklimatische Aufwertung. Entwicklungen in diesen Flächen sollen unter Berücksichtigung der Klimafunktionen erfolgen. Grünflächen in dicht bebauten Siedlungsbereichen sind zu erhalten und im Sinne des Prinzips der Klimaoasen qualitativ zu verbessern.

Im Ergebnis dient die Planungshinweiskarte Stadtklima als zentrales Produkt der Klimaanalyse, um das Stadtklima beurteilen zu können. Auf Grundlage der Karte können klimatisch belastete Bereiche sowie stadtklimatisch wertvolle Grünräume auf einen Blick identifiziert werden. Je nach Fragestellung und Fläche können daraus erste, allgemeine planerische Konsequenzen abgeleitet werden (Wo sind Flächen freizuhalten? Wo sind Maßnahmen zur Anpassung nötig? Wo sind bei geplanten Vorhaben stadtklimatische Belange besonders zu berücksichtigen?). Die weiteren Kartenwerke (Ergebnisparameterkarten, Klimaanalysekarten und **Bewertungskarten**) sind ergänzend zur Planungshinweiskarte zu Rate zu ziehen – je nach Projektanlass enthalten sie wichtige Zusatzinformationen (Ist eine Fläche am Tag und/oder in der Nacht belastet? Sind Grünflächen für den Kaltfluthaushalt und/oder als Rückzugsorte an heißen Tagen von Bedeutung?).



7.4.3 WEITERE INFORMATIONSLAYER IN DER PLANUNGSHINWEISKARTE

Im Rahmen von Planungen sind eine Vielzahl von Fachinformationen zu berücksichtigen. Eine Überlagerung verschiedener Fachinformationen ist daher zumeist sinnvoll und unausweichlich. Vor diesem Hintergrund sind auch in der Planungshinweiskarte Informationslayer mit Fachinformationen „nachrichtlich“ integriert worden. Diese Layer hatten auf die Erstellung der Planungshinweiskarte keinen Einfluss und wurden nachträglich eingebunden. Zu den Informationslayern gehören:

- **Flächen des Naturschutzes und der Landschaftsplanung:** Zu den Flächen zählen Naturschutzgebiete, geschützte Landschaftsbestandteile, FFH- und Natura2000-Gebiete, Bannwälder, Ausgleichsflächen, Ökokonten, Regionale Grünzüge und Trinkwasserschutzgebiete.
- **Baugebiete oder Bauflächen nach rechtswirksamem Flächennutzungsplan mit integrierter Landschaftsplanung (FNP/LP) (Stand: Juni 2025):** Die Flächen umfassen Siedlungsgebiete, die im aktuell rechtswirksamen FNP/LP als Baugebiete oder Bauflächen dargestellt werden, jedoch größtenteils nicht bebaut sind. Entsprechende Verkehrsflächen werden nicht dargestellt. In Einzelfällen kann die Bebauungsplanung von der Darstellung im FNP/LP abweichen. Die Aussagen sind daher mit den ggf. für die jeweilige Fläche rechtsgültigen Bebauungsplänen mit Grünordnung als detailliertere Planungsebene abzugleichen. Es wird darauf hingewiesen, dass auf manchen Grün- und Freiflächen rechtsgültige Bebauungspläne mit Grünordnung bestehen, die noch nicht umgesetzt wurden, oder sich solche derzeit in Aufstellung befinden.
- **Umgriffe der Vorbereitenden Untersuchungen einer möglichen städtebaulichen Entwicklungsmaßnahme:** Dargestellt ist der Flächenumgriff der städtebaulichen Entwicklungsmaßnahmen im Münchner Norden und Nordosten zum Zeitpunkt der vorbereitenden Untersuchungen. Der Umgriff umfasst sowohl potenzielle Siedlungs- als auch Grün- und Freiflächen.



7.5 WEITERENTWICKLUNG DER STADTKLIMAANALYSE VON 2014

Der vorliegenden Untersuchung ist die Stadtklimaanalyse 2014 (GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2014) vorausgegangen. Innerhalb der rund 10 Jahre, welche zwischen der letzten Stadtklimaanalyse (2014) und der vorliegenden Fortschreibung der Stadtklimaanalyse liegen, hat sich nicht nur die Stadtstruktur entwickelt, sondern auch die Methodik sowie das verwendete Modell. Zudem hat sich das Klima weiter gewandelt. Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend auf die wesentlichen Änderungen zwischen den beiden Klimaanalysen eingegangen. Diese Gründe sind vor allem:

- Stadtentwicklung im Stadtgebiet München
- Verfügbarkeit detaillierterer Geodaten
- Weiterentwicklung des FITNAH-3D Modells bezüglich Rechenkapazitäten (Rasterauflösung) und Nutzungsklassen sowie Eingabemöglichkeiten ins Modell
- Vorliegen von regionalen Klimamodellen der EURO-CORDEX Initiative

7.5.1 NOTWENDIGKEIT DER FORTSCHREIBUNG

In der gegenwärtigen Fortschreibung der Stadtklimaanalyse kann modelltechnisch auf eine deutlich feinere Rasterweite von 5 m x 5 m anstatt von 50 m x 50 m (2014) zurückgegriffen werden. Somit lassen sich bei den zugrunde liegenden Geodaten, wie bspw. bei der Berücksichtigung von Strömungshindernissen wie Lärmschutzwänden, deutliche detailliertere Strukturen in die Simulationen integrieren, was bei der vorausgegangenen Analyse nicht der Fall war. In den Ergebnissen sind somit auch deutlich kleinräumigere Aussagen zu dem Strömungsgeschehen sowie den klimatischen Einzelparametern möglich. Zudem wurden die Nutzungsklassen, welche dem Modellgebiet zugrunde liegen, im Zuge der Fortentwicklung des FITNAH-3D-Modells überholt.

Weiterhin wurden in der aktuellen Analyse neben dem Status quo noch weitere Szenarien (Kapitel 5.1.3), basierend auf regionalen Klimamodellen der EURO-CORDEX Initiative, modelliert. Auf dieser Basis können die Auswirkungen von einem Temperaturanstieg und reduzierter Bodenfeuchte im gesamten Stadtgebiet modelliert und aufgezeigt werden. Dies war in den vorangegangenen Analysen nicht der Fall.

Darüber hinaus konnten mit den beiden „Bausteinen“ weitere Blicke in die zukünftige Stadtentwicklung und die einhergehenden Nutzungsänderungen und deren klimaökologischen Auswirkungen geworfen und Analysen angestellt werden.

Anstatt einer Klimafunktionskarte wurden unter Berücksichtigung der (VDI 3787, Blatt 1, 2015) Szenarien Status quo, Szenario 1 und Szenario 2, vier Klimaanalysekarte (Kapitel 6.2) erstellt, welche die Nachtsituation mitsamt der Kaltluftprozesse und der thermischen Verhältnisse berücksichtigt.

Nach der „Bewertungskarte Stadtklima“ aus 2014, welche lediglich eine Flächenkulisse und das Status Quo Szenario beschreibt, setzt sich in der vorliegenden Analyse die aktuelle Planungshinweiskarte aus den sechs Bewertungskarten (Kapitel 7.3) zusammen. Für jedes der 3 Szenarien (ohne die beiden „Bausteine“) gibt es eine Bewertung der Tagsituation und der Nachtsituation. Hintergrund ist die detaillierte Berücksichtigung des modifizierten Temperatur- und Trockenheitssignals vor dem Hintergrund des Klimawandels. So stellt



die PHK-Version 2025 eine Synthese aus den Bewertungskarten dar und verarbeitet damit (anders als die Version 2014) die Tag- und Nachtsituation sowie den Klimawandel. Die Planungshinweiskarte hat zum Ziel, abzubilden, welche Flächen durch ein hohes Handlungserfordernis charakterisiert sind, also wo in München Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden müssen. Sie dient als zentrales Planungselement und nichts zuletzt als (aktualisierte) Grundlage des Münchner Klimaanpassungskonzeptes.

Die nachfolgende Tabelle stellt die wichtigsten Vergleichsparameter zwischen den beiden Analysen noch einmal gegenüber.

Tabelle 25: Vergleich zwischen der Stadtklimaanalyse 2014 und der Stadtklimaanalyse 2025 hinsichtlich Methoden, Ergebnissen und Produkten

Vergleichsparameter		Stadtklimaanalyse 2014	Stadtklimaanalyse 2025
Methode	Analysemethode	Physikalisch-numerische Modellierung	Physikalisch-numerische Modellierung
	Modell	FITNAH-3D (Version 2013)	FITNAH-3D (Version 2022)
	Horizontale Auflösung	50 m	5 m
	Berücksichtigte Stadtstruktur	generalisierte Strukturtypen	Realnutzung auf Basis des Luftbilds 2023
	Meteorologische Randbedingungen	Autochthone Wetterlage (Windschwach, heißer Sommertag)	Autochthone Wetterlage (Windschwach, heißer Sommertag)
	Alpines Pumpen	Nicht berücksichtigt	Berücksichtigt durch Nesting in Landesweite Klimaanalyse
	Szenarien	Bestandssituation 2014	Bestandsituation 2024 sowie vier Bebauungs- und Klimaszenarien
Ergebnisse	Nachtsituation	• bodennahe Lufttemperatur (Mittag, Abend, Nacht) • nächtliches bodennahes Windfeld • Kaltluftvolumenstrom • Kaltluftproduktionsrate • Humanbioklimaindex: PMV	• nächtliche bodennahe Lufttemperatur • nächtliches bodennahes Windfeld • Kaltluftvolumenstromdichte • Kaltluftproduktionsrate
	Tagsituation	Bodennahe Lufttemperatur	Humanbioklimaindex: PET
Produkte	Klimaanalysekarte	Ja, für Bestandssituation	Ja, für die Bestandssituation und die Klimaszenarien 1 & 2 (insgesamt 4 Karten)
	Bewertungskarten	Nein	Jeweils Tag- und Nachtsituation für die Bestandssituation und die zwei Klimaszenarien (insgesamt 6 Karten)
	Planungshinweiskarte	ja, „Bewertungskarte Stadtklima“	Ja, als Synthese der Bewertungskarten

7.5.2 VERGLEICH DER ERGEBNISSE (AUSGEWÄHLTE BEISPIELE)

Wie die obige Tabelle und die Erläuterungen zeigen, werden zwischen der Stadtklimaanalyse 2014 und 2025 die Unterschiede sowohl hinsichtlich der verwendeten Methoden als auch hinsichtlich der erzeugten Parameter, der angewandten Bewertungsverfahren und der erzeugten Produkte sichtbar. Dieser Umstand lässt einen validen quantitativen Vergleich in Form von Differenzkarten oder auch Flächenbilanzen (z.B. zu Anteilen von thermisch belasteten Wirkungsräumen) nicht zu.

Bei der nächtlichen Lufttemperatur werden die aus der räumlichen Auflösung hervorgehenden Unterschiede besonders deutlich (s. Abbildung 75). So ist in der Analyse 2014 die Siedlungsstruktur quasi homogen in das Klimamodell eingegangen, was zu einer einheitlichen Ausprägung des Wärmeinseleffekts führt.

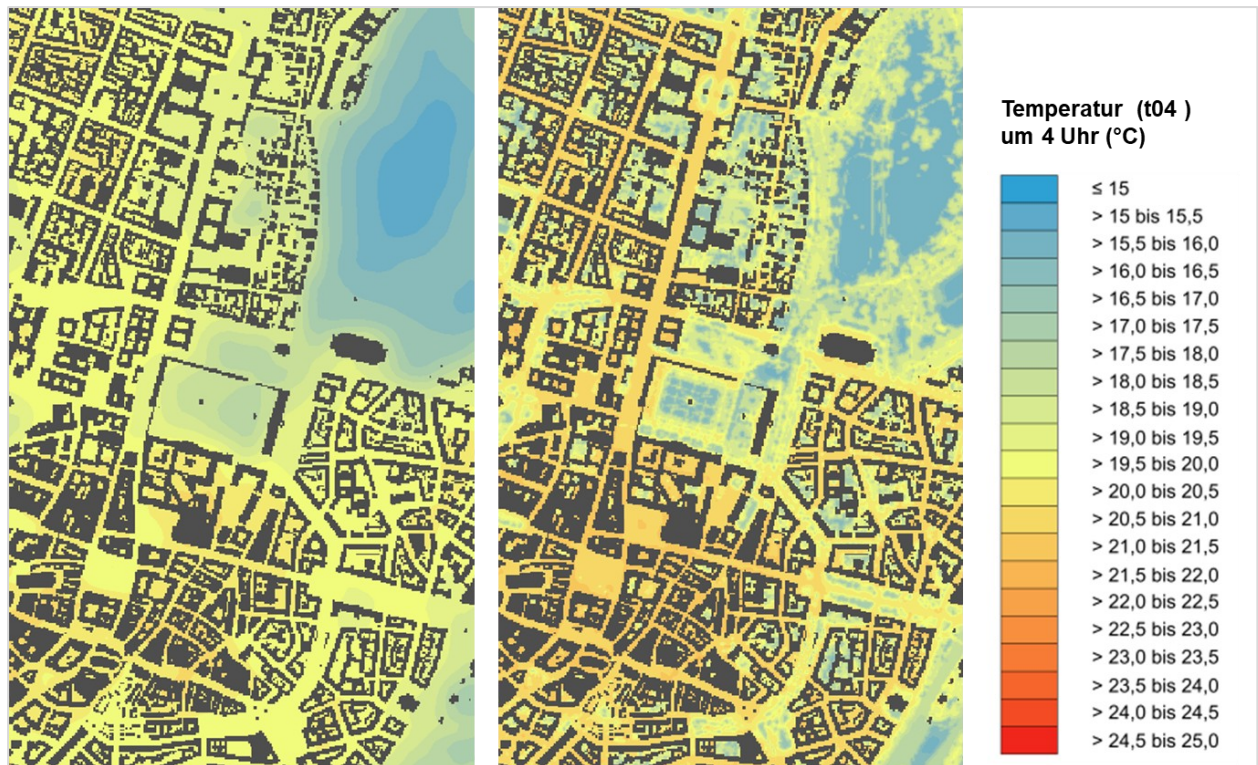


Abbildung 75: Gegenüberstellung der nächtlichen Lufttemperatur um 04:00 aus den Analysen 2014 (links) und 2025 (rechts).

In der Analyse 2025 zeigt sich mit der 5 m Auflösung das wie in der Realität zu erwartende kleinräumige Mosaik der unterschiedlich stark erwärmten Nutzungstypologien. Die Rasterzellen, welche als Gebäude ins Klimamodell eingegangen sind, weisen keinen Temperaturwert auf. In den Ergebnissen wird somit der unbebaute Außenraum repräsentiert. In der vorangegangenen Analyse sind hingegen keine Gebäude abgebildet worden (in der oberen Abbildung nur zur besseren Vergleichbarkeit dargestellt), sie sind über die Strukturtypen wie bspw. Einzelhausbebauung repräsentiert. Gleichzeitig wird die klimatisch ausgleichende Wirkung des Siedlungsgrüns sichtbar. Bei der Bewertung der bioklimatischen Situation am Tage und/oder in der Nacht kann diese den Ausschlag geben, ob Blockflächen gleicher Bebauungstypologie aber unterschiedlicher Vegetationsausstattung eine eher starke oder schwache Belastung aufweisen.

Die methodischen Unterschiede werden auch im nächtlichen Luftaustausch sichtbar. Während in der Analyse 2014 die verwendeten Nutzungen eine jeweils „mittlere“ Porosität bzw. Durchlüftungsvermögen pro Kategorie aufweisen, wird in der Aktualisierung 2025 die klimatische Wirkung jedes Gebäudes bzw. einzelnen in den Eingangsdaten vorhandenen Baumes berücksichtigt und die Fließrichtung der Kaltluft detaillierter dargestellt. So zeigen die Großstrukturen wie breite Gleisanlagen, Grünräume und Kaltluftleitbahnen analog zu 2014 auch den übergeordneten Luftaustausch. Gleichzeitig wird die Bedeutung unbebauter Flächenanteile und auch der Straßenräume für die Durchlüftung innerhalb der Bebauung sichtbar. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Kaltluftvolumenstrom als 50 m Raster (unten) bzw. 5 m Raster (oben).

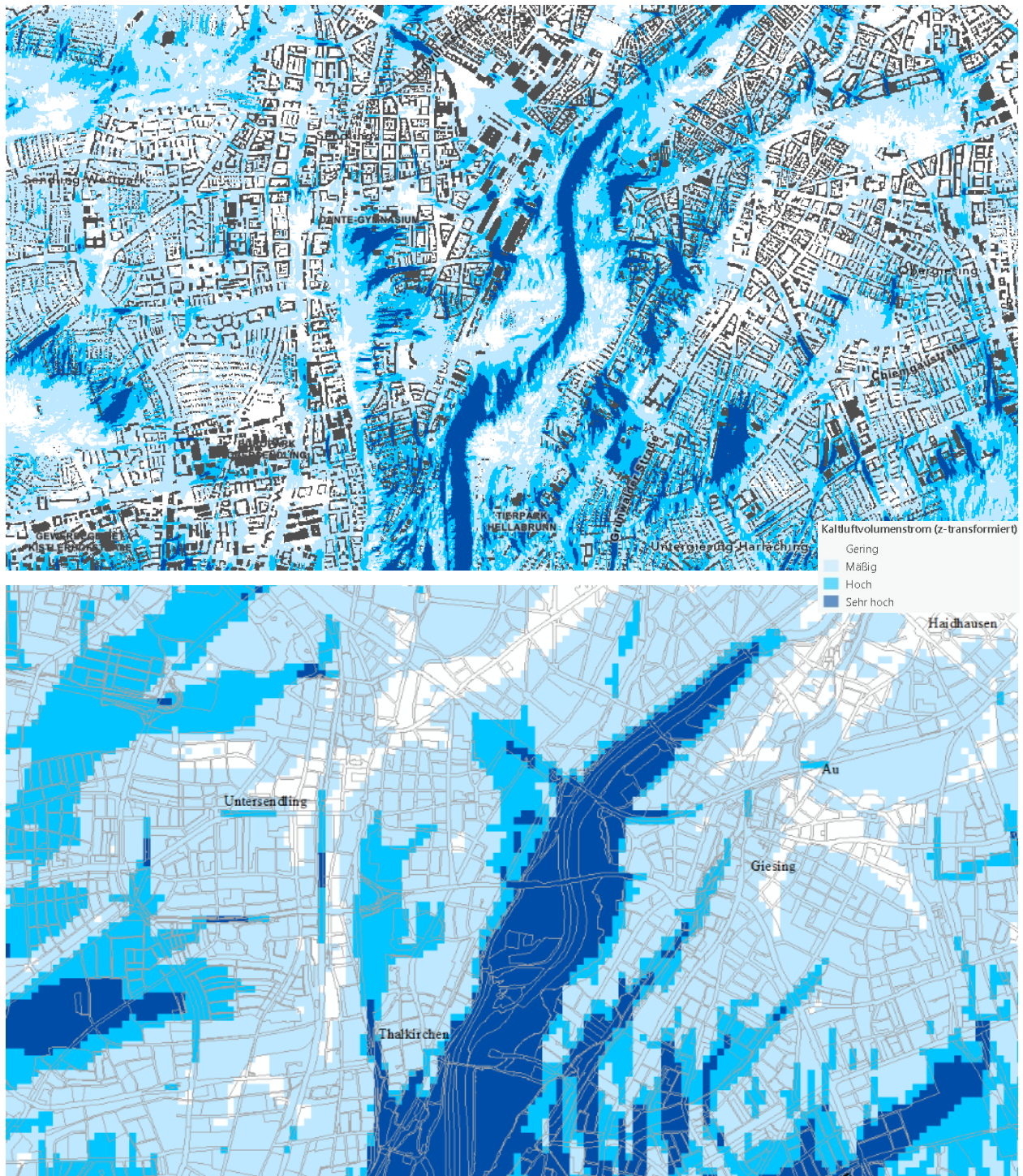


Abbildung 76: Gegenüberstellung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms aus den Analysen 2014 und 2025

Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus 2014 zeigt sich im 5 m Raster deutlich die Durchlüftung auch der unbebauten Flächenanteile innerhalb des Siedlungsraumes, wobei insbesondere die Straßenräume zur Ventilation beitragen. Der südliche Teil der Isarauen zeigt in beiden Fällen die Bedeutung des Bereichs für Kaltluftlieferung und Kaltluftaustausch.

Da eine Gegenüberstellung der absoluten Rasterwerte nicht sinnvoll ist (höhere Auflösung, etwas andere Definition des Kaltluftvolumenstroms), wurde der Kaltluftvolumenstrom über die z-Transformation normalisiert und Klassen abgeleitet. Somit wurde versucht eine Vergleichbarkeit herzustellen. Es wird sichtbar,

dass an vielen Stellen die Ausprägung der hohen/sehr hohen Werte vergleichbar ist. Es zeigt sich außerdem, dass in der Analyse 2025 verbreitet auch die unbebauten Flächenanteile im Siedlungsraum der Stadt am Luftaustausch beteiligt sind.

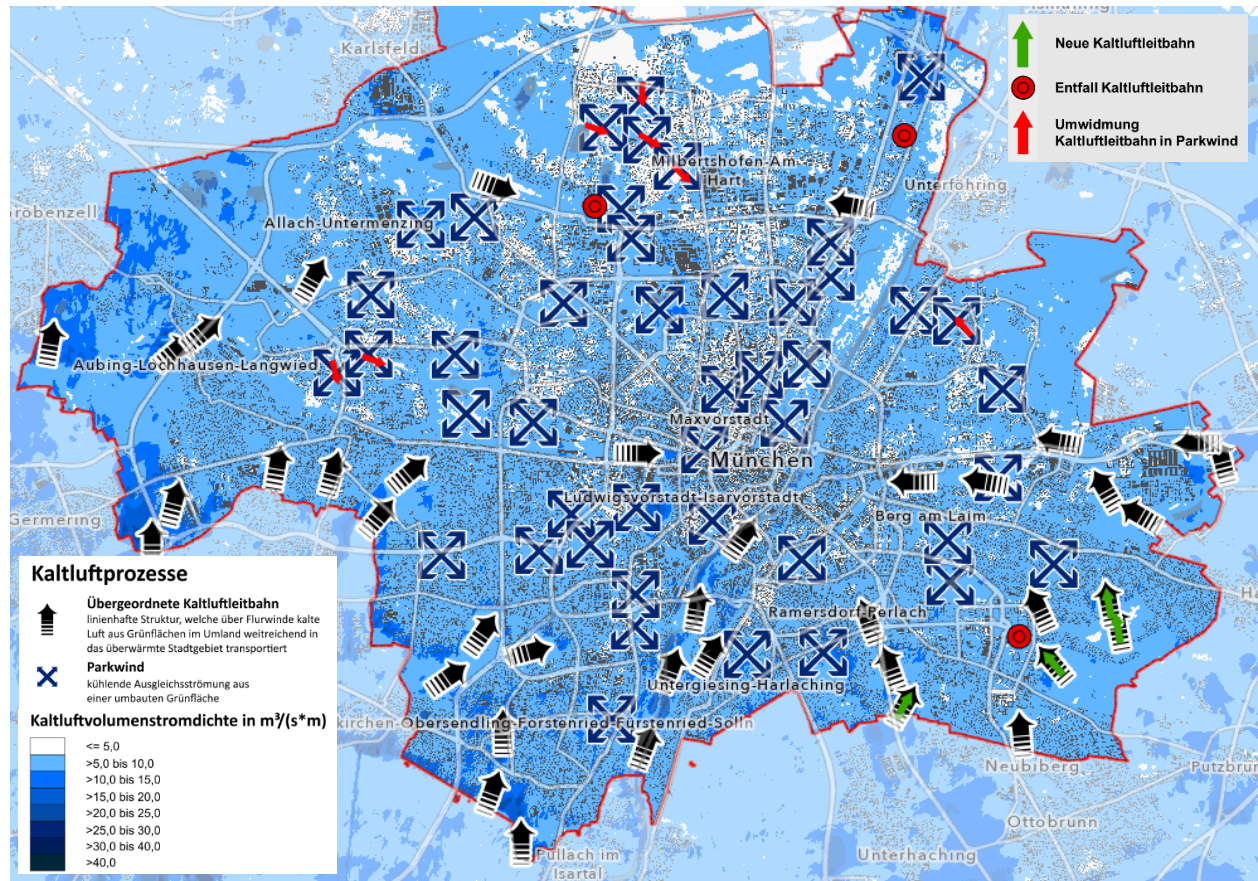


Abbildung 77: Gegenüberstellung des nächtlichen Kaltluftvolumenstroms sowie der Kaltluftleitbahnen aus den Analysen 2014 und 2025.

Die Kaltluftleitbahnen und Parkwinde für die aktuelle Stadtklimaanalyse sind in Abbildung 77 dargestellt. Dabei ist durch zusätzliche Signaturen (s. Legende) kenntlich gemacht, an welcher Stelle es, basierend auf der vorangegangenen Studie aus 2014, zu einer Etablierung von neuen Kaltluftleitbahnen kam, wo es zum Entfall von Kaltluftleitbahnen kam und wo es zu einer Umwidmung von einer 2014er-Kaltluftleitbahn hin zu einem umlaufenden Parkwindsystem kam.

Lediglich an 3 Stellen im Stadtgebiet kam es zu einem Entfall von einer Kaltluftleitbahn. Im Münchner Norden, westlich der Eggarten-Siedlung kommt es zu einem Entfall einer Kaltluftleitbahn. Hier zeigen in der aktuellen Untersuchung die Windgeschwindigkeiten und Kaltluftvolumina nicht mehr den so weit von West nach Ost hineinreichenden linearen Strömungskorridor, wie in der alten Studie. Die Gründe für einen Wegfall sind vielfältig. Neben den bereits erläuterten modelltechnischen Änderungen, einem deutlichen Zugewinn an Detailtiefe in Form von räumlicher Auflösung in der Betrachtung der klimatischen Parameter im Stadtgebiet sowie durch die Berücksichtigung des Alpinen Pumpens können auch Nutzungsänderung Grund für ein verändertes Strömungsregime sein. Beispielsweise die Errichtung von Siedlungsarealen, welche durch ihre nächtliche Ausstrahlung warme Bereiche darstellen und somit die kühlen Kaltluftströme „anziehen“ und ggf. umlenken, von ihrem ursprünglichen Verlauf. Der zweite Wegfall einer Leitbahn befindet sich im Nordosten, westlich der Freisinger Landstraße in München-Freimann. An dieser Stelle kam es in den letzten 10 Jahren zu keinen nennenswerten Nutzungsänderungen, sodass hier die Gründe für den



Wegfall der Leitbahn in der besseren räumlichen Auflösung und Darstellung der klimatischen Verhältnisse liegt. An dieser Stelle prägt sich keine Leitbahn aus, da die auf der Freifläche produzierte Kaltluft nicht weiter westlich über die Autobahn strömen kann, sondern lokal in Richtung Süden verteilt wird oder auf der Fläche verbleibt, da sich kein deutlich gerichtetes Strömungsgeschehen ausbildet. Die dritte Stelle, wo es zu einem Wegfall von einer Kaltluftleitbahn, im Vergleich mit der Untersuchung von 2014 kommt, befindet sich im Südosten des Stadtgebiets, im Bereich der Ständlerstraße in Neuperlach. In diesem Fall zeigt sich ein ähnliches Bild, wie beim vorgenannten Fall. Es handelt sich bei dem Areal erneut um eine Freifläche, welche von einer Straße und Gebäuden umgeben ist. Die auf der Fläche produzierte Kaltluft sorgt für keine weitreichend versorgende Strömungsbahn, sondern wird auch in diesem Fall von den umliegenden Gebäuden angesogen. In diesem Beispiel ist nicht auszuschließen, dass die baulichen Maßnahmen östlich des Heizwerks Perlach für eine Reduktion der Strömungen entlang der Ständlerstraße gesorgt haben. Durch diese baulichen Maßnahmen kam es zum Entfall einer Grünfläche und zu einer Verringerung des Fließquerschnitts in Nordwest-Richtung.

Allerdings wurde, auf Basis der Ergebnisse, der vorliegenden Untersuchung, südöstlich des Betrachtungsgebietes, am Stadtrand eine neue Kaltluftleitbahn ausgewiesen. An dieser Stelle, östlich des Oskar-Maria-Graf-Rings sind deutliche Strömungen in West-Richtung zu sehen, die Kaltluft in das Stadtgebiet eintragen.

Dieses Beispiel zeigt, dass es durch die höhere räumliche Auflösung und die neueren Geodaten auch andersherum zu einer Etablierung von „neuen“ Kaltluftleitbahnen, gegenüber der Untersuchung aus 2014 kommen kann. Neben dem soeben erwähnten Beispiel gibt es noch 3 weitere Beispiele, allesamt ebenfalls im Südosten des Stadtgebiets. Andernorts kommt es zu einer „Umwidmung“ von einer bisherigen Kaltluftleitbahn hin zu einem umlaufenden Parkwindsystem. In diesen Fällen sind stets noch relevante Kaltluftprozesse vorhanden, aber die Ausrichtung beschränkt sich mehr auf die lokale Umgebung und ist zumeist multidirektional und weist nicht mehr den linear in eine Richtung ausgeprägten Leitbahncharakter auf.

Anders als in den letzten 10 Jahren kann das in München etablierte Stadtklimamodell FITNAH-3D heute als weitgehend ausentwickelt gelten. Und auch die Qualität und Verfügbarkeit der notwendigen Geobasisdaten hat für die Anwendung im Rahmen von Stadtklimaanalysen ihr Optimum erreicht. Dies ermöglicht bei zukünftigen Fortschreibungen eine insgesamt bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

7.5.3 RELEVANZ FÜR DIE PLANUNG

Neben den auf Basis der neuen Simulationen erhaltenen Ergebnisse sind auch nachrichtliche Übernahmen von Fachinformationen in die Planungshinweiskarte integriert, welche nicht im Zusammenhang mit dem Leistungsumfang der hier dargestellten Stadtklimaanalyse steht. Diese Integration erfolgte auf Wunsch des Auftraggebers, da die Informationen in Abstimmung mit weiteren Referaten als unerlässlich für die aktuellen Planungen angesehen werden. Zu diesen Fachinformationen zählen die nachrichtliche Übernahme von **Flächen des Naturschutzes und der Landschaftsplanung**. Hierunter fallen Naturschutzgebiete, geschützter Landschaftsbestandteil, FFH- und Natura2000-Gebiete, Bannwald, Ausgleichsflächen, Ökokonten, regionale Grünzüge und Trinkwasserschutzgebiete. Weiterhin wurden mittels separater Signatur **Gebiete der städtebaulichen Entwicklungsmaßnahmen** im Stand der vorbereitenden Untersuchung in der Planungshinweiskarte dargestellt. Außerdem wurden **Baugebiete mit absehbarer Bebauung nach rechtswirksamen Flächennutzungsplan mit integrierter Landschaftsplanung** (Stand: Juni 2025) mit einer eigenständigen Signatur dargestellt. Übernommen aus der vorangegangenen Stadtklimaanalyse 2014 wurden ebenfalls die „Übergeordneten Ventilationsbahnen“, in gleicher Darstellungsform.



7.6 MAßNAHMENKATALOG

Die Planungshinweiskarte zeigt genau jene Bereiche in der Stadt, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. **Der nachstehende Maßnahmenkatalog** nennt dazu beispielhaft verschiedene Möglichkeiten der Ausgestaltung und **dient zur Orientierung**, wie die Planungshinweise bedarfsgerecht und situationsabhängig zu konkretisieren sind. Für München wurde im ersten Schritt der nachfolgende Katalog aus 21 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert.

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 26 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

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

Die jeweilige Wirkung hängt stark von der konkreten Ausgestaltung der Maßnahmen, ihrer Lage im Stadtgebiet sowie der betrachteten vertikalen und horizontalen Entfernung von der Maßnahme ab. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Münchener Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen (s. Tabelle 26).

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). Insbesondere die großflächigen Waldgebiete Münchens sowie die Isarauenbereiche 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 Ausgleichsströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen Bäume (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition



und 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 (→ M12: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. 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). Für München existiert eine Liste mit geeigneten Baumarten auf Basis der GALK-Straßenbaumliste (GALK).

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

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen⁸ Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauseter Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10), 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

⁸ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (= Gegenteil von autochthon)



Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

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

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 bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz.

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

Auf **Brachflächen** oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre



Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung wie bei Sommerstraßen während der Sommermonate an. Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch (z.B. Interimsbegrünung des Max-Joseph-Platzes). Der **Dialog mit Anwohnern** kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren.



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

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM			
01	Innen-/Hinterhofbegrünung	Kurzerläuterung	
		▪ Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
▪ 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		▪ Innen- und Hinterhöfe	

Bild: Innenhof in München (Jörg-Hube-Straße) (Quelle: © E. Kressirer)



02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	Kurzerläuterung ▪ Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
▪ 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		▪ Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)	Bild: Grünfinger in München Messestadt-Riem (Quelle: © M. Nagy, LHM)

THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM

03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	Kurzerläuterung ▪ Helle Farben zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts		▪ Fassaden (Neubau und Bestand) ▪ ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze	Bild: Helle Fassade mit Begrünung, Eggenstraße München (Quelle: © C. Leupold)



04	Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung ▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) ▪ niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen	 Bild: Entsiegelter, gepflasterter und begrünter Hof (Quelle: © U. Setzwein)
	Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement	Räumliche Umsetzung ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe	



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM

05 Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben	Kurzerläuterung ▪ 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 Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“	 Bild: Begrüntes, abgesenktes Tramgleis, Rotterdam (Quelle: © T. Zölch)
Wirkung ▪ 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	Räumliche Umsetzung ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze	
06 Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien	Kurzerläuterung ▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten) ▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen	 Bild: Rosenkavalierplatz in München (Quelle: © M. Nagy, LHM)
Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts	Räumliche Umsetzung ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld	



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM

07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Kurzerläuterung ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)	
Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität		Räumliche Umsetzung ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze	
08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	Kurzerläuterung ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)	
Wirkung ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement		Räumliche Umsetzung ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)	

Bild: Englischer Garten in München (Quelle: © M. Bräu)

Bild: Parkmeile Feldmochinger Anger in München (Quelle: © Airgonautics, LHM)

Bild: Englischer Garten in München (Quelle: © M. Bräu)

Bild: Parkmeile Feldmochinger Anger in München (Quelle: © Airgonautics, LHM)



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM

09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	Kurzerläuterung ▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen ▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird	
Wirkung ▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -> Hohe Aufenthaltsqualität ▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken	Räumliche Umsetzung ▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen	

Bild: Westpark München (Quelle: © M. Nagy, LHM)

Bild: Isar in München (Quelle: © muenocchio über Pixabay)



10	Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme	Kurzerläuterung ▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-) Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen	
	Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün	Räumliche Umsetzung ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze	

Bild: Sickerfläche Hansapark München (Quelle: © W. Hasenstab, LHM)

Bild: Sickerfläche Hansapark München (Quelle: © W. Hasenstab, LHM)

THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUßENRAUM

11	(Temporäre) Saisonale klima- angepasste Umgestaltung öffentlicher Räume	Kurzerläuterung ▪ Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen ▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)	
Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern		Räumliche Umsetzung ▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)	

Bild: Kolumbusstraße in München
(Quelle: © T. Zölch, LHM)

Bild: Kolumbusstraße in München (Quelle: © T. Zölch, LHM)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG			
12	Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung	Kurzerläuterung - 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	 Bild: Isarbereich in München als Durchlüftungssachse (Quelle: Geodatenservice© LHM)
		Wirkung - Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung - Reduktion des Wärmestaus	
13	Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch	Kurzerläuterung - Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen, die oftmals Parkwinde induzieren - Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht	 Bild: Vernetztes Grün in der Messestadt Riem in München. (Quelle: Geodatenservice © LHM.)
		Wirkung - Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme - Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung	



VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG			
14	Entdichtung (Rückbau)	Kurzerläuterung	 Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)
		▪ Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungs- dichte und das Bauvolumen	
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts ▪ Verbesserung der Durchlüftung ▪ Synergien zum Niederschlagswassermanage- ment		▪ Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen ▪ Garagen ▪ Lagerhallen ▪ ggf. Industrie- und Gewerbebrachen ▪ Bahnanlagen	
15	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	Kurzerläuterung	 Bild: Landschaftspark West in München (Quelle: Aironautics © LHM)
		▪ 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		Räumliche Umsetzung	
▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung ▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungs- gebieten und Durchlüftung ▪ Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage		▪ Grün- und Freiflächen	



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM			
16	Dachbegrünung	Kurzerläuterung ▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)	
		Wirkung ▪ 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 ▪ Flachdächer, ▪ ggf. flach geneigte Dächer ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)	Bild: Dachgarten mit Urban Gardening in München (Petra-Kelly-Straße) (Quelle: © J. Giessel)



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

17	Fassadenbegrünung	Kurzerläuterung ▪ Boden- oder wandgebundene bzw. systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)	
Wirkung ▪ 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		Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)	
18	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	Kurzerläuterung ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie	
Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz		Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude (Neubau und Bestand)	

Bild: Fassadenbegrünung Victoriastraße München (Quelle: © U. Setzwein)

Bild: Fraunhoferstraße in München (Quelle: © U. Uehlein)



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

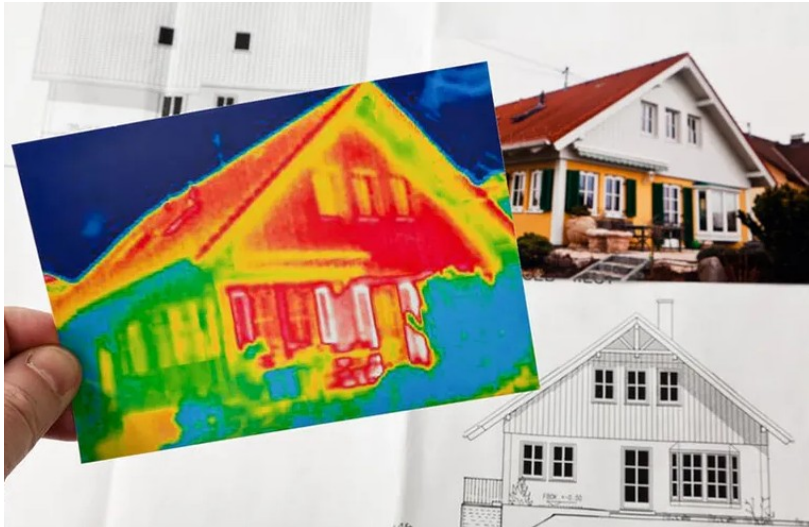
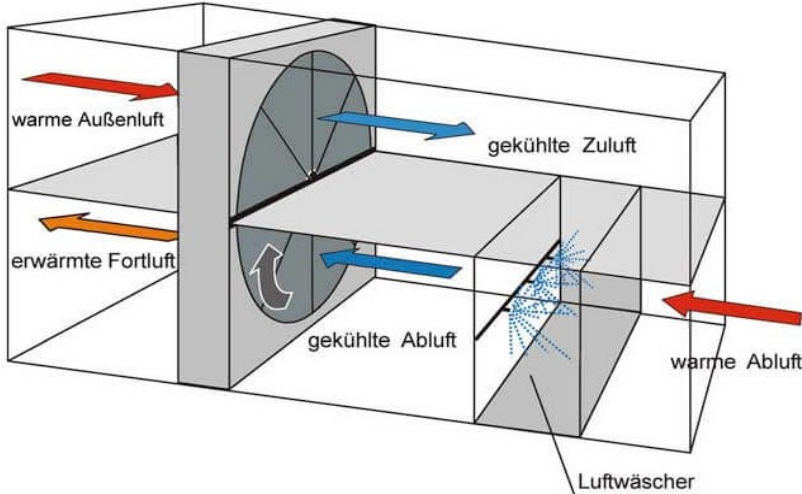
19	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	Kurzerläuterung ▪ Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme	
Wirkung ▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs ▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber		Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude (Bestand)	
20	Technische Gebäudekühlung	Kurzerläuterung ▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung ▪ Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird ▪ Erdkältenutzung ▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden	
Wirkung ▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung		Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können	

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

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



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

21	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	Kurzerläuterung 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 Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)		Räumliche Umsetzung - Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege) - vorwiegend im Neubau umsetzbar	

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



7.7 DIGITALES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das **Stadtklimamanagementsystem** ist die **digitale Version der Stadtklimaanalyse**. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta)Daten und steht der Stadtverwaltung München in Form von gelayouteten GIS-Projekten (QGIS 3.36.1) zur Verfügung und kann in das städtische GIS-System übernommen werden. Neben den QGIS – Projekt-Files (.qgz), gliedern sich die Daten in Raster- und Vektordaten. Das Stadtklimamanagementsystem bietet gegenüber den reinen Kartendarstellungen (als Plot, PDF oder Bilddatei) einige Vorteile:

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

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der knapp 40.000 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 50 Einzelinformationen zu den Kategorien a) Eingangsdaten für die Modellrechnungen (u.a. Nutzung, Versiegelungsgrade, Strukturhöhe), b) Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), c) Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und d) sonstige Sachdaten (Abbildung 78).

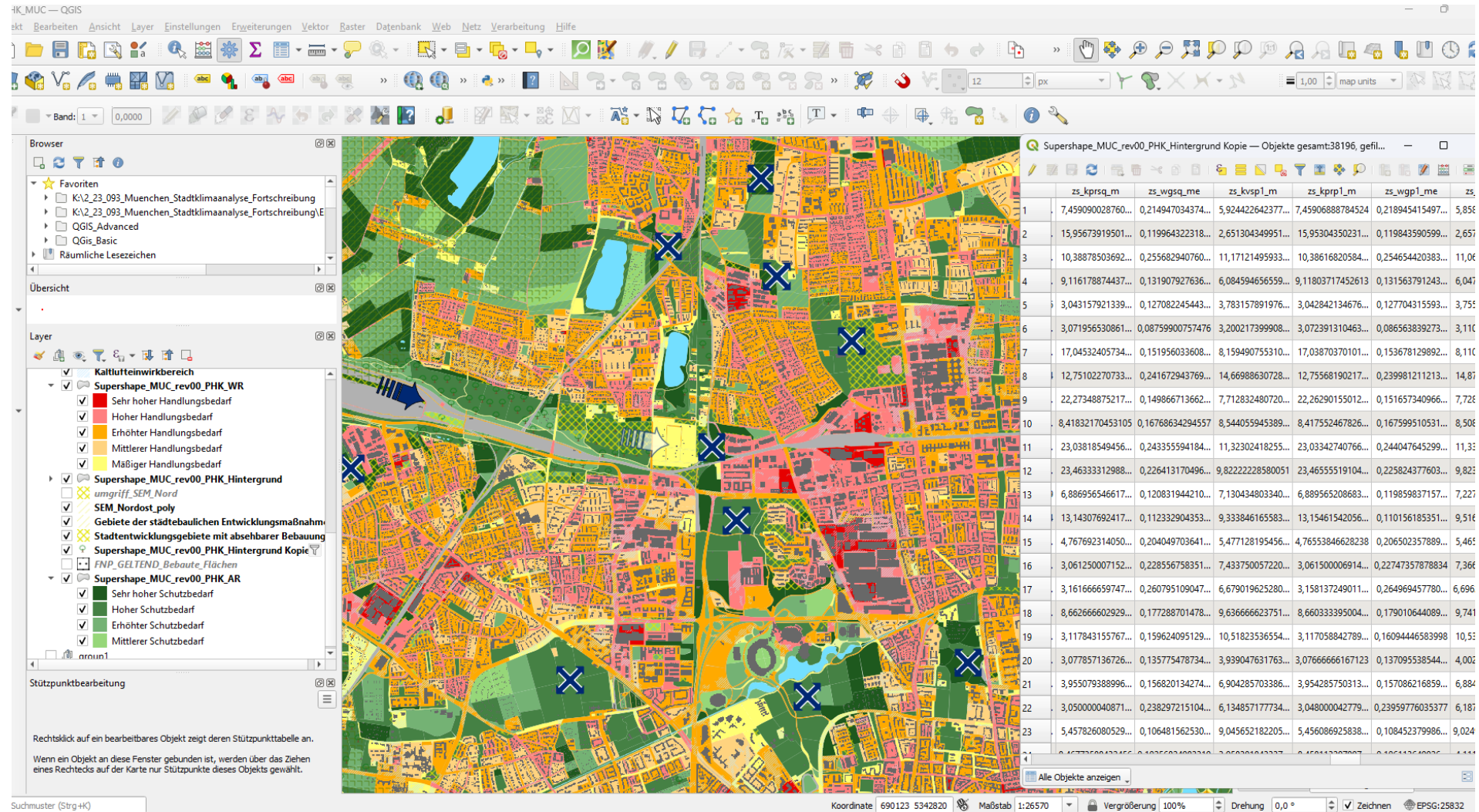


Abbildung 78: Screenshot aus der digitalen Planungshinweiskarte innerhalb des Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“



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>

AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC. (2023). <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV) (2004). https://www.gesetze-im-internet.de/arbst_ttv_2004/BJNR217910004.html

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>

Beschluss der Vollversammlung, Sitzungsvorlage Nr. 20-26/V 07027

BMG. (2021, Juli 2). Hitze: Ältere und Pflegebedürftige. <https://gesund.bund.de/hitze-pflegebeduerftigkeit>

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.

BRÜNDL, W., Mayer, H., Baumgartner A. (1987): Untersuchung des Einflusses von Bebauung und Bewuchs auf das Klima und die lufthygienischen Verhältnisse in bayerischen Großstädten – STADTKLIMA BAYERN. Abschlussbericht zum Teilprogramm Klimamessungen in München. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, Materialien 43, München.

Business Wissen. (2023). Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. business-wissen.de. <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik/>

Caissie, D. (2006). The thermal regime of rivers: A review. Freshwater Biology, 51(8), 1389–1406. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x>

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>

Deutschländer, T., & Mächel, H. (2017). Temperatur inklusive Hitzewellen. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven (S. 47–56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_6

DKRZ. (2024). Die SSP-Szenarien. <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien>

Donat, M., Leckebusch, G., Pinto, J., & Ulbrich, U. (2010). European storminess and associated circulation weather types: Future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. Climate Research, 42(1), 27–43. <https://doi.org/10.3354/cr00853>

DWD. (2014). MUKLIMO_3 Modell [Software]. https://www.dwd.de/DE/leistungen/muklimo_thermodynamik/muklimo_thermo.html

DWD (Deutscher Wetterdienst, Hrsg.) (2020): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München - Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 252. Online verfügbar: https://www.dwd.de/DE/leistungen/pbfb_verlag_berichte/pdf_einzelbaende/252_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=4

DWD. (2023). Stadtklima—Die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/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). Gefühlte Temperatur. https://www.dwd.de/DE/leistungen/hitze_thermische_belastung/gefuehlte_temperatur.html

DWD. (2024d). Wetter- und Klimalexikon—Klima. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101462>

Fanger, P. O. (1972). Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill.

Fink, A. H., Pohle, S., Pinto, J. G., & Knippertz, P. (2012). Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. Geophysical Research Letters, 39(7), 2012GL051025. <https://doi.org/10.1029/2012GL051025>

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.

GALK(DEUTSCHE GARTENAMTSLEITERKONFERENZ), o.J.: Zukunftsbäume für die Stadt. Auswahl aus der GALK-Straßenbaumliste.

GEO-NET (2014): Stadtklimaanalyse Landeshauptstadt München. Online verfügbar: https://stadt.muenchen.de/dam/jcr:1d8eeb94-d4fd-4933-b48f-00b58ef1c63b/Bericht_Stadtklimaanalyse_LHM.pdf



- GEO-NET (2021), Bayerisches Landesamt für Umwelt (Hrsg.): Landesweite Schutzgutkarte Klima/Luft für die Landschaftsrahmenplanung. Online verfügbar: https://www.lfu.bayern.de/download/natur/schutzgutkarten/klimaluft_abschlussbericht.pdf
- Giorgi, F., Jones, C., & Asrar, G. R. (2009). Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework. https://cordex.org/wp-content/uploads/2012/11/cordex_giorgi_wmo-1.pdf
- Gross, G. (1987). Effects of deforestation on local climate and nocturnal drainage flow.
- 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. (1993). Air Flow Around and Through Individual Trees. In D. Barsch, I. Douglas, F. Joly, M. Marcus, B. Messerli, & G. Groß (Hrsg.), *Numerical Simulation of Canopy Flows* (Bd. 12, S. 34–91). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-75676-4_3
- Gross, G. (2012a). Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale 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. (2016). Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(4), 479–487. <https://doi.org/10.1127/metz/2016/0797>
- Gross, G. (2017). Some effects of water bodies on the environment—numerical experiments. *Journal of Heat Island Institute International*. https://www.heat-island.jp/web_journal/JGM8SpecialIssue/2-1_gross.pdf
- Gross, G. (2021a). 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. (2021b). On the importance of a viscous surface layer to describe the lower boundary condition for temperature. *Meteorologische Zeitschrift*, 30(3), 271–278. <https://doi.org/10.1127/metz/2021/1073>
- 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 Windverhältnisse in komplexem Gelände. *DEWI-Magazin*, 20.
- Haller, M., Krähenmann, S., & Walter, A. (2021). Statistische Aufbereitung von Klimaprojektionen: Bias-Adjustierung und Regionalisierung mit Beobachtungsdaten. https://doi.org/10.5676/DWD_PUB/PRO-MET_104_03



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., 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

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley, Hrsg.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>

ISO. (2015). ISO 9001:2015. Quality management systems—Requirements. <https://www.iso.org/standard/62085.html>

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., Kottmeier, C., Petersen, J., Rechid, D., & Teichmann, C. (2017). Regionale Klimamodellierung. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven (S. 27–35). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_4

Jendritzky, G. (2007). Folgen des Klimawandels für die Gesundheit. In W. Endlicher & F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.), Der Klimawandel—Einblicke, Rückblicke und Ausblicke (S. 108–118). Humboldt-Universität zu Berlin, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät II, Geographisches Institut. <https://doi.org/10.18452/1981>

Kahlenborn, W., Porst, L., Voß, M., Fritsch, U., Renner, K., Zebisch, M., Wolf, M., Schönthaler, K., & Schauser, I. (2021). Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021 (Kurzfassung) (UBA, Hrsg.). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/KWRA-Zusammenfassung>

Kaspar, F., Mächel, H., Jacob, D., & Kottmeier, C. (2017). Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In S. Schuck-Zöller, D. Jacob, & G. P. Brasseur (Hrsg.), Klimawandel in Deutschland (S. 17–26). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_3

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>

Kosow, H., & Gaßner, R. (2008). Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse (L. Erdmann & B.-J. Luber, Übers.; Bd. 103). IZT. https://www.izt.de/media/2022/10/IZT_WB103.pdf

Krähenmann, S., Haller, M., & Walter, A. (2021). A new combined statistical method for bias adjustment and downscaling making use of multi-variate bias adjustment and PCA-driven rescaling. *Meteorologische Zeitschrift*, 30(5), 391–411. <https://doi.org/10.1127/metz/2021/1060>



- 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
- LfU (2020): das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftenreihe: UmweltSpezial.
- 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“.
- Lohmeyer, A., & Schändler, G. (1998). Das Kaltluftabflußmodell KALM (K:_GRUNDLAGENLiteraturKaltluft-LOHMEYER_KALM.pdf). <https://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/publikationen/KALMdeutsch.pdf>
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., ... Raasch, S. (2020). Overview of the PALM model system 6.0. Geoscientific Model Development, 13(3), 1335–1372. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1335-2020>
- MAYER, H. & MATZARAKIS, A. (1992): Stadtklimarelevante Luftströmungen im Münchner Stadtgebiet. – Forschungsvorhaben Stadtluft, Abschlussbericht, Lehrstuhl für Bioklimatologie u. Meteorologie Univ. München. 96 S.
- Mayer, H., Beckroge, W., & Matzarakis, A. (1994). Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen (UVP-Report 5, S. 265–268).
- Mayer, H., & Höppe, P. (1987). Thermal comfort of man in different urban environments. Theoretical and Applied Climatology, 38(1), 43–49. <https://doi.org/10.1007/BF00866252>
- McDonald, R. E. (2011). Understanding the impact of climate change on Northern Hemisphere extra-tropical cyclones. Climate Dynamics, 37(7–8), 1399–1425. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0916-x>
- 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>
- 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>
- Pinto, J. G., & Meyers, M. (2017). Winde und Zyklonen. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland* (S. 67–75). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_8
- Pinto, J. G., Zacharias, S., Fink, A. H., Leckebusch, G. C., & Ulbrich, U. (2009). Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Climate Dynamics*, 32(5), 711–737. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0396-4>
- Rauthe, M., Malitz, G., Gratzki, A., & Becker, A. (2014). Starkniederschlag. In A. Becker & R. F. Hüttel (Hrsg.), *Forschungsfeld Naturgefahren*. https://www.dwd.de/DE/leistungen/naturgefahrenforschung/downloads/forschungsfeld_naturgefahrens_starkniederschlag.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- 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>
- Samaniego, L., Thober, S., Kumar, R. *et al.* Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Clim Change* **8**, 421–426 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>
- 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>
- Schär, C., Frei, C., Lüthi, D., & Davies, H. C. (1996). Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophysical Research Letters*, 23(6), 669–672. <https://doi.org/10.1029/96GL00265>
- Schwalm, C. R., Glendon, S., & Duffy, P. B. (2020). RCP8.5 tracks cumulative CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(33), 19656–19657. <https://doi.org/10.1073/pnas.2007117117>
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi: [10.1017/9781009157896.013](https://doi.org/10.1017/9781009157896.013).
- Sievers, U. (2005). Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21 (No. 227; Berichte des DWD).
- Stachowiak, H. (1973). Allgemeine Modelltheorie. Springer Verlag.
- 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: Steininger, K., König, M., Bednar-Friedl, B., Kranzl, L., Loibl, W., Prettenthaler, F. (eds) Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Springer Climate. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12457-5_16. 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 - Entwurf. (2024). Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft-1>

VDI 3787, Blatt 8. (2020). Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-8-umweltmeteorologie-stadtentwicklung-im-klimawandel>

VDI 3787, Blatt 9. (2004). Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-9-umweltmeteorologie-beruecksichtigung-von-klima-und-lufthygiene-in-raeumlichen-planungen>

Wilms, F. E. P. (2006). Szenarien sind Systeme. Working Paper des Forschungszentrums für Prozess- und Produkt-Engineering(2006/13). https://www.academia.edu/20427866/Szenarien_sind_Systeme_Working_Paper_des_Forschungszentrums_f%C3%BCr_Prozess_und_Produkt_Engineering_2006_13_Dornbirn_2006

Winterrath, T. Junghänel, K. Lengfeld, E. Walawender, E. Weigl (2023): Starkregenereignisse im urbanen Raum – Monitoring auf Basis von Messstationen und Wetterradar. promet Heft 106 3 S.27-36. Hrsg. Deutscher Wetterdienst.



ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. (2025). Starkniederschlag. GeoSphere Austria.
<https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/ne-oklima/starkniederschlag>

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 02.06.2026

Erstellt von: Dr. Jens Dahlhausen (M. Sc. Geoökologie)

Geprüft von: Dr. Björn Büter (Geschäftsführer)

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.