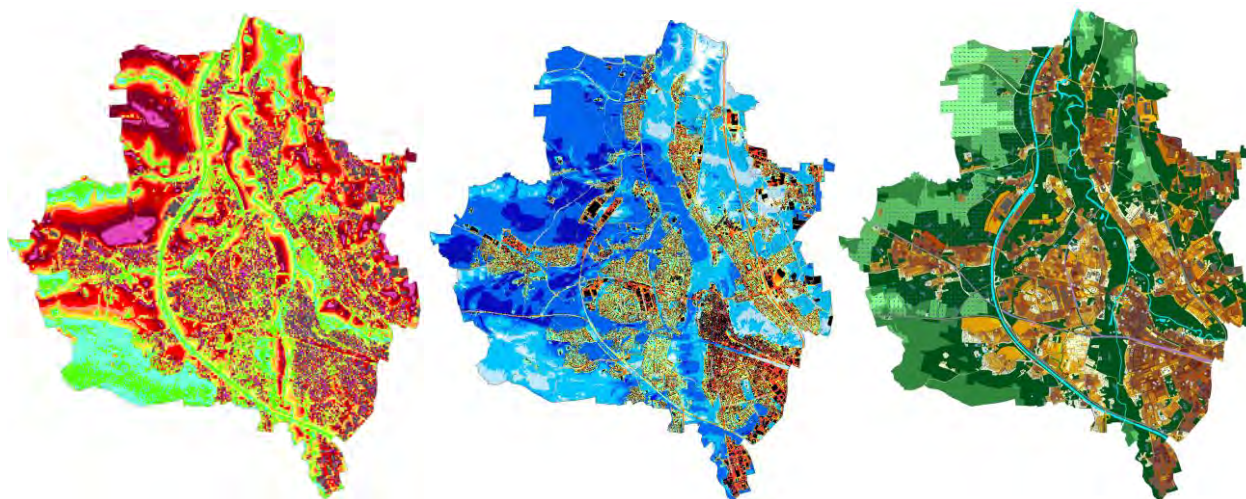


Stadtklimaanalyse Fürth

Erläuterungsbericht



Auftraggeberin



Stadt Fürth
Amt für Umwelt, Ordnung und Verbraucherschutz
Schwabacher Straße 170
90763 Fürth

Auftragnehmerin



Geo-Net Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstr. 5a
30161 Hannover



gefördert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz





Impressum

Auftraggeberin

Stadt Fürth
Amt für Umwelt, Ordnung und Verbraucherschutz
Schwabacher Straße 170, 90763 Fürth

Ansprechpartner*innen: Jonas Köhler, Diana Perkins

Bearbeitung

Geo – Net Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstr. 5a
30161 Hannover

Ansprechpartnerinnen: Elke Hipler, Cornelia Burmeister

Unterstützt durch Fördermittel des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz mit dem Förderschwerpunkt „Klimaschutz in Kommunen“ der Richtlinie KommKlimaFör

Hannover, Dezember 2025



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	II
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis.....	VI
Glossar	VIII
1. Zusammenfassung	10
2. Hintergrund und Anlass	15
3. Fachliche Grundlagen	17
3.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit.....	17
3.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	19
3.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik.....	22
4. Klima und Klimawandel im Raum Fürth	23
4.1 Datengrundlage und Methodik	23
4.2 gegenwärtiges Klima.....	27
4.3 Zukünftige Klimaveränderungen in Fürth.....	33
5. Analysemethode	42
5.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	42
5.2 Szenarien-Entwicklung	46
5.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten.....	51
5.4 Rahmen- und Randbedingungen.....	57
5.5 Modellausgabegrößen.....	59
5.6 Qualitätssicherung.....	61
5.7 Unsicherheiten und Herausforderungen.....	61
6. Ergebnisse der numerischen Modellierungen	64
6.1 Nächtliche Lufttemperatur und Kaltluftproduktion.....	64
6.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht	67
6.3 Wärmebelastung am Tage.....	69
7. Zwischenprodukte	73
7.1 Klimaanalysekarten	73
7.2 Karte der soziodemographischen Verletzlichkeit	77
8. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte.....	82
8.1 Grundlagen.....	82
8.2 Geometrische Basis	83



8.3	Bewertungskarten	84
8.4	Planungshinweiskarte	93
8.5	Massnahmenkatalog	100
8.6	Planungsrechtliche Anknüpfungspunkte	125
	Quellenverzeichnis	135
	Anhang	146



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	17
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD, 2026C)	18
ABBILDUNG 3: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ & SETT, 2019).....	19
ABBILDUNG 4: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: (LINE, 2017) (OBEN), (MINISTERIUM FÜR VERKEHR UND INFRASTRUKTUR BADEN-WÜRTTEMBERG (MVI), 2012) (MITTE), (DWD, 2023) (UNTEN))	20
ABBILDUNG 5: RÄUMLICHE AUSDEHNUNG DER FÜR DIE AUSWERTUNG VERWENDETEN MODELL-GITTERPUNKTE (HINTERGRUNDKARTE: OPENSTREETMAP).....	24
ABBILDUNG 6: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN RCP-SZENARIEN UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100 (QUELLE: MEINSHAUSEN ET AL., 2011).....	26
ABBILDUNG 7: KLIMADIAGRAMM FÜR FÜRTH FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DEN RASTERDATENPRODUKTEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (NACH DWD, 2026B).....	27
ABBILDUNG 8: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN FÜRTH IM ZEITRAUM 1881 – 2022 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2026B)	28
ABBILDUNG 9 ENTWICKLUNG DES TROCKENHEITSINDEX NACH DE MARTONNE IN FÜRTH VON 1970 BIS 2023 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2026B).....	30
ABBILDUNG 10 ENTWICKLUNG DER BODENFEUCHTE ANHAND DER NUTZBAREN FELDKAPAZITÄT IN FÜRTH VON 1991 BIS 2023 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2026B)	31
ABBILDUNG 11 WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN FÜRTH FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION NÜRNBERG (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2026B)	31
ABBILDUNG 12 LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN FÜRTH FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION NÜRNBERG (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2024A)	32
ABBILDUNG 13 ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN FÜRTH ALLER RCP-SZENARIEN	34
ABBILDUNG 14 ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN IN FÜRTH (RCP 8.5) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 – 2000 BASIEREND AUF DEN EURO-CORDEX DATEN	35
ABBILDUNG 15 ÄNDERUNG DER MONATLICHEN SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ FÜR ZWEI ZUKUNFTSPERIODEN IN FÜRTH (RCP 8.5) BASIEREND AUF DEN EURO-CORDEX DATEN	37
ABBILDUNG 16: ÄNDERUNG DER MITTLEREN SAISONALEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN FÜRTH (RCP 8.5)	38
ABBILDUNG 17: ÄNDERUNG DER MITTLEREN SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN FÜRTH (RCP 8.5)	39
ABBILDUNG 18: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	44
ABBILDUNG 19: 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.....	46
ABBILDUNG 20: DER SZENARIO-TRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN, 2023)	47
ABBILDUNG 21: ÜBERSICHT DER ENTWICKLUNGSSZENARIEN WELCHE IN DEN ZUKUNFTSSZENARIEN MODELLIERT WURDEN, UND WEITERE IN DEN BEWERTUNGSKARTEN UND PLANUNGSHINWEISKARTE DARGESTELLTEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN / BAULÜCKEN	51
ABBILDUNG 22: DGM IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	52
ABBILDUNG 23: ABLEITUNG DER VEGETATIONSHÖHEN AUS DEM NDVI IN KOMBINATION MIT DEM NORMALISIERTEN OBERFLÄCHENMODELL.....	54
ABBILDUNG 24: AUSSCHNITT DES NUTZUNGSRASTERS.....	54
ABBILDUNG 25: AUSSCHNITT DES STRUKTURHÖHENRASTERS	55



ABBILDUNG 26: SIEDLUNGSENTWICKLUNGSFLÄCHEN: RANDOMISIERTE NUTZUNGSKLASSENVERTEILUNG VS. KONKRETES KONZEPT	56
ABBILDUNG 27: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992)	57
ABBILDUNG 28: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN GRÖÖE, TIEFE UND FLUSSABSCHNITT ZUR TÄGLICHEN WASSERTEMPERATUR. QUELLE: ÜBERNOMMEN AUS CAISSIE [2006, S. 1391].	58
ABBILDUNG 29: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR (4 UHR) FÜR DIE IST-SITUATION IN EINEM AUSSCHNITT DES ZENTRALEN FÜRTHER STADTGEBIETS.	65
ABBILDUNG 30: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN EINEM AUSSCHNITT DES ZENTRALEN FÜRTHER STADTGEBIETS, FÜR DIE 6 ZUKUNFTSSZENARIEN	66
ABBILDUNG 31: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM UMFELD DER KERNSTADT, IST-SITUATION.	67
ABBILDUNG 32: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM FÜR EINEN AUSSCHNITT DES UNTERSUCHUNGSGEBIETS, IST-SITUATION.	68
ABBILDUNG 33: AUSSCHNITT AUS DEM BODENNAHEN NÄCHTLICHEN STRÖMUNGSFELD.	69
ABBILDUNG 34: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN EINEM AUSSCHNITT DES FÜRTHER STADTGEBIETES	71
ABBILDUNG 35: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN EINEM AUSSCHNITT DES ZENTRALEN FÜRTHER STADTGEBIETES, FÜR DIE 6 ZUKUNFTSSZENARIEN	72
ABBILDUNG 36: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN.	74
ABBILDUNG 37: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE IST-SITUATION (LEGENDE: SIEHE ABBILDUNG 36)	77
ABBILDUNG 38: KONZENTRATION DER ANTEILE AN KINDERN UNTER 6 JAHREN IN EINEM AUSSCHNITT DES FÜRTHER STADTGEBIETS.	79
ABBILDUNG 39: KONZENTRATION DER ANTEILE AN SENIOREN ÜBER 65 JAHREN IN EINEM AUSSCHNITT DES FÜRTHER STADTGEBIETS.	79
ABBILDUNG 40: SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE FÜR EINEN AUSSCHNITT DES FÜRTHER STADTGEBIETS	81
ABBILDUNG 41: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	83
ABBILDUNG 42: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 3785, BLATT 1, 2008, S. 30)	84
ABBILDUNG 43: SCHEMA DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG VON FLÄCHEN IM AUSGLEICHSPRAUM IN DER NACHT	87
ABBILDUNG 44: AUSSCHNITT AUS DER BEWERTUNGSKARTE FÜR DIE NACHTSITUATION (IST-SITUATION), VERKÜRZTE LEGENDE	89
ABBILDUNG 45: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION FÜR DIE 6 SZENARIEN, VERKÜRZTE LEGENDE.	90
ABBILDUNG 46: AUSSCHNITT AUS DER BEWERTUNGSKARTE FÜR DIE TAGSITUATION (IST-SITUATION, VERKÜRZTE LEGENDE	92
ABBILDUNG 47: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION FÜR DIE 6 SZENARIEN, VERKÜRZTE LEGENDE.	92
ABBILDUNG 48: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA, VERKÜRZTE LEGENDE	96



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: LANGJÄHRIGE MITTLERE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUREN, DES NIEDERSCHLAGS SOWIE VON METEOROLOGISCHEN KENNTAGEN IN FÜRTH (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD, 2026B)	29
TABELLE 2 LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER LUFTTEMPERATUR IN FÜRTH (MINIMUM, P50 = MEDIAN, MAXIMUM) QUELLE: EIGENE AUSWERTUNGEN AUF GRUNDLAGE DER EURO-CORDEX DATEN.....	34
TABELLE 3 LANGJÄHRIGE ÄNDERUNGEN THERMISCHER KENNTAGE IN FÜRTH (MINIMUM, P50 = MEDIAN, MAXIMUM) BASIEREND AUF DEN EURO-CORDEX DATEN	36
TABELLE 4: ÄNDERUNG DER MITTLEREN NIEDERSCHLÄGE, DER KLIMATISCHEN WASSERBILANZ UND DER ANZAHL AN TROCKENTAGEN IN FÜRTH (MINIMUM, MEDIAN UND MAXIMUM DES ÄNDERUNGSSIGNALS ALLE MODELLÄUFE).	38
TABELLE 5: ÄNDERUNG DER AUFTRITTHÄUFIGKEIT VON STARKREGENEREIGNISSEN SOWIE DES MAXIMALEN TAGESNIEDERSCHLAGS IN FÜRTH (MINIMUM, MEDIAN UND MAXIMUM DES ÄNDERUNGSSIGNALS ALLE MODELLÄUFE).....	40
TABELLE 6: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	43
TABELLE 7: MODELL-SZENARIEN ZUR SIMULATION DES FÜRTHER STADTKLIMAS UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE ..	49
TABELLE 8: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS	53
TABELLE 9: NUTZUNGSKLASSENANTEILE UND STRUKTURHÖHEN NACH GRZ	56
TABELLE 10: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	60
TABELLE 11: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	61
TABELLE 12: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET (NACH VDI 3787, BLATT 9, 2004)	70
TABELLE 13: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN	76
TABELLE 14: KLASSIFIZIERUNG DER SENSITIVITÄT DER BEVÖLKERUNG	80
TABELLE 15: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE (GERUNDET AUF 1 DEZIMALSTELLE) FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	85
TABELLE 16: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN (GERUNDET AUF 1 DEZIMALSTELLE) FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT	86
TABELLE 17: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE (GERUNDET AUF 1 DEZIMALSTELLE) FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	88
TABELLE 18: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG VON SIEDLUNGSFLÄCHEN IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	90
TABELLE 19: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG VON AUSGLEICHSRÄUMEN IN BEZUG AUF DEN SIEDLUNGSRAUM IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	91
TABELLE 20: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	93
TABELLE 21: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE POTENZIELLE ERHOLUNGSFUNKTION AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO	93
TABELLE 22: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.....	94
TABELLE 23: MIT DEN STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	95
TABELLE 24: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSRRAUMS.	97



TABELLE 25: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	98
TABELLE 26: BEWERTUNGSGRUNDLAGEN DER STADTKLIMATISCHEN VERTRÄGLICHKEIT DER STÄDTEBAULICHEN ERWEITERUNGSFLÄCHEN	99
TABELLE 27: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT FÜRTH.	103
TABELLE 28: BEST PRACTICE BEISPIELE AUS FÜRTH UND VERSCHIEDENEN ANDEREN STÄDTEN FÜR DIE UMSETZUNG VON STADTKLIMATISCHEN (ANPASSUNGS-) BELANGEN. QUELLE: EIGENE RECHERCHE (KEIN ANSPRUCH AUF VOLLSTÄNDIGKEIT)	130



Glossar

- Albedo:** Rückstrahlvermögen einer Oberfläche (Reflexionsgrad kurzwelliger Strahlung). Verhältnis der reflektierten zur einfallenden Lichtmenge. Die Albedo ist abhängig von der Beschaffenheit der bestrahlten Fläche sowie vom Spektralbereich der eintreffenden Strahlung.
- Allochthone Wetterlage:** Durch großräumige Luftströmungen bestimmte Wetterlage, die die Ausbildung kleinräumiger Windsysteme und nächtlicher Bodeninversionen verhindert. Dabei werden Luftmassen, die ihre Prägung in anderen Räumen erfahren haben, herantransportiert. Die allochthone Wetterlage ist das Gegenstück zur *→ autochthonen Wetterlage*.
- Ausgleichsraum:** Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen *→ Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über *→ Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über funktionstfähige Austauschbeziehungen trägt dieser zur Verminderung oder zum Abbau der Wärmebelastungen im Wirkungsraum bei. Mit seinen günstigen klimatischen Eigenschaften bietet er eine besondere Aufenthaltsqualität für Menschen.
- Austauscharme Wetterlage:** *→ Autochthone Wetterlage*
- Autochthone Wetterlage:** Durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlage mit schwacher Windströmung und ungehinderten Ein- und Ausstrahlungsbedingungen, die durch ausgeprägte Tagesgänge der Lufttemperatur, der Luftfeuchte und der Strahlung gekennzeichnet ist. Die meteorologische Situation in Bodennähe wird vornehmlich durch den Wärme- und Strahlungshaushalt und nur in geringem Maße durch die Luftmasse geprägt, sodass sich lokale Klimate wie das Stadtklima bzw. lokale Windsysteme wie z.B. Berg- und Talwinde am stärksten ausprägen können. In den Nachtstunden sind autochthone Wetterlagen durch stabile Temperaturschichtungen der bodennahen Luft gekennzeichnet. Damit wird eine vertikale Durchmischung unterbunden und eine ggf. überlagernde Höhenströmung hat keinen Einfluss mehr auf das bodennahe Strömungsfeld, das entsprechend sensibel auf Hindernisse reagiert. Tagsüber sind die Verhältnisse weniger stabil.
- Bioklima:** Beschreibt die direkten und indirekten Einflüsse von Wetter, Witterung und Klima (= atmosphärische Umgebungsbedingungen) auf die lebenden Organismen in den verschiedenen Landschaftsteilen, insbesondere auf den Menschen (Humanbioklima).
- Flurwind:** Thermisch bedingte, relativ schwache Ausgleichsströmung, die durch horizontale Temperatur- und Druckunterschiede zwischen vegetationsgeprägten Freiflächen im Umland und (dicht) bebauten Gebieten entsteht. Flurwinde strömen vor allem in den Abend- und Nachtstunden schubweise in Richtung der Überwärmungsbereiche (meist Innenstadt oder Stadtteilzentrum).
- Grünfläche:** Als „Grünfläche“ werden in dieser Arbeit unabhängig von ihrer jeweiligen Nutzung diejenigen Flächen bezeichnet, die sich durch einen geringen Versiegelungsgrad von maximal ca. 25 % auszeichnen. Neben Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfen und Sportanlagen umfasst dieser Begriff damit auch landwirtschaftliche Nutzflächen sowie Forsten und Wälder.
- Kaltluft:** Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).
- Kaltlufteinwirkungsbereich:** Wirkungsbereich der lokal entstehenden Strömungssysteme innerhalb der Bebauung. Gekennzeichnet sind Siedlungs- und Verkehrsflächen, die von einem überdurchschnittlich hohen *→ Kaltluftvolumenstrom* durchflossen werden oder bodennahe Windgeschwindigkeiten von mindestens 0,1 m/s aufweisen.
- Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete (*→ Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche (*→ Wirkungsräume*) miteinander und sind mit ihren hohen *→ Kaltluftvolumenströmen* elementarer Bestandteil des Luftaustausches. Sie sind in ihrer Breite räumlich begrenzt, mindestens jedoch 50 m breit (Mayer et al. 1994) und zum belasteten Siedlungsraum ausgerichtet.
- Kaltluftvolumenstrom:** Vereinfacht ausgedrückt das Produkt der Fließgeschwindigkeit der *→ Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit m^3/s). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an *→ Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer *→ Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$). Zur



Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das → *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

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

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

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

RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway): Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (IPCC) die bis dahin genutzten, auf sozio-ökonomischen Faktoren beruhenden SRES-Szenarien ab. Die Zahl in der Bezeichnung RCP 2.6 („Klimaschutz-Szenario“), RCP 4.5 bzw. RCP 8.5 („Weiter wie bisher-Szenario“) gibt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Stand Mitte des 19. Jahrhunderts an.

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

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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



1. Zusammenfassung

Die Hitzebelastung im Siedlungsraum ist eine Herausforderung, welche in der Raumplanung miteinbezogen werden muss. Die Raumentwicklung erfordert jedoch genaue Kenntnisse über die lokalen Klimabedingungen. Vor diesem Hintergrund wurde die vorliegende Stadtklimaanalyse flächendeckend und hochaufgelöst für Fürth erstellt. Die Modellergebnisse und die daraus resultierenden Karten (Klimaanalyse-, Bewertungs- und Planungshinweiskarte) geben Aufschluss über die klimatische Situation in der Stadt.

Das Hauptprodukt des ca. 2-jährigen Arbeitsprozesses ist eine Planungshinweiskarte, die in einem verwaltungsinternen, ämterübergreifenden Prozess unter Leitung des Amts für Umwelt, Ordnung und Verbraucherschutz entwickelt worden ist. Das Kartenwerk macht zum einen die abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) in Fürth sichtbar. Zum anderen weist die Planungshinweiskarte aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) einen Schutzbedarf auf Grundlage der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu. Der Entwicklung der Planungshinweiskarte vorangestellt sind Bewertungskarten, in denen jeweils die Tag- und die Nachtsituation, für die Ist-Situation sowie mehrere Zukunftsszenarien getrennt betrachtet wurden. Siedlungsflächen wurden je nach bioklimatischer Belastung (basierend auf der Lufttemperatur in der Nacht bzw. PET (Physiologisch Äquivalente Temperatur)) am Tage klassifiziert. Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) wurden am Tage nach ihrer Bedeutung als Erholungsraum (basierend auf der PET), und in der Nacht auf Basis ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen bewertet.

Grundlagen der Modellierung

Der Stadtklimaanalyse liegt eine Modellrechnung mit dem Stadtklimamodell FITNAH-3D zu Grunde, welche flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet bereitstellt. Die horizontale Auflösung der Modellierung beträgt 5 m, d.h. das Stadtgebiet von Fürth und Umgebung wird in ein Raster mit einer Gitterweite von 5 m x 5 m zerlegt. Für jede Rasterzelle werden Informationen bspw. zur Geländehöhe und Landnutzung, zu Gebäudeumrissen und -höhen sowie zu Bäumen und dem Versiegelungsanteil bestimmt und als Eingangsdaten für die Modellrechnung verwendet. Innerhalb der Stadtgrenze wurden zudem bereits in der Modellierung der Ist-Situation Bebauungspläne berücksichtigt, welche kurz vor der baulichen Realisierung standen. Dabei liegt der Modellierung eine sommerliche Hochdruckwetterlage mit wolkenlosem Himmel und einem sehr schwachen übergelagerten Wind zugrunde (Tageshöchsttemperatur > 25 °C), die in der Stadtklimatologie typischerweise verwendet wird.

Das zukünftige Stadtklima in Fürth

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen auch die zukünftige Situation für drei verschiedene Szenarien („schwacher“, „moderater“ und „starker Klimawandel“ für jeweils zwei Zeiträume betrachtet („nahe Zukunft“: Zeitraum 2031-2060 sowie „ferne Zukunft“: Zeitraum 2071-2100). In den Zukunftsmodellierungen wird die Temperatur aller Höhenprofile zu Beginn der Modellrechnung um den entsprechenden Differenzwert erhöht. Die Temperaturdifferenzen entsprechen den Differenzen für die Sommerperioden zwischen den meteorologischen Perioden 1991 – 2020 im Vergleich zu 2031 – 2060 bzw. 2071 – 2100. Grundlage sind die Klimawandel-Szenarien RCP2.6, RCP4.5 bzw. RCP8.5 für den Raum Fürth. Zudem wird dem Modell



für die Szenarien „moderater Klimawandel“ sowie „starker Klimawandel“ eine stufenweise verminderte Bodenfeuchte infolge zunehmender sommerlicher Dürrephasen vorgegeben. Es gilt darüber hinaus zu beachten, dass im Zuge des Klimawandels nicht nur die absolute Zunahme der Temperaturen ausschlaggebend für die Hitzebelastung sind, sondern vielmehr auch die vermehrte Häufigkeit von Kenntagen wie „Heiße Tage“ (Maximaltemperaturen $> 30\text{ °C}$), „Sommertage“ (Maximaltemperaturen $> 25\text{ °C}$) und „Tropennächten“ (Temperaturen nicht unter 20 °C). So sind für Fürth je nach Klimawandel-Szenario für die Referenzperiode 2041 bis 2070 im Extremfall bis zu 26 mehr „Heiße Tage“ prognostiziert.

Die voraussichtlich zu erwartende städtebauliche Entwicklung in Fürth ist in Form von Entwicklungsflächen in die Modellierung der Zukunftsszenarien eingeflossen. Grundlage dafür sind potenzielle wohnbauliche und gewerbliche Bauflächen aus der Bauleitplanung, ab einer Mindestgröße von einem Hektar.

Modellergebnisse

Das Stadtklimamodell liefert für jede Rasterzelle Ergebnisse zur nächtlichen Lufttemperatur, der Kaltluftproduktion und dem Kaltluftströmungsfeld sowie zur Wärmebelastung am Tag. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms (welche die Strömung über die komplette untere Luftschicht repräsentiert) gelten die Ergebnisse für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung).

Mit Hilfe der Modellergebnisse können nachts überwärmte städtische Bereiche (sogenannte städtische Wärmeinseln) identifiziert und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abgeschätzt werden. Für die Tagsituation wird die Hitzebelastung anhand der PET definiert. Als weitere Parameter werden die Kaltluftvolumenstromdichte, sowie die Strömungsrichtung und – Geschwindigkeit sowie die Kaltluftproduktionsrate ausgegeben. Die aufgeführten Absolutwerte der Klimaparameter sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Temperaturunterschiede innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

Klimaanalysekarten

Die Klimaanalysekarten fassen die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in jeweils einer Karte zusammen und präzisieren das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten (Kaltluftleitbahnen, flächenhafte Kaltluftabflüsse etc.). Dabei gibt es pro Zukunftsszenario sowie für die Ist-Situation jeweils eine Karte. Für die Situation um 14:00 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter, sodass die Karte der PET als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden kann.

Die Klimaanalysekarte gibt zudem eine quantitative Abschätzung für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien: Wie hoch ist der Wärmeinseleffekt? Wie groß ist der Kaltluftvolumenstrom? Welche Strömungsgeschwindigkeit haben die Winde? In der rasterbasierten Karte treten kleinräumige Unterschiede deutlich hervor und Einzelgebäude und Baumgruppen sind gut erkennbar, weshalb sie sich für die Detailplanung eignet.



Bewertungskarten

Aufbauend auf den Modellergebnisse wurden Bewertungskarten erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die einzelnen Szenarien erfolgte. Für die Bewertung ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder) und Flächen im Siedlungsraum zu unterscheiden.

In den Bewertungskarten zur Nacht-Situation orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt. Dabei bekommen Grün- und Freiflächen im Umfeld von Wohngebieten eine höhere Wertigkeit als im Umfeld von Gewerbegebieten, da in der Nacht die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht. Siedlungsferne Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind aus stadtklimatischer Sicht von geringerer Bedeutung. Die Bewertung des Siedlungsraums basiert auf der nächtlichen Überwärmung, so dass dicht bebaute (z.B. die Innenstadt) und/oder hochversiegelte Bereiche (z.B. einige Gewerbegebiete) die ungünstigsten Bedingungen aufweisen. Die steigenden Temperaturen infolge des Klimawandels wirken sich stark auf die Bewertung des Siedlungsraums in den Zukunftsszenarien aus. Während in der Ist-Situation ca. 2 % der Flächen als hoch oder sehr hoch (nachts) bioklimatisch belastet klassifiziert sind, ordnen sich im Szenario „moderater Klimawandel“ (basierend auf RCP – Szenario 4.5) bereits ca. 44 % in der nahen Zukunft, und ca. 73 % in der fernen Zukunft in diesen Klassen ein.

Die Bewertungskarten zur Tag-Situation betrachten die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung. Zudem rücken der Straßenraum für Wegebeziehungen sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und Grünflächen in den Vordergrund. Die Wärmebelastung hängt wesentlich von der Verschattung ab, sodass sich gerade bei Grün- und Freiflächen teilweise konträre Bewertungen zur Nacht-Situation ergeben. Eine Freifläche kühlt in der Nacht stark aus, weist an Sommertagen (ohne Bewölkung) aber eine hohe Wärmebelastung auf, wenn keine Bäume vorhanden sind. Demgegenüber ist die Aufenthaltsqualität in Wäldern und (baumbestandenen) Parks auch an Sommertagen sehr hoch. Die für die Zukunftsszenarien erhöhte ins Modell eingegebene Start-Lufttemperatur sowie die reduzierte Bodenfeuchte wirkt sich deutlich auf die PET und somit auch die Bewertung der Flächen am Tage aus. Der Flächenanteil von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen erhöht sich von ca. 13 % in der Ist-Situation auf im Szenario „moderater Klimawandel“ ca. 50 % in der nahen Zukunft und ca. 62 % in der fernen Zukunft.

Die Bewertungskarten geben eine Einschätzung der klimatischen Situation auf einer bestimmten Fläche für den Tag und die Nacht jeweils für die Ist-Situation und die Zukunftsszenarien und verzweigen dadurch die komprimierte Information der Planungshinweiskarte auf mehrere Karten. So können Handlungsbedarfe im Wirkraum oder Schutzbedarfe im Ausgleichsraum (aus der Planungshinweiskarte) auf die Tageszeit oder den Prognosehorizont festgelegt und zielgerichtete Maßnahmen in Bezug auf das Kaltluftprozessgeschehen (Nacht), den Aufenthaltskomfort im Freien (Tag), die heutige oder zukünftige Flächenkulisse entwickelt werden.

Planungshinweiskarte

In der Planungshinweiskarte, als zentralem Produkt, wird eine Bewertung der Flächen hinsichtlich der Handlungspriorität für Anpassungsmaßnahmen im Siedlungsraum sowie des stadtklimatischen Schutzbedarfs von



Grün- und Freiflächen vorgenommen. Die Bewertungen beruhen auf den stadtklimatischen Funktionen (ablesbar in den Bewertungskarten), ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

In der Planungshinweiskarte werden die **städtebaulichen Entwicklungsflächen** sowohl für Gewerbe- als auch für Wohnnutzung mit einer zusätzlichen Schraffur dargestellt, welche die klimaökologische Verträglichkeit der geplanten Bebauung in drei Bewertungsstufen einteilt. Hieraus kann der Bedarf an zusätzlichen Maßnahmen zur Minderung der Wärmebelastung grob abgelesen werden. Die überwiegende Anzahl der Entwicklungsflächen wurde nicht mit konkreter Planung, sondern mit per Zufall über die Flächen verteilten Nutzungspixeln modelliert, welche sich in Versiegelungsgrad, Baumasse und Grünanteilen an der geplanten Nutzungskategorie (Gewerbe oder Wohnen) orientiert. Eine endgültige Bewertung dieser Flächen kann daher erst erfolgen, wenn flächenkonkrete Planungen vorliegen.

Maßnahmenkatalog

Dem Werk der Stadtklimaanalyse für Fürth ist ein 20 Maßnahmen umfassender Maßnahmenkatalog angehängt, der Empfehlungen für verschiedene Räume und Anwendungsbereiche aufzeigt. Die Maßnahmen reichen vom Themenkomplex „Thermisches Wohlbefinden im Außenraum“ über die „Verbesserung der Durchlüftung“ bis zur „Reduktion der Wärmebelastung im Innenraum“. Welche Maßnahmen jeweils für eine Fläche geeignet sind, hängt einerseits von den konkreten Bedingungen vor Ort, andererseits von den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab.

Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse zeigt als Ergänzung zur Stadtklimaanalyse die Betroffenheit der Fürther Bevölkerung in Bezug auf eine anzunehmende Wärmebelastung. Auf der Basis von demographischen Daten wurden Kinder unter 6 Jahren sowie Senioren über 65 Jahren als vulnerable Altersgruppen eingestuft, die eine im besonderen Maße physiologische Empfindlichkeit (Vulnerabilität) gegenüber Hitzeextremen aufweisen. Die demographischen Daten wurden auf die Ebene der Bewertungsflächen, welche im Zuge der Bewertungskarten und Planungshinweiskarte definiert wurden, zusammengefasst. Die separaten Analyseergebnisse zur räumlichen Dichteverteilung der zwei Altersgruppen werden in einer Karte zur Gesamtanalyse miteinander kombiniert. Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Einrichtungen sowie die Einwohnerdichte und -anzahl pro Bewertungsfläche ausgewertet.

Anwendung in der Praxis

Primäres Anwendungsfeld der Stadtklimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarte und des Maßnahmenkatalogs im Speziellen ist die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der vorbereitenden auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Damit sind valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf eines externen Gutachters möglich.



Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse aber auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gesamstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Stadtklimas in Fürth auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 Jahren anzustreben.



2. Hintergrund und Anlass

Mit voranschreitender Klimaveränderung werden Tage und Nächte mit großer Hitzebelastung in Zukunft immer häufiger und extremer. Insbesondere im Siedlungsraum tragen eine in dichter Bebauung eingeschränkte Windzirkulation sowie die Absorption der einfallenden Sonnenstrahlung durch die vielen versiegelten Flächen in Kombination mit der Abwärme von Industrie, Gebäuden und Verkehr zum Wärmeinsel-Effekt bei. Tagsüber heizen sich Siedlungen stärker auf und nachts kühlen sie deutlich langsamer ab als das Umland. Vor allem die Kernstadt ist durch erhöhte Hitzebelastung, geringe natürliche Versickerung und hohe Emissionen besonders betroffen. Gleichzeitig weisen Städte im Vergleich zum peripheren Umland eine höhere Bevölkerungsdichte und damit eine hohe Anzahl vulnerabler Bevölkerungsgruppen auf. Diese gilt es vor belastenden Umwelteinflüssen wie Hitze zu schützen und nach § 1 Absatz 5 Satz 2 BauGB eine „menschenwürdige Umwelt“ zu gewährleisten.

Die Klimafolgenanpassung (im vorliegenden Fall 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 Stadt Fürth hat in ihrem Integrierten Klimaschutzkonzept (IKSK) das Ziel festgelegt, bis zum Jahre 2040 klimaneutral zu werden (Stadt Fürth, 2021). Neben Maßnahmen zum Klimaschutz durch Reduktion von Treibhausgasemissionen und Energieverbräuchen ist besonders die Anpassung an die Folgen der Klimakrise der zweite wichtige Baustein in Richtung klimagerechter Stadt. Im „Handlungsfeld Klimaanpassung“ des IKSK ist die Erstellung einer Stadtklimaanalyse (Maßnahme 3.11) eine von sieben Maßnahmen (neben u. a. Starkregengefahrenkarte, Hochwasserrisikomanagementplan, Hitzeaktionsplan), um den Folgen des Klimawandels zu begegnen. Ziel dabei ist es, eine „fundierte stadtplanerische Ausrichtung auf Klimaschutz und Klimaanpassung zu ermöglichen“ (Stadt Fürth, 2021).

Vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz sind flächenbezogene Fachinformationen ein ausschlaggebendes Hilfsmittel, um Planungen sachgerecht zu beurteilen. Aus der Kenntnis des in Fürth vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse für Fürth sollen als städtebauliches Entwicklungskonzept gemäß § 1 Abs. 6 Nr. 11 BauGB beschlossen werden und somit als Beurteilungsgrundlage für baurechtliche Planungen dienen. Somit wird eine gezielte Einordnung der geplanten Bauflächen im Hinblick auf die klimatische Situation ermöglicht. Ziel ist es dabei nicht, zukünftige, in Diskussion befindliche Baugebiete ganzheitlich auszuschließen, sondern diese möglichst klimaverträglich zu gestalten.

Die stadtklimatische Analyse soll sowohl den Ist-Zustand der klimatischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Fürth sowie die prognostizierten Verhältnisse für die nahe (2031 – 2060) und ferne (2071 – 2100) Zukunft darstellen und anschließend bewerten. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Neben der aktuellen Hitze- bzw. Wärmebelastung der Siedlungsflächen am Tage und in der Nacht werden auch die Ausgleichsleistungen der Grün- und



Freiflächen erfasst. Letztere können in der Nacht bedeutende Kaltluft- und Frischluftentstehungsgebiete sowie Luftleitbahnen darstellen. Sie stellen eine Durchlüftung der Siedlungsgebiete sicher und garantieren eine nächtliche Abkühlung, sodass eine Bebauung dieser Korridore zu vermeiden oder anzupassen ist. Zum anderen wird für die Tagsituation das Potenzial der Grün- und Freiflächen als kühler Erholungsraum untersucht.

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

3. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten und rechtssicheren Anwendung der vorliegenden Stadtklimaanalyse ist – ihrem Charakter als entscheidungsrelevantes Fachgutachten entsprechend – ein belastbares interdisziplinäres Grundlagenverständnis erforderlich. Dieses Gutachten stellt daher die fachlichen, rechtlichen und klimawissenschaftlichen Zusammenhänge in strukturierter und praxisorientierter Form dar und schafft damit eine tragfähige Grundlage für planerische Abwägungsprozesse sowie strategische Entscheidungen der Stadt Fürth.

Als Ausgangspunkt werden die Zusammenhänge zwischen thermischem Komfort und menschlicher Gesundheit (Kap. 3.1) dargestellt, um die Relevanz stadtklimatischer Belastungssituationen – insbesondere für vulnerable Bevölkerungsgruppen – fachlich einzuordnen. Anschließend werden die maßgeblichen meteorologisch-physikalischen Prozesse im urbanen Raum (Kap. 3.2) erläutert, die für die Entstehung, Ausprägung und räumliche Differenzierung dieser Belastungssituationen verantwortlich sind. Abschließend erfolgt die Einbettung der lokalen Analyseergebnisse in den Kontext des fortschreitenden Klimawandels (Kap. 4), wodurch zukünftige Entwicklungstendenzen und Anpassungserfordernisse transparent gemacht werden.

Die folgenden Ausführungen dienen nicht einer abstrakten Wissensdarstellung, sondern der nachvollziehbaren Herleitung der Bewertungsmaßstäbe, der methodischen Ansätze sowie der daraus abgeleiteten planerischen Handlungsempfehlungen. Die angegebenen Quellen ermöglichen eine vertiefende fachliche Einordnung, ohne den Anspruch einer vollständigen Literaturübersicht zu erheben.

3.1 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.

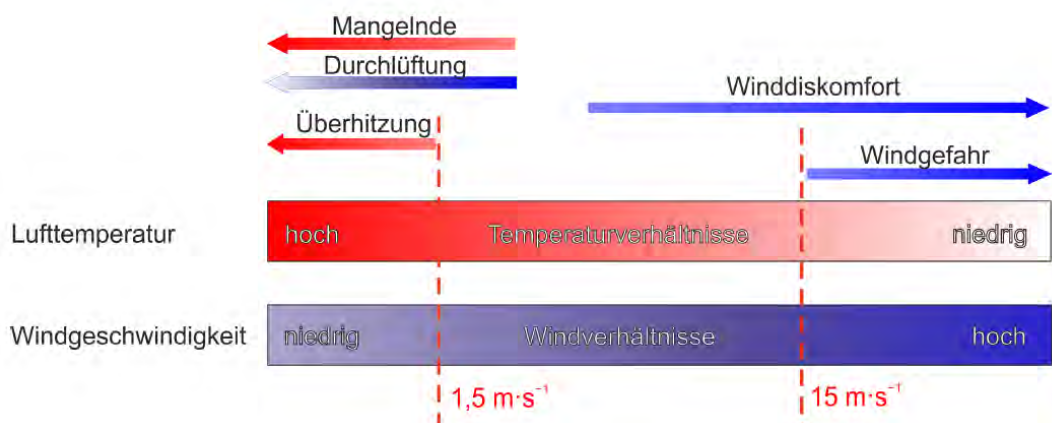


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

Mit Blick auf den thermischen Komfort gilt dabei beispielsweise eine Kombination aus hohen Lufttemperaturen und niedrigen Windgeschwindigkeiten als gesundheitlich belastend (Abbildung 1).

Zur Quantifizierung der klimatischen Belastung auf den Menschen wurden in der Stadt- und Regionalklimatologie humanbiometeorologische Kenngrößen eingeführt, von denen sich insbesondere in den letzten Jahrzehnten im deutschsprachigen Raum die „Physiologisch Äquivalente Temperatur“ (PET) etabliert hat (Höppe & Mayer, 1987). Neben den meteorologischen Einflussgrößen lässt die PET auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen (Abbildung 2). Auf diese Weise können physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Die Bestimmung der PET erfordert eine beträchtliche Anzahl von Eingangsgrößen, die teilweise nur mit erheblichem Mess- bzw. Modellierungsaufwand bestimmt werden können. Deshalb besitzen nach wie vor Auswerterroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD, 2020) (vgl. Kapitel 1).

Die PET ist 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 (Klepeis et al., 2001) – 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 3787, Blatt 2, 2008, S. 25).

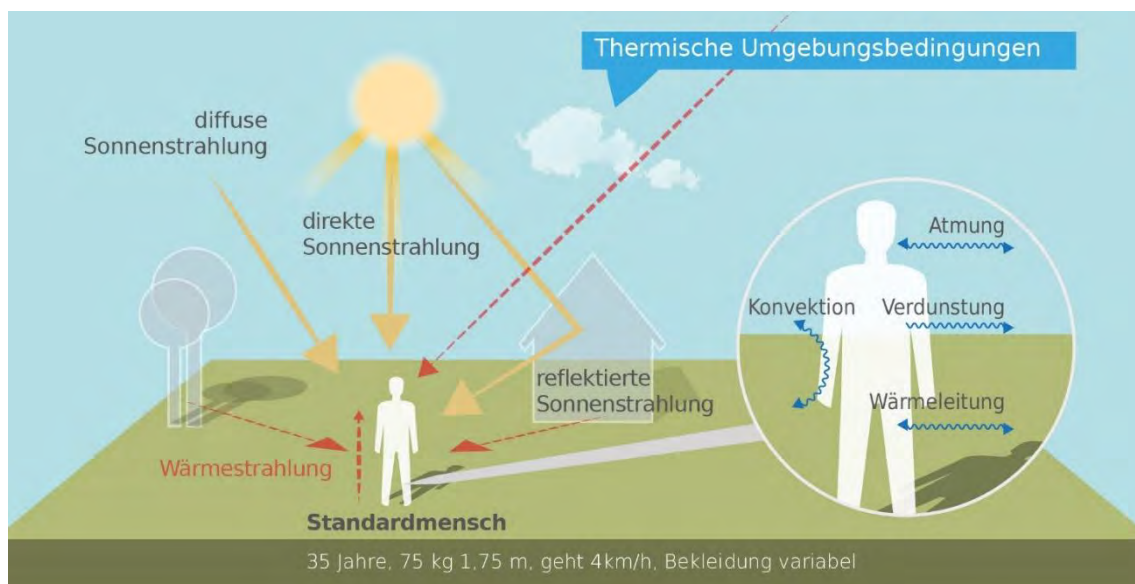


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD, 2026c)

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 3787, Blatt 2, 2008, S. 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (ISO, 1989).

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 Bei-



spielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO, 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steininger, 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von 10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (Cedeño Laurent et al., 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Hitzereduzierende Maßnahmen sollten daher die Siedlungsbereiche mit hohem Anteil an vulnerablen Bevölkerungsgruppen sowie deren täglich frequentierte Orte (Schule, Kita, Spielplatz, Sportfläche, Pflegeheim, Klinikum) besonders in Betracht ziehen (vgl. Kapitel 7.2). Sandholz und Sett kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können (Sandholz & Sett, 2019). Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze 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 3).

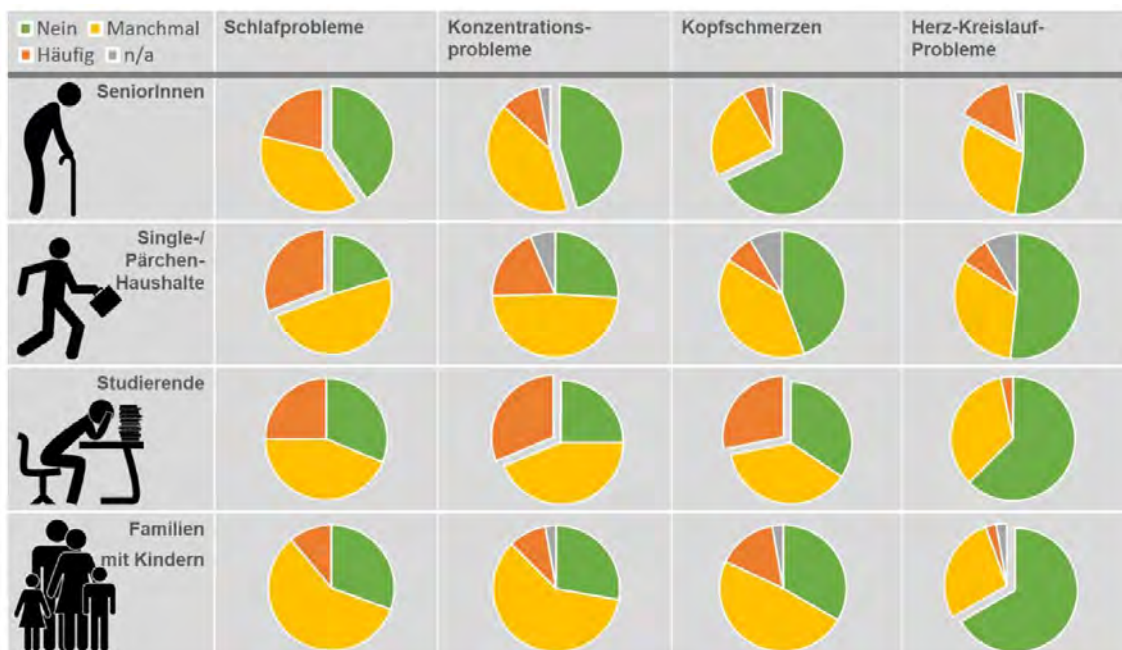


Abbildung 3: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz & Sett, 2019)

3.2 WÄRMEINSELEFFEXT UND KALTLUFTPROZESSE

Eine wichtige Grundlage für einen erholsamen Schlaf in den Sommermonaten ist eine gute Durchlüftung des Stadtkörpers. So kann in den Nachtstunden durch das Heranführen kühlerer Luft aus dem Umland oder aus innerstädtischen Grün-/Freiflächen das Temperaturniveau der in der Stadt lagernden wärmeren Luftmassen lokal gesenkt werden. Entscheidend ist dabei, dass die kältere Außenluft auch ins Gebäudeinnere gelangen

kann, sodass dem nächtlichen Luftaustausch („natürliche Ventilation“) zwischen Gebäude und Umgebungsluft eine Schlüsselrolle zukommt (Gross, 2021). Auch die VDI 3787, Blatt 5 benennt die Umgebungsluft als die zentrale Auswertungsgröße, um die Kaltluftwirkung in der Nacht zu erfassen (VDI 3787, Blatt 5, 2003).

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 4 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (DWD, 2026d). 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 4: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: (Line, 2017) (oben), (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI), 2012) (Mitte), (DWD, 2023) (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt oder Siedlung modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al., 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr,



Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und stärkeren bioklimatischen Belastungen.

Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-) Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2 \text{ m/s}$ hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme (siehe Abbildung 4 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den höher gelegenen Flächen 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. Auch in weniger stark reliefierten Stadtgebieten – wie in Fürth – spielen Hangneigungen und Gefälle eine entscheidende Rolle für das Kaltluftströmungsfeld. Die Windgeschwindigkeiten bewegen sich aber größtenteils im Rahmen von maximal $1,0 \text{ m/s}$ (vgl. Kapitel 6.2). Ausnahmen sind die Hänge des Solarbergs sowie Teile der Hangflächen nördlich der Flexdorfer Straße mit Geschwindigkeiten von $> 1,0 \text{ m/s}$.

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



3.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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

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

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

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



4. Klima und Klimawandel im Raum Fürth

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung aller Wettererscheinungen über einen längeren Zeitraum, der im Allgemeinen 30 Jahre beträgt. Es gibt den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem Ort oder Gebiet im Jahresverlauf wieder und lässt langfristige Veränderungen erkennbar werden (DWD, 2026e).

Die Beschreibung des **gegenwärtigen Klimas** in Fürth basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2026a, 2026b; Kaspar et al., 2013). Die Daten sind rasterbasiert und liegen auf einem regelmäßigen Gitter für ganz Deutschland vor. Sie weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von monatlichen (z.B. Bodenfeuchte) bzw. jährlichen Mittelwerten (z.B. Sommertage) auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- und Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Fürths wurden Gitterzellen aus dem regelmäßigen 1 x 1 km- Gitter extrahiert, räumlich aggregiert und die Daten zu repräsentativen Zeitreihen zusammengestellt. Diese jährlichen Zeitreihen wurden direkt ausgewertet. Zudem wurden daraus die Mittelwerte über 30-jährige Perioden gebildet, um Aussagen zur langfristigen klimatischen Entwicklung treffen zu können. Für Parameter, die nicht vom DWD als Raster bereitgestellt werden (z. B. Tropennächte), wurden Daten von der nächstgelegenen Messstationen in Nürnberg 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 und des ReKliEs-Projektes (Hübener et al., 2017). 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; IPCC, 2013). 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 Emissionsszenarien simuliert und analysiert werden. Wie alle Modelle sind auch Klimamodelle Abbilder der Wirklichkeit und somit nicht „perfekt“. Die Ergebnisse von Klimamodellen beinhalten daher einen gewissen Anteil an Modellunsicherheit, der aus der Struktur des Modells, den verwendeten Techniken zur Modellierung der Atmosphärenphysik und der Parametrisierung bestimmter Prozesse resultiert. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft, nicht nur die Simulationsergebnisse eines Modells, sondern mehrerer Modelle zu verwenden, ein sogenanntes Modellensemble.

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).

Zur Auswertung der Ergebnisse eines Modellensembles stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. So ist es möglich, die Ergebnisse zu aggregieren und einen Ensemble-Mittelwert auszuwerten oder aus den Ensemblewerten statistische Maße wie bspw. den Median oder Quantile abzuleiten. Auch komplexe statistische Ansätze wie bspw. das Bayes-Verfahren kommen bei der Auswertung von Modellensembles zur Anwendung (Fischer et al., 2012). Es stellt sich weiterhin die Frage, ob alle Ensemble-Mitglieder gleichberechtigt betrachtet oder eventuell nach ihrer Güte (die zu definieren wäre) gewichtet werden sollen. Jede Methode zur Auswertung von Modellensembles hat Vor- und Nachteile, die jedoch an dieser Stelle nicht tiefergehend diskutiert werden können (siehe z. B. Knutti et al., 2010). Für diesen Bericht wurden die Mitglieder des Regionalmodell-Ensembles gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke et al., 2024).

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer **zeitlichen Auflösung** von einem Tag und einer **räumlichen Auflösung** von ca. 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 den Grenzen Fürths (vergleiche Abbildung 5). 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. Dies führt jedoch beispielsweise dazu, dass Starkregenereignisse, welche oftmals kleinräumig und zeitlich kurz auftreten, von Regionalklimamodellen potenziell nicht erfasst und folglich sogar unterschätzt werden (DWD, 2022).



Abbildung 5: Räumliche Ausdehnung der für die Auswertung verwendeten Modell-Gitterpunkte (Hintergrundkarte: OpenStreetMap)

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die Treibhausgasemissionen (Kohlendioxid CO₂, Methan CH₄, Lachgas N₂O, fluoridierte Treibhausgase) zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von



sogenannten **RCP-Szenarien** (RCP = *Representative Concentration Pathways*) mit unterschiedlicher Entwicklung der Treibhausgaskonzentrationen über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen (Abbildung 6). Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5. Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*), die sozioökonomische 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 Szenarien¹), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten und dem DWD-Referenzensemble enthalten, sodass im vorliegenden Bericht weiterhin die RCP-Szenarien verwendet werden. Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-Szenarien benennt den zusätzlichen Strahlungsantrieb in W/m^2 in Bezug zum vorindustriellen Stand um 1860, der im projizierten Verlauf des jeweiligen Szenarios im Jahr 2100 erreicht sein wird und bedeutet somit ein entsprechend Vielfaches der Strahlungsleistung von 1860 (IPCC, 2014; maribus, 2024; Moss et al., 2010).

Das **RCP-Szenario 2.6** beschreibt zunächst einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis Mitte des Jahrhunderts auf ca. 3 W/m^2 , welcher bis zum Ende des Jahrhunderts langsam, aber stetig auf $2,6 \text{ W/m}^2$ absinkt (bedeutet also das 2,6-fache der Strahlungsleistung von 1860). Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario aufgrund drastischer Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgas-Emissionen das 2°C -Ziel nicht überschreiten, sodass RCP 2.6 auch als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.

RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert. Bei diesem Szenario würden die globalen Mitteltemperaturen um $2,6^\circ\text{C}$ gegenüber dem vorindustriellen Niveau steigen.

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. $4,8^\circ\text{C}$ gegenüber dem vorindustriellen Zustand bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO_2 -Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Bisher befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes², mit den globalen CO_2 -Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Gilfillan et al., 2020; Peters et al., 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO_2 -Ausstoßes würde aufgrund der Trägheit des Klimasystems keine signifikante Änderung in Kürze herbeiführen. Aus diesem Grund sind im vorliegenden Bericht vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden. Für die zwei Stadtklimamodellierungen der Zukunft in Fürth („Schwacher Klimawandel“ und „Starker Klimawandel“) wurden die Lufttemperaturzunahmen des RCP 4.5 bzw. des RCP 8.5 verwendet (siehe hierzu Kapitel 5.2 Szenarienentwicklung).

¹ CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project 6*) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms (*World Climate Research Programme*)

² <https://www.globalcarbonproject.org/>

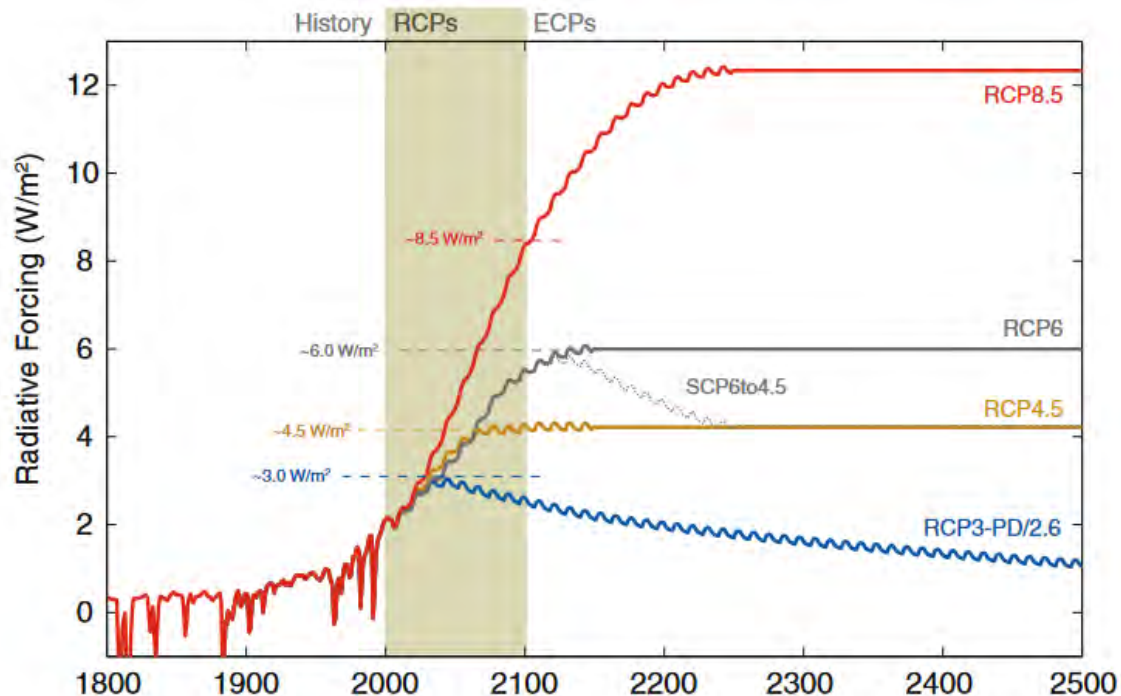


Abbildung 6: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100³ (Quelle: Meinshausen et al., 2011)

Eine etablierte Methode zur Beschreibung von klimatischen Änderungen ist die Verwendung von **meteorologischen Kenntagen**. Dies sind z.B. die Anzahl von Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes (meist jährlich). Die Bestimmung dieser Kenntage erfolgt anhand von Schwellenwerten wie bspw. $T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$ für Sommertage.

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

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten Klimanormalperiode von 1961 – 1990, da dieser Zeitraum nur zum Teil von der aktuellen weltweiten Erwärmung betroffen war. 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. Diese wird auch in der aktuellen bundesweiten Klimawirkungs- und Risikoanalyse (KRA) verwendet (UBA, 2021a). Die KRA betrachtet in Bezug auf die Klimawandelfolgen weiterhin zwei Zukunftsperioden in der Mitte (2031 – 2060) und zum Ende (2071 – 2100) des Jahrhunderts. Für Fürth wurden für die Beschreibung des zukünftigen Klimas und für die Modellierungen mit FITNAH-3D in die-

³ ECP = *Extended Concentration Pathways* sind ergänzende Szenarien bis zum Jahr 2300 für die Betrachtung langfristiger Auswirkungen des globalen Klimawandels



sem Kapitel beide Zukunftsperioden betrachtet. Es wurden dann sowohl für die Referenz- als auch die Zukunftsperioden für jede Klimavariablen zeitliche Mittelwerte berechnet. Von den jeweiligen Mittelwerten der entsprechenden 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 dem vom Bund-Länder-Fachgespräch zur Interpretation von Modelldaten vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (Linke et al., 2024). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist 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 u.a. Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15). Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind.

4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Zur Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Fürth wird sich auf die Daten aus der aktuellen Klimaperiode von 1991 bis 2020 bezogen. In diesem Zeitraum ist Fürth durch eine langjährige Mitteltemperatur für die Luft von 9,6 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von 634 mm/Jahr gekennzeichnet (Abbildung 7). Damit weist Fürth im Mittel ähnlich hohe Lufttemperaturen und geringere Niederschlagsmengen als im deutschlandweiten Durchschnitt für diesen Zeitraum (9,3 °C bzw. 790 mm/Jahr) auf (UBA, 2025b, 2025a).

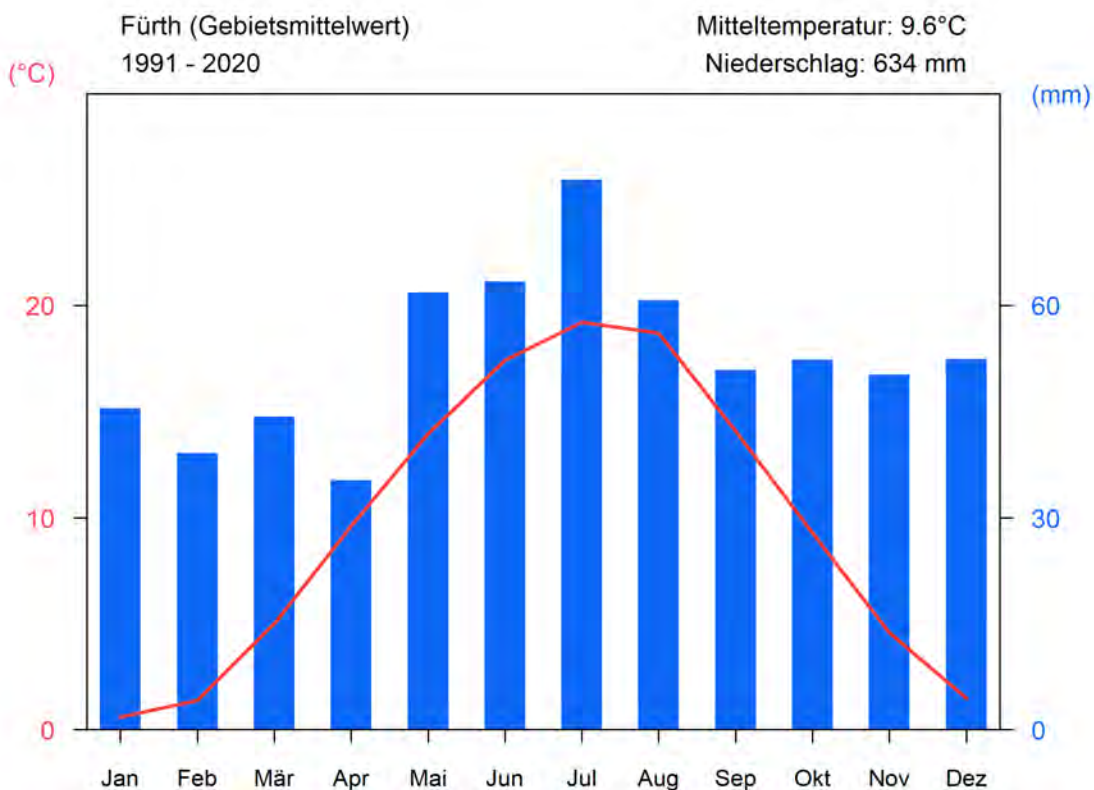


Abbildung 7: Klimadiagramm für Fürth für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf den Rasterdatenprodukten des Deutschen Wetterdienstes (nach DWD, 2026b)



Verglichen mit früheren Perioden wird deutlich, dass in Fürth – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die durchschnittliche Lufttemperatur im Vergleich zur Referenzperiode (1971-2000) bereits um 0,7 °C und seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen (1881 – 1910) sogar um 1,5 °C gestiegen. Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der jetzigen und letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 8).

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. In Fürth zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der aktuellen Klimaperiode 1991-2020 zur Referenzperiode 1971-2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 42 auf 52 pro Jahr und die Anzahl an Heißen Tagen von 8 auf 13 pro Jahr gestiegen (Tabelle 1).

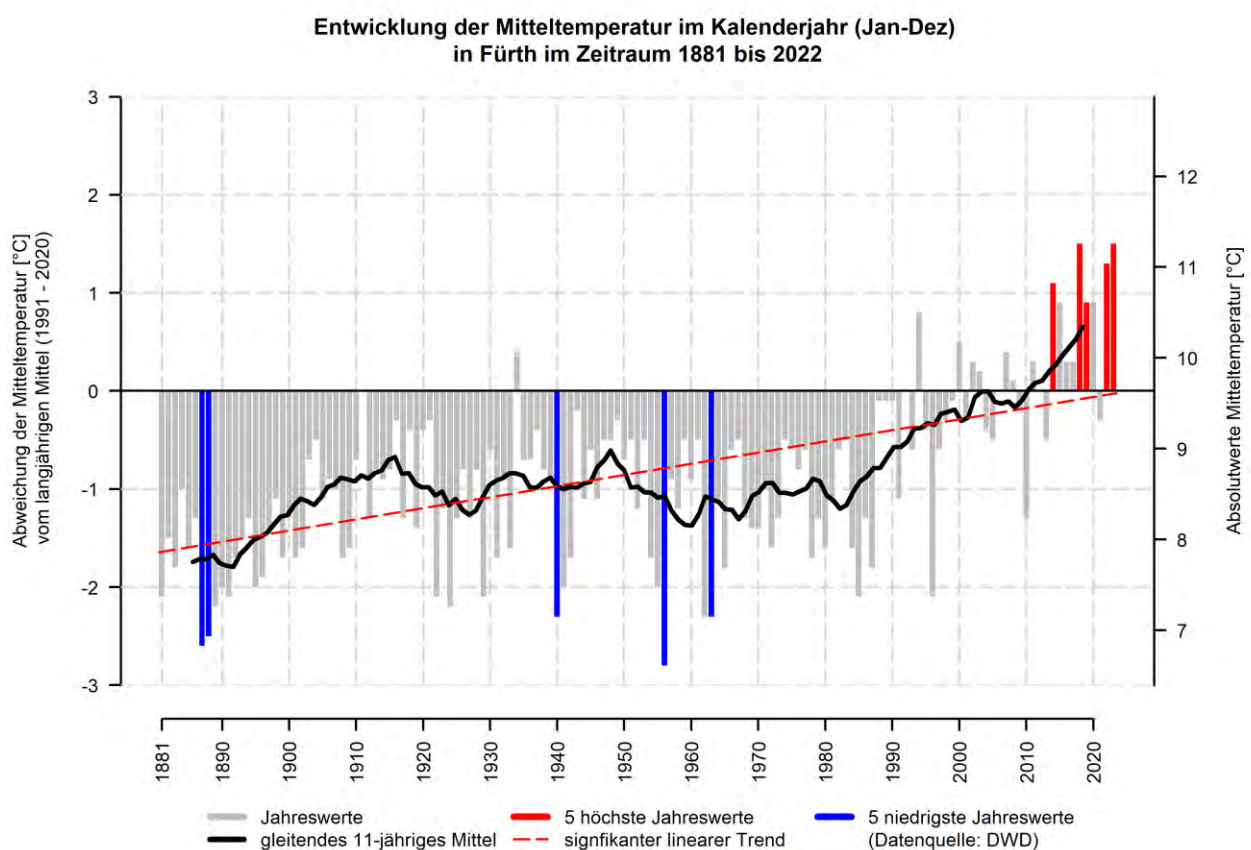


Abbildung 8: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Fürth im Zeitraum 1881 – 2022 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2026b)



Tabelle 1: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kenntagen in Fürth (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2026b)

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	8,5	8,8	9,6
Sommertage ($T_{\max} \geq 25 \text{ °C}$) [n/Jahr]	40	42	52
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$) [n/Jahr]	7	8	13
Tropennächte ⁴ ($T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$) [n/Jahr]	keine Angabe	0	0
Frosttage ($T_{\min} < 0 \text{ °C}$) [n/Jahr]	102	97	90
Eistage ($T_{\max} < 0 \text{ °C}$) [n/Jahr]	23	20	16
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	646	647	634

Die Temperaturen wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein Maß für die Trockenheit ist der Trockenheitsindex nach de Martonne, der sich aus dem Jahresniederschlag im Verhältnis zur Jahresmitteltemperatur der Luft ergibt (de Martonne, 1926). Dieser unterliegt in Fürth Schwankungen, zeigt v.a. in den 90er Jahren und ab 2014 eine Abnahme, aber keinen signifikanten abnehmenden Trend (vermehrte Trockenheit durch geringeren Jahresniederschlag im Verhältnis zu steigenden Lufttemperaturen). Der Grenzwert zur (Semi-)Aridität wurde in der vergangenen Klimaperiode nicht unterschritten (Abbildung 9).

Die Bodenfeuchte nimmt in Fürth über die letzten 30 Jahre signifikant ab (Abbildung 10). In der Einheit % nFK (Prozent der nutzbaren Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Trockenstress stehen bzw. der Welkepunkt erreicht wird, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind (DWD, 2024b). Erwartungsgemäß fällt die Bodenfeuchte im Sommer (orange Balken in Abbildung 10) deutlich geringer aus als in den anderen Jahreszeiten (graue Balken). Die Bodenfeuchte ist jedoch nicht so stark gesunken, dass die Pflanzen Trockenstress ausgesetzt sind.

⁴ Da die Tropennächte vom DWD nicht als flächendeckende Raster veröffentlicht werden, beziehen sich die Angaben der Tropennächte auf die DWD Station Nürnberg für den Zeitraum 1971-2000 und 1991-2020 (DWD, 2026a)

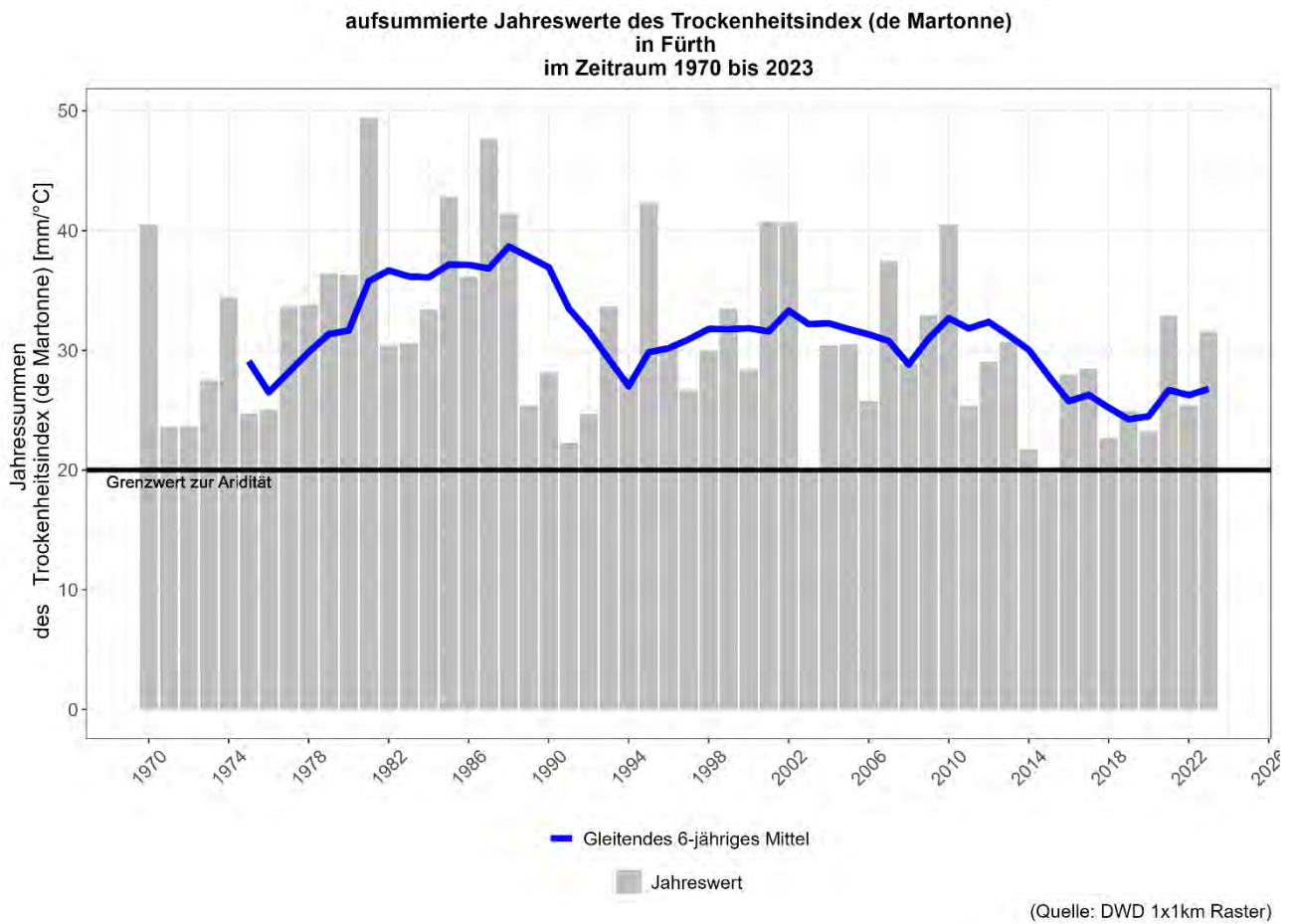


Abbildung 9 Entwicklung des Trockenheitsindex nach de Martonne in Fürth von 1970 bis 2023 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2026b)

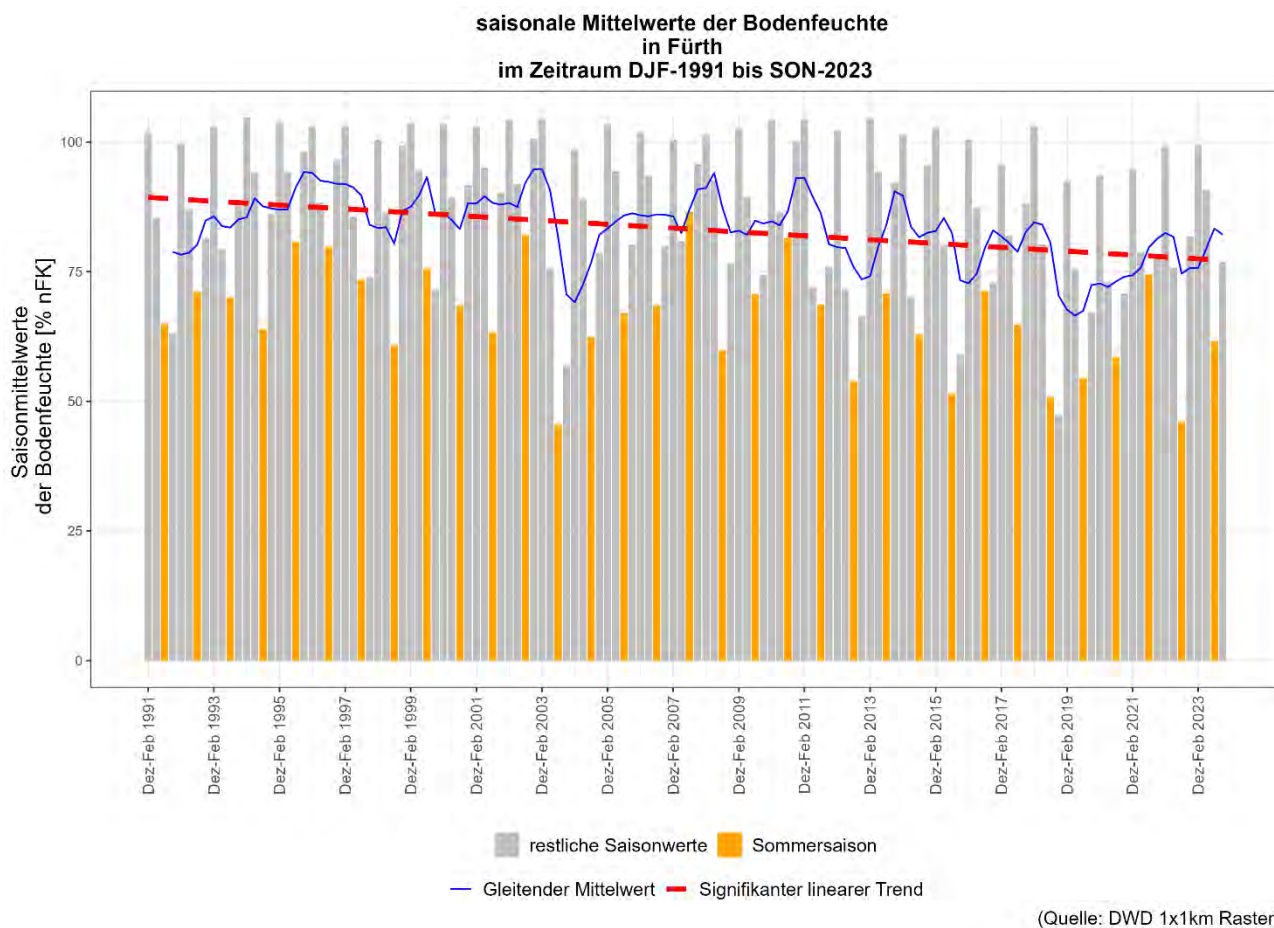


Abbildung 10 Entwicklung der Bodenfeuchte anhand der nutzbaren Feldkapazität in Fürth von 1991 bis 2023 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2026b)

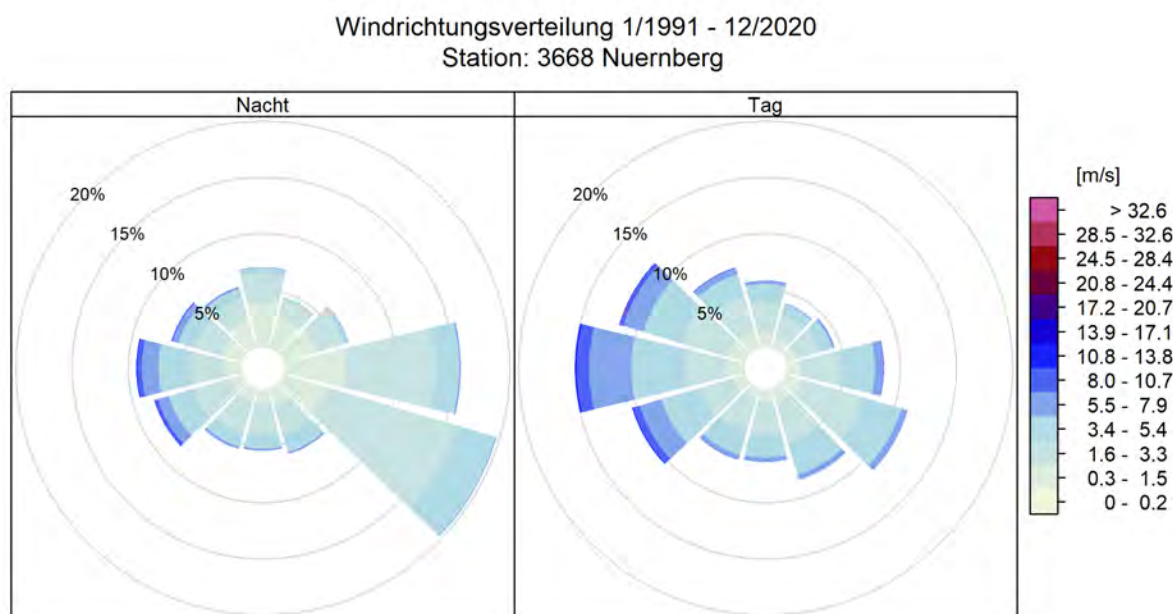


Abbildung 11 Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Fürth für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Nürnberg (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2026b)



Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Nürnberg dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Fürth. Dort liegt die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit bei 3,0 m/s, am häufigsten traten Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 3,3 m/s (leichte Brise) auf. In den Nachtstunden häufen sich Winde aus West bzw. WSW (Abbildung 11), am Tag ist der Wind aus Ost die Hauptwindrichtung. Die zweithäufigste Windrichtung stellen in der Nacht O und am Tag WSW dar.

Autochthone Wetterlagen

Die Modellrechnungen innerhalb der vorliegenden Stadtklimaanalyse legen nach VDI 3787, Blatt 9 (2004) einen autochthonen Sommertag (wolkenloser Himmel, nur sehr schwach überlagernder Wind) als meteorologische Rahmenbedingung für die Modellrechnung zugrunde. Verbunden mit dieser autochthonen Wetterlage ist das Auftreten einer windschwachen Strahlungsnacht, in der die nächtliche Ausstrahlung aufgrund der fehlenden Bewölkung deutliche Temperaturunterschiede im Stadtgebiet erzeugt. Diese Situation bringt die höchsten thermischen Belastungen innerhalb der Stadt mit sich und die lokalklimatischen Besonderheiten in Fürth prägen sich besonders gut aus. Das sind zum einen der Wärmeinseleffekt und die sich aus sich selbst entwickelnde Kaltluftdynamik, die durch keine überlagerte Strömung beeinflusst wird. Somit sind bei einer autochthonen Wetterlage die Kaltluftleitbahnen identifizierbar.

**langjährige mittlere monatliche Anzahl an autochthonen Nächten (67.4 pro Jahr)
1991 - 2020, Station: 3668 - Nuernberg**

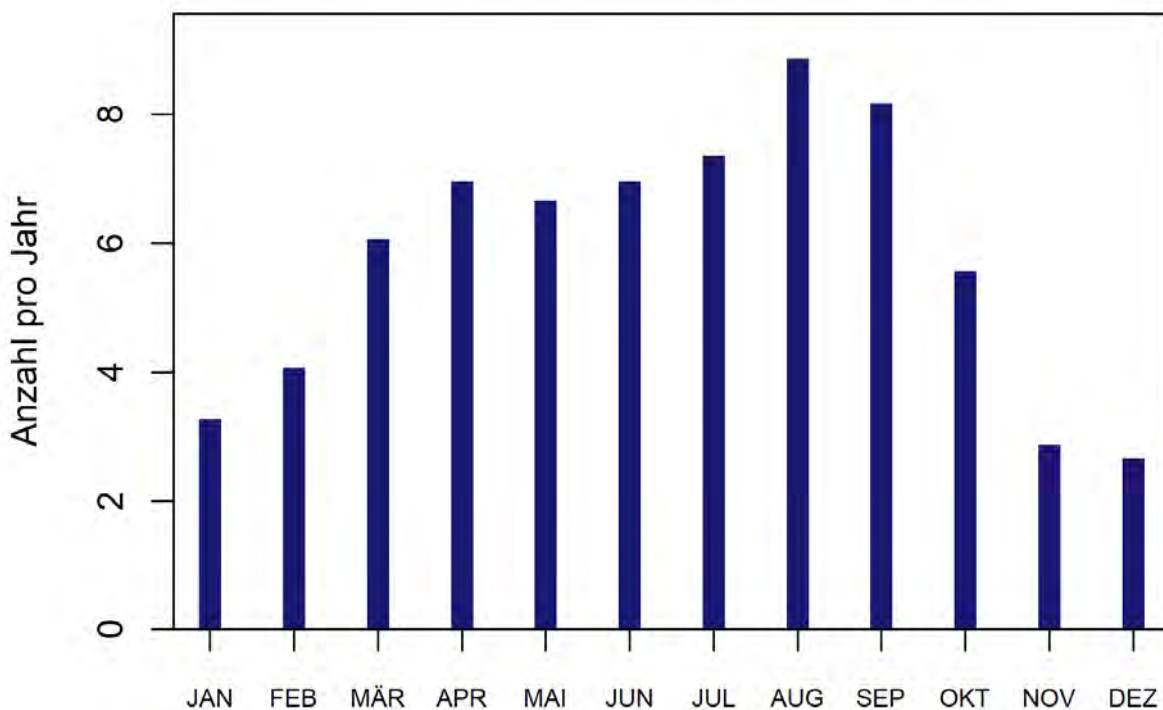


Abbildung 12 Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Fürth für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Nürnberg (Quelle: eigene Berechnung nach DWD, 2024a)

Um autochthone Nächte zu ermitteln, braucht es Angaben zur stündlichen Windgeschwindigkeit, zur Lufttemperatur und zum Bedeckungsgrad (Berechnung nach Augter, 1997, unveröffentlicht; zitiert in [Schlünzen et al., 2018](#)). Daher wurden diese für die nahe gelegene repräsentative Station Nürnberg des Deutschen Wetterdiensts ausgewertet.



An der nächstgelegenen Wetterstation Nürnberg traten in der letzten Klimaperiode 67,4 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 12). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel 22,7 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 25 % entspricht – jede vierte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen. Die Station Nürnberg ist, wie die meisten DWD-Stationen, WMO-konform aufgebaut und liegt nicht im urbanen Stadtgebiet, sondern im rural geprägten Rand der Stadt. Daher kann es zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Auftrittshäufigkeit autochthoner Nächte in der Innenstadt von Fürth kommen. Die obenstehenden Angaben sind daher als Mindestmaß zu verstehen.

4.3 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN IN FÜRTH

4.3.1 LUFTTEMPERATUR UND KENNTAGE

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der Jahresmitteltemperatur in Fürth bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 13 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen⁵ (Tabelle 2).

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

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (Minimum - Maximum in den Modellergebnissen in Abbildung 13).

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

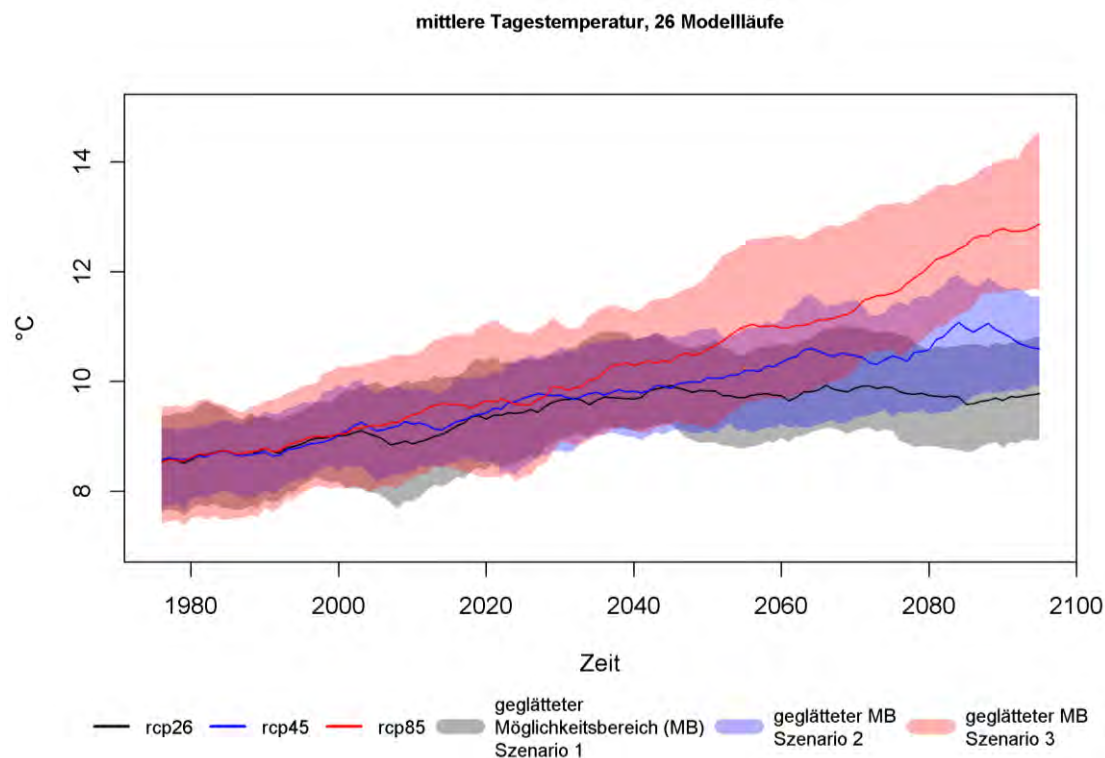


Abbildung 13 Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Fürth aller RCP-Szenarien

Tabelle 2 Langjährige Änderung der Lufttemperatur in Fürth (Minimum, P50 = Median, Maximum)
Quelle: Eigene Auswertungen auf Grundlage der EURO-CORDEX Daten

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		Min	P 50	Max	Min	P 50	Max	Min	P 50	Max
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1,1	1,4	0,8	1,1	1,6	0,6	1	1,6
	RCP 4.5	0,8	1,3	1,6	0,8	1,5	2	1,4	2	2,3
	RCP 8.5	1,2	1,9	2,7	1,5	2,1	3,1	2,9	3,6	4,7
Minimumtemperatur [°C]	RCP 2.6	0,5	2,5	3,8	1,3	2,6	4	1,5	2,5	3,3
	RCP 4.5	1,3	3,1	4	1,1	3,2	4,1	2,7	4,9	5,5
	RCP 8.5	0,9	3,6	5,8	1,4	4	5,4	5,6	7	9,6
Maximumtemperatur [°C]	RCP 2.6	0,6	1,2	2,6	0,8	1,4	2,6	0	1,7	3,6
	RCP 4.5	0,7	2	3,1	0,9	2,3	3,8	1,7	2,4	4,3
	RCP 8.5	1,1	2,2	3,4	1,7	2,6	4,4	3,8	4,9	7,1

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Jahreszeiten erkennbar (Abbildung 14). Die Zunahmen fallen im RCP 8.5 am höchsten aus und verstärken sich generell zum Ende des Jahrhunderts (rote Boxen).

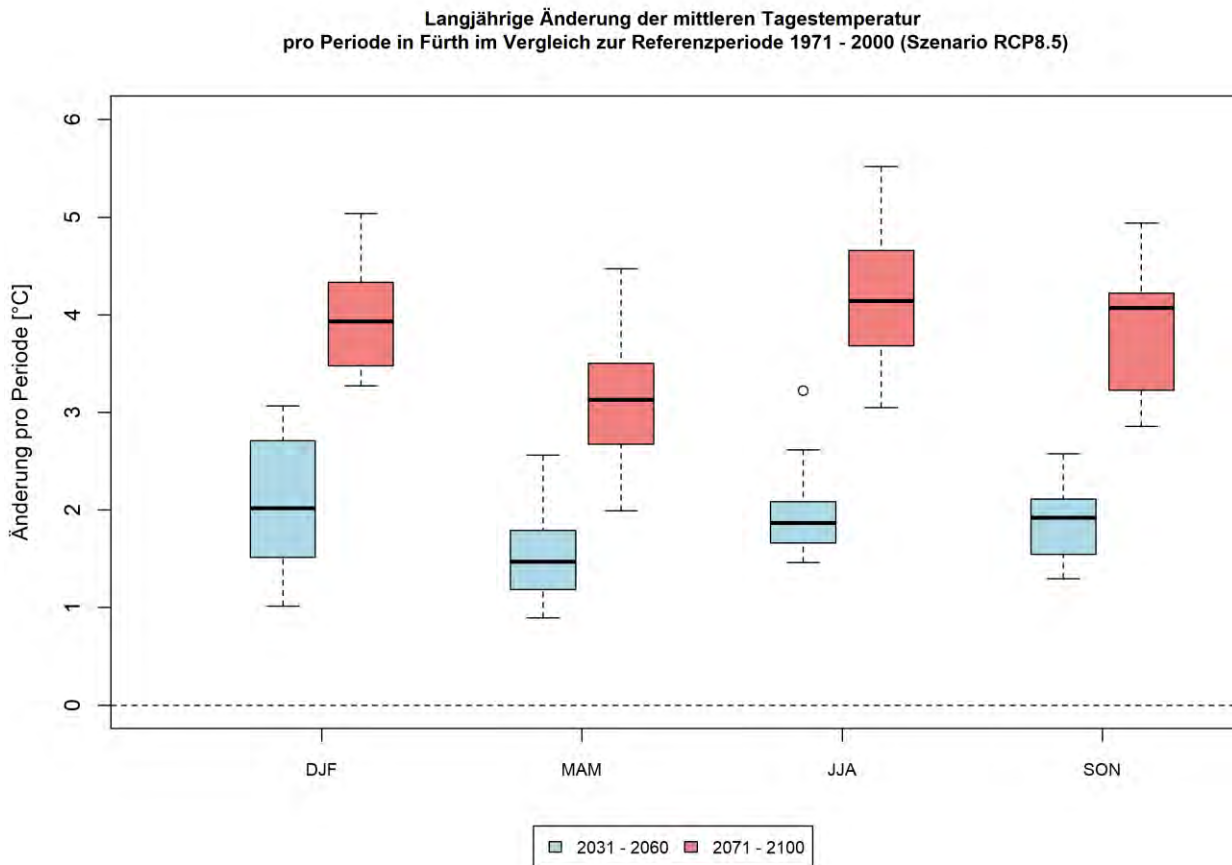


Abbildung 14 Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen in Fürth (RCP 8.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 – 2000 basierend auf den EURO-CORDEX Daten

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine weitere Perspektive auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jähr-liche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen zukünftig deutlich zu (Tabelle 3). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin im Mittel mit weiteren ~28 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1971 – 2000) nur sechs Mal jährlich auftraten (vgl. Kapitel 4.2 gegenwärtiges Klima).

Tropennächte waren in Fürth in der Referenzperiode nicht aufgetreten. Je nach Szenario treten sie zur Mitte des Jahrhunderts weiterhin sehr selten (im Median + eine Tropennacht pro Jahr im RCP 8.5) bis selten auf. Bis Ende des Jahrhunderts ist die Entwicklung noch stärker vom jeweiligen Szenario abhängig. Während die Häu-figkeit von Tropennächten im RCP 2.6 auf einem geringen Niveau verbleibt, projiziert das RCP 8.5 eine deutli-che Zunahme. Demnach wären bis 2100 bis zu 8 zusätzliche Tropennächte pro Jahr in Fürth möglich. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. dass in (inner-) städtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttempera-tur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert min-destens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden im Raum Fürth zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden (in der Referenzperiode durchschnittlich 3 Tage) bis Ende des Jahr-hunderts um 2 - 7 Tage.



Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an Frost- und Eistagen (ebenfalls Tabelle 3). In Fürth wurden im langjährigen Mittel 97 Frosttage bzw. 20 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1971 – 2000). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 37 Frosttage bzw. 4 Eistage auftreten. Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechseln und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

Tabelle 3 Langjährige Änderungen thermischer Kenntage in Fürth (Minimum, P50 = Median, Maximum) basierend auf den EURO-CORDEX Daten

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		Min	P 50	Max	Min	P 50	Max	Min	P 50	Max
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	6,2	13,1	24,9	7,4	13,2	26,7	5	12,7	24,5
	RCP 4.5	9	13,7	21,5	9,1	18	28,6	16,4	17,9	25,5
	RCP 8.5	12,4	18,4	45,1	16,4	21,7	53,5	29,2	40	73,7
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	3,3	6,2	13,6	3,2	6,6	14,6	2,9	5,7	15,2
	RCP 4.5	7	8,7	13,9	6,7	11,4	17,9	8,3	11,9	17,2
	RCP 8.5	5,6	10,4	19,2	9,2	14,3	26,3	22,4	28,1	49,4
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0,3	1	0	0,3	0,9	0	0,5	2,1
	RCP 4.5	0,2	0,5	1	0,7	0,8	1,8	0,7	1,9	2,7
	RCP 8.5	0,2	0,9	3,8	0,2	1,5	7,1	1,4	7,5	19,8
Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Heiße Tage) [n]	RCP 2.6	0,1	0,2	0,9	0	0,3	0,9	0	0,4	1,2
	RCP 4.5	0,1	0,3	0,8	0,2	0,4	1	0,3	0,6	1,3
	RCP 8.5	0,3	0,5	1,4	0,4	0,7	1,8	1,3	2,3	3,1
Frosttage [n/Jahr] ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$)	RCP 2.6	-28,1	-19,8	-12,6	-29,6	-20,2	-12,1	-25,5	-18,1	-10,3
	RCP 4.5	-31	-21,1	-11,6	-36,8	-23,8	-11,5	-51	-40	-17
	RCP 8.5	-49,9	-34,9	-16,5	-52,6	-39,4	-20,9	-74	-59,5	-40,2
Eistage [n/Jahr] ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$)	RCP 2.6	-9,8	-8	-4,9	-9,8	-8,1	-4,6	-9,7	-7,4	-4,3
	RCP 4.5	-12,5	-8,4	-3,1	-13,1	-9,3	-2,1	-14,3	-12	-8,4
	RCP 8.5	-14,1	-11,1	-5,1	-13,1	-11,6	-5,1	-17,6	-16	-13,6

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

Als geeigneter Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend feuchter sind (leichte positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz), sind für das RCP 8.5 in den Monaten Juni bis August deutliche Abnahmen der Bilanz erkennbar (Abbildung 15). Für den Sommer zeichnet sich damit eine



sich verschärfende Trockenheit ab, wobei davon auszugehen ist, dass diese sich auch auf die Bodenfeuchte auswirken wird.

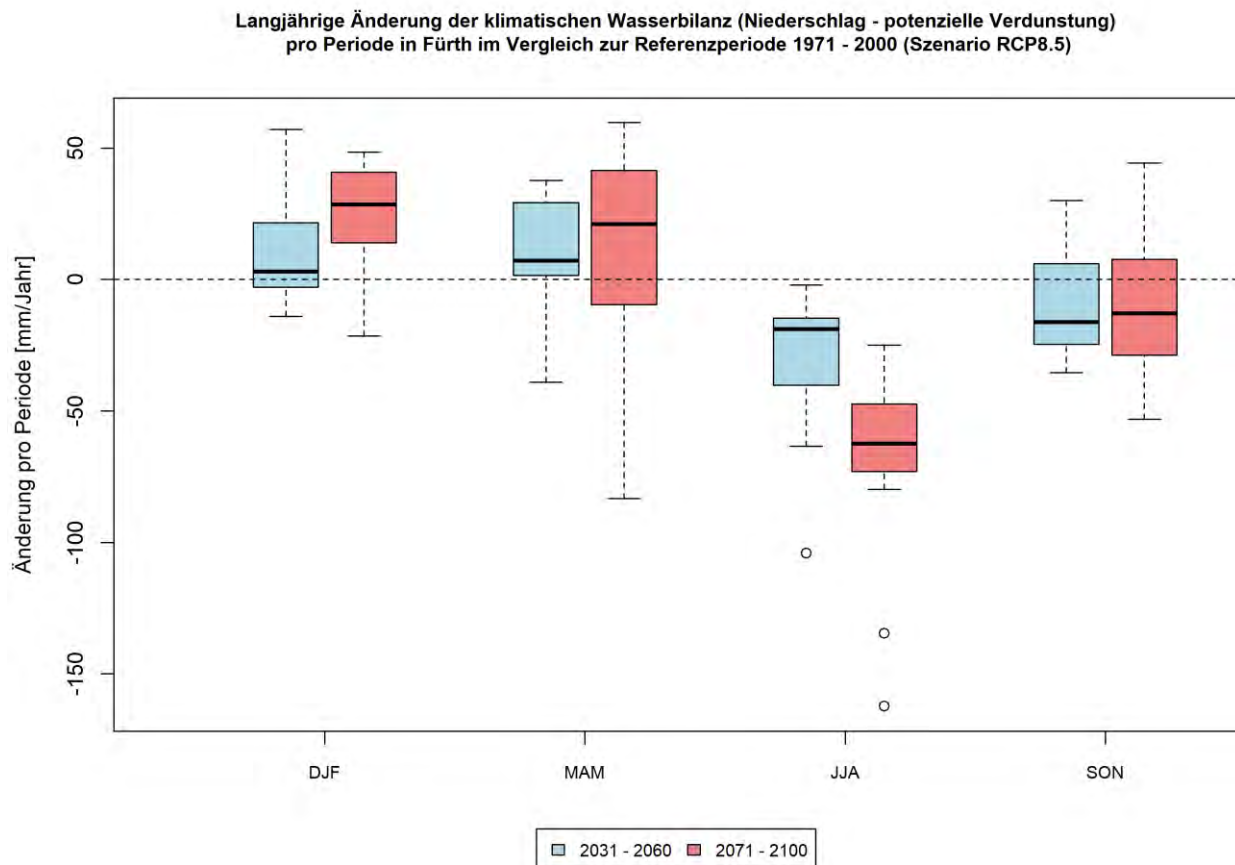


Abbildung 15 Änderung der monatlichen saisonalen klimatischen Wasserbilanz für zwei Zukunftsperioden in Fürth (RCP 8.5) basierend auf den EURO-CORDEX Daten

4.3.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG UND TROCKENHEIT

In Bezug auf den Jahresniederschlag sind in Fürth leichte Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Für das *RCP*-Szenario 8.5 sind im Median steigende, im *RCP*-Szenario 2.6 dagegen gleichbleibende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert zu verzeichnen, wobei jeweils große Abweichungen zwischen den verschiedenen Modellläufen bestehen (Tabelle 4).

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann es (wieviel) regnet, u.a. für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt entscheidend. Bei einer saisonalen Betrachtung zeigen sich Unterschiede in der zukünftigen Entwicklung des Niederschlags in Fürth. Im Winter sowie Frühjahr ist im *RCP*-Szenario 8.5 mit einer Zunahme der Niederschlagssummen zu rechnen. Bis Mitte des Jahrhunderts zeigen sich für den Sommer und Herbst keine eindeutigen Trends (im Median sehr geringe Änderungen bei hohen Spannbreiten der Modelle). Langfristig werden für den Herbst tendenziell zunehmende, für den Sommer dagegen abnehmende Niederschlagssummen projiziert (Abbildung 16). Im *RCP*-Szenario 2.6 zeigen sich bis Ende des Jahrhunderts ähnliche Trends in Bezug auf die Winter- und Frühjahrsniederschläge (leichte Zunahme) und Sommerniederschläge



(Abnahme), während im Herbst keine eindeutigen Änderungen der Niederschlagssummen zu erkennen sind (Abb. A 1 im Anhang).

Abbildung 16: Änderung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen in Fürth (RCP 8.5)

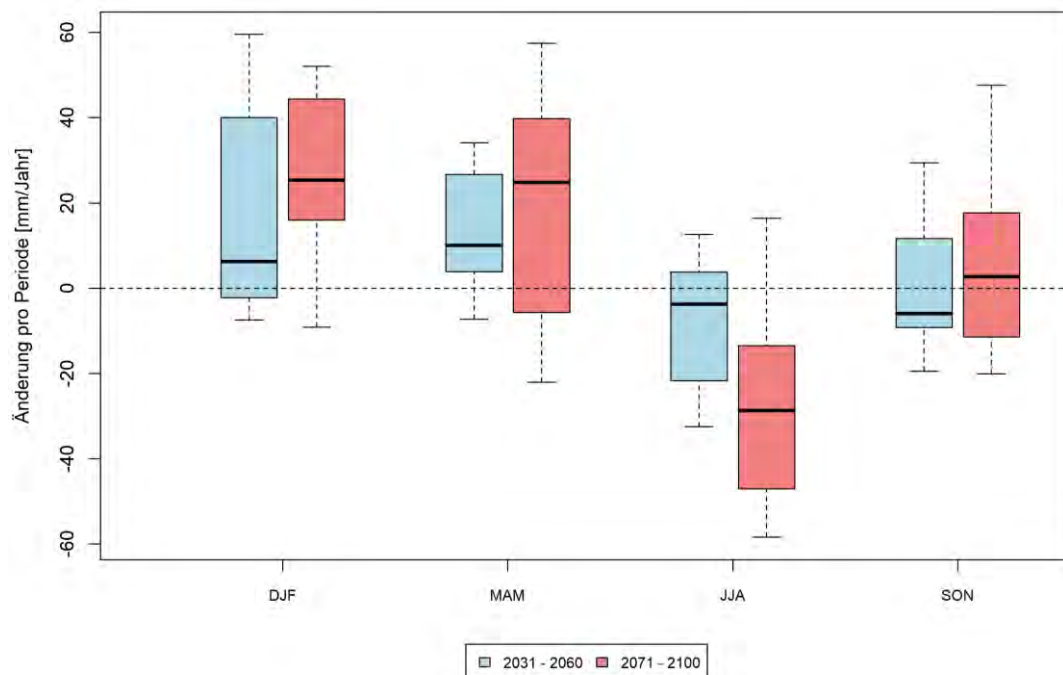


Tabelle 4: Änderung der mittleren Niederschläge, der klimatischen Wasserbilanz und der Anzahl an Trockentagen in Fürth (Minimum, Median und Maximum des Änderungssignals alle Modellläufe).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		Min	P 50	Max	Min	P 50	Max	Min	P 50	Max
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-37,8	7,2	70	-42	4,4	41,3	-54	8,6	74,9
	RCP 4.5	-6,3	34,9	85,2	4,5	25,8	69,5	33,3	45,6	84,5
	RCP 8.5	-44,7	26	93,3	-63	27	87,1	-110	38	114,1
Klimatische Wasserbilanz (Niederschlag – pot. Verdunstung) [mm/Jahr]	RCP 2.6	-73,1	-13,2	80,6	-77,1	-22,1	43,8	-87,6	-25,2	48,2
	RCP 4.5	-52,6	21,1	82,4	-39	-16,4	80	-16,9	19,9	64,7
	RCP 8.5	-184,1	-2,5	50,1	-223,1	2,8	56,5	-324,2	-2,6	70,5
Trockentage (Tage mit < 0,1 mm Niederschlag) [n/Jahr]	RCP 2.6	-4	1,9	12,6	-1,9	4,4	13,9	-5,6	0,9	13,5
	RCP 4.5	-4,3	-1,3	3,4	-3,4	1,1	4,4	-3,7	0,4	3,5
	RCP 8.5	-5,2	3,3	11,5	-1,4	3,3	15,6	-2,5	5,9	26,9

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 Tro-



ckenheit und Dürre durch einen Mangel an Wasser oder Feuchtigkeit gekennzeichnet, der aus einem Niederschlagsdefizit resultiert und über einen längeren Zeitraum zu Wasserknappheit führen kann. Als erstes Indiz für Trockenheit kann die Anzahl an Trockentagen verstanden werden (hier definiert als Tage mit einem Niederschlag $< 0,1$ mm). Zukünftig ist in Fürth in allen RCP-Szenarien mit einer Zunahme an Trockentagen ab dem mittleren Jahrhundert zu rechnen (Tabelle 4).

Ein weiterer Indikator für Trockenheit kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag (Wasserdargebot) zu potenzieller Verdunstung (Wasserverlust) sein. Je nach Szenario ist von einer Abnahme (RCP 2.6) bzw. Zunahme (RCP 4.5) der klimatischen Wasserbilanz in Fürth auszugehen. Im RCP 8.5 wird im Mittel die klimatische Wasserbilanz nicht zu oder abnehmen. Werden jedoch die Min und Max-Werte betrachtet, zeigt sich die große Bandbreite der Modellvorhersagen (Tabelle 4). Die jahreszeitlichen Änderungen der klimatischen Wasserbilanz folgen den Trends der saisonalen Niederschlagsverschiebung. Insbesondere langfristig ist in Fürth mit trockeneren Sommern und feuchteren Wintermonaten zu rechnen (Abbildung 17).

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

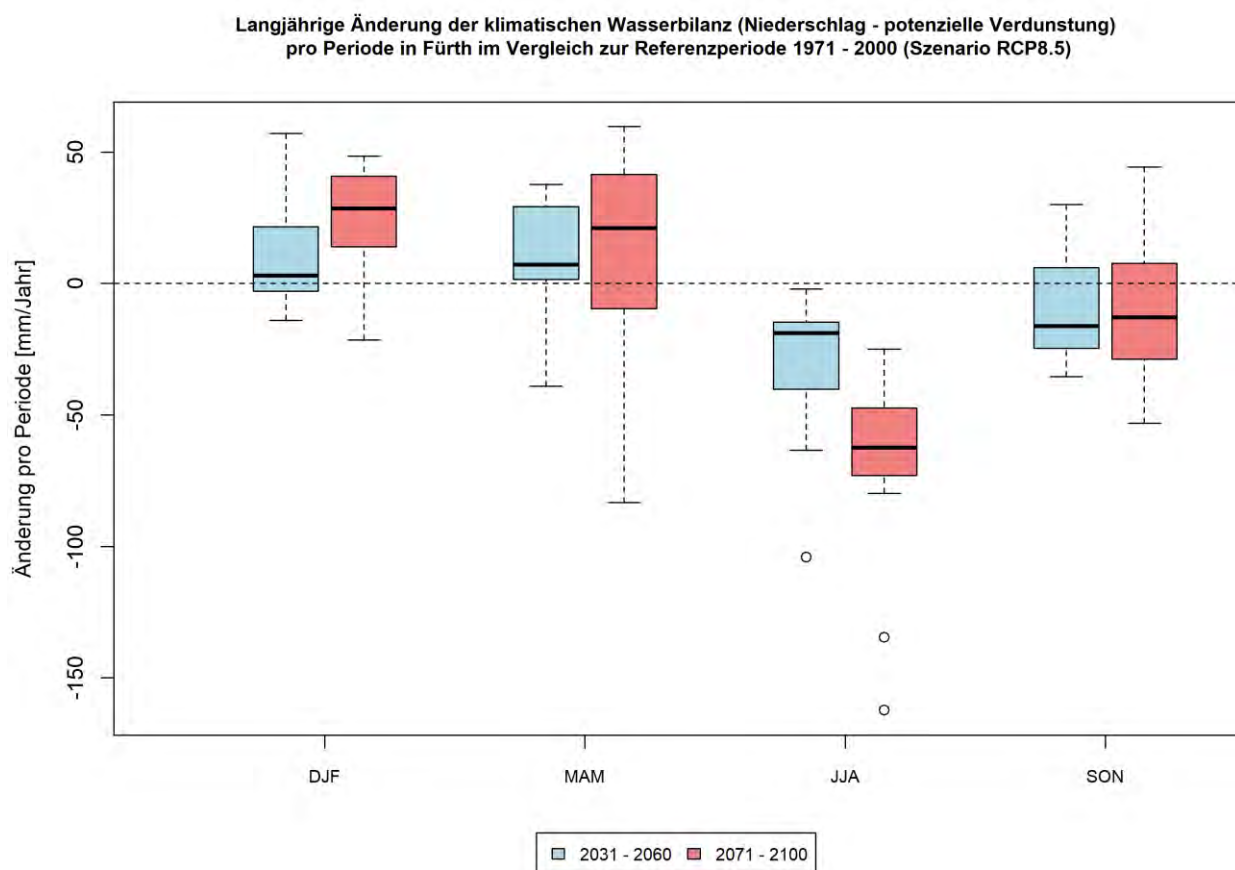


Abbildung 17: Änderung der mittleren saisonalen klimatischen Wasserbilanz in Fürth (RCP 8.5)

4.3.3 STARKREGEN

Infolge des Klimawandels ist grundsätzlich eine wärmere Atmosphäre zu erwarten, die mehr Wasserdampf aufnehmen kann, sodass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (UBA, 2021b).



Dieser allgemein zu erwartende Prozess ist auch in den regionalen Klimamodellen für Fürth zu erkennen. Für die betrachteten Starkregenereignisse (> 10, > 20 sowie > 30 mm pro Tag) projizieren die Modelle jeweils steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen im RCP-Szenario 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind und generell stärker ausfallen als im RCP-Szenario 2.6 (Tabelle 5). Die Zunahme des mittleren maximalen Tagesniederschlags lässt zudem darauf schließen, dass die Niederschlagsintensität ebenfalls zunimmt.

Tabelle 5: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen sowie des maximalen Tagesniederschlags in Fürth (Minimum, Median und Maximum des Änderungssignals alle Modelläufe).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		Min	P 50	Max	Min	P 50	Max	Min	P 50	Max
Tagesniederschlag > 10 mm/d [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,1	0,8	3,9	-0,2	0,4	2,4	-1	0,3	3,4
	RCP 4.5	-0,8	1,8	4,1	0,2	1,5	4,5	1,8	3,1	4,8
	RCP 8.5	-0,2	1,6	3,4	0,1	2,6	4	0,2	3,2	6,4
Tagesniederschlag > 20 mm/d [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,7	0,5	0,9	-0,2	0,4	1,2	-1,3	0,3	1,1
	RCP 4.5	0	0,4	1,7	0,2	0,5	1,2	0,7	0,8	1,7
	RCP 8.5	-0,5	0,6	1,9	-0,1	0,9	1,8	0	1,2	2,6
Tagesniederschlag > 30 mm/d [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,5	0,2	0,5	-0,2	0,1	0,5	0	0,1	0,9
	RCP 4.5	-0,2	0,4	1,2	0	0,2	0,9	0,1	0,7	1
	RCP 8.5	-0,2	0,4	0,9	-0,2	0,3	1,3	-0,4	0,5	1,8
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	0,9	8,1	12,1	1,7	8,6	13,3	4,6	7,6	12
	RCP 4.5	0	8,2	9,6	2,8	6,4	9	2,4	6,1	9
	RCP 8.5	1,9	9,2	21,4	-1,4	7,8	22,2	-2,7	11,2	15,9

4.3.4 STURM

In keinem der betrachteten Klimaszenarien sind signifikante Zunahmen oder Abnahmen der Auftrittshäufigkeit von Stürmen bis zum Jahr 2100 in Fürth auszumachen (ohne Abbildung).

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 steigen würde, also die Stärke der auftretenden Windgeschwindigkeiten (Donat et al., 2010; McDonald, 2011; Pinto et al., 2009; Pinto & Meyers, 2017).



4.3.5 ZUSAMMENFASSUNG

Die Aussagen zum erwarteten Klimawandel in Fürth gelten für Mitte (2031 – 2060 sowie 2041 - 2070) und Ende des Jahrhunderts (2071 – 2100) und stützen sich auf ein Modellensemble der *EURO-CORDEX*-Initiative, das verschiedene Entwicklungspfade der Treibhausgas-Emissionen berücksichtigt. Dabei wurden die Vorgaben des Landes Bayern beachtet.

Die Klimamodelle verdeutlichen, dass sich der beobachtete Trend einer Erwärmung in Fürth zukünftig fortsetzt. So werden weiterhin steigende Jahresmitteltemperaturen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Die mit dem Temperaturanstieg einhergehende Erwärmung bedingt eine Zunahme an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten, zudem gibt es Hinweise, dass die Länge von Hitzeperioden zunimmt. Frost- und Eistage treten dagegen zukünftig seltener auf und sorgen für mildere Winter, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechseln und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

Für den Jahresniederschlag ist keine eindeutige Änderung infolge des Klimawandels in Fürth zu erkennen. Entscheidender sind saisonale Verschiebungen des Niederschlags mit einem Trend zu geringeren Niederschlagsmengen im Sommer und höheren Werten im Winter. Entsprechend des *RCP*-Szenarios 8.5 ist auch im Frühjahr mit zunehmenden Niederschlagsmengen zu rechnen. Dieser Trend wirkt sich auch auf die klimatische Wasserbilanz aus, die sich über das Jahr gesehen lediglich leicht ändert, in der saisonalen Betrachtung jedoch deutliche Veränderungen zeigt. So ist für das *RCP*-Szenario 8.5 in den Winter- und Frühjahrsmonaten mit einem Anstieg der klimatischen Wasserbilanz zu rechnen. Aufgrund geringerer Niederschläge bei steigenden Verdunstungsraten ist dagegen im Sommer von einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz und einem Rückgang des natürlichen Wasserdargebots auszugehen. Die abnehmende klimatische Wasserbilanz im Sommer lässt häufigere bzw. längere anhaltende Trockenperioden vermuten, jedoch sind die in den Modellen projizierten Änderungen zu gering, um valide Aussagen treffen zu können.

Infolge der Temperaturzunahme ist zukünftig von häufigeren und intensiveren Starkregenereignissen auszugehen (eine wärmere Atmosphäre kann mehr Wasserdampf aufnehmen). Die regionalen Klimamodelle bestätigen diesen Trend für Fürth und zeigen jeweils steigende Häufigkeiten für Ereignisse > 10, > 20 sowie > 30 mm pro Tag, wobei die Zunahmen im *RCP*-Szenario 8.5 zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind.

In keinem der betrachteten Klimaszenarien sind signifikante Zunahmen oder Abnahmen der Auftrittshäufigkeit von Stürmen bis zum Jahr 2100 in Fürth auszumachen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die regionalen Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind, Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden. Zudem ist festzuhalten, dass eine wärmere Atmosphäre mindestens das Potential zur Bildung von Stürmen erhöht.



5. Analysemethode

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

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

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

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

Ein Wald oder Baumbestand findet über bestandsspezifische Größen wie Baumhöhe oder Bestandsdichte Eingang in das Modell. Damit gelingt es u.a., die Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit im Bestand, die Erhöhung der Turbulenz im Kronenbereich und die starke nächtliche Abkühlung im oberen Kronendrittel in Übereinstimmung mit verfügbaren Beobachtungen zu simulieren. Unter Berücksichtigung der stadtspezifischen Größen Gebäudehöhe, Versiegelungs- sowie Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1987).

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

Die Lösung der physikalischen Gleichungssysteme erfolgt in einem numerischen Gitter. Die Rasterweite muss dabei so fein gewählt werden, dass die lokalklimatischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes vom jeweiligen Modell erfasst werden können. FITNAH-3D erfüllt die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl.7 (VDI 2015) definierten Standards für mesoskalige Windfeldmodelle im Zusammenhang mit dynamisch und thermisch bedingten Strömungsfeldern.

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale/kantonale Klimaanalysen bis hin zu sehr großräumigen Anwendungen für ganze Bundesländer oder Staaten. Die horizontale Auflösung in einem regelmäßigen Gitter reicht dabei von 5 m bis 200 m. Die vertikale Gitterweite ist nicht äquidistant und in der bodennahen Atmosphäre besonders dicht angeordnet, um die starke Variation der meteorologischen Größen realistisch zu erfassen. So liegen die untersten Rechenflächen in Höhen von 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40



und 70 m über Grund (ü. Gr.). Nach oben hin wird der Abstand immer größer und die Modellobergrenze liegt in einer Höhe von 3000 m ü. Gr. In dieser Höhe wird angenommen, dass die am Erdboden durch Relief und Landnutzung verursachten Störungen abgeklungen sind. Modellanwendungen mit FITNAH 3D benötigen spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Informationen in der jeweils gewählten Auflösung vorliegen:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Fürth und angrenzendes Umland rd. 6,8 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 6 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Abbildung 18 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen.



Tabelle 6: In FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5-10 m.

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
7	Gleisfläche	0
9	Freiland, niedrige Vegetation	0,5
14	Gewässer	0
20	Gebäude	individuell
22	unbebaut versiegelt	0
23	naturferner Boden*	0,5
24	Baum über Versiegelung	individuell
25	Baum über Freiland	individuell
26	Baum auf naturfernem Boden	individuell
27	Solarpaneele	0
28	Sand, Geröll	0

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

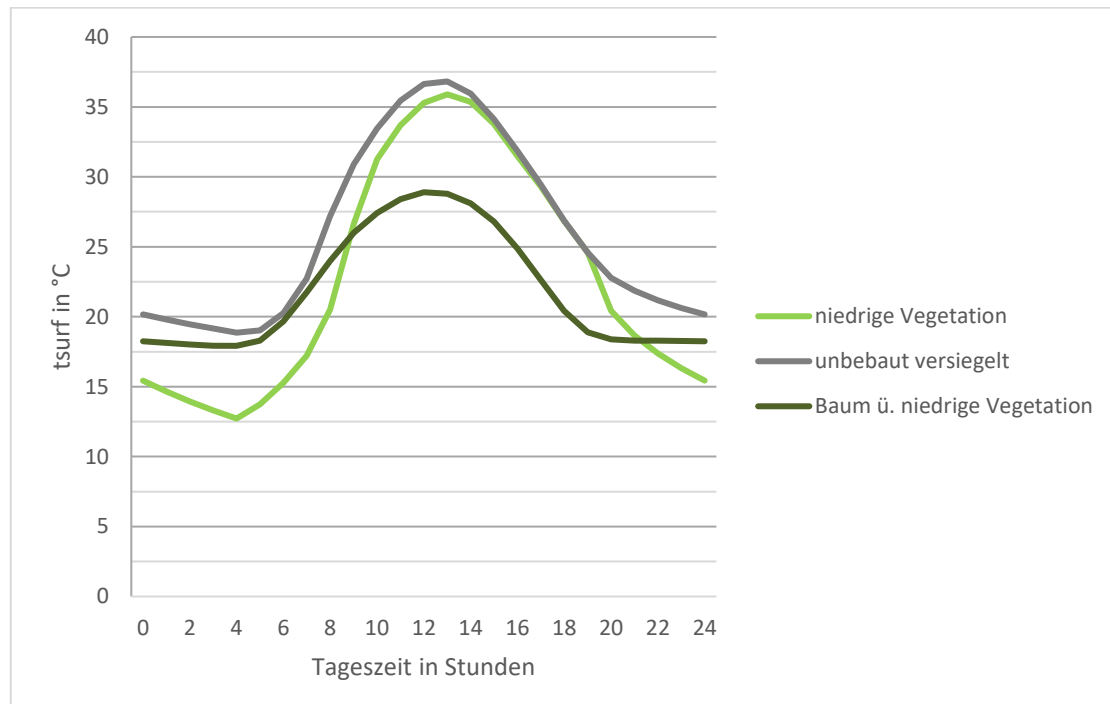


Abbildung 18: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin (K) unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale



Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau 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 19 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

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

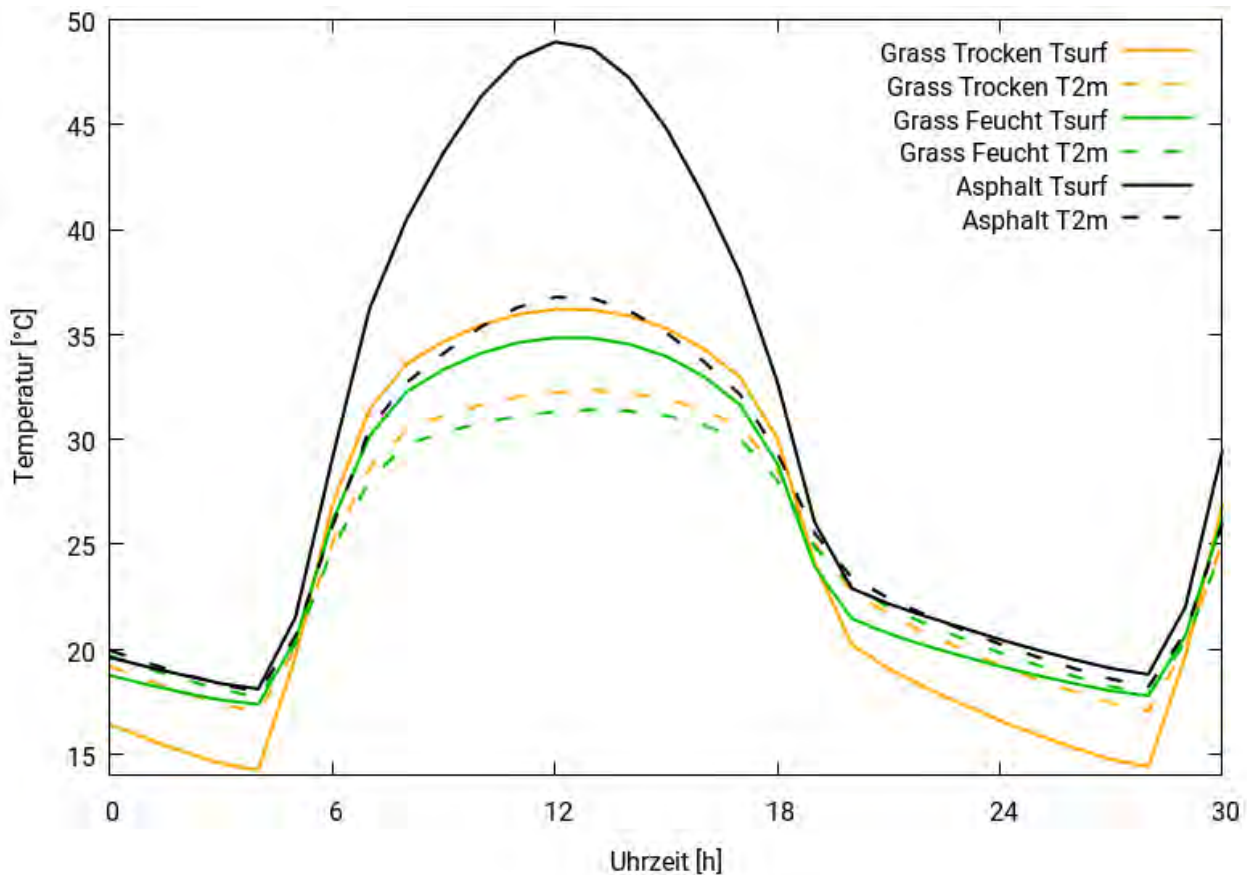


Abbildung 19: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

5.2 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

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

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte oder eines Masterplans Stadtklimawandel / Klimaanpassungsplan (vgl. Zürich, 2020; Stadt Freiburg i. Br., 2025; Stadt Karlsruhe, 2015) 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 (z. B. VDI 3785, Blatt 1, 2008, S. 30).

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

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

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

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernen 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 (folgende Abbildung, Wilms, 2006; Kosow & Gaßner, 2008). 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 20).

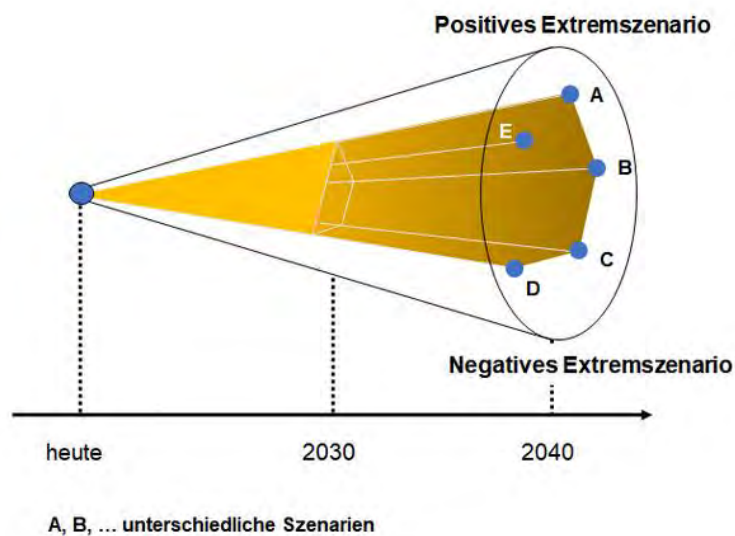


Abbildung 20: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen, 2023)

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. Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das zukünftige Fürther Stadtklima für zwei Zeiträume mit insgesamt sechs Szenarien simuliert (Tabelle 7). Als Stellschrauben



zur Bestimmung des zukünftigen Stadtklimas wurden das Modul 1 (klimatischer Änderungen infolge des Klimawandels) und Modul 2 (Landnutzungsänderungen) verwendet.

Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für Fürth Aussagen getroffen werden können, wie sich der Klimawandel etwa auf die Temperatur, Trockenheit oder den Niederschlag auswirkt (vgl. Kap 4). Dennoch besteht beim Blick in die Zukunft zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit, wie stark die jeweiligen Klimaänderungen tatsächlich auftreten. Aus diesem Grund werden für das zukünftige Stadtklima in Fürth drei verschiedene Szenarien („schwacher“, „moderater“ und „starker Klimawandel“ für jeweils zwei Zeiträume betrachtet („nahe Zukunft“: Zeitraum 2031-2060 sowie „ferne Zukunft“: 2071-2100; vgl. Tabelle 7). Diese Szenarien können als base case- bzw. worst case-Varianten verstanden werden und es gilt als äußerst wahrscheinlich, dass sich die tatsächlich eintretenden Klimaänderungen in Fürth innerhalb der Szenarien bewegen. Im „schwachen Klimawandel“ für den Zeitraum 2031 - 2060 wird die Lufttemperatur zu Beginn der Modellrechnung um 1,0 °C, im „starken Klimawandel“ um 2,3 °C erhöht⁶. 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 oberen 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 Temperatursignals berücksichtigt. Zum anderen verringert sich mit zunehmender Intensität des Klimawandels auch die Bodenfeuchte infolge zunehmender sommerlicher Trockenheit. So sinkt die Bodenfeuchte von 60 % im Status quo auf 30 % im Szenario 6 ab (Tabelle 7). 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 Fürth 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 kurzwellige 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 (IPCC, 2013). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von der Hälfte des Temperatursignals berücksichtigt.

Die Szenarien 1 und 4 („schwacher Klimawandel“, Zeitraum „nahe Zukunft bzw. „Ferne Zukunft) unterscheiden sich in ihrer Temperatúrausprägung nur in der zweiten Nachkommastelle, so dass aus Gründen der Einsparung von Rechnerkapazität einerseits und unter Berücksichtigung von ohnehin bestehenden Ergebnisunsicherheiten andererseits (vgl. Kap 5.7) nur eine Modellierung für beide Szenarien durchgeführt wurde. Die Modellergebnisse von Szenario 1 und 4 sind daher identisch

⁶ 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. Kap. 4.4). Das für die Modellierung verwendete Klimaänderungssignal der Temperatur ergibt sich als Differenz der sommerlichen Temperaturen zwischen den Zukunftsperioden 2031-2060 bzw. 2071-2100 und der Referenzperiode 1971-2000.



Tabelle 7: Modell-Szenarien zur Simulation des Fürther Stadtklimas und ihre zentralen Merkmale

	Szenario	Klimawandel		Stadtentwicklung
		Temperatursignal (Änderung der Sommertempera- tur vs. 1971-2000)	Bodenfeuchte („zunehmende Sommertrocken- heit“)	
Nahe Zukunft	1 – schwacher Klimawandel Zeitraum 2031-2060 (15. Perzentil RCP 2.6)	+1,0 K	60% (identisch zu IST)	Wird in allen Szenarien identisch berücksichtigt
	2 – moderater Klimawandel Zeitraum 2031-2060 (50. Perzentil RCP 4.5)	+1,6K	50%	
	3 – starker Klimawandel Zeitraum 2031-2060 (85. Perzentil RCP 8.5)	+2,3 K	40%	
Ferne Zukunft	4 – schwacher Klimawandel Zeitraum 2071-2100 (15. Perzentil RCP 2.6)	+1,0 K	60% (identisch zu IST)	
	5 – moderater Klimawandel Zeitraum 2071-2100 (50. Perzentil RCP 4.5)	+2,0 K	40%	
	6 – starker Klimawandel Zeitraum 2071-2100 (85. Perzentil RCP 8.5)	+4,9 K	30%	



Städtebauliche Flächenkulisse

Die Klimasimulation erfolgt einerseits für die Bestandssituation und andererseits für die Zukunftsszenarien. Die Bestandssituation bildet dabei die Stadtstruktur zum Zeitpunkt 2024 ab. In die Modellierung der Zukunftsszenarien, welche den Einfluss des Klimawandels widerspiegeln, ist die voraussichtlich zu erwartende städtebauliche Entwicklung in Fürth eingeflossen (Abbildung 21). Auf dieser Basis können die einzelnen Entwicklungsflächen, auch unter Berücksichtigung des Klimawandels, einer ersten stadtklimatischen Bewertung unterzogen werden. Grundlage dafür sind Flächen aus der Bauleitplanung: potenzielle wohnbauliche und gewerbliche Bauflächen ab einer Mindestgröße von einem Hektar. Aufgrund der planerischen und baulichen Dynamik im Stadtgebiet Fürth kann es sich dabei allerdings nur um eine Momentaufnahme handeln. Folgende Flächen (Flächennutzungsplan und Bebauungspläne) wurden berücksichtigt:

Wohnbauflächen

- B-Plan 277 "Auf der Schwand"
- B-Plan 278b "Banderbacher Weg"
- B-Plan 278d "Dambach West"
- B-Plan 278neu "Saatweg"
- B-Plan 332b "Im Stöckig"
- B-Plan 396 "Schleifweg"
- B-Plan 413b "Löchlein-Nord"
- B-Plan 438a "Westlich Magnolienweg"
- Loheäcker, Mannhof
- Hüttendorfer Weg
- Oberfürberg Nord
- B-Plan 329 "Heilstättenstraße"
- Unterfürberg
- Alte Reutstraße

Gewerbliche Bauflächen

- B-Plan 327a 1.Ä. "Gewerbegebiet Rezatstraße"
- B-Plan 390b "nordöstlich Ortsteil Steinach"
- B-Plan 396b "ehemaliges Faurecia-Areal"
- B-Plan 460a "Bereich entlang der Flugplatzstraße und westlich der Vacher Straße - Golfpark"⁷
- Burgfarrnbach, nördlich der Veitsbronner Straße
- westlich der Mainstraße
- Industriestraße
- Boxdorfer Straße

Der Bebauungsplan 350a „Seeackerstraße“ ging nicht in die Modellierung der Zukunftsszenarien ein. Hierfür gibt es ein gesondertes klimaökologisches Gutachten (Geo - Net Umweltconsulting GmbH, 2025).

⁷ der B-Plan ist seit dem 22.10.2025 rechtsverbindlich

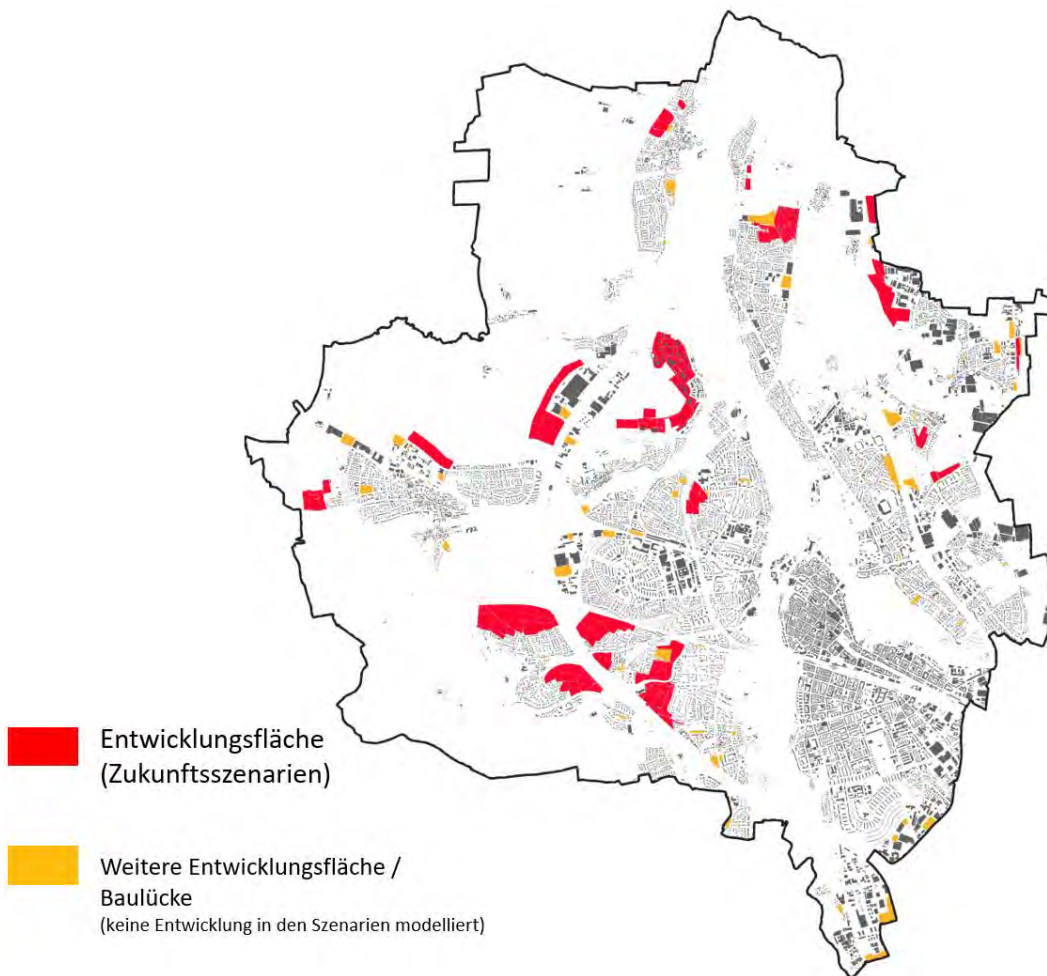


Abbildung 21: Übersicht der Entwicklungsflächen, welche in den Zukunftsszenarien modelliert wurden, und weitere in den Bewertungskarten und Planungshinweiskarte dargestellte Entwicklungsflächen / Baulücken

Zusätzlich zu den in den Zukunftsszenarien modellierten Entwicklungsflächen werden weitere Entwicklungsflächen sowie Baulücken in die Bewertungskarten und Planungskarte mit einer Umrandung dargestellt. Diese Flächen bleiben in ihrer Nutzungs- Kategorisierung für die Zukunftsszenarien identisch zur Ist-Situation.

5.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Wie in Kap. 3 beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe (Bäume und Baustruktur)

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadtgebiet von Fürth sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 170 km² (Abbildung 22), weist also einen mehr als doppelt so großen Flächeninhalt auf wie das Stadtgebiet selbst (63,35 km²).

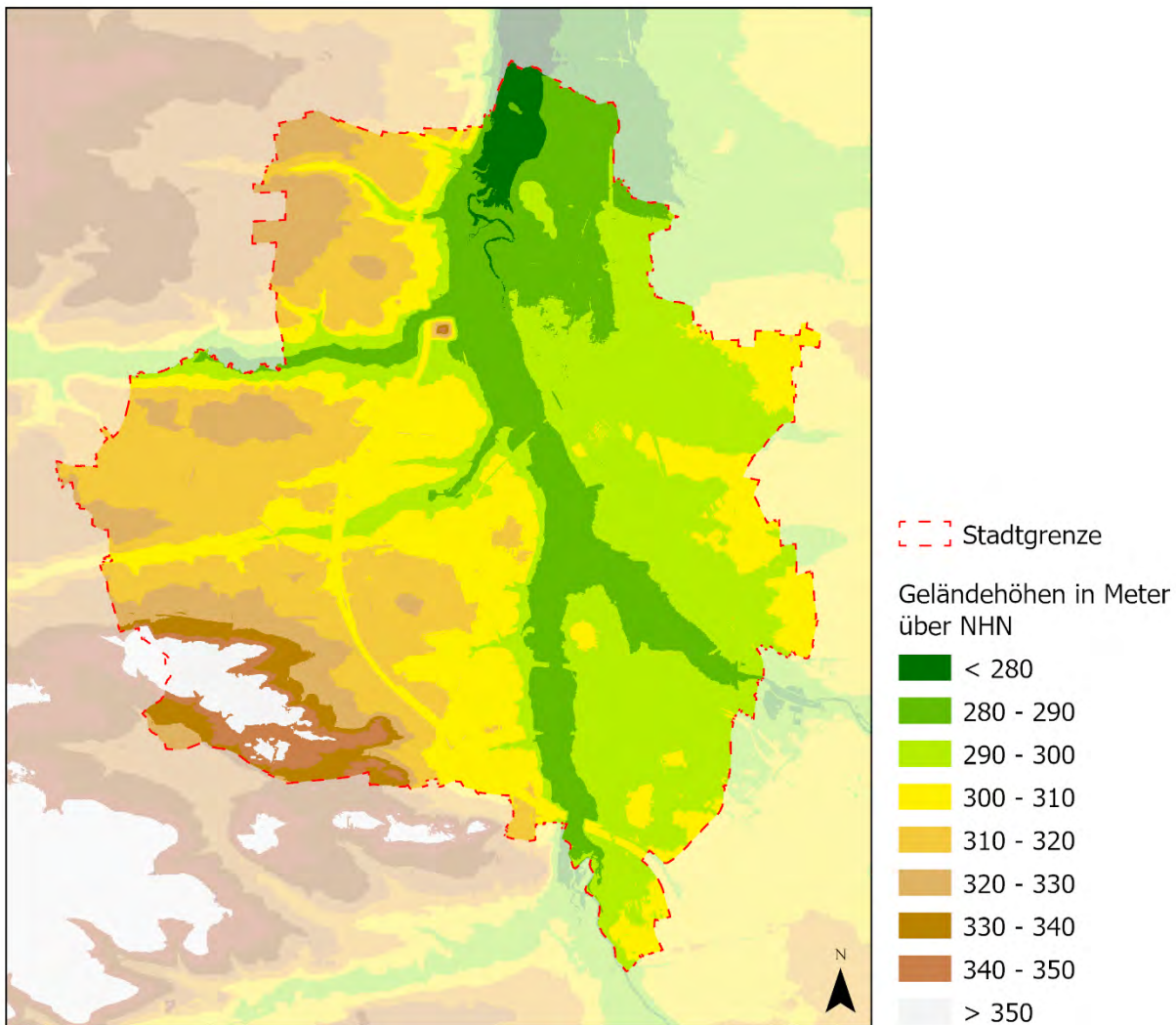


Abbildung 22: DGM im Untersuchungsgebiet

Das Geländehöhenmodell liegt in einer Auflösung von 1 m vor. Fürth liegt zwischen einem ansteigenden Waldgebiet im Westen und breiten Flussniederungen, die die landschaftlich tiefsten Ebenen des Stadtgebiets bestimmen. Die Rednitz und die Pegnitz umfließen den historischen Stadtkern im Westen und Norden, bevor sie sich nördlich der Innenstadt zur Regnitz vereinen. Diese Flussniederungen markieren gleichzeitig die tiefsten Bereiche des Stadtgebiets mit dem niedrigsten Punkt im Regnitztal an der Grenze zu Erlangen auf etwa 278 m über NHN. Ausgehend von den Flussauen steigt das Gelände allmählich an. Im Westen zeigt sich dieser Höhengradient besonders deutlich: Hinter der Südwesttangente und dem Main-Donau-Kanal beginnt das höher liegende Waldgebiet, das den Übergang zum Fürther Stadtwald markiert. Dort befindet sich auch der höchste Punkt Fürths mit rund 392 m über NHN. Tabelle 8 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Zuweisung der Nutzungsklassen sowie der Geländehöhe und Strukturhöhen zusammen. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue vor. Dennoch kommt es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtischen Modellanwendungen sehr hohen Auflösung zu Generalisierungseffekten. Diese können kleinräumig relevant sein, spielen für gesamtstädtische Fragestellungen aber eine untergeordnete Rolle.



Tabelle 8: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters

Datenquelle	Aktualität	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhenmodell	2022	GeoTIFF	1 m	direkte Verwendung
ALKIS-Nutzung + Gebäudeumrisse	2024	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungsklassen
Geplante Gebäude	2024	ESRI-Shapefile	-	direkte Verwendung
OSM-Bahnverkehrslinien	2023	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungsklassen
CIR-Luftbild	2022	Raster-Dataset	20 cm	Berechnung NDVI für Vegetationsmaske und versiegelte Flächen
Oberflächenmodell	2022	Raster-Dataset	20 cm	Berechnung eines normalisierten Oberflächenmodells (DOM minus DGM), Verschneidung mit NDVI für Vegetationshöhen
öffentliche Baumbestände	2023	ESRI-Shapefile	-	Ergänzung zu den Vegetationshöhen
Grünflächenkataster	2022	ESRI-Shapefile	-	Ergänzung der Freiflächen
Lärmschutzwände	2022	ESRI-Shapefile	-	direkt Verwendung

Da für die Stadt Fürth lediglich öffentliche Baumbestände als Punktinformationen im Rahmen des Baumkatas-ters zur Verfügung standen, mussten für die Erzeugung einer flächendeckenden Bauminformation andere Da-tenquellen hinzugezogen werden. Hierfür lagen Sommer-CIR-Luftbilder aus dem Jahr 2022 vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellen-wert von „0“ war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe aus dem normalisierten Oberflächenmodell konnten auf diese Weise Baumstandorte identifi-ziert werden (Abbildung 23). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da bei-spielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisierten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert werden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 5 m x 5 m-Raster-auflösung nicht immer möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

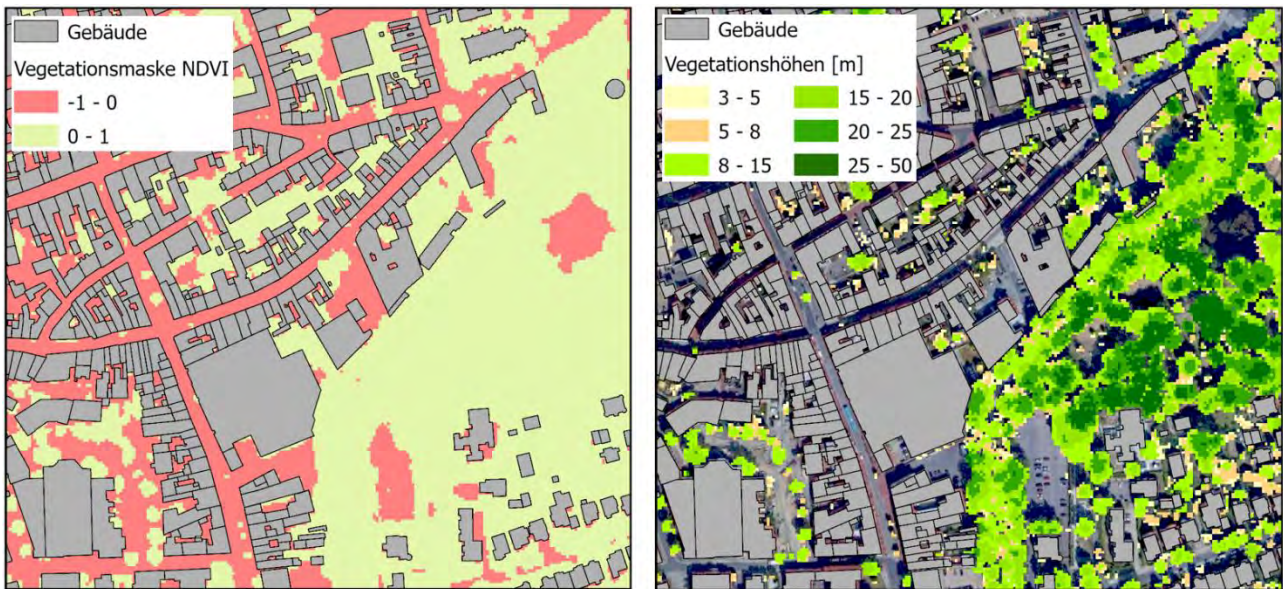


Abbildung 23: Ableitung der Vegetationshöhen aus dem NDVI in Kombination mit dem normalisierten Oberflächenmodell

Die Modelleingangsdaten sollen den aktuellen Sachstand bzw. die Bebauungssituation in Fürth im Jahre 2024 repräsentieren. Da die Bebauung bei Neubaugebieten schon weiter war als der offizielle Geodatenstand, wurden bereits genehmigte Gebäude separat von der Stadt Fürth übermittelt, um die Eingangsdaten möglichst aktuell zu erarbeiten. **Abbildung 24** zeigt für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes die in das Modell eingeflossenen Nutzungsklassen.

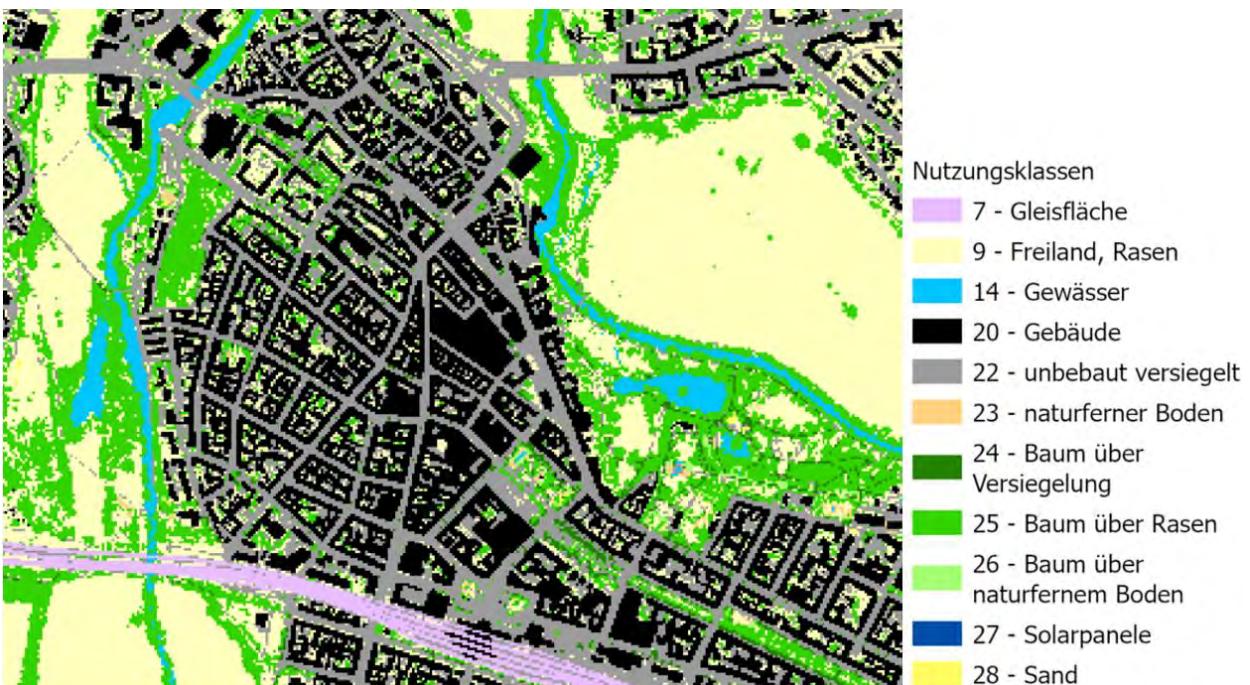


Abbildung 24: Ausschnitt des Nutzungsrastrers

Strukturhöhen werden in FITNAH-3D für Gebäude und Vegetation angegeben und geben deren Höhe in Metern über der Geländeoberkante wieder (für Bäume definitionsgemäß ab einer Höhe von 3 m über Gelände). Das normalisierte Oberflächenmodell (nDOM) war hierfür die Grundlage, über welche für alle Gebäude- und Vegetationspixel die Höhe abgeleitet wurde. **Abbildung 25** zeigt einen Ausschnitt des Strukturhöhenrastrers.

Lärmschutzwände sind als extra Datensatz mit ihrer Höhe eingegangen, um sie als Strömungshindernis zu modellieren.

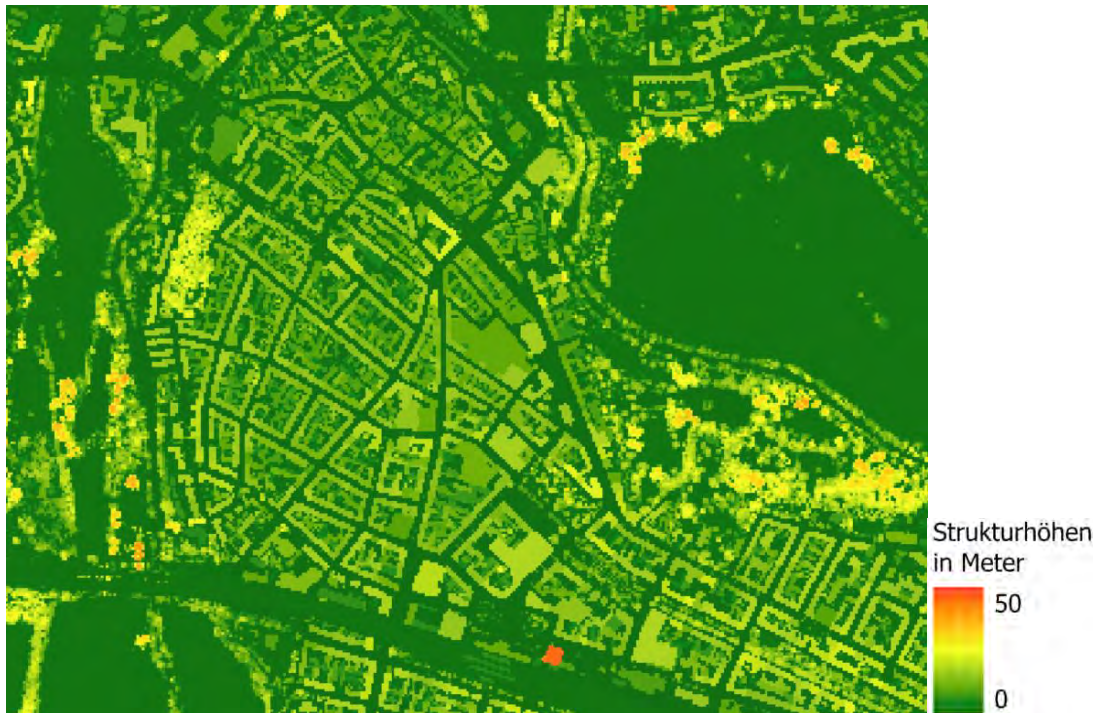


Abbildung 25: Ausschnitt des Strukturhöhenrasters

Der Landnutzung für die Zukunftssituation liegt an erster Stelle diejenige des Status Quo (Ist-Situation) zugrunde. In die Modellierung der Zukunftsszenarien ist die voraussichtlich zu erwartende städtebauliche Entwicklung in Fürth eingeflossen. Die Grundlage hierfür bilden die Flächen aus der Bauleitplanung (vgl. Kap. 5.2).

Konkrete Konzepte konnten dabei direkt in die FITNAH-3D-landnutzungsklassen überführt werden. Dies betrifft folgende drei sich in Aufstellung befindliche Bebauungspläne:

- B- Plan 396 „Schleifweg“
- B- Plan 278d „Dambach West“
- B- Plan 438a „Westlich Magnolienweg“

Für die meisten Flächen liegen allerdings noch keine weitergehenden Konzeptionen, städtebaulichen Entwürfe oder genaue Daten zum Entwicklungsumfang vor. Bei diesen Flächen werden allgemeine Parameter zu Grunde gelegt. Bekannt ist jeweils die Art der baulichen Nutzung (z.B. Wohngebiet oder Gewerbegebiet) oder eine individuelle GRZ. Bei einigen Gebieten, bei welchen Baulücken geschlossen werden sollen oder eine Nachverdichtung stattfinden soll, können Baudichte und Grünvolumen auch über bereits bebaute, benachbarte Flächen abgeleitet werden. Für jede dieser Flächen wird eine statistische Verteilung der Landnutzungsklassen und Gebäudehöhen definiert. Tabelle 9 zeigt beispielhaft die Nutzungsklassenanteile und angenommenen Strukturhöhen für die beiden GRZ-Werte 0,4 und 0,8.



Tabelle 9: Nutzungsklassenanteile und Strukturhöhen nach GRZ

GRZ	Nutzungsklasse in Prozent [%]				Strukturhöhe in Meter [m]			
	Gebäude	Versiegelt	Freifläche	Baum	Gebäude	versiegelt	Freifläche	Baum
0,4	24	16	55	5	8	0	0	12
0,8	48	32	17	3	10	0	0	12

In den Zukunftsmodellläufen füllt das FITNAH-Modul „Randomisator“ die Siedlungsentwicklungsflächen rasterpixelweise und zufällig mit dem Anteil der verknüpften FITNAH-Nutzungsklassen und Strukturhöhen. Durch diese Approximation gelingt es, zukünftige Änderungen von Temperaturfeldern und Kaltluftprozessen näherungsweise vorherzusagen, ohne einer konkreten Flächenplanung vorzugreifen. Dieser Ansatz wird sowohl bei kompletten Siedlungsentwicklungsgebieten als auch bei einzelnen Baulücken verwendet. Abbildung 26 zeigt exemplarisch eine mit dem Randomisator gefüllte Siedlungsentwicklungsfläche und eine Siedlungsentwicklungsfläche, für welche ein vorläufiges hinreichend konkretes Konzept vorlag.



Abbildung 26: Siedlungsentwicklungsflächen: Randomisierte Nutzungsklassenverteilung (oben) vs. konkretes Konzept (unten)

5.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage in Fürth regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (vgl. Kapitel 4). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21.06.). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Fürth besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 3.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 27 sind schematisch die für eine austauscharme sommerliche Wetterlage typischen tageszeitlichen Veränderungen der Temperatur und Vertikalprofile der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit für die Landnutzungen Freiland, Stadt und Wald dargestellt. Beim Temperaturverlauf zeigt sich, dass unversiegelte Freiflächen wie z.B. Wiesen und bebaute Flächen ähnlich hohe Temperaturen zur Mittagszeit aufweisen können, während die nächtliche Abkühlung über Siedlungsflächen deutlich geringer ist (Wärmeinseleffekt). Waldflächen nehmen eine mittlere Ausprägung ein, da die nächtliche Auskühlung durch das Kronendach gedämpft wird. Hinsichtlich der Windgeschwindigkeit wird die Hinderniswirkung von Bebauung und Vegetationsstrukturen im Vertikalprofil deutlich.

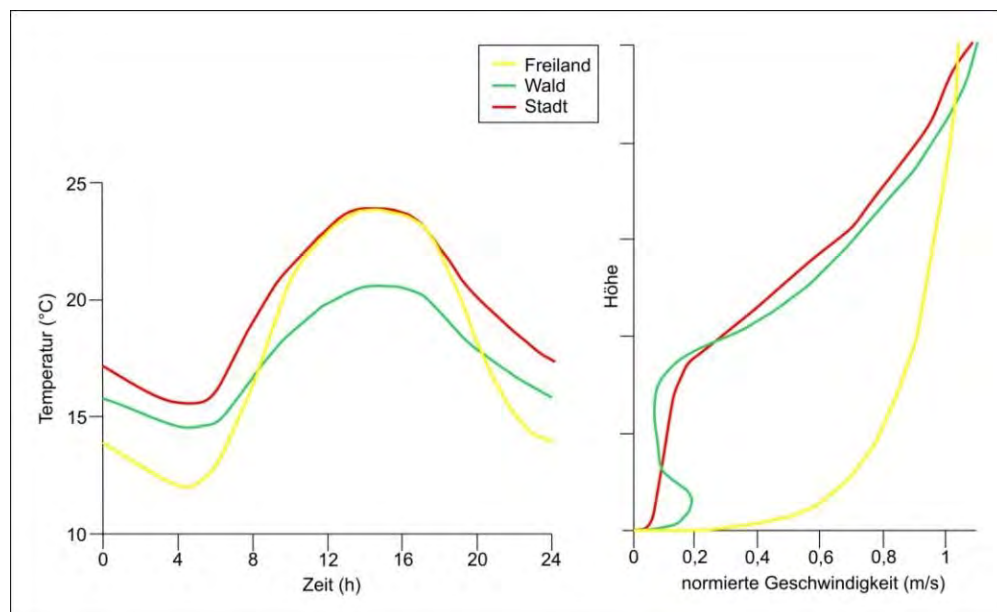


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die jeweiligen Modellrechnungen wird auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes vorgenommen (Schär et al., 1996). Das Delta (also das Temperatursignal) wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert. Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0

m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden (in 314 m über NN) 21,51 °C für die Ist-Situation, und für die Zukunftsszenarien entsprechend dem Temperatursignal aus Tabelle 7 höher.

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch im Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wurde die Bodenfeuchte im Szenario 6 „starker Klimawandel“ (Zeitraum 2071 – 2100) entsprechend auf 30 % nFK gesetzt, welches dem Welkepunkt entspricht. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, sodass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt.

Neben einer individuellen bodennahen Lufttemperatur ist FITNAH-3D auch in der Lage, räumlich und tageszeitlich flexible Oberflächentemperaturen von offenen Wasserflächen zu berücksichtigen. Die oberflächennahe Wassertemperatur hängt grundsätzlich von der Entfernung zur Mündung, Breite und Tiefe des Flusses sowie meteorologischen Gegebenheiten wie Sonneneinstrahlung, langwelliger Wärmestrahlung und Verdunstung (Evaporation) ab. Die Interaktion dieser Prozesse resultiert in der Wassertemperatur, die am Tag und innerhalb des Jahres mehr oder minder stark schwanken kann. Der tageszeitliche Wassertemperaturgang schwankt kaum. Flüsse werden im Längsverlauf immer wärmer, je weiter sie von der Quelle entfernt sind (natürlicher Temperaturgradient) (Lozan et al., 2008, S. 296 ff). Wie Abbildung 28 verdeutlicht, besteht darüber hinaus der Zusammenhang, dass die Erwärmung mit zunehmendem Volumen des Wassers abnimmt. Bei der Erwärmung des Gewässers im Sommer gilt es demnach zu beachten, welchen Wasserstand der Fluss aufweist. Niedrigwasserstand führt zu einer stärkeren Erwärmung des Wasserkörpers.

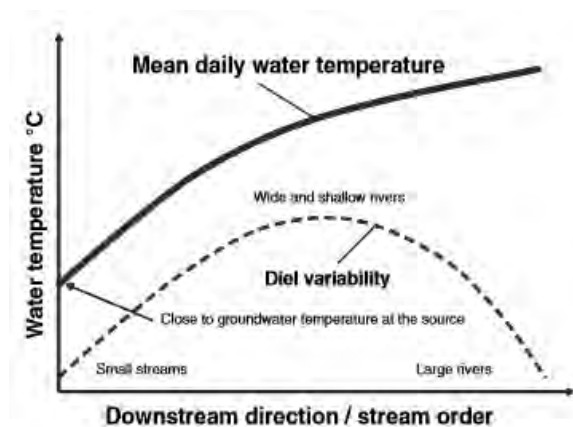


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Größe, Tiefe und Flussabschnitt zur täglichen Wassertemperatur. Quelle: Übernommen aus CAISSIE [2006, S. 1391].

Die Strahlungsenergie der Sonne führt bei Wasser nicht nur zu Erwärmung, sondern auch zu Verdunstung. Die Strahlung dringt je nach Trübheitsgrad tief in den Wasserkörper ein. Bei Fließgewässern kommt es durch die Bewegung zu Durchmischungsprozessen, sodass sich das Wasser bis in tiefere Schichten erwärmt. Durch die zeitgleich auftretende Evaporation erwärmt sich das Wasser jedoch weniger schnell als das bei anderen Strukturen der Fall ist, wie bspw. Boden oder Gestein. Der Prozess der Evaporation verbraucht Wärmeenergie und entzieht der unmittelbaren Umgebung somit die Wärme (Oke et al., 2017, S.



158, 439). Durch die geringe Temperaturzunahme bei großer Energiezufuhr und geringe Temperaturabnahme bei Abkühlung sind Wasserkörper gute Wärmespeicher (Kuttler, 2013). Dementsprechend sind die Temperaturextreme im Wasser geringer und treten zeitlich verzögert auf.

Tagsüber haben Wasserkörper einen positiven Effekt auf den thermischen Komfort (Temperatur) und sind in ihren Temperatúrauswirkungseigenschaften vergleichbar zu einer optimal mit Wasser versorgten Grünfläche. Jedoch ist die Reichweite der Temperatúrauswirkung durch die Wasserfläche geringer als die einer Grünfläche und beschränkt sich hauptsächlich auf die Fläche des Wasserkörpers. Im Sommer können Fließgewässer tagsüber zur Kühlung der unmittelbar angrenzenden Luftpakete beitragen. Eine Studie zum Kühlungseffekt von Flüssen auf Städte in Taiwan (Chen et al., 2014) hat jedoch gezeigt, dass der Effekt weitaus geringer ausfällt als in natürlichen Flussgebieten. In den sehr städtisch entwickelten Flussauen wurde eine Reichweite des Kühlungseffektes von 0 m bis 75 m anhand der Auswertung des Thermalbandes von Satellitenbildern nachgewiesen.

Nachts haben Wasserflächen keinen kühlenden Effekt, da sie selbst durch die hohe Wärmekapazität (Wärmespeicher) ein höheres Temperaturniveau als die Lufttemperatur aufweisen (Kuttler, 2013). Gleichzeitig ziehen Fließgewässer in den Städten die Luftströmung und damit auch einen Teil der Kaltluft an, da sie nachts meist die wärmsten Strukturen im Stadtgebiet sind. Zugleich sind sie oftmals der tiefste Punkt im Stadtgebiet, so dass dieser Prozess noch weiter verstärkt wird.

Zur Ermittlung der mittleren sommerlichen Wassertemperaturen der Fließgewässer in Fürth wurden Messreihen von 2015 – 2023 der „Umweltdaten Stadt Nürnberg“ ausgewertet (<https://www.nuernberg.de/internet/umweltdaten/fliessgewaesser.html>). Es konnten individuelle Werte für die Fließgewässer Pegnitz, Regnitz und Rednitz ermittelt werden: Messstation Hüttendorf für die Regnitz mit 19,67 °C, Messstation Neumühle für die Rednitz mit 19,74 °C und Messstation Theodor-Heuss-Brücke für die Pegnitz mit 18,67 °C. Für den Main-Donau-Kanal wurde der Wert der internen Deutschlandrechnung verwendet (19,55 °C). Stehende Gewässer haben eine Standard-Wassertemperatur von 20 °C erhalten.

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

5.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 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 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]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
W-Komponente des Windes [m/s]	[m/s]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Potentielle Lufttemperatur	[K]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Diffusionskoeffizient momentum	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m ² /s ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s ²]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m ²]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Spezifische Feuchte	[kg/kg]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteniveaus 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 insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.



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

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

5.6 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Qualitätssicherung stellt den abschließenden Arbeitsschritt der Modellierung im engeren Sinne dar. Sie ist Bestandteil des zertifizierten Qualitätsmanagements nach DIN EN ISO 9001:2015, 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 sechs Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung durch den Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Alle Modellläufe durchliefen erfolgreich die Qualitätssicherung.

5.7 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

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

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



Zunächst einmal sind Modelle per Definition unvollständige Abbilder der Wirklichkeit (Stachowiak, 1973). Sie erheben damit keinen Anspruch, das zu modellierende System allumfassend abzubilden, sondern wollen dieses hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern jene Prozesse, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 3783, Blatt 7, 2017) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten ist, aus denen sich jedoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sogenannten RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E-Vorhaben ist.

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

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

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

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² (5 * 5 Meter) repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von meso-skaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte und größere Siedlungen haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen



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

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als 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 (gemeindeübergreifenden) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

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



6. Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für die Ist- Situation und die sechs Klimawandelszenarien (vgl. Kapitel 5.2) beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 5.4). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Modellergebnisse werden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten / georeferenzierte Raster (*.tif) an die Auftraggeber übergeben.

6.1 NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR UND KALTLUFTPRODUKTION

Die Ermittlung der bodennahen **nächtlichen Lufttemperatur** ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche (sogenannte städtische Wärmeinseln) zu identifizieren, 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 Modellergebnis in der Ist-Situation von ca. 15 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis ca. 21 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Fürth damit eine Spannweite von ca. 6 °C (Abbildung 29). Die Ausprägung der entsprechenden Lufttemperaturwerte in den sechs Zukunftsszenarien ist in Ausschnitten in Abbildung 30 dargestellt. Für das Szenario „starker Klimawandel“ steigen die Werte auf bis zu knapp 23 °C (nahe Zukunft) bzw. über 25 °C (ferne Zukunft).

Die höchsten nächtlichen Belastungen treten vorwiegend in der Altstadt (z. B. Marktplatz, Angerstraße, Gustavstraße, Schwabacher Straße und Hirschenstraße), aber auch in den hoch versiegelten Industrie- und Gewerbegebieten (bspw. an der Karolinenstraße, Industriestraße, Breslauer Straße, Veitsbronner Straße sowie am Hafen) auf. Große Parkplatzflächen oder Schulhöfe, sofern weitgehend versiegelt und ohne Beschattung, sind ebenso als nächtliche Wärmeinseln zu erkennen (bspw. Grundschule Friedrich- Ebert Straße) sowie einige dicht bebaute Hauptverkehrsstraßen (bspw. Nürnberger Straße, Königstraße). Am Bahnhofplatz kann man deutlich den Temperaturunterschied zwischen der versiegelten Fläche und den zwei Grünflächen erkennen, welche 2,5 bis 3,0 °C kühler Werte anzeigen (Abbildung 29). Der Südstadtpark sticht ebenfalls durch kühle nächtliche Temperaturen von unter 16 °C in der Ist-Situation hervor. Die große offene Fläche ohne Baumbestand begünstigt die nächtliche Abkühlung der Bodenoberfläche. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums sind in den aufgelockerten Wohnsiedlungsbereichen am Stadtrand zu finden (bspw. Oberfürberg, Unterfürberg, Dambach). Vor allem die Siedlungslagen am westlichen Stadtrand erhalten große Kaltluftmengen aus den angrenzenden landwirtschaftlichen Freiflächen, welche in Zusammenhang mit starker Durchgrünung bzw. relativ lockerer Bebauung für niedrige Lufttemperaturen in der Nacht sorgen (vgl. Beschreibung zu Kaltluftströmungsfeld und Klimaanalysekarte weiter unten). Charakteristisch für viele Wohnquartiere im gesamten Untersuchungsgebiet ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßenbereich und



in den oftmals großflächigen Grünbereichen und Gärten hinter den Gebäuden. Hier zeigen sich Temperaturdifferenzen von bis zu 4 °C.

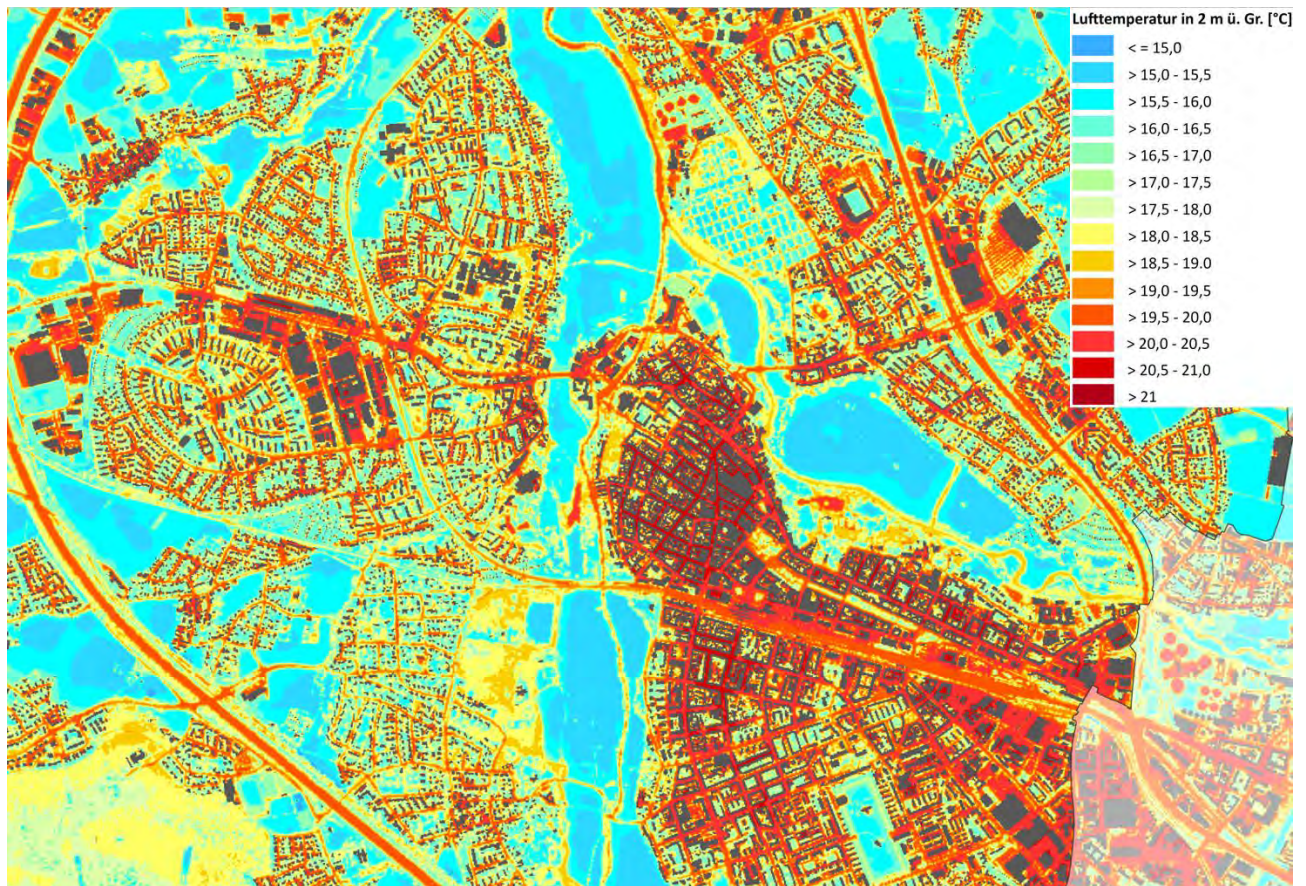


Abbildung 29: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur (4 Uhr) für die Ist-Situation in einem Ausschnitt des zentralen Fürther Stadtgebiets.

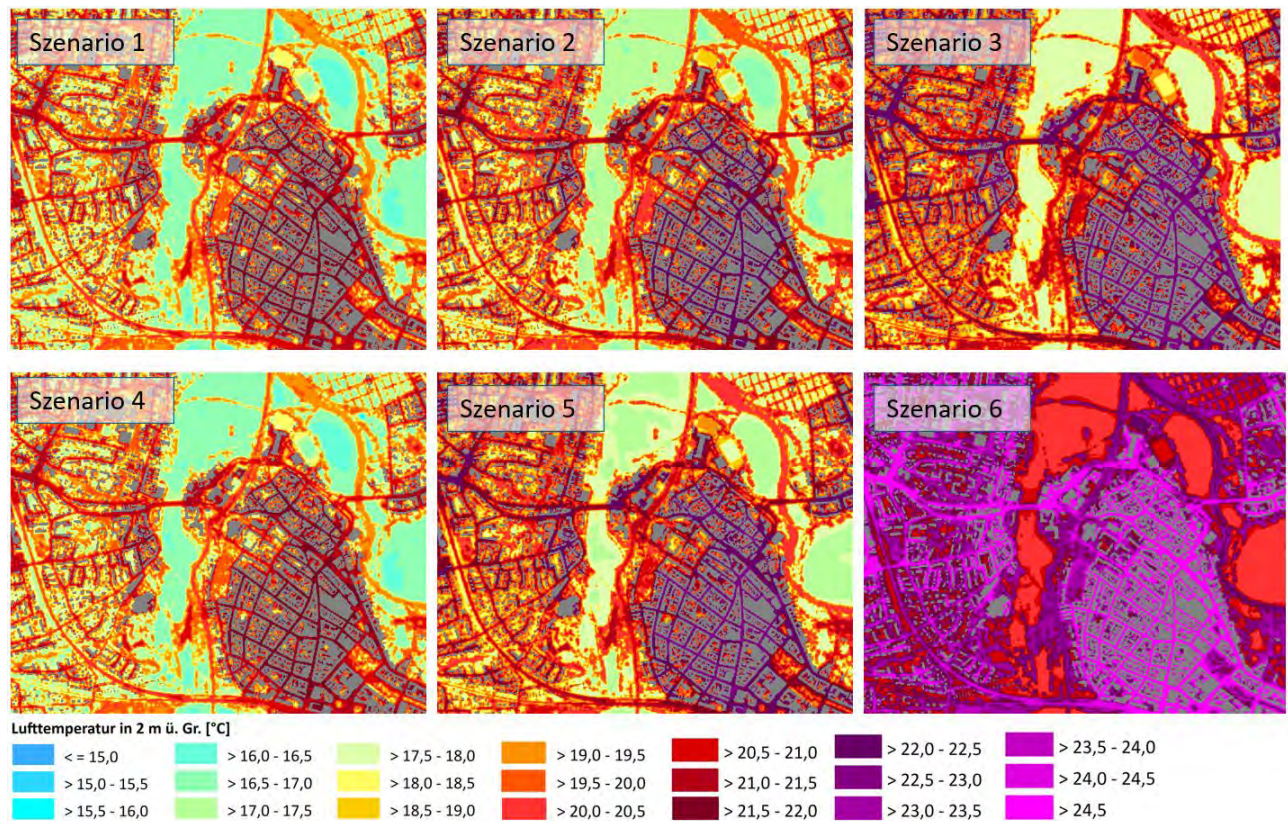


Abbildung 30: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in einem Ausschnitt des zentralen Fürther Stadtgebiets, für die 6 Zukunftsszenarien

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Freiflächen im Umland, aber auch die Auenbereiche von Rednitz, Pegnitz und Regnitz, kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 15 – 16 °C (bzw. 17 – 18 °C (nahe Zukunft) 20 – 21 °C (ferne Zukunft) im Szenario „starker Klimawandel“) auf. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Die bodennahen Temperaturen im Fürther Stadtwald liegen bei etwa 17 – 18 °C (Ist-Situation) in der Nacht, mit entsprechend höheren Werten in den Zukunftsszenarien. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrünzten Siedlungsräumen zur Folge hat, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach bilden, welche in Richtung Siedlung abfließt.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können. Entlang der Flüsse und des Main- Donau- Kanals, aber auch am Ufer des Stadtparkweihers ist eine leicht erhöhte (wenige Zehntelgrad °C) Lufttemperatur festzustellen.

Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die **Kaltluftproduktionsrate** verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht. Die Maßeinheit hier ist m³ pro m² pro Stunde. In Abbildung 31 wird die flächenhafte Verteilung der Kaltluftproduktionsrate zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts für einen zentralen Ausschnitt des Fürther Stadtgebietes dargestellt. Über versiegelten Flächen (Straßen und Plätze) findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über landwirtschaftlichen Freiflächen produziert, vor allem

in Kombination mit Hanglagen (vgl. Kap. 3.2). Innerhalb der Siedlungsquartiere ist eine Vielzahl an unveriegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion zu erkennen. Die Auenwiesen von Rednitz, Pegnitz und Regnitz fallen in Innenstadtnähe durch ihre großen Flächen auf, aber auch der Südstadtpark, in blau bis dunkelblau dargestellt. Mit Bäumen bestandene Flächen zeigen – aufgrund reduzierter Abkühlung der Bodenoberfläche unter den Baumkronen (siehe oben) – eine deutlich geringere Kaltluftproduktionsrate (hellgrün dargestellt).

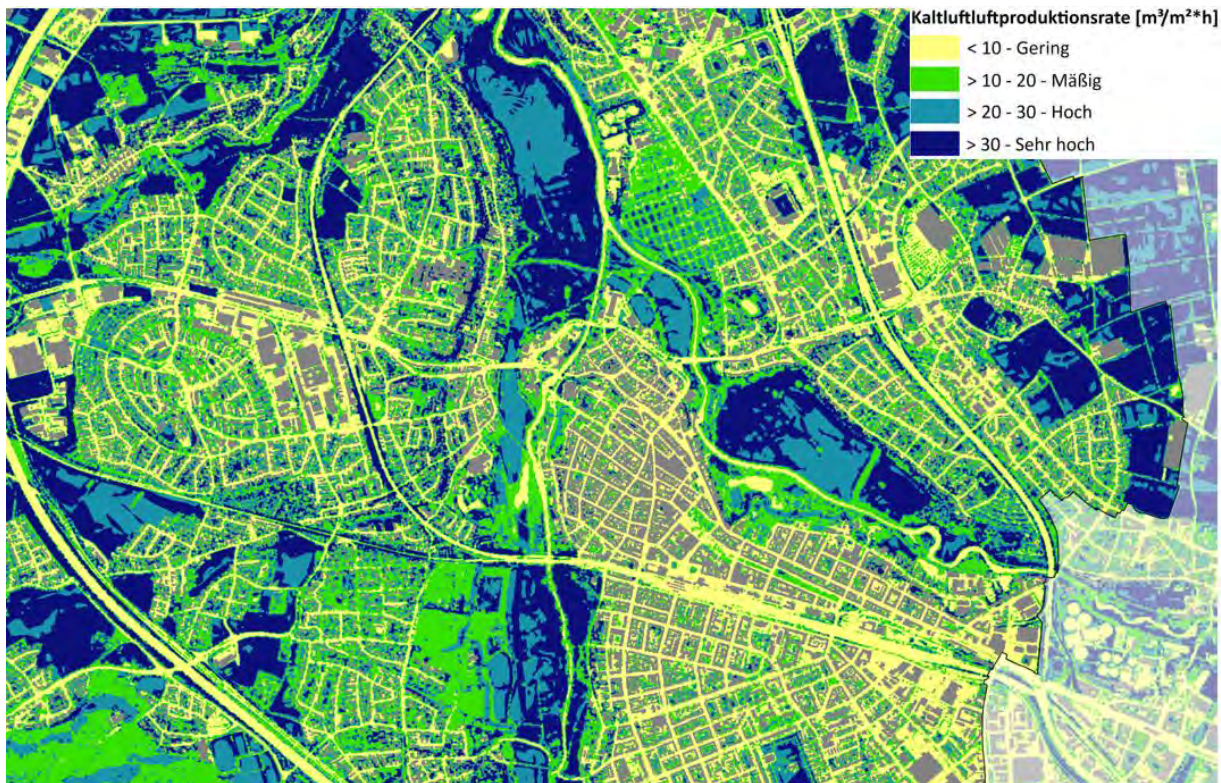


Abbildung 31: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Umfeld der Kernstadt, Ist-Situation.

In den Zukunftsszenarien verändert sich zwar das Temperaturfeld, die Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Oberflächenstrukturen erfahren aber – bis auf die städtebaulichen Entwicklungsflächen – keine signifikanten Veränderungen. Das Strömungsfeld der Austauschprozesse und die Menge der produzierten und strömenden Kaltluft unterscheidet sich daher im Vergleich zwischen Ausgangssituation und Zukunftsszenarien im Stadtgebiet nur geringfügig, so dass auf Kartendarstellung an dieser Stelle verzichtet wird.

6.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt im reliefierten Gelände eine große Variabilität. Zweiter Antrieb für den Kaltluftvolumenstrom ist der bodennahe Lufttemperaturunterschied: die über den städtischen Wärmeinseln aufsteigende warme Luft zieht kühle Ausgleichsströmungen heran (vgl. Kap. 2.2). Die **Kaltluftvolumenstromdichte** wird in Kubikmeter Kaltluft, die pro Sekunde über eine gedachte Linie von einem Meter Breite fließt, angegeben ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$). Abbildung 32 zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte und die bodennahe Strömungsrichtung für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets. Die Fürther Siedlungsgebiete werden nachts aus dem Umland angeströmt. Die größten Kaltluftmengen fließen dabei über baumlose (landwirtschaftliche) Freiflächen, mit über $20 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$. Treffen die Kaltluftmas-

sen auf Siedlungsgebiete, so tragen sie dort effektiv zur Abkühlung bei. Bebauung und Versiegelung schwächen den Kaltluftstrom ab und in Teilen des Stadtzentrums sinkt die Kaltluftvolumenstromdichte auf nahezu null.

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

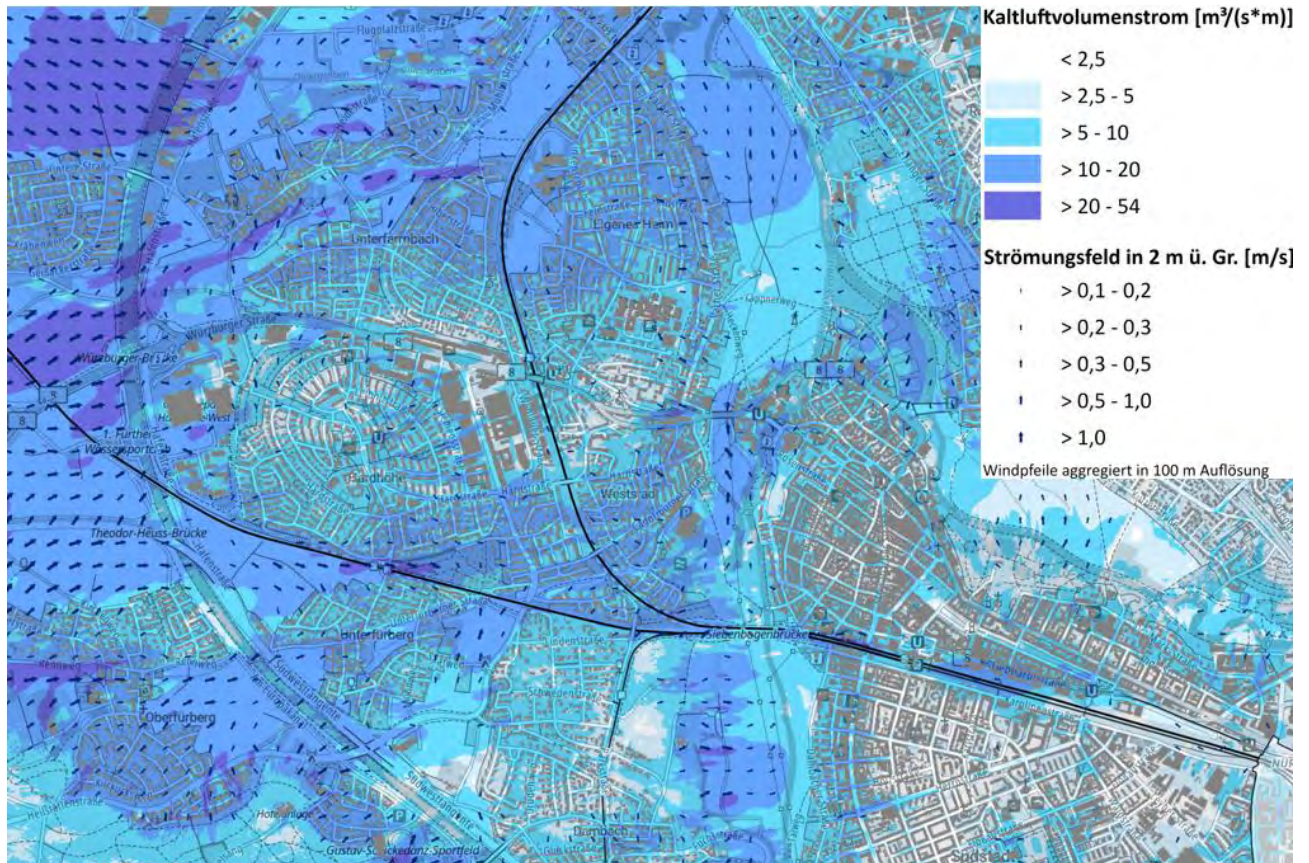


Abbildung 32: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets, Ist-Situation.

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen wird der Parameter Strömungsgeschwindigkeit herangezogen. In Abbildung 33 ist für einen Ausschnitt von Fürth die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt. Die Strömungspfeile werden hier in einer Auflösung von 100 m dargestellt (also deutlich gröber als die Original-Modellergebnisse mit 5 * 5 m). Deutlich ist beispielsweise am linken Rand der Abbildung zu erkennen, wie die Kaltluft mit hoher Geschwindigkeit (ca. 0,7 m/s, dargestellt über die Größe der Pfeile) in Richtung Wohnsiedlungen strömt. Auch entlang der Rednitz- Aue ist die Strömungsgeschwindigkeit noch ca. 0,5 m/s. Beim Auftreffen auf Gebäude und versiegelte Bereiche vermindert sich der Kaltluftstrom. Baustrukturen sind klare Strömungshindernisse. Breite Straßen und Plätze sowie Parks dagegen können wertvolle Transportlinien bzw. „Trittsteine“ für Kaltluft sein. Beim Blick in die hochaufgelösten Geodaten der Modellergebnisse (hier nicht dargestellt) zeigt sich, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

Die bodennahe Kaltluftströmung (Richtung und Geschwindigkeit) bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie unter Baumbestand sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt.

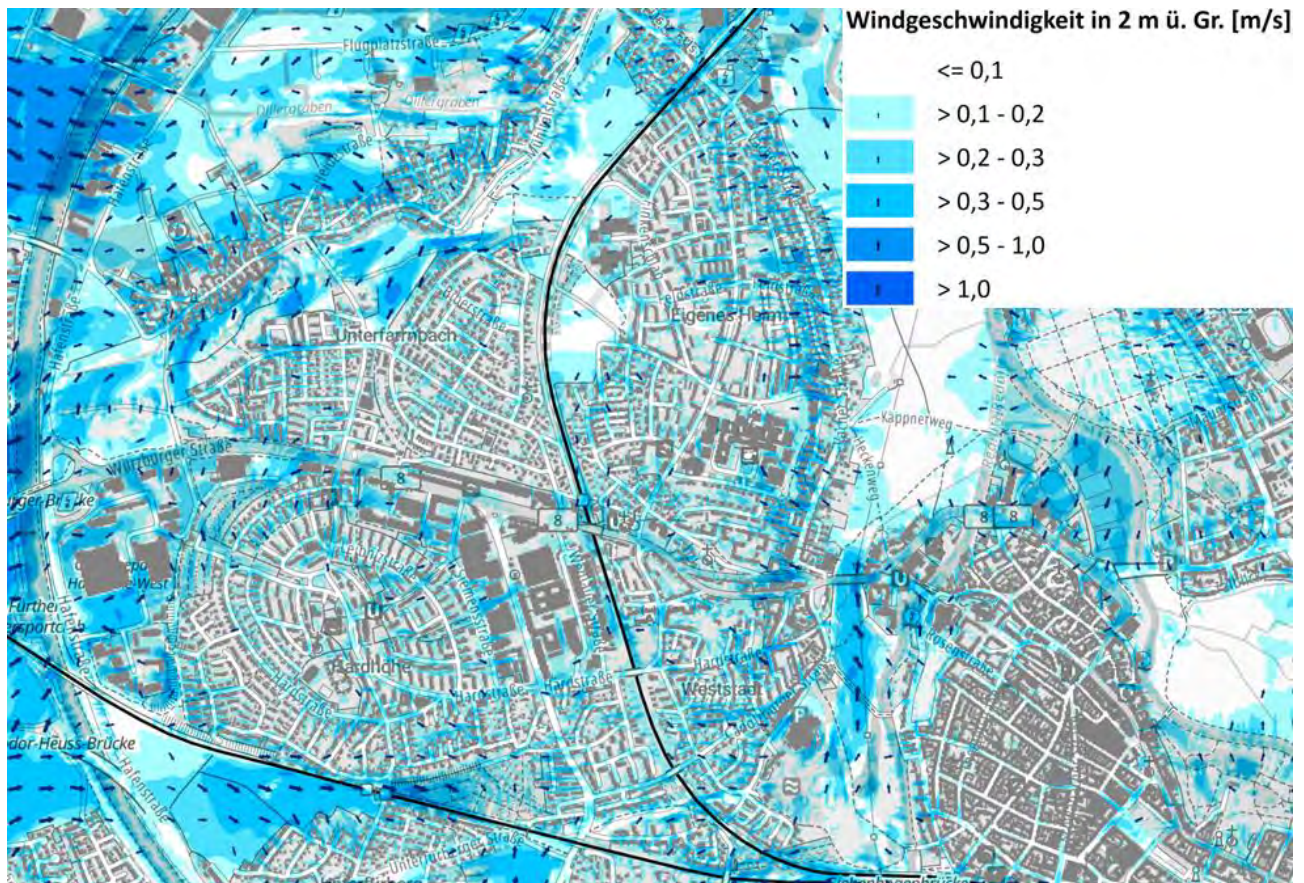


Abbildung 33: Ausschnitt aus dem bodennahen nächtlichen Strömungsfeld.

6.3 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenn-größen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen. In der vorliegenden Arbeit wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Höppe & Mayer, 1987). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat dieser den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit auch von Nichtfachleuten besser nachvollzogen werden zu können. Darüber hinaus handelt es sich bei der PET um eine Größe, die sich in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt hat, sodass sich die Ergebnisse aus Fürth mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen humanbiometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (Müller & Kuttler, 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien am Tage sinnvoll einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologischen Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C).



Tabelle 12: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET (nach VDI 3787, Blatt 9, 2004)

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

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die **PET** eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Die flächenhafte Ausprägung in einem Ausschnitt des Stadtgebietes ist in Abbildung 34 für die Ist-Situation dargestellt. Abbildung 35 zeigt kleinere Ausschnitte für die 6 einzelnen Zukunftsszenarien. In Grüntönen heben sich Flächen mit Baumbestand (bspw. am rechten Bildrand der städtische Friedhof und der Stadtpark) mit den geringsten PET-Werten von unter 26 °C (in der Ist-Situation) ab. Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass vor allem die stadtnahen Grünflächen als Rückzugsorte dienen können. Auch Gewässer wirkend am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die angrenzenden Grünflächen entlang Pegnitz, Rednitz und Regnitz, besonders in Kombination mit Vegetation entsprechender Höhe eine leicht reduzierte PET im Vergleich zu weiter entfernten Flächen aufweisen und damit – zumindest vom PET-Wert her – oft eine gute Aufenthaltsqualität am Tage bieten.

Die größtenteils landwirtschaftlich genutzten, weitgehend baumlosen Freiflächen im Außenraum zeigen dagegen zum Auswertezeitpunkt 14 Uhr PET-Werte um von bis zu 43 °C (Ist-Situation). Aufgrund der stufenweise reduzierten Bodenfeuchte in der Modellierung der Szenarien ist ab der Stufe „moderater Klimawandel“ auf Grün- und Freiflächen die höchste Zunahme der Hitzebelastung am Tage dargestellt, denn hier wird (je nach Abstufung, vgl. Tabelle 7) der Welkepunkt der Pflanzen in dem Maße überschritten, so dass die Kühlungswirkung der Verdunstung ausfällt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Beurteilung der zukünftigen Hitzebelastung neben der absoluten Zunahme der Temperatur, vielmehr die Zunahme der Häufigkeit von heißen Tagen (vgl. Tabelle 3) entscheidend ist.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Entscheidend für die Belastung am Tage ist der Versiegelungsgrad, die Baumasse sowie die Verschattung vor Ort durch Baustrukturen und Bäume, wobei Bäume zusätzliche Kühlung durch den Verdunstungsprozess liefern. Große Waldflächen (Stadtwald) können außerdem auch am Tage im Nahbereich kühle Ausgleichsströmungen liefern, wobei die Luft-Austauschprozesse nie die Dimensionen der Nachtsituation erreichen. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt (Marktplatz, Obstmarkt, Teile vom Kirchenplatz St. Michael sowie Teile vom Bahnhofplatz) und teilweise auf den versiegelten, baumlosen Flächen der Gewerbegebiete zu finden sind (ca. 42 bis 44 °C PET in der Ist-Situation, bzw. 45 bis 46 °C für das Zukunftsszenario „starker Klimawandel in der nahen Zukunft (Szenario 3) bzw. bis

über 49 °C PET für die ferne Zukunft (Szenario 6)). Auch Hauptverkehrsstraßen sind aufgrund hoher Versiegelung hohen PET- Werten ausgesetzt, so z. B. die Friedrich- Ebert- Straße.

In der Fürther Altstadt sorgen die hohen Gebäude der engen Straßen und Gassen aber auch für Schattenwurf und damit relativ kühle Verhältnisse. Auf der Nord- bis Nordost-Seite der Gebäude ist durch den Schattenwurf zum Zeitpunkt 14 Uhr entsprechend der PET-Wert deutlich kühler als auf den Flächen, welche sich in der vollen Sonneneinstrahlung befinden. So ist beispielsweise die Nord- Süd verlaufende Schwabacher Straße auf der westlichen Seite zum Tageszeitpunkt der größten Wärmeentwicklung fast komplett im Schatten und weist dort ca. 9 °C bis 10 °C niedrigere PET- Werte auf als die voll angestrahlte Ost-Seite.

Auf dem Waagplatz, Löwenplatz sowie beispielsweise Parkplatz Lilienstraße sorgen Bäume für Beschattung und dadurch ca. 12 °C kühlere PET- Werte als auf den sonnenbeschienenen Plätzen.

Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in einigen umliegenden Ortsteilen. Beispielsweise in Burgfarrnbach bieten die Wohngebiete zwar meist einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume, so dass die Hitzebelastung vergleichbar zu der in Teilen der Innenstadt 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.

Als kühle stadtnahe grüne Erholungsorte stellen sich der Stadtpark, der städtische Friedhof, sowie die direkt an die Siedlung angrenzenden Flächen des Stadtwalds dar (nicht abgebildet). Der Südstadtpark erhitzt sich auf der zentralen baumlosen Fläche stark und bietet hier keinen Erholungsraum an heißen Tagen (nicht abgebildet).

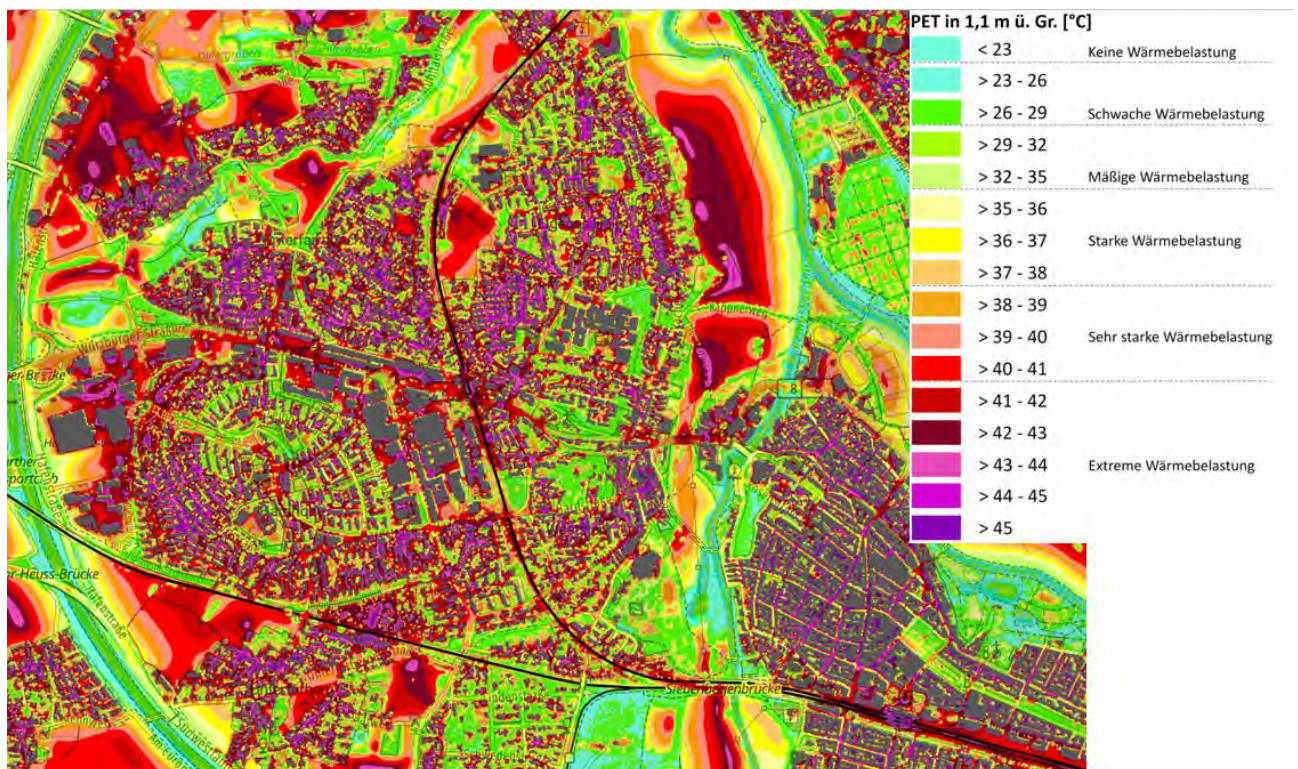


Abbildung 34: Wärmebelastung am Tag (PET) in einem Ausschnitt des Fürther Stadtgebietes

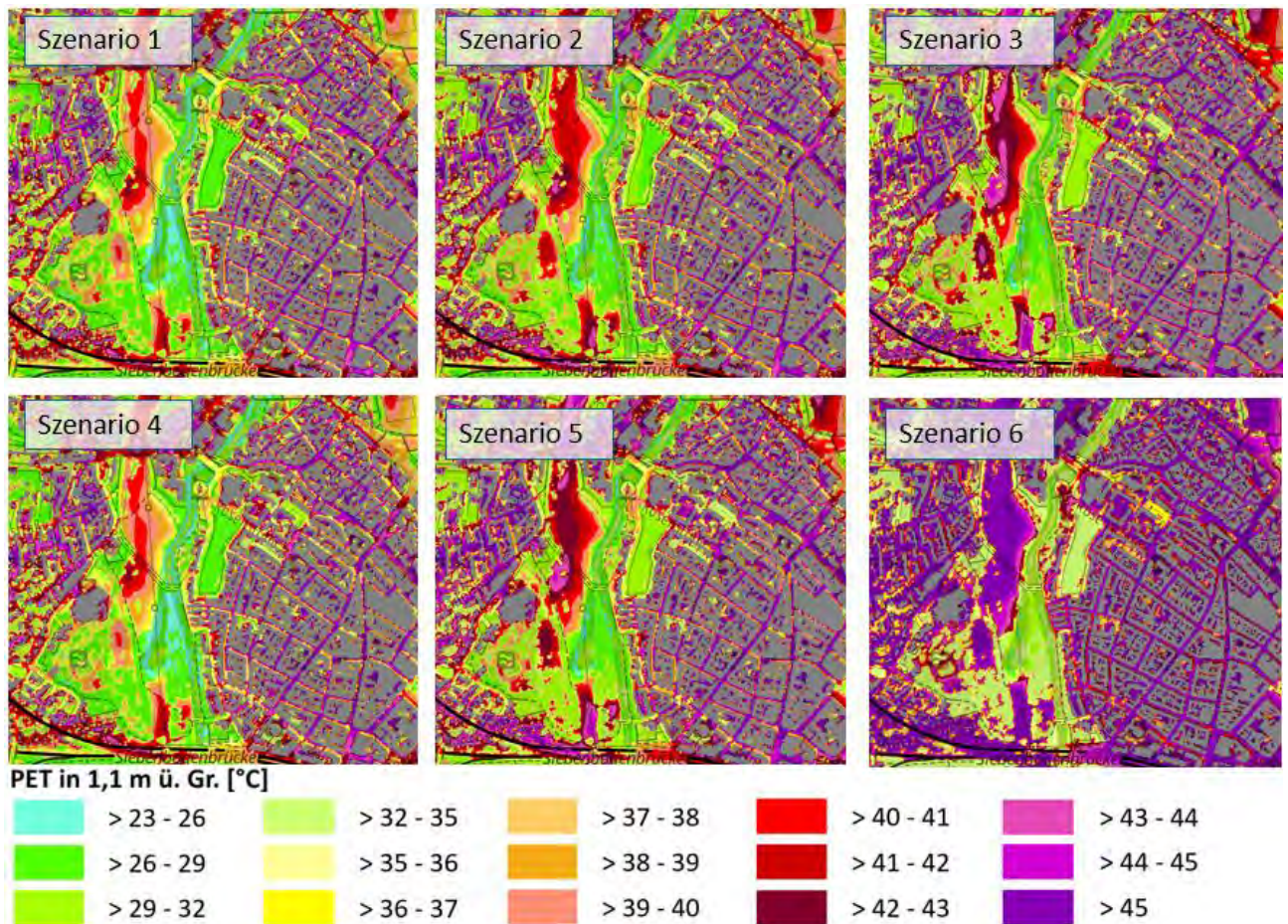


Abbildung 35: Wärmebelastung am Tag (PET) in einem Ausschnitt des zentralen Fürther Stadtgebietes, für die 6 Zukunftsszenarien



7. Zwischenprodukte

7.1 KLIMAANALYSEKARTEN

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, S. 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling, 2010, S. 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt anschließend über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap. 8). Mit diesem Verständnis wurden für die Stadt Fürth folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario „schwacher Klimawandel (2031 - 2060)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „moderater Klimawandel (2031 - 2060)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2031 - 2060)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „schwacher Klimawandel (2071 - 2100)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „moderater Klimawandel (2071 - 2100)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2071 - 2100)“

Die Legende der Klimaanalysekarten gliedert sich jeweils in die Elemente Wirkraum (Siedlungs- und Verkehrsflächen), Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) und Kaltluftprozessgeschehen (vgl. Abbildung 36). Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁸ (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Die Abgrenzung des Siedlungsraums ist wie in der Planungshinweiskarte vektorbasiert und beruht auf derselben geometrischen Basis (vgl. Kap. 8.2).

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



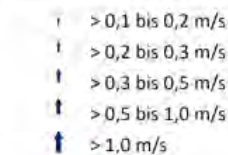
Grün- und Freiflächen

Kaltluftvolumenstromdichte [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{s}$]



Kaltluftaustausch

Windvektoren in 2 m über Grund (aggregierte Auflösung 100 m)



Siedlungsräume

Lufttemperatur in 2 m über Grund [$^{\circ}\text{C}$]



Abbildung 36: Legende der Klimaanalysekarten

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch mehrere Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 13). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf



eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den Geo-Datensätzen zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden. Die als **Kaltluftentstehungsgebiete** gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen mit einer Kaltluftproduktionsrate von $> 29,14 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (Medianwert). **Kaltlufteinwirkbereiche** sind solche Siedlungsbereiche deren Kaltluftvolumenstromdichte den Medianwert (im Siedlungsraum) von $7,06 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ überschreitet und eine Strömungsgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$ aufweisen.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten bestimmte Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Fürth von besonderer Bedeutung sind. Hierzu zählen zum einen die linienhaften **Kaltluftleitbahnen**. Kaltluftleitbahnen verbinden kaltluftproduzierende Ausgleichsräume und Wirkräume miteinander und sind mit ihren meist hohen Kaltluftvolumenströmen elementarer Bestandteil des Kaltluftprozessgeschehens. Gleichzeitig sind sie aufgrund ihrer räumlich begrenzten Breite (mindestens 50 m, vgl. Mayer et al., 1994) aber auch hochgradig anfällig gegenüber Flächenentwicklungen in ihren Kern- und Randbereichen, die zu einer Verengung des Durchflussquerschnittes und einer erhöhten Rauigkeit und damit zu einer Funktionseinschränkung bzw. zu einem Funktionsverlust führen können.

Für das Fürther Stadtgebiet lassen sich sechs Kaltluftleitbahnbereiche identifizieren. Große Mengen Kaltluft werden über die weiten Wiesenflächen der Flussauen von Regnitz und Rednitz von Norden bzw. von Süden in die angrenzenden Siedlungsgebiete transportiert. Eine zweite große Kaltluftleitbahn verläuft über die Grünflächen entlang des Farrnbachs von Westen bis in das Stadtzentrum hinein. **Weitere** Kaltluftleitbahn sind

- von Westen entlang der Freiflächen südlich der Bahnlinie nach Unterfürberg hinein (Funktion gefährdet durch die Planung in der Entwicklungsfläche)
- über die Gartenkolonie Südstadt, von den Freiflächen westlich des Main-Donau-Kanals ausgehend
- entlang des Rennwegs, von den leicht abfallenden Hangflächen am Rande des Stadtwalds aus
- entlang des Bucher Landgrabens im Norden von Fürth nach Herboldshof hinein

Flächenhafte **Kaltluftabflussbereiche** sind in Vergleich zu Kaltluftleitbahnen nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Die für Fürth festgestellten flächenhaften Kaltluftabflüsse werden am westlichen Stadtrand vorrangig von Gefälle angetrieben und reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Am östlichen Stadtrand und auf den Flächen im Übergang zum Nürnberger Stadtgebiet sind die flächenhaften Kaltluftabflüsse eher als Flurwinde, welche durch Temperaturunterschiede hervorgerufen werden, einzuordnen (vgl. Kap. 3.2). Die Kaltluftmengen sind geringer als diejenigen im westlichen Stadtrand (vgl. Modellergebnisse, Kap. 6.2). Diese Ausgleichsströmungen sind daher anfälliger für eine Einschränkung ihrer klimaökologischen Funktionen bei Flächenentwicklungen. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. intensiver zu prüfen ist.

Flächen mit **Parkwind** - Phänomen (Kaltluft strömt aus einer umbauten Grünfläche heraus in die umgebende Bebauung) sind der Südstadtpark und die Grünfläche am Zusammenfluss von Farrnbach und Dillergraben sowie das Entwicklungsgebiet Schwand.



Kaltluftprozesse (Leitbahnen, flächenhafte Abflüsse sowie Parkwinde) welche in den Zukunftsszenarien aufgrund von Entwicklungsflächen beeinträchtigt werden würden, sind in den Klimaanalysekarten der Zukunftsszenarien in pink (statt blau) dargestellt (vgl. Abbildung 36).

Tabelle 13: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Kaltlufteinwirkungsbereiche	Bereiche (im Wirkraum) mit einer Kaltluftvolumenstromdichte von 7,06 m ³ /m/s (Median) und Strömungsgeschwindigkeit > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiete	Bereiche (im Ausgleichsraum) mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 29,14 m ³ /m ² /h (Median)
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftleitbahnen (linear) in Richtung Siedlungsraum	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
flächenhafte Kaltluftabflüsse in Richtung Siedlungsraum	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Parkwinde	Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche heraus. Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der 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.

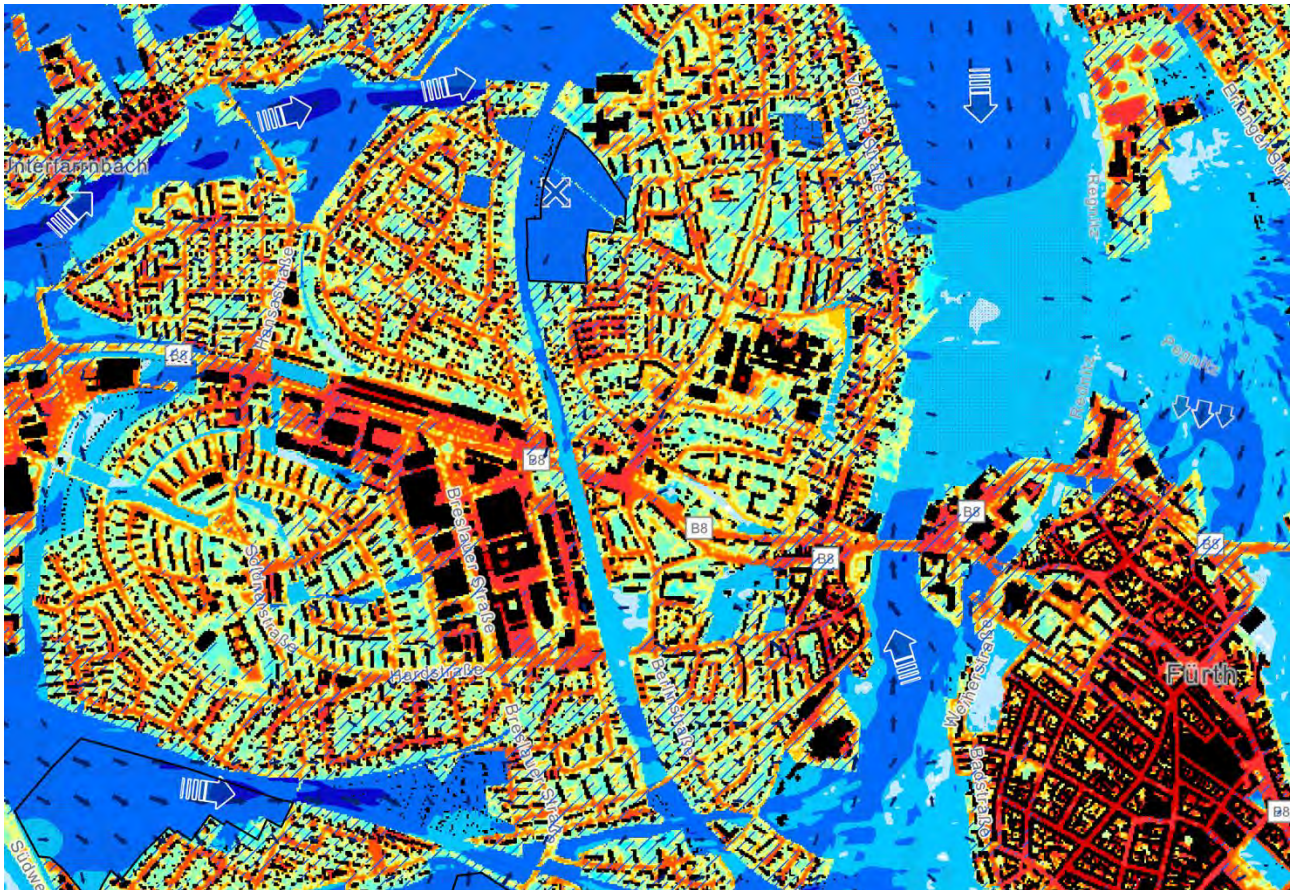


Abbildung 37: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation (Legende: siehe Abbildung 36)

7.2 KARTE DER SOZIODEMOGRAPHISCHEN VERLETZLICHKEIT

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

7.2.1 DATENGRUNDLAGE

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

Senioren: Personen im Alter über 65 Jahren wurden aufgrund ihrer Einstufung als „ältere“ Bevölkerung als potenziell vulnerabel betrachtet. Bei Menschen in dieser Altersklasse besteht ein erhöhtes Risiko von Übersterblichkeit. Die erhöhte Mortalität begründet sich durch größere hitzeabhängige Gesundheitsrisiken infolge chronischer Erkrankungen, kognitiver und körperlicher Einschränkungen, Multi-morbidität sowie Multimedikation und eine herabgesetzte Fähigkeit zur physiologischen Anpassung an Hitze. Ältere Men-



schen sind unter Umständen weniger mobil und besitzen eine geringere physiologische Anpassungsfähigkeit gegenüber Hitze (geringere Abgabe der Körperwärme, fehlende Wahrnehmung der Hitze, schnellere Dehydration) (BMG 2021).

Kinder: Kinder bis einschließlich 5 Jahren wurden als zweite sensible Altersgruppe definiert. Im Vergleich zu Erwachsenen besteht bei Kindern eine geringere Thermoregulation, der Körper produziert weniger kühlenden Schweiß, gleichzeitig bietet die Körperoberfläche eine größere relative Absorptionsfläche für Wärmestrahlung. Weiterhin liegt bei Kindern ein höherer Flüssigkeitsanteil im Körper vor und die relative Verdunstung ist aufgrund der größeren Körperoberfläche in Bezug zum Körpervolumen ebenfalls höher als bei Erwachsenen. Bei Hitze sind sie daher einem größeren Risiko ausgesetzt, eine Exsikkose (Austrocknung des Körpers) als Folge einer Dehydration zu erleiden (HLNUG, 2019).

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die räumliche Verteilung der vulnerablen Bevölkerung Fürths in einer Karte. Die demographischen Daten lagen mit hoher Genauigkeit vor und wurden auf die Ebene der Bewertungsflächen, welche im Zuge der Bewertungskarten und Planungshinweiskarte definiert wurden, zusammengefasst (vergleichbar mit Baublöcken, die aus zumeist mehreren Wohngebäuden bestehen vgl. Kap 8.2). Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Einrichtungen sowie die Einwohnerdichte und -anzahl pro Bewertungsfläche im Zuge der Sensitivitätsanalyse ausgewertet. Datenstand für die Bevölkerungsdaten ist der 31.12.2024.

Analyse sensibler Orte / Einrichtungen

Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen an denen sich vulnerable Gruppen (ältere oder kranke Menschen, Kinder) vermehrt aufhalten. In Fürth wurden Schulen, Kitas, Spielplätze, Sportflächen, Pflegeheime und das Klinikum erfasst. Diesen Orten sollte eine besondere Aufmerksamkeit bei der Erarbeitung von Hitzeschutzmaßnahmen zuteilwerden, um den Aufenthalt von hitzesensibler Bevölkerung im Freien sowie in Innenräumen weniger belastend zu gestalten.

Analyse der Bevölkerungsanzahl /-dichte

Bewertungsflächen mit einer hohen relativen Anzahl an Einwohnern auf geringem Raum wurden ebenfalls zur Identifikation sensibler Bereiche herangezogen. Eine überdurchschnittlich hohe Einwohnerdichte besteht ab 64,8 Einwohner / Hektar pro Bewertungsfläche. Enger Wohnraum kann als eine relevante Benachteiligung betrachtet werden. Gegenüber einer Einfamilienhaussiedlung steht weniger Fläche pro Person für Wohnraum oder für Ausweichmöglichkeiten im Freien zur Verfügung. Zudem geht eine hohe Einwohnerdichte häufig auch mit einer hohen Bebauungsdichte einher, welche die Hitzebelastung im Straßenraum zusätzlich steigert.

7.2.2 METHODIK

Zur Ermittlung der Sensitivität eines Gebietes wurden Klassengrenzen definiert, welche sich aus den vorhandenen demographischen Daten ableiten. Dafür wurde die Verteilung eines jeden Indikators (Senioren über 65 Jahre, Kinder unter 6 Jahre) berechnet und in Dezile eingeteilt. Der erste Schritt bestand aus der Berechnung der Dichte der jeweiligen vulnerablen Bevölkerungsgruppe in Einwohner pro Hektar pro Bewertungsfläche. Als nächstes wurden die einzelnen Einwohnerdichten in je zehn Dezile (Zehntel) eingeteilt.

In jeder der 10 Klassen befinden sich somit jeweils 10 % der untersuchten Altersgruppe. Die berechneten Dezile wurden entsprechend folgender Klassifikation zur Beschreibung von Sensitivitätsgraden eingeteilt:

Dezile 1 bis 7 = Klasse „wenig sensitives Gebiet“

Dezil 8 = Klasse „sensitives Gebiet“

Dezil 9 = Klasse „hoch sensitives Gebiet“

Dezil 10 = Klasse „extrem sensitives Gebiet“

Die räumliche Verteilung der zuvor vorgestellten Basisindikatoren und deren Einteilung in Dezile ist in den nachfolgenden Abbildungen für die zwei Bevölkerungsgruppen „Kinder unter 6 Jahren“ sowie „Senioren über 65 Jahren“ für einen Ausschnittes des Fürther Stadtgebiets dargestellt.



Abbildung 38: Konzentration der Anteile an Kindern unter 6 Jahren in einem Ausschnitt des Fürther Stadtgebiets



Abbildung 39: Konzentration der der Anteile an Senioren über 65 Jahren in einem Ausschnitt des Fürther Stadtgebiets



7.2.3 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

Die vorangestellte Sensitivitätsanalyse ermöglicht es der Stadtplanung bereits, Gebiete mit einer besonders hohen Dichte an sensiblen Bevölkerungsgruppen zu identifizieren. Über eine Kombination der ausgewählten Indikatoren können im Detail städtische Räume lokalisiert werden, in denen die gefährdeten Bevölkerungsgruppen gehäuft vorkommen. Auf diese Weise können die Ergebnisse der vorliegenden Analyse in besonders sensiblen Gebieten im Stadtgebiet in die Planung einfließen.

Zur Identifizierung sensibler Gebiete wurde eine Überlagerung der Einzelindikatoren vorgenommen, was der folgenden Tabelle 14 zu entnehmen ist. Die Gefährdung der Senioren wurde bei der Ausweisung sensibler Gebiete stärker gewichtet als die Kinderdichte, da eine auf Deutschland übertragbare, wissenschaftliche Evidenz für die Vulnerabilität von älteren Menschen gegenüber Hitze vorliegt (Becker et al., 2019; HLNUG, 2019) wohingegen die Kinder- und Armutsdichte nicht auf eindeutiger Evidenz beruht (HLNUG, 2019).

Tabelle 14: Klassifizierung der Sensitivität der Bevölkerung

Klasse	Indikatoren
Extrem sensibles Gebiet	Senioren Dezile 8 bis 10 und Kinder Dezil 10
Sehr hoch sensibles Gebiet	Senioren Dezile 8 bis 10 und Kinder Dezil 8 und 9
Hoch sensibles Gebiet	Senioren Dezile 8 bis 10 oder Kinder Dezil 10
Sensitives Gebiet	Einwohnerdichte überdurchschnittlich hoch (> 64,8 Einwohner pro Hektar) oder ein sensibler Ort (Schule, Kita, Spielplatz, Sportfläche, Pflegeheim, Klinikum)
Wenig sensibles Gebiet	Bisheriges unzutreffend

Die Sensitivitätsanalysekarte (Abbildung 40) zeigt die räumliche Verteilung der beiden hitzesensiblen Bevölkerungsgruppen auf Ebene der Bewertungsflächen. Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Fürther Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

In Kombination mit der „Planungshinweiskarte Stadtklima“ (vgl. Kap. 8.4) kann die Sensitivität der Bevölkerung mit den Ergebnissen der stadtklimatischen Belastung in Fürth verschnitten werden, um Aussagen zur Betroffenheit der Bevölkerung durch Hitze treffen zu können.

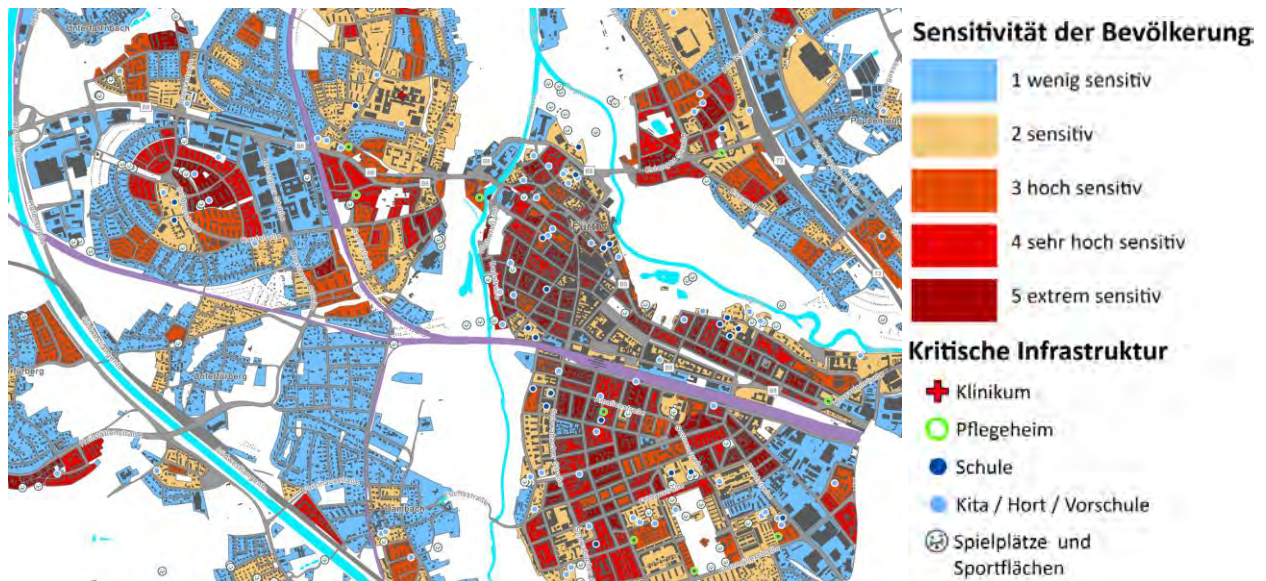


Abbildung 40: Sensitivitätsanalysekarte für einen Ausschnitt des Fürther Stadtgebiets

7.2.4 EMPFEHLUNGEN UND MAßNAHMEN

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

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

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

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



8. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

8.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich dabei um eine „*informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält*“ (VDI 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 luft-hygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben*“ (VDI 3787, Blatt 1, 2015, S. 5–6).

Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum (inkl. RGB-Farbcodes für die verschiedenen Klassen) vor und gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungswirkung und unterliegt keiner Planzeichenverordnung. Daher kann in begründeten Fällen von den im vorliegenden Konzept enthaltenen Vorschlägen abgewichen werden.

Die Inhalte und Hinweise werden im Rahmen der planerischen Abwägung berücksichtigt und können unterschiedlich gewichtet werden. Eine verbindliche Wirkung entsteht erst, wenn sie ganz oder teilweise in formelle Planwerke wie den Flächennutzungsplan oder Bebauungspläne übernommen werden. Das vorliegende Konzept ist als städtebauliches Entwicklungskonzept bei der Aufstellung der Bauleitpläne zu berücksichtigen.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zu Ist- und Zukunftsszenarien in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, vorgelagert sog. Bewertungskarten zu erstellen. In den Bewertungskarten wurde getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für jedes Szenario vorgenommen.

Für die Planungshinweiskarte wurden die Ergebnisse der Bewertungskarten aus Ist-Situation und dem Zeitraum „nahe Zukunft“ (Szenario 1 bis 3) zusammengefasst, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Fürth Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.

8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap. 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 hingegen auf eindeutig im Stadtraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

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

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene in der Regel nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine Grundlage, die gutachterlich weiterqualifiziert wurde. Dabei wurden sowohl sehr kleinräumige Strukturen zusammengefasst (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch größere zusammenhängende Flächen in kleinere Funktionseinheiten aufgeteilt (vorrangig im Wirkraum). Es kann unter Umständen vorkommen, dass kleinere Freiflächen in der Karte nicht als solche ausgewiesen sind, oder Überbauungen mit einem hohen Grünanteil nicht als Siedlungsflächen ausgewiesen sind. Im Falle zusätzlicher Bebauung auf Grün- und Freiflächen kann sich deren Funktion ändern und muss gegebenenfalls neu bewertet werden.

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel sowohl höhere als auch niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 41).

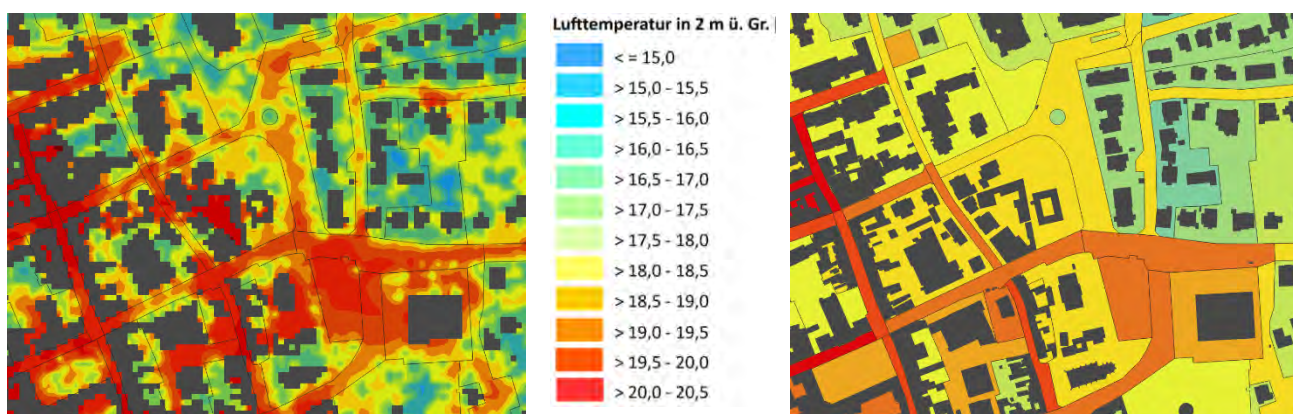


Abbildung 41: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie



8.3 BEWERTUNGSKARTEN

8.3.1 WIRKRAUM

Im Wirkraum wird die thermische Belastungssituation dargestellt. Wertgebend dabei ist in der Nacht die bodennahe Lufttemperatur als starker Indikator für den Schlafkomfort in Gebäuden sowie am Tag die Wärmebelastung im Außenraum (Physiologisch Äquivalente Temperatur, PET). Bei der Temperatur und der PET, die auf die Flächen der Basisgeometrie gemittelt wurden, handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb „sommerliche autochthone Wetterlage“ gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb eines Sommers sowie selbst innerhalb der zu betrachtenden Wetterlage auch deutlich wärmere oder kühlere Situationen. Die Planungshinweiskarte muss den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 3785, Blatt 1, 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei der sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 42).

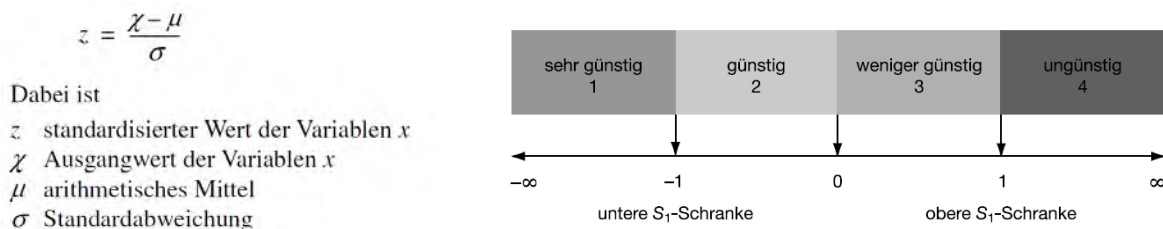


Abbildung 42: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 3785, Blatt 1, 2008, S. 30)

Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das grundsätzliche Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein. Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Für die Bewertung des thermischen Komforts nachts ist die Situation in den Wohngebieten entscheidend. Industrie- und Gewerbegebiete sowie der Verkehrsraum (Straßen und Plätze) geben generell nachts mehr gespeicherte Wärme ab als die Wohngebiete (vgl. Kap 6.1), weshalb für die Nachtsituation die Statistiken des Wirkraums (Siedlungsraums) in Wohnsiedlungsraum einerseits, und Verkehrsraum sowie unbewohntem Siedlungsraum (Gewerbegebiete etc.) getrennt voneinander erstellt wurden (vgl. Tabelle 16).



Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Verfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Analyse. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise die Ist-Situation). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Für die Bewertungskarten sowie die Planungshinweiskarte besteht die Bewertungsgrundlage aus der Kombination von Ist-Situation und den drei Szenarien der nahen Zukunft (Szenario 1 bis 3).

Daher wurden zunächst die Statistiken der Ist-Situation (als kühlsite Situation) und des Szenarios Starker Klimawandel (Szenario 3, 2031 – 2060, als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters“ miteinander verknüpft. Aus dieser neuen Grundgesamtheit über beide Situationen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation⁹:

- Nächtliche Temperatur für den Wohnsiedlungsraum:
Mittelwert = 19,17 °C Standardabweichung = 1,624 °C
- Nächtliche Temperatur für Verkehrsraum und unbewohnten Siedlungsraum:
Mittelwert = 20,10 °C Standardabweichung = 1,689 °C
- Wärmebelastung am Tag für den Siedlungsraum:
Mittelwert = 39,78 °C PET Standardabweichung = 5,441 °C PET

Das an den Bandbreiten der auftretenden Werte orientierte Vorgehen eröffnet die Möglichkeit, Bewertungen für beliebige Konstellationen innerhalb dieser Bandbreiten auch im Nachgang zu der vorliegenden Analyse durchzuführen.

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 42) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeren Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr geringe* – *geringe* – *mittlere* – *hohe* – *sehr hohe* bioklimatische Belastung eingeteilt (Tabelle 15). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert ($z = 0$) schwankenden Klassen.

Tabelle 15: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte (gerundet auf 1 Dezimalstelle) für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Bioklimatische Belastung am Tag	Klassengrenzen nach z-Transformation	Entsprechende PET-Werte [°C]
Sehr gering	$z \leq -0,75$	$PET \leq 35,7$
Gering	$-0,75 < z \leq -0,25$	$35,7 < PET \leq 38,4$
Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$38,4 < PET \leq 41,1$
Hoch	$0,25 < z \leq 0,75$	$41,1 < PET \leq 43,9$
Sehr hoch	$z > 0,75$	$PET > 43,9$

⁹ Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte aus den Modellergebnissen verwendet, die innerhalb des Siedlungsraums liegen (Wohn- und Gewerbegebiete sowie Straßenraum), da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt.



Für das Zukunftsszenario 6 („starker Klimawandel“, „ferne Zukunft“) wurde eine sechste Klasse mit dem Grenzwert $Z > 2,0$ eingeführt, denn aufgrund der großen Differenz der Starttemperatur der Modellierung (+ 4,9 K, vgl. Tabelle 7) wurde dies notwendig, um eine Differenzierung in den höheren Klassen zu erhalten. In die Klasse „Extrem hohe Belastung“ fallen im Szenario 6 67,3 % (Tabelle 18).

Tabelle 16: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen (gerundet auf 1 Dezimalstelle) für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht

	Bioklimatische Belastung in der Nacht	Klassengrenzen nach z-Transformation	Entsprechende Temperaturen (T04) [°C]	
			Wohnsiedlung	Verkehrsraum und unbewohnter Siedlungsraum
	Sehr gering	$z \leq -0,75$	$T04 \leq 18,0$	$T04 \leq 18,8$
	Gering	$-0,75 < z \leq -0,25$	$18,0 < T04 \leq 18,8$	$18,8 < T04 \leq 19,7$
	Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$18,8 < T04 \leq 19,6$	$19,7 < T04 \leq 20,5$
	Hoch	$0,25 < z \leq 0,75$	$19,6 < T04 \leq 20,4$	$20,5 < T04 \leq 21,4$
	Sehr hoch	$z > 0,75$	$T04 > 20,4$	$T04 > 21,4$
	Extrem hoch (nur Szenario 6)	$Z > 2,0$	$T04 > 22,4$	$T04 > 23,5$

In der Darstellung der Nachtsituation wird neben der Überwärmung zusätzlich auf den Kaltlufthaushalt eingegangen. Zu einem gewissen Anteil wirkt sich die Kaltluft bereits auf die nächtliche Lufttemperatur in den einzelnen Flächen aus. Analog zu den Klimaanalysekarten wurden Siedlungsflächen mit einer Kaltluftvolumenstromdichte über dem Medianwert von $7,06 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{s}$ und gleichzeitig einer Strömungsgeschwindigkeit $> 0,1 \text{ m/s}$ als sogenannter Kaltlufteinwirkungsbereich dargestellt. Die Durchlüftung einer Fläche kann sich positiv auf angrenzende Flächen auswirken. Diesen Flächen wird eine Klimafunktion zugeschrieben, sie sind über eine Schraffur in der Bewertungskarte (Nacht) sichtbar.

8.3.2 AUSGLEICHsRAUM

Während in den Klimaanalysekarten die dem Ausgleichsraum zugehörigen Grün- und Freiflächen, landwirtschaftlichen Flächen und Wälder vornehmlich siedlungsunabhängig anhand ihres Kaltluftliefervermögens gekennzeichnet werden, steht in den Bewertungs- und der Planungshinweiskarte deren stadtklimatische Bedeutung sowie die Ableitung der Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsänderungen im Mittelpunkt.

Zur stadtklimatischen Bewertung des Ausgleichsraums in der Nacht rückt dessen Funktion für den Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit den besonderen Kaltluftprozessen (Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüsse, Parkwind) stehende Fläche automatisch eine *sehr hohe bioklimatische Bedeutung*.

Im Hinblick auf planungsrelevante Belange spielt zusätzlich der Siedlungsbezug der Flächen im Ausgleichsraum eine Rolle. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb des Ausgleichsraums entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Die Fläche des Ausgleichsraums spielt dabei eben-



falls eine Rolle: Flächen von weniger als 0,2 Hektar Größe werden als weniger relevant in Bezug auf nächtliche Ausgleichsfunktion bewertet. Die folgende Abbildung 43 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- *„Kaltluftvolumenstrom überdurchschnittlich“*: Flächenmittelwert für Kaltluftvolumenstromdichte ist größer als der Mittelwert aller Ausgleichsflächen ($11,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)
- *„Im Bereich von“*: Entfernung bis 250 m Luftlinie

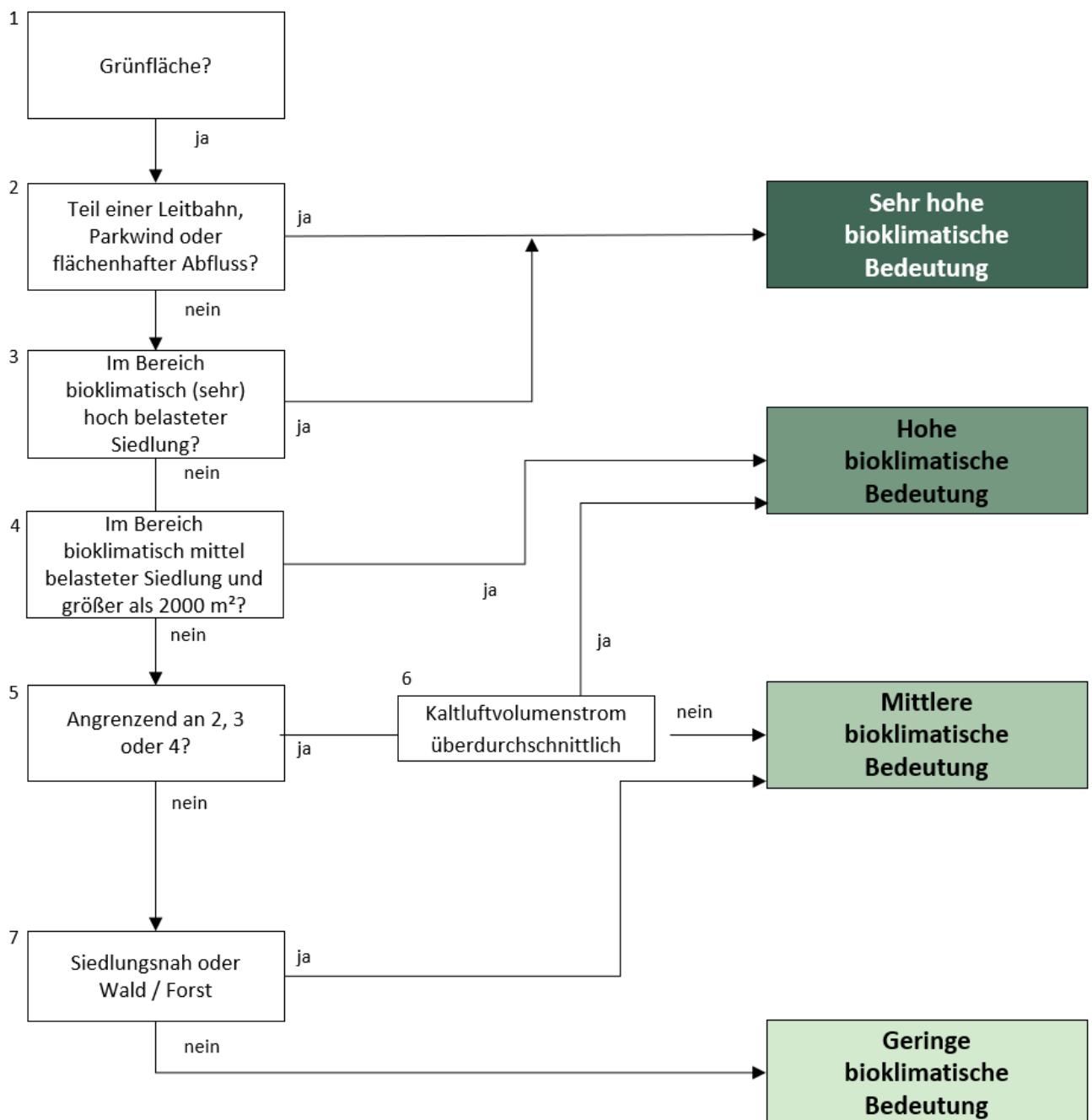


Abbildung 43: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht

Für die Tag-Situation wird die bioklimatische Bedeutung (Aufenthaltsqualität) auf den Flächen im Ausgleichsraum in einer fünfstufigen Skala von *sehr hoch* bis *sehr gering* bewertet (Tabelle 17). Dies geschieht



wiederum über die oben beschriebene z-Transformation, der folgende statistische Werte zugrunde lagen (Flächenkulisse: alle Ausgleichsräume im Stadtgebiet von Fürth):

- PET für den Ausgleichsraum am Tag: Mittelwert = 37,59 °C PET / Standardabweichung = 6,841 °C

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag im gesamten Stadtgebiet, sodass die Aufenthaltsqualität auf den Flächen im Ausgleichsraum sinken kann. Damit nimmt die Anzahl ungünstig bewerteter Flächen zu, was jedoch nicht meint, dass deren Bedeutung für das Stadtklima abnimmt. Vielmehr ist es ein Hinweis darauf, dass die Wärmebelastung auf den Flächen ohne Aufwertung und angepasste Pflege zunehmen wird. Sie behalten jedoch eine wichtige stadtklimatische Ausgleichsfunktion für den stärker belasteten Siedlungsraum.

Tabelle 17: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte (gerundet auf 1 Dezimalstelle) für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen		Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
	Sehr hoch	$z \leq -0,75$	$PET \leq 32,5$
	Hoch	$-0,75 < z \leq -0,25$	$32,5 < PET \leq 35,9$
	Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$35,9 < PET \leq 39,3$
	Gering	$0,25 < z \leq 0,75$	$39,3 < PET \leq 42,7$
	Sehr gering	$z > 0,75$	$PET > 42,7$

8.3.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

Abbildung 44 zeigt einen Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nacht, in der Ist-Situation. Die Flächen mit *hoher oder sehr hoher* Belastung sind lediglich im hoch verdichteten Innenstadtbereich zu lokalisieren und nehmen nur 2,1 % Flächenanteil ein. Bereiche mit *mittlerer* Belastung in der Nacht sind in der Ist-Situation vereinzelt über das gesamte Stadtgebiet verstreut, konzentrieren sich aber in Innenstadt und nördlichen Teil der Südstadt. Sie nehmen ca. 15 % der Siedlungsfläche ein. Der weitaus größte Flächenanteil in der Ist-Situation (83 %) des Siedlungsbereichs wird von *geringer* und *sehr geringer* Wärmebelastung in der Nacht geprägt. Der Stadtteil Dambach fällt beispielsweise fast ausschließlich in die Kategorie „sehr geringe Wärmebelastung in der Nacht“ in der Ist-Situation. Tabelle 18 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Belastungskategorien pro Szenario.

Die Bewertungskarten für die Nacht für die 6 Zukunftsszenarien werden als Ausschnitte in Abbildung 45 gegenübergestellt. In den Zukunftsszenarien erhöht sich die Belastung in der Nacht stufenweise. Bereits in Szenario 1 sind ca. 28 % der Siedlungsflächen *hoch* oder *sehr hoch* belastet, darunter fast die gesamte Innenstadt und fast die gesamte Südstadt sowie die großen Gewerbegebiete (Hardhöhe, Hardhöhe West, Weikershof, Gewerbegebiet an der Industriestraße). Im Szenario „Starker Klimawandel“ für die nahe Zukunft kehren sich die Größenverhältnisse um, und über 95 % der Siedlungsflächen weisen eine *hohe* oder *sehr hohe* Wärmebelastung in der Nacht auf.

Das Bewertungsschema für den Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) basiert auf den Kaltluftprozessen, und der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden Wohnsiedlungsflächen (vgl. Abbildung 43). Folglich liegen die Flächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung, in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen direkt angrenzend an Wohnsiedlungsflächen mit mindestens mittlerer Wärmebelastung in der Nacht.



In den Zukunftsszenarien kommen die städtebaulichen Entwicklungsflächen mit ihrem jeweiligen Belastungsgrad als zusätzlicher Wirkraum dazu, und die angrenzenden Grün- und Freiflächen bekommen jeweils entsprechend eine höhere bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsraum bzw. Kaltluftlieferant in der Nacht zugeordnet. Der Anteil von Flächen mit *hoher* bzw. *sehr hoher* Bedeutung erhöht sich außerdem deutlich aufgrund der Zunahme von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen (Tabelle 19). Bei den Freiflächen sehr geringer bioklimatischer Bedeutung für das Stadtklima handelt es sich um die (meist) großflächigen landwirtschaftlichen Flächen im Umland, mit Abstand zur Siedlungsfläche von mindestens einigen Hundertmetern.

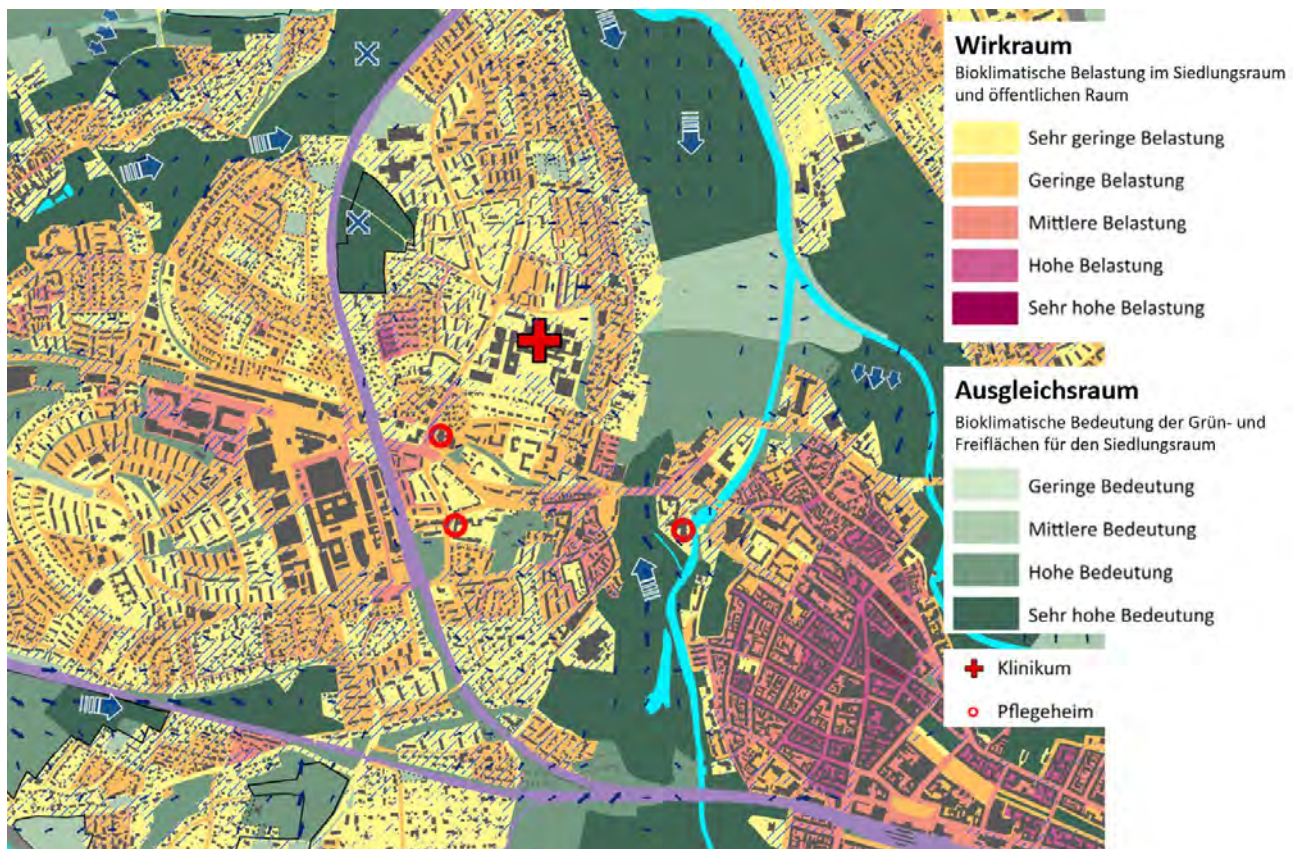


Abbildung 44: Ausschnitt aus der Bewertungskarte für die Nachtsituation (Ist-Situation), verkürzte Legende

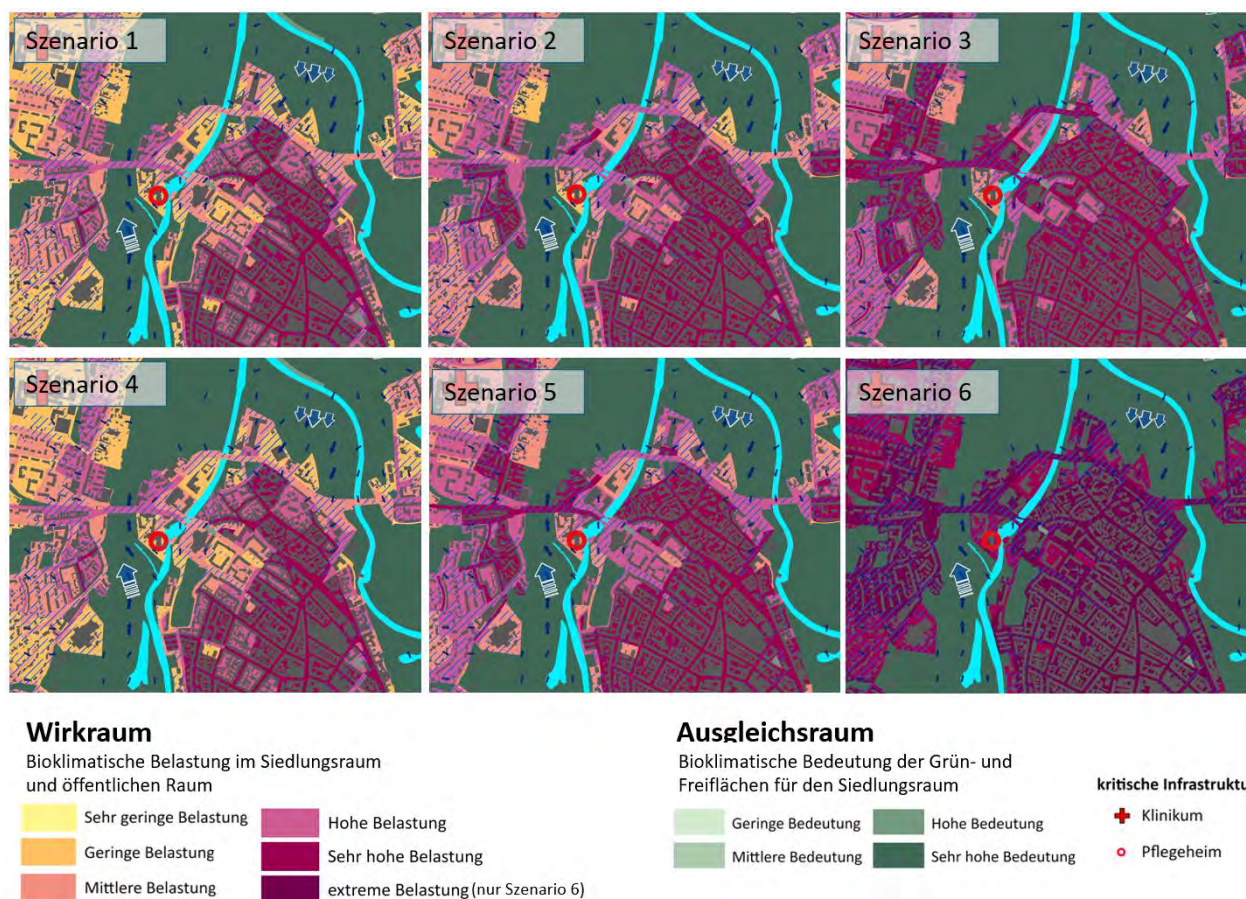


Abbildung 45: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation für die 6 Szenarien, verkürzte Legende

Tabelle 18: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung von Siedlungsflächen in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung in der Nacht		Flächenanteile						
		Ist-Situation	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
Sehr gering		41,3 %	5,2 %	1,9 %	0,5 %	5,2 %	1,1 %	0,0 %
Gering		41,7 %	24,2 %	8,0 %	2,2 %	24,2 %	3,7 %	0,0 %
Mittel		14,9 %	42,8 %	36,6 %	11,8 %	42,8 %	22,9 %	0,1 %
Hoch		2,0 %	23,4 %	39,8 %	41,8 %	23,4 %	43,7 %	0,4 %
Sehr hoch		0,1 %	4,4 %	13,7 %	43,7 %	4,4 %	28,6 %	32,1 %
Extrem hoch		-	-	-	-	-	-	67,3 %



Tabelle 19: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung von Ausgleichsräumen in Bezug auf den Siedlungsraum in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Bedeutung in der Nacht		Flächenanteile						
		Ist- Situation	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
	Gering	15,1 %	10,9 %	8,6 %	6,0 %	10,9 %	6,1 %	5,1 %
	Mittel	30,8 %	16,1 %	12,9 %	10,7 %	16,1 %	11,0 %	10,1 %
	Hoch	28,5 %	21,4 %	18,3 %	13,8 %	21,4 %	16,9 %	5,6 %
	Sehr hoch	25,6 %	51,7 %	60,1 %	69,5 %	51,7 %	66,0 %	79,2 %

Die Bewertungskarten für die Tagsituation werden in Ausschnitten für die Kernstadt in Abbildung 46 dargestellt, und für die Zukunftsszenarien in Abbildung 47. Grundsätzlich verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet, vorrangig abhängig von Verschattungsgrad durch Bäume und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Die Innenstadt, nördliche Teile der Südstadt sowie Gewerbe- und Industriegebiete mit großflächig versiegelten Parkplätzen stechen durch relativ hohe Belastung heraus. Aber auch weniger dicht bebaute Wohngebiete ohne genügend Baumbestand, wie zum Beispiel in Burgfarnbach sind in der Ist-Situation bereits hoher Hitzebelastung ausgesetzt. Tabelle 20 zeigt, dass sich in der Ist-Situation ca. 15 % der Siedlungsflächen in der Belastungsklasse „hoch“ oder „sehr hoch“ befinden. Im Szenario 3 („starker Klimawandel“, „nahe Zukunft“) sind es 68 %.

Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte in den Zukunftsszenarien an Erholungspotenzial für den Menschen am Tage. In der Ist-Situation wird ein Anteil von ca. 38 % der Flächen mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung eingestuft – hierbei handelt es sich ausnahmslos um Waldflächen oder solche mit hohem Baumanteil. Im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ für die nahe Zukunft (Szenario 3) belegen nur noch 29 % diese höchste Einstufung (Tabelle 21). Die baumlosen Freiflächen mit niedriger Vegetation verlieren aufgrund der im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ modellierten reduzierten Bodenfeuchte am deutlichsten an Erholungsfunktion, da sie der stärksten Zunahme von PET-Werten unterliegen. Fast 63 % der Grün- und Freiflächen wird im Szenario „starker Klimawandel“ für die nahe Zukunft nur noch eine sehr geringe bioklimatische Bedeutung zugeordnet, in der fernen Zukunft (Szenario 6) sind es knapp 72 % (Ist-Situation: 38 %). Die Bezeichnung „bioklimatische Bedeutung“ bezieht sich explizit auf das Erholungspotenzial auf Basis der PET-Werte. Die faktische Bedeutung bzw. Notwendigkeit als Ausgleichsraum ist – angesichts steigender Temperaturen – davon unberührt bzw. nimmt in Zukunft eher zu.

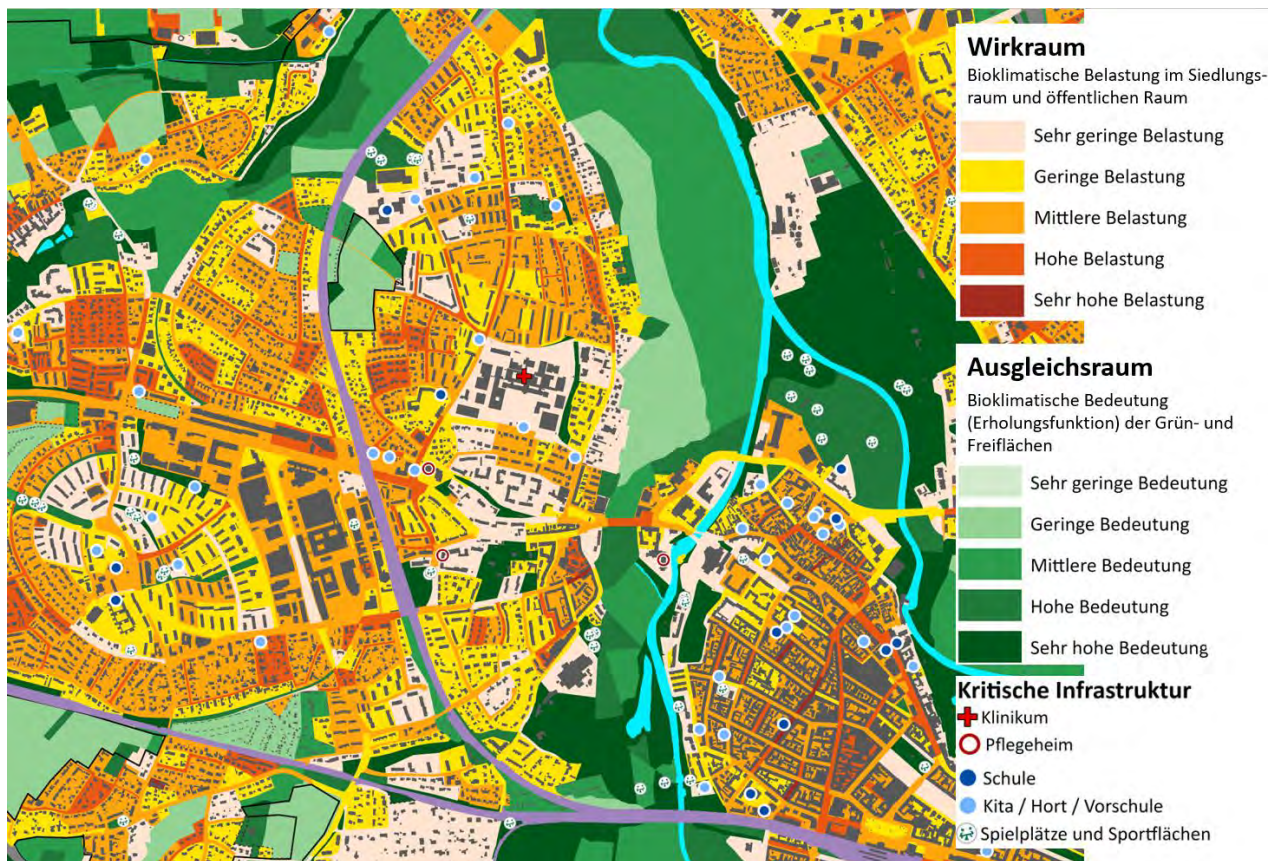


Abbildung 46: Ausschnitt aus der Bewertungskarte für die Tagsituation (Ist-Situation, verkürzte Legende)

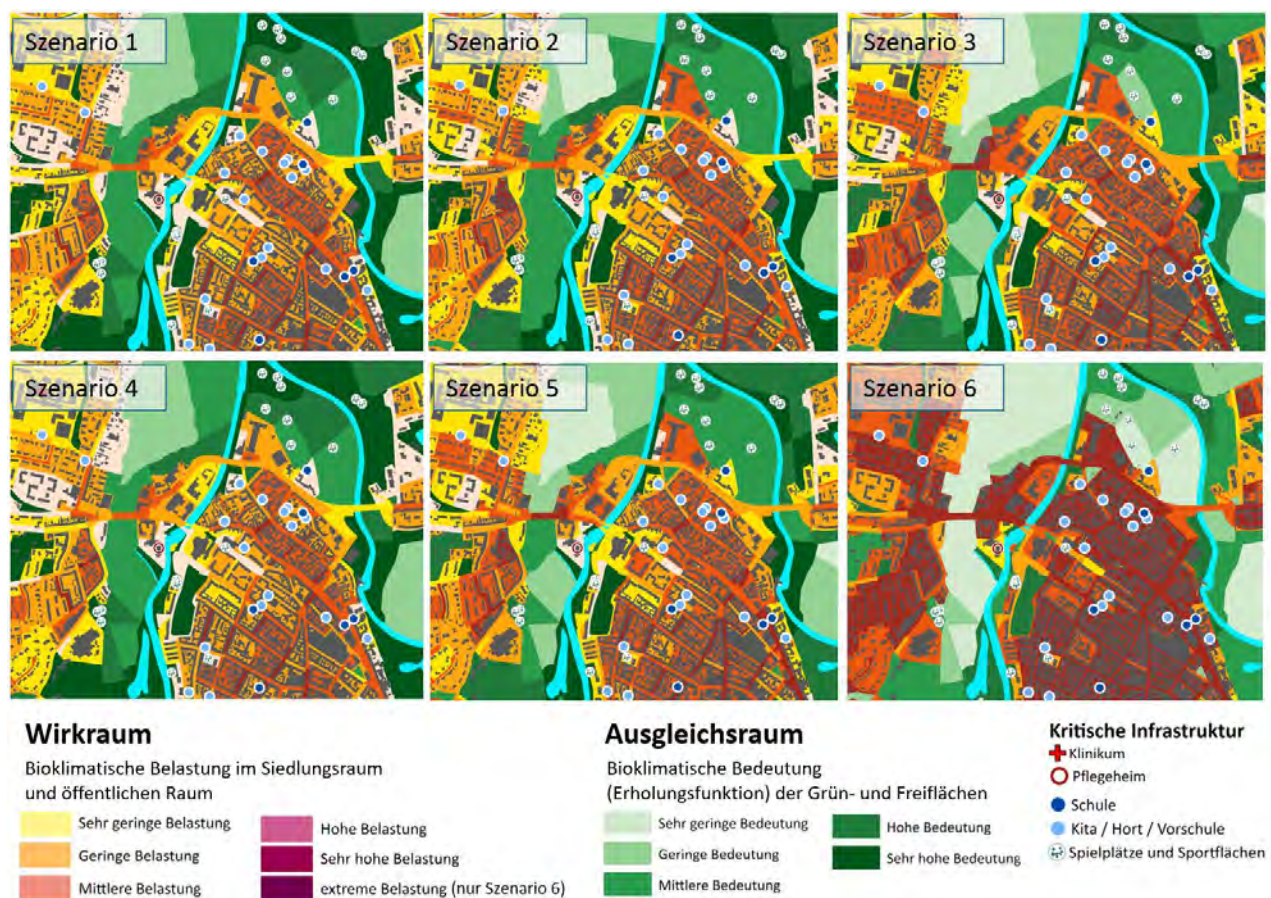


Abbildung 47: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation für die 6 Szenarien, verkürzte Legende



Tabelle 20: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung am Tage		Flächenanteile						
		Ist-Situation	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
	Sehr gering	18,1 %	10,2 %	6,9 %	4,1 %	10,2 %	4,6 %	0,2 %
	Gering	25,0 %	16,4 %	13,0 %	8,4 %	16,4 %	9,6 %	2,6 %
	Mittel	42,1 %	36,5 %	28,1 %	19,9 %	36,5 %	22,7 %	6,5 %
	Hoch	14,6 %	35,0 %	46,0 %	48,2 %	35,0 %	49,0 5	18,1 %
	Sehr hoch	0,1 %	1,9 %	6,1 %	19,3%	1,9 %	14,0 %	72,6 %

Tabelle 21: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die potenzielle Erholungsfunktion am Tage, nach Modellierungsszenario

Aufenthaltsqualität / bi- oklimatische Bedeutung an Sommertagen		Flächenanteile						
		Ist- Situation	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4	Szenario 5	Szenario 6
	Sehr gering	3,8 %	13,1 %	27,6 %	42,2 %	13,1 %	38,5 %	64,2 %
	Gering	34,2 %	33,5 %	28,4 %	20,4 %	33,5 %	23,1 %	7,4 %
	Mittel	24,1 %	18,7 %	13,1 %	8,7 %	18,7 %	8,9 %	4,7 %
	Hoch	9,5 %	7,0 %	4,9 %	4,9 %	7,0 %	5,0 %	23,5 %
	Sehr hoch	28,4 %	27,7 %	26,1 %	23,8 %	27,7 %	24,4 %	0,2 %

8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte der Klimaanalyse fasst die Ergebnisse der Bewertungskarten Tag bzw. Nacht für jeweils die Ist-Situation und drei Szenarien der nahen Zukunft zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar. Abbildung 48 zeigt einen Ausschnitt der Karte.

Im Siedlungsraum (= Wirkraum) wird die stadtklimatische Handlungspriorität dargestellt. Für die Einteilung wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert, wobei Tag- und Nachtbewertung gleich gewichtet sind. Das Ergebnis sind wiederum fünf Belastungsklassen (sehr gering – gering – mittel – hoch – sehr hoch) für die Gesamtbewertung.



Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute (Ist-Situation) eine hohe oder sehr hohe bioklimatische Belastung aufweisen. Die weitere Bewertungs-Abstufung setzt sich wie in Tabelle 22 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist („klimatisch resilienter Bereich“). Das Handlungserfordernis lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Die Flächen ohne vorrangige Handlungspriorität behalten auch unter der Annahme eines „starken Klimawandels“ ihre (sehr) günstige humanbioklimatische Situation bei. Sie können als sehr robust gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden.

Tabelle 22: Methodische Herleitung der stadtklimatischen Handlungsprioritäten und der Anteil an den Flächen des Wirkraums.

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Handlungspriorität 1	Flächen, die bereits heute eine Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung sind	7,1 %
Handlungspriorität 2	Flächen, die bereits bei schwachem Klimawandel zu einem Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung werden können	32,0 %
Handlungspriorität 3	Flächen, die bei moderatem Klimawandel ein Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung werden können	24,0 %
Handlungspriorität 4	Flächen, die erst bei starkem Klimawandel ein Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung werden können	21,1 %
Klimatisch resilienter Bereich	Flächen, die auch bei starkem Klimawandel nicht zu einem Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung werden	15,8 %

Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tag und Nacht. „Erhöhte Wärmebelastung“ bedeutet eine Gesamtbewertung „hoch“ oder „sehr hoch“

Ein Großteil der Innenstadt und Südstadt ist mit Handlungspriorität 1 oder 2 belegt, ebenso wie ein Großteil der Gewerbeflächen, und viele dicht bebaute Siedlungsbereiche in den Stadtteilen. Die Handlungsprioritäten sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird¹⁰. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 23 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen.

Die nachfolgenden Maßnahmenempfehlungen stehen unter dem Vorbehalt der Abwägung im Einzelfall mit weiteren für die Stadtentwicklung relevanten Aspekten, wie etwa Wohnen, Wirtschaft oder Infrastruktur.

¹⁰ Es können (und sollen im Falle von Gelegenheitsfenstern) also auch stadtklimatischen Anpassungsmaßnahmen bspw. in Flächen der Handlungspriorität 3 umgesetzt werden, wenn noch nicht alle Flächen in den höheren Handlungsprioritäten angepasst wurden.



Planungsrechtliche Vorgaben des Baugesetzbuchs (BauGB) bleiben hiervon unberührt. Das vorliegende Konzept ist als städtebauliches Entwicklungskonzept gemäß § 1 Abs. 6 Nr. 11 BauGB in der planerischen Abwägung bei der Aufstellung der Bauleitpläne der Stadt Fürth zu berücksichtigen.

Tabelle 23: Mit den stadtklimatischen Handlungsprioritäten im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum		Planungshinweise
	Handlungspriorität 1	Sehr hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen. Es sollte keine weitere bauliche Verdichtung (insbes. Zu Lasten der Grün- und Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sollten erhalten, der Vegetationsanteil erhöht und Entsiegelungsmaßnahmen umgesetzt werden
	Handlungspriorität 2	Hohe Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen. Bei baulichen Entwicklungen und Bau- und Straßensanierungen sollten Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation und Durchlüftung (u.a. Baukörperstellung) (prioritär) umgesetzt werden. Es sollte keine weitere Verdichtung (insbes. zu Lasten der Grün- und Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sollten erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden.
	Handlungspriorität 3	Mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen. Bei baulichen Entwicklungen und Bau- und Straßensanierungen werden Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation empfohlen. Eingriffe sollten nicht zu einer Verschlechterung der thermischen Situation führen. Freiflächen sollten nach Möglichkeit erhalten und der Vegetationsanteil erhöht werden.
	Handlungspriorität 4	Geringe bis mittlere Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen. Bei baulichen Entwicklungen und Bau- und Straßensanierungen sollten Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation beachtet werden. Der Vegetationsanteil sollte erhalten bleiben.
Klimatisch Bereich	resilienter	Vorwiegend offene Siedlungsstruktur mit guter Durchlüftung und einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierungen. Klimaökologische Standards sollten bei allen baulichen Entwicklungen trotzdem eingehalten werden, um die günstige bioklimatische Situation zu erhalten.

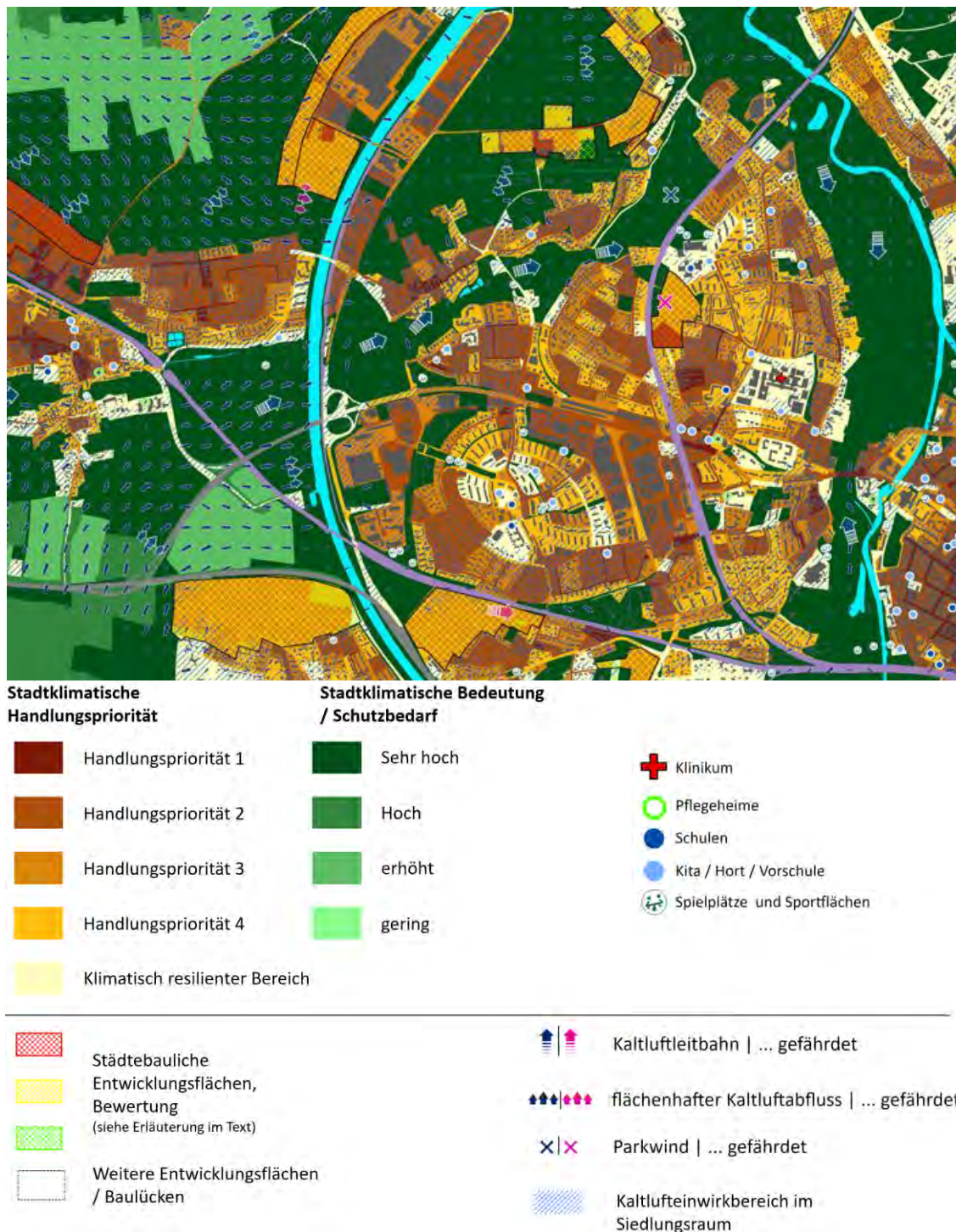


Abbildung 48: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima, verkürzte Legende

8.4.1 STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt (nachts) bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert. Tag- und Nachtbewertung sind gleich gewichtet bis auf die Ausnahme, dass Leitbahnflächen automatisch auch in der Gesamtbewertung die höchste Bewertung bekommen. Das Ergebnis sind wiederum fünf Bewertungsklassen (sehr gering – gering – mittel – hoch – sehr hoch) für die Gesamtbewertung.



Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung. Als Bewertungsmaßstab werden die Szenarien Ist-Situation, sowie „schwacher Klimawandel“ und „moderater Klimawandel“ (Szenario 1 bzw. 2) für die nahe Zukunft herangezogen. Flächen, die in mindestens einer dieser drei Szenarien in die Kategorie der höchsten Bedeutung für das Stadtklima fallen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen. Die weitere Abstufung erfolgt entsprechend Tabelle 24.

Der hohe Anteil von Flächen mit hohem oder sehr hohem stadtklimatischen Schutzbedarf (64,4 % aller Flächen im Ausgleichsraum) geht auf die großen siedlungsnahen Leitbahnflächen in Fürth zurück, die in der Nacht sehr hohe Bedeutung aufweisen. Aber auch die übrigen landwirtschaftlichen Flächen, die an belastete Wohnsiedlungen angrenzen, fallen aufgrund ihrer Bedeutung für die nächtliche Kaltluftversorgung in die Kategorie mit hohem oder sehr hohem Schutzbedarf. Der Fürther Stadtwald, städtische Friedhof, Stadtpark sowie die Waldfläche östlich der Parkstraße in Dambach nehmen zusätzlich aufgrund ihrer hohen Bedeutung für die Tagsituation große Flächenanteile mit höchstem Schutzbedarf ein.

In Abhängigkeit vom Schutzbedarf der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen. Die entsprechenden Planungshinweise sind in Tabelle 25 zugeordnet. Bei einem *sehr hohen Schutzbedarf* wird eine Entwicklung beispielsweise nur dann als stadtklimaverträglich gewertet, wenn die grundsätzliche Klimafunktion berücksichtigt wird (z.B. die Funktion als Kaltluftleitbahn oder ihre Wirkung als öffentliche Grünfläche mit hoher Aufenthaltsqualität an heißen Tagen). Bei der weiteren Abstufung ist die Funktion der jeweiligen Flächen zu beachten, wobei die Art und Größe des Vorhabens im Einzelfall bestimmen, welche Vorgaben zur stadtklimatischen Prüfung einzuhalten sind. Dabei kann die klimafachliche Begleitung einer Planung sowohl von städtischer Seite aus als auch durch externe Gutachter:innen erfolgen.

Tabelle 24: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums.

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Ausgleichsraum
Sehr hohe Bedeutung und Schutzbedarf	Sehr hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien Ist-Situation, Szenario 1 oder Szenario 2	64,4 %
Hohe Bedeutung und Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien Ist-Situation, Szenario 1 oder Szenario 2	14,3 %
Erhöhte Bedeutung und Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien Ist-Situation, Szenario 1 oder Szenario 2	15,5 %
Geringe Bedeutung und Schutzbedarf	Übrige Flächen	5,8 %



Tabelle 25: Mit dem stadtklimatischen Schutzbedarf im Ausgleichsraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
Sehr hoher Schutzbedarf	Für die Siedlungsstruktur besonders wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer sehr hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten - sofern bereits planungsrechtlich zulässig – nur unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen. Dabei sollte eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung sowie eine Vernetzung mit benachbarten Grün-/ Freiflächen zur Optimierung der klimatischen Ausgleichsleistung (Grünverbindungen) angestrebt werden.
Hoher Schutzbedarf	Für die gegenwärtige Siedlungsstruktur wichtige klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren bis hohen Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen und eine gute Durchströmbarkeit der angrenzenden Bebauung angestrebt werden.
Erhöhter Schutzbedarf	Für die Siedlungsstruktur ergänzende klimaökologische Ausgleichsräume mit einer mittleren Empfindlichkeit gegenüber Nutzungsintensivierung. Die angrenzende Bebauung profitiert von den bereit gestellten Klimafunktionen, ist in aller Regel aber nicht auf sie angewiesen. Bauliche Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen (z.B. Baukörperstellung).
Geringer Schutzbedarf	Flächen stellen für die gegenwärtige Siedlungsstruktur keine relevanten Klimafunktionen bereit bzw. befinden sich im Umfeld von Siedlungsflächen ohne nächtliche Überwärmung. Diese Areale weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber einer Nutzungsintensivierung auf und lassen am ehesten ein Potenzial für eine bauliche Entwicklung erkennen. Baumaßnahmen sollten dennoch klimaverträglich umgesetzt werden.

8.4.2 STADTKLIMATISCHE BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen sind in der Planungshinweiskarte mit einer schwarzen durchgezogenen Umrandung versehen. Grundlage dafür sind die Flächen aus der Bauleitplanung ab einer Mindestgröße von einem Hektar (vgl. Kapitel 5.2). Sie wurden in den Zukunftsszenarien modelliert und zeigen somit die potenziellen zukünftigen Hitzebelastungen am Tage und in der Nacht nach Umsetzung der Bebauungsplanung. Analog zu allen Siedlungsflächen wurde ihnen eine stadtklimatische Handlungspriorität zugewiesen. Zusätzlich zeigt die farbliche Schraffur die Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit dieser Entwicklungsflächen an, welche auf der modellierten Handlungspriorität sowie (sofern gegeben) der bioklimatischen Bedeutung als Grünfläche in der Ist-Situation basiert. Die Kriterien für die Flächenbewertung sind ebenso wie die Bewertung selbst in Tabelle 26 aufgeführt.



Tabelle 26: Bewertungsgrundlagen der stadtklimatischen Verträglichkeit der städtebaulichen Erweiterungsflächen

Symbol	Kriterien für Flächen	Betrifft folgende Entwicklungsflächen	Bewertung
	• Stadtklimatische Handlungspriorität 1 oder 2 und Fläche ist in Ist-Situation Grünfläche mit höchster Bedeutung (Tag/Nacht)	Wohnbauflächen: • B-Plan 277 "Auf der Schwand" (teilweise) • Hüttendorfer Weg • B-Plan 413b "Löchlein-Nord" (teilweise) • B-Plan 396 "Schleifweg" (größtenteils) Gewerbliche Bauflächen: • Boxdorfer Straße • Burgfarnbach, nördlich der Veitsbronner Straße	Städtebauliche Entwicklung mit sehr hohem Bedarf an Maßnahmen zur Hitzeminderung. Klimafachliche Begleitung der Planung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse wird empfohlen.
	• Stadtklimatische Handlungspriorität 3 / 4 oder ohne und Fläche ist in Ist-Situation Grünfläche mit höchster Bedeutung (Tag/Nacht) • Oder: Stadtklimatische Handlungspriorität 1 bis 3 und Fläche ist in Ist-Situation Grünfläche mit geringer / sehr geringer Bedeutung (Tag/Nacht) • Oder: Stadtklimatische Handlungspriorität 2 / 3 und Fläche ist in Ist-Situation Grünfläche mit zweithöchster Bedeutung	Wohnbauflächen: • Loheäcker, Mannhof (nördlicher Teil) • B-Plan 413b "Löchlein-Nord" (teilweise) • B-Plan 438a "Westlich Magnolienweg" (größtenteils) • Oberfürberg Nord • Unterfürberg • B-Plan 278b "Banderbacher Weg" • B-Plan 278neu "Saatweg" • B-Plan 278d "Dambach West" • B-Plan 277 "Auf der Schwand" (größtenteils) • B-Plan 396b "ehemaliges Faurecia-Areal" • Alte Reutstraße • B-Plan 332b "Im Stöckig" • B-Plan 396 "Schleifweg" (teilweise) Gewerbliche Bauflächen: • B-Plan 460a "Bereich entlang der Flugplatzstraße und westlich der Vacher Straße – Golfpark" (größtenteils) • B-Plan 327a 1.Ä. "Gewerbegebiet Rezatstraße" • B-Plan 396b "ehemaliges Faurecia-Areal" • Industriestraße • westlich der Mainstraße • B-Plan 390b "nordöstlich Ortsteil Steinach"	Städtebauliche Entwicklung mit Bedarf an Maßnahmen zur Hitzeminderung. Klimafachliche Begleitung der Planung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse wird empfohlen.
	• In Ist-Situation bebaute Fläche wird zu Grünfläche • Oder: Grünfläche geringer oder sehr geringer Bedeutung in der Ist-Situation wird zu bebauter Fläche mit Handlungspriorität 4 oder ohne Handlungspriorität (klimatisch resilienter Bereich) • Oder: Grünfläche hoher Bedeutung in der Ist-Situation wird zu Siedlungsfläche ohne Handlungspriorität (klimatisch resilienter Bereich) • Oder: Grünfläche bleibt Grünfläche	Wohnbauflächen: • Loheäcker, Mannhof (südlicher Teil) • B-Plan 438a "Westlich Magnolienweg" (teilweise)	Städtebauliche Entwicklung ohne Bedarf an Maßnahmen zur Hitzeminderung. Klimaökologischer Standards sollten beachtet werden.



8.5 MASSNAHMENKATALOG

Die Planungshinweiskarte zeigt Bereiche in der Stadt Fürth auf, in denen Maßnahmen zur Verbesserung der thermischen Situation erforderlich bzw. empfehlenswert sind. Der nachstehende Maßnahmenkatalog zeigt die verschiedenen Möglichkeiten der Ausgestaltung auf und soll dazu dienen, die Planungshinweise zu konkretisieren. Für Fürth wurde ein Katalog aus 20 klimaökologisch wirksamen Einzelmaßnahmen identifiziert.

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 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 in Tabelle 27 beschrieben und in drei Cluster aufgeteilt:

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

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

Der vorhandene 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 Grünareale (Stadtwald, Wiesengrund, Stadtpark) Fürths 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 (vgl. GALK – Arbeitskreis Stadtbäume, 2023).

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

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und 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 allochthonen¹¹ 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 klimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung

¹¹ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)



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 (→ M20: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; (→ M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M15, M16, M17, M19).

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden – insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung. In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte dreifache Innenentwicklung maßgeblich (UBA, 2023). Dabei geht es um nachhaltige Stadtentwicklung als multifunktionale Siedlungs-, Verkehrs-, Frei- und Grünraumplanung.



Tabelle 27: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Fürth.

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

01 Innen-/Hinterhofbegrünung	Kurzerläuterung		
	Wirkung	Maßstabsebene	
- Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts - Erhöhung der Aufenthaltsqualität - Verbesserung des Mikroklimas - Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität	Block	Höfe, Hinterhöfe	Bild: Grün gestalteter Innenhof in Fürth (Quelle: © msh stadtplanung GbR)

Hinweise zur Umsetzung

In Fürth bietet sich als erstes die Flächen mit oberster klimatischer Handlungspriorität (Flächen, die bereits heute ein Belastungsraum mit erhöhter Wärmebelastung sind, vgl. Planungshinweiskarte) für die Umsetzung der Maßnahme an. Hierzu können Innen- oder Hinterhöfe entkernt oder entsiegelt werden. Zentrale Akteure bei der Maßnahmenumsetzung sind zum einen Privatpersonen (EigentümerInnen und BewohnerInnen) und die Privatwirtschaft (Wohnungsbaugesellschaften). Wettbewerbe und Förderprogramme können für diese Gruppe aktivierend wirken. Als effektiv haben sich in vielen Städten auch Nachbarschaftsaktionen zur Gestaltung der Hinterhöfe erwiesen. Zum anderen kann die Öffentliche Hand in ihren eigenen Liegenschaften direkt tätig werden. Eine besondere Aufmerksamkeit sollte dabei auf gleichzeitig vulnerable und sensible Einrichtungen wie KiTas, Alten-/ Pflegeheime und Krankenhäuser sowie Grundschulen und Betreutes Wohnen und Flüchtlingsunterkünfte gerichtet werden. Hier können zielgerichtet auch für diese „Wohnformen“ qualitätsvolle Aufenthaltsräume unmittelbar im Hinterhof oder auf dem Gelände angelegt werden. Treffen vulnerable Einrichtungen mit besonders wärmebelasteten Flächen zusammen, sollte eine prioritäre Umsetzung erfolgen.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

02	Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen	Kurzerläuterung	
		▪ Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten	
Wirkung		Maßstabsebene	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		Block	▪ Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)



Bild: Hallplatz (Quelle: © Stadt Fürth)

Hinweise zur Umsetzung

Frei zugängliche Grünflächen sind beispielsweise Waldgebiete oder öffentliche Parkanlagen, aber auch kleinere Pocket-Parks und Friedhöfe. Ziel dieser Maßnahme sind insbesondere fußläufig schnell und gut erreichbare (manchmal auch gärtnerisch gestaltete) Grün- oder Brachflächen im innerstädtischen Raum, aber auch öffentliche Parkanlagen, oder kleinere Pocket-Parks sowie die (Neu-)Gestaltung von Friedhöfen. Neue, frei zugängliche Grünflächen werden vornehmlich auf ungenutzten oder brachliegenden Flächen oder Baulücken errichtet, so dass die zentralen Akteure von den jeweiligen Besitzverhältnissen abhängig sind. Ihre Ausstattung reicht von einfachen Pflanzenbeeten und Bänken unter Bäumen über Pocket-Parks bis hin zu größeren Grünflächen. Die Anlage von zusammenhängenden größeren Grünflächen wie Parkanlagen oder urbanen Wäldern im Umfeld stark bebauter Stadtquartiere ist besonders anzustreben. Sie sind sowohl für den nächtlichen Kaltlufthaushalt als auch für die Erholung vom thermischen Stress am Tage von besonderer Bedeutung. Bei der Neuanlage bzw. Umgestaltung sollte vor allem auf eine ausreichende Mikroklimavielfalt sowie auf eine Vermeidung von Austauschbarrieren geachtet werden.

Mittlerweile gibt es mehrere Studien zur Wirkung von „Grün“ auf die Gesundheit und Psyche, die Kowarik et al. in ihrem Bericht zu den Ökosystemdienstleistungen in der Stadt zusammengefasst und ausgewertet haben. Die Durchgrünung der Stadt besitzt bereits präventive Wirkung, da sie zur Bewegung an der frischen Luft einlädt, dadurch Stress reduzieren oder bspw. auch Lärm und Schadstoffbelastung mindern kann (Kowarik et al., 2016).



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

03	Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten	Kurzerläuterung	
		Helle Farben (insbesondere von Dächern und Fassaden) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern	
Wirkung		Maßstabsebene	Räumliche Umsetzung
Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts		- Gebäude - Straßenraum	- Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand) - ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



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

Hinweise zur Umsetzung

Ein Maß für das Rückstrahlvermögen von Oberflächen ist die Albedo. Sie gibt das Verhältnis von einfallender zu reflektierter Strahlung an und wird in Werten von null bis eins angegeben. Eine hohe Albedo hat aus thermischer Perspektive sowohl eine positive Auswirkung auf die Wärmeleitung als auch auf die Lufterwärmung. Je höher also die Albedo der Baumaterialien oder der Fassadenanstriche („cool colors“) ist, desto mehr einfallende Sonnenstrahlung wird von ihnen reflektiert und desto geringer fällt die Erwärmung der Oberfläche und der angrenzenden Luftmassen aus. Die Maßnahme kann zum einen beim Neubau von Gebäuden und Straßen angewendet werden. Vor allem bei Südfassaden, die der stärksten Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, ist ein heller Anstrich empfehlenswert (Abbildung 36). Dachflächen können ebenso mit einem hellen Material oder Anstrich versehen werden. Das weitaus größere Potenzial besteht allerdings im thermisch belasteten Bestand. Praktisch bei jedem Gebäude und jeder Fläche im Straßenraum kann im Rahmen der Instandhaltung oder Sanierung die Albedo der Fassade, des Daches oder ebenerdig versiegelter Flächen erhöht werden. Entsprechend vielfältig sind auch die entscheidenden Akteure. Vor allem in der Fürther Innenstadt und Südstadt ist der Denkmalschutzaspekt hervorzuheben, welcher für viele Fassaden Gestaltungsmöglichkeiten beschränkt.

Eine Erhöhung der Albedo kann allerdings auch negative Effekte haben (Migliari et al., 2025). Die Strahlung wird bei einer hohen Albedo reflektiert und nur noch zu geringen Teilen absorbiert, was dazu führt, dass sich die umgebende Lufttemperatur durch die Strahlungstemperatur erhöht. Da dies auch oftmals der Aufenthaltsbereich von Menschen ist, kann es zu einer Reduktion des thermischen Wohlbefindens führen. Bei der Verwendung von sehr hellen Materialien kann es weiterhin zu einer Blendung der Augen führen (Rodríguez Castillejos et al., 2017). Es überwiegt jedoch die positive Wirkung einer hohen Albedo an Häuserfassaden und auf Dächern, auf Plätzen sollte dagegen eine hohe Albedo vermieden werden und eher mittelhelle Materialien / Farben verwendet werden, um das thermische Empfinden der Menschen nicht zu beeinträchtigen. Plätze sollten eher verschattet als mit hellem Belag versehen werden.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

04 Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren	Kurzerläuterung - Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.) - niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen	
Wirkung - Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts - Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement	Maßstabsebene Block	Räumliche Umsetzung Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe

Bild: Parkplatz mit Rasengittersteinen in Lüneburg (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Hinweise zur Umsetzung

Unter dieser Maßnahme wird der Austausch von vollständig versiegelten Flächen zugunsten einer Komplettentsiegelung mit anschließender Begrünung oder zugunsten von teilversiegelnden Oberflächenmaterialien (z. B. Rasengittersteine, Fugenpflaster, Sickerpflaster) verstanden. Das Ziel der Maßnahme ist die (teilweise) Wiederherstellung der natürlichen Bodenfunktionen. Aus klimatischer Sicht sind vor allem die Effekte einer reduzierten Wärmespeicherung sowie einer erhöhten Verdunstungskühlung von Bedeutung. Entsiegelungsprojekte entsprechen zudem den Zielen des Bodenschutzes, des Hochwasserschutzes sowie eines naturnahen Wasserkreislaufs und unterstützen den Ansatz einer dezentralen Siedlungswasserwirtschaft. Die Maßnahme kann daher als multieffektiv bezeichnet werden. In Fürth ist sie insbesondere auf Parkplätzen, öffentlichen Plätzen, wenig befahrenen Straßen und teilweise auch Gehwegen (teilversiegelte Materialien wie Sickerpflaster, Fugenpflaster, wassergebundenen Decken), sowie Hinter- und Innenhöfen umsetzbar. Insofern können sowohl die Öffentliche Hand als auch Privatpersonen und die Privatwirtschaft als zentrale Akteure identifiziert werden.

Der erhöhte Vegetationsanteil senkt die umgebende Lufttemperatur und es kommt zur Verringerung des Regenwasserabflusses. Die Siedlung gewinnt an Ästhetik und bietet Erholungsmöglichkeiten vor Ort. Es entstehen neue Lebensräume, die im Idealfall mit weiteren vernetzt werden können.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

05 Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben	Kurzerläuterung ▪ Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum ▪ Verschattung und Witterungsschutz von ÖPNV Haltestellen ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren ▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere“ (BlueGreenStreets, 2022)	 Bild: Mit Bäumen beschattete Einkaufsstraße in Frankfurt Main (Quelle: © D. Lessmann, GEO-NET)
Wirkung ▪ Reduktion der Wärmebelastung insb. tagsüber bei Pflanzung neuer Bäume durch Verschattung, bei Entsiegelung durch Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien mit Niederschlagswassermanagement (Entlastung des Kanalnetzes bei Starkregen, Grundwasserneubildung, Verdunstungskühlleistung) und zur Biodiversität	Maßstabsebene Straßenraum	Räumliche Umsetzung ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

Hinweise zur Umsetzung

Besonders in und um Siedlungsräumen sorgen Bäume für Schatten an Geh- und Radwegen. Sie sollten möglichst an der Südseite der Straße gepflanzt werden, so dass die Straße bzw. der Gehweg um die Mittagszeit beschattet werden. Laubbäume sind zu bevorzugen: sie spenden im Sommer Schatten und lassen im Winter Licht und Sonnenstrahlung in die Häuser. Eine ausreichend dimensionierte Rigole schützt die Straßenbäume vor Befahrung. Anwohner können z.B. durch Baumpatenschaften dazu animiert werden, Baumrigolen attraktiv zu bepflanzen. Darüber hinaus übernehmen Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität.

Sonnenexponierte Bushaltestellen sollten mit einem Hitzeschutz versehen werden (Sonnenschutzfolien auf Glasflächen, Ersatz einzelner Glas- durch Holzflächen, Dachbegrünung, Trinkbrunnen o.ä.). Ein möglichst heller Asphalt (vgl. Maßnahme 03) und versickerungsfähige Gehwege (z.B. Verbundpflastersteine) (vgl. Maßnahme 04) reduzieren die Erwärmung zusätzlich. Entsiegelung und Begrünung auf kleiner Verkehrsflächen tragen zur Abkühlung des Lokalklimas bei und erhöhen die Aufenthaltsqualität. Stark frequentierte Fußgänger-Bereiche können zeitweise mit Sonnensegeln beschattet werden. Auf überdachten Parkplätzen kann in Kombination mit Photovoltaikmodulen Verschattung bei gleichzeitiger Produktion von Grünstrom z.B. für E-Ladesäulen erreicht werden.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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: Waagplatz, Fürth (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)
Wirkung Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber	Maßstabsebene - Verkehrs- und Straßenraum - Block	Räumliche Umsetzung Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld	

Hinweise zur Umsetzung

Straßen, (Geh- und Fahrrad-)Wege sowie Stadtplätze sind der zentrale öffentliche Aufenthaltsbereich der Stadtbevölkerung und der TouristInnen im Außenraum. Mit Blick auf den Klimawandel (häufigere und intensivere Hitzeperioden), den demographischen Wandel (höherer Anteil an hitzesensiblen Bevölkerungsgruppen), den zunehmenden Fußgänger- und Fahrradverkehr sowie die weiter steigenden TouristInnenzahlen sollte einer nicht gesundheitlich belastenden thermischen Situation auf diesen Flächen besondere Beachtung geschenkt werden. Die gezielte Verschattung stellt eine zentrale Maßnahme zur Verringerung der thermischen Belastung durch die direkte Sonneneinstrahlung am Tage dar.

Die zumeist ungehinderte Einstrahlung führt tagsüber zu einer hohen Wärmebelastung direkt auf den ebenerdig versiegelten Flächen. Für waagerechte Bodenoberflächen ist der Zeitpunkt der größten Sonneneinstrahlung der Sonnenhöchststand zur Mittagszeit.

Die Verschattung erfolgt im öffentlichen Raum oder Straßenraum mit Bäumen und Sträuchern, wird jedoch auch ergänzt durch Gebäudeanbauten (z. B. Markisen in Fußgängerzonen) oder Kleinbauten (z. B. Wartehäuschen an ÖPNV-Haltestellen). Perspektivisch ist mit einem großflächigeren Einsatz künstlicher Materialien zu rechnen wie z. B. Sonnensegel. Die beschatteten Straßen/Gehwege, Plätze und Parkplätze speichern weniger Wärme als die der Sonnenstrahlung ausgesetzten. Bei großflächiger Verschattung kann somit auch der nächtliche Wärmeinseleffekt und damit die thermische Belastung angrenzender Wohnquartiere reduziert werden. Bei verschatteten Parkplätzen wird zusätzlich die Wärmeemission der an- und abfahrenden Kraftfahrzeuge durch Verschattung und Verdunstungskühlung kompensiert und auch der Aufheizung der PKW-Innenräume wird vorgebeugt. Alternativ oder ergänzend können Überdachungen, Sonnensegel oder ähnliche Schatten liefernde Bauten eingesetzt werden. Aufgrund der fehlenden Verdunstung ist ihre Wirkung im Vergleich zur Bepflanzung jedoch herabgesetzt. Darüber hinaus übernehmen Bäume und Sträucher im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Durch die Begrünung wird das Gelände bzw. der Bereich ästhetisch aufgewertet. Bei der Umsetzung der Maßnahme 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. Im Bereich von Luftleitbahnen dürfen Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und sollten möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (siehe auch M12). Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (GALK – Arbeitskreis Stadtbäume, 2023; vgl. Klima-Arten-Matrix von Roloff et al., 2008). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen aufweisen, die zur Bildung von Ozon beitragen.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Kurzerläuterung	
		▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)	
Wirkung		Maßstabsebene	Räumliche Umsetzung
▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien mit Biodiversität		Quartier	▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Dr-Konrad-Adenauer-Anlage, Fürth (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Bild: Dr-Konrad-Adenauer-Anlage, Fürth (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Hinweise zur Umsetzung

Damit innerstädtische Grün- und Freiflächen (öffentliche Parkanlagen, aber auch kleinere Pocket-Parks und Friedhöfe) ihr Potenzial an klimaökologischen Dienstleistungen sowohl für die Tag- als auch für die Nachtsituation umfänglich ausschöpfen können, sollten sie möglichst vielfältige Mikroklimata bereitstellen. Als Leitbild kann die Grünflächengestaltung nach dem „Savannentyp“ (Kuttler, 2013, S. 271) dienen, die zu einem großen Anteil aus gut wasserversorgten Rasenflächen und kleinen Baumgruppen, die mit offenen multifunktionalen Wasserflächen (z. B. Wasserspielplatz und Retentionsraum für Starkregenereignisse), Hügellandschaften, verschatteten Wegen und Sitzgelegenheiten sowie weiteren Strukturmerkmalen (Beete, Rabatten, Blumenwiesen, Sukzessionsflächen) besteht. Die Übergangsbereiche zur angrenzenden Bebauung sollten offen gestaltet sein. Die Grün- und Freiflächen tragen – je nach Größe – zur nächtlichen Kaltluftproduktion bei und gewährleisten deren Abfluss und damit Belüftung von angrenzenden Wohnblöcken. Weiterhin sind mikroklimatisch vielfältige Grün- und Freiflächen für den Aufenthalt am Tage für alle Ziel- und Risikogruppen optimiert.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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 ▪ Erholungsraum ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien mit Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement	Maßstabs-ebene Grünflächen	Räumliche Umsetzung ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)	

Bild: im Stadtpark Fürth (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Hinweise zur Umsetzung

Großflächige Park- und Grünanlagen sind nicht nur aufgrund ihrer Bedeutung für den Kaltlufthaushalt besonders schützenswert, sondern auch, weil sie wichtige Erholungsflächen darstellen, die von den StadtbewohnerInnen inklusive der klimasensiblen Bevölkerungsgruppen am Tage gezielt aufgesucht werden. Angesichts der prognostizierten Zunahme an Sommertagen und Hitzeperioden ist zukünftig von einer stärkeren Nutzung und somit Inanspruchnahme der Grünflächen auszugehen. Der Klimawandel führt gleichzeitig zu mehr sommerlichen Hitze- und Trockenstress in den Park- und Grünanlagen. Die großen Flächen bieten neben der Reduzierung der Hitzebelastung am Tag auch Schutz vor Lärmimmissionen und dienen dem Regenwasserrückhalt.

Aufgrund der ansässigen Wohnbevölkerung sind die einschlägig bekannten Park- und Grünanlagen im unmittelbaren Bereich der Siedlungsflächen (Wohnblöcken) besonders schützenswert (Südstadtpark, Stadtpark, Dr.-Konrad-Adenauer-Anlage). Über den Fürther Flächennutzungsplan und den integrierten Landschaftsplan kann und wird der besonderen Schutzwürdigkeit dieser Flächen Rechnung getragen. Wälder gehören zu den besonders schützenswerten Biotopen. Die Waldfunktionen reichen von der CO₂ Deposition über den Arten- und Biotopschutz sowie die Grundwasserneubildung und den Bodenschutz bis hin zur Quelle für nachhaltige Rohstoffe und Energie. Auch wenn ihr nächtliches Kaltluftliefervermögen im Vergleich zum Freiland weniger stark ausgeprägt ist, sind Waldflächen dennoch elementarer Bestandteil des Luftaustauschsystems. Der Energieumsatz erfolgt zu einem großen Teil an den Grenzflächen zwischen dem weitgehend geschlossenen Kronendach und den darüber liegenden Luftschichten. Kaltluft entsteht also über dem Kronendach und sinkt dann aufgrund ihrer höheren Dichte und damit Schwere in den Stammraum ein. Tagsüber verschattet der Wald den Erdboden und die Erwärmung ist daher gegenüber dem Freiland verringert, was im Vergleich zu einem angenehmeren Bioklima führt. Kühlere Luft kann auch tagsüber aus den Wäldern in die unmittelbare Umgebung abfließen. Der gleiche Effekt führt nachts dazu, dass die bodennahen Luftschichten sich nicht so schnell abkühlen. Hieraus resultieren im Vergleich zum Offenland geringere Kaltluftvolumina im Stammraum, deren Ausströmen durch die Kraut- und Strauchschicht zusätzlich behindert wird, wenn es nicht durch Hangneigungen von > 1° zu Kaltluftabflüssen kommt. Neben diesen beiden thermischen Effekten, erfüllen Stadtwälder durch ihre große Oberfläche auch eine wichtige Filterfunktion für Luftschadstoffe (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI), 2012).



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

09	Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen	Kurzerläuterung	
		▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer aber auch kleinerer Wasserflächen ▪ Größere Gewässer sind raugkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird	
Wirkung		Maßstabsebene	Räumliche Umsetzung
▪ 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		alle	▪ Gewässer ▪ Grün- und Freiflächen



Bild: Springbrunnen Dr-Konrad-Adenauer-Anlage, Fürth (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Hinweise zur Umsetzung

Offene Wasserflächen weisen eine positive Wirkung auf die thermische Situation auf. Dies gilt insbesondere für die Tagsituation. Hier findet Verdunstung statt, die Energie aus der umgebenden Luft benötigt und diese abkühlt („Verdunstungskühlung“). Je größer die Wasseroberfläche, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Bewegtes Wasser erzielt eine stärkere kühlende Wirkung als stehendes Gewässer, da die verdunstungsfähige Oberfläche bei der Bewegung vergrößert wird (Bundesamt für Umwelt der Schweiz (BAFU) 2018; MUNLV 2011). In Sommernächten verbessern Wasserflächen aufgrund ihrer hohen Wärmespeicherkapazität hingegen nicht den thermischen Komfort. Während langer Wärmeperioden können sie in den Nachtstunden sogar wärmer werden als die umgebende Luft und somit deren Abkühlung verringern (Kuttler 2013).

Neben den zahlreichen Fließgewässern in Fürth trägt auch die Anlage von bewegtem Wasser auf den öffentlichen Plätzen vor allem am Tage zur Erhöhung der Aufenthaltsqualität stark bei. Ausführungsbeispiele für die Maßnahme sind Brunnen, Wasserspielplätze, künstliche Wasserfälle oder Teiche, Springbrunnen und Wasserspiele wie bspw. die Abbildung zeigt. Ein Potential zur Umsetzung besteht vor allem auf thermisch belasteten Flächen des Öffentlichen Raumes, so dass die Öffentliche Hand (ggf. in private public partnerships) die entscheidende Akteurin zur Umsetzung der Maßnahme darstellt.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

10	Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme, Schwammstadt	Kurzerläuterung		
		Rückhaltung von Wasser im Siedlungsraum durch Schaffung wasserdurchlässiger Beläge, (Teil-) Entsiegelung, Versickerungsmulden und Rigolensystemen, Zisternen, Pflanzung von Grünstrukturen inkl. Dach- und Fassadengrün		
Wirkung		Maßstabsebene	Räumliche Umsetzung	Bild: Schwammstadtkonzept am Potsdamer Platz, Berlin (Quelle: © D. Lessmann, GEO-NET)
▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung ▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien mit gezielter Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün		▪ Verkehrs- und Straßenraum ▪ Block	▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze	

Hinweise zur Umsetzung

Generell sollte das **Schwammstadtprinzip** angewendet werden, welches durch Umsetzung spezifischer Maßnahmen den Rückhalt, die Speicherung und die Nutzung von anfallendem Niederschlagswasser ermöglicht. Dabei soll sich der urbane Wasserhaushalt dem eines natürlichen Wasserhaushalts annähern. Eine damit einhergehende erhöhte Wasserverfügbarkeit trägt auch zur Hitzereduktion durch Transpirationskühlung bei. Folgende Maßnahme bilden die Grundlagen für eine Schwammstadt:

- Rigolen und Versickerungsmulden auf Grünflächen
- versickerungsfähige Beläge statt Vollversiegelung
- Dach- und Fassadenbegrünung
- Retentionsdächer sowie Retentionsflächen
- Renaturierung von Gewässern, Öffnung von verrohrten Bächen

Der Rückhalt von Niederschlagswasser, sowie ein dezentrales und zeitverzögertes Ableiten und Versickern verhindern einerseits den Verlust von Niederschlagswasser in die Kanalisation als auch die Überlastung der Kanalisation bzw. des Vorfluters durch zu schnellen Oberflächenabfluss bei extremen Niederschlagsereignissen. Außerdem ermöglicht das Speichern von Wasser in Rückhaltesystemen eine Bewässerung von Grünanlagen während Trockenperioden. Aufgrund der Flächenknappheit im Siedlungsraum sind sogenannte multifunktionale Flächen oft eine gute Möglichkeit zur Umsetzung des Schwammstadtprinzips. Sie dienen im Alltag beispielsweise als Schulhof, Spielplatz oder öffentlicher Parkplatz, sind aber so gestaltet, dass sie bei Starkregen gezielt überflutet werden können, um die Kanalisation zu entlasten und Regenwasser langsam zu versickern oder zu speichern (STMUV, 2026). Weitere Beispiele von Multifunktionalität in Verbindung mit dem Schwammstadtprinzip sind als Dachgärten ausgestaltete Gründächer sowie Baumpflanzungen Versickerungsmulden.



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

11	(Temporäre) Saisonale klima-angepasste Umgestaltung öffentlicher Räume	Kurzerläuterung ▪ Umwandlung hitzebelasteten versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Kübelbäumen, mobilen „grünen Möbeln“, Strauchgewächsen, Rollrasen etc. zu städtischen Klimaoasen ▪ Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebbarmachung 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	Maßstabsebene Quartier Räumliche Umsetzung ▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)



Bild: „Grüne Bank“ in der Königstraße, Fürth (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Hinweise zur Umsetzung

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an. Zum Beispiel schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Kübelbäume und -sträucher können auch dort aufgestellt werden, wo unterirdische Leitungen wegen der erforderlichen Schutzabstände reguläre Baumstandorte verhindern. Als gutes Beispiel dienen in Fürth die „Grünen Bänke“. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum weiter zu priorisieren.



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

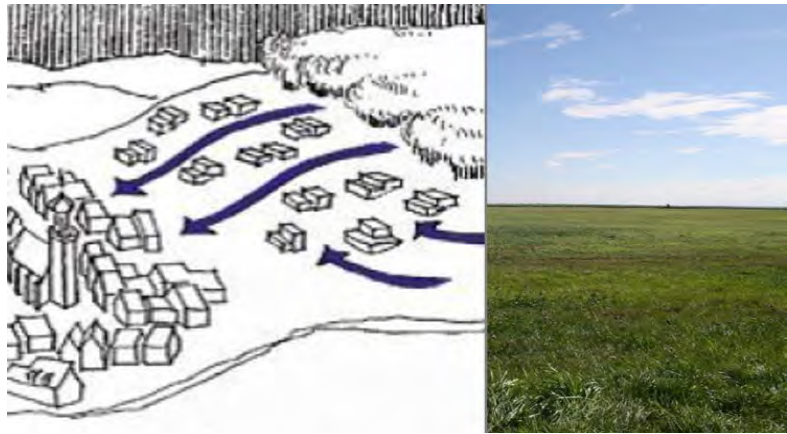
12 Optimierung von großskaligem Kaltlufttransport Durchlüftung	Kurzerläuterung - Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung) - Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bebauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen	
Wirkung - Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung - Reduktion des Wärmestaus	Maßstabsebene Kaltluftprozessraum	Räumliche Umsetzung - Neubau, Gebäudekomplexe - Grün- und Freiflächen - Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze

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

Hinweise zur Umsetzung

Durch die Vermeidung von Austauschbarrieren auf Flächen, die für den Kaltlufthaushalt relevant sind, wird sichergestellt, dass die entstehende Kalt- bzw. Frischluft auf den Flächen möglichst ungehindert ausströmen kann. Andernfalls können diese Flächen ihre anvisierte Wirkung nicht oder nur anteilig entfalten. Die Wirkung einer Kaltluftleitbahn ist umso besser, desto hindernisfreier sie ist. Austauschbarrieren sollten daher im Einflussbereich von Kaltluftflüssen grundsätzlich vermieden werden. Das gilt für Grün- und Freiflächen als auch für das Eindringen der Kaltluft in den Siedlungskörper. Die Grün- und Freiflächen produzieren die Kaltluft, da sie nachts stärker abkühlen als versiegelte Flächen. Großräumige, gut wasserversorgte und durch flache Vegetation geprägte Freiflächen wie Wiesen, Felder, Kleingartenanlagen und Parklandschaften sind Quellen für Kalt- und Frischluft und bedürfen daher eines besonderen Schutzes.

Bei einer Neigung von 1° beginnt die Kaltluft hangabwärts zu fließen oder sie wird aufgrund des bestehenden thermischen Temperaturgradienten zwischen kühleren Grün- und Freiflächen zum bebauten wärmeren Siedlungsraum angesogen. Hindernisse bremsen den Fluss der Kaltluft ab. Auch Wälder können vor allem an Hängen Kaltluftquellgebiete darstellen, die nächtlichen Abkühlungsraten sind aber geringer als über dem Freiland. Am bewaldeten Hang ist die Kaltluftproduktion höher und die Kaltluft fließt aus dem Stammraum der Wälder den Hang hinunter. Am Tage sind Wälder in der Lage, auch Kaltluft für angrenzende Siedlungsflächen zu erzeugen (Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI), 2012). Auch wenn ihre Wirkung meist überschätzt wird, nehmen neben den großen Kaltluftentstehungsgebieten im städtischen Umland auch größere Grün- und Parkanlagen im innerstädtischen Bereich eine wichtige Funktion für den lokalen Kaltlufthaushalt ein. Auch stark durchgrünte Siedlungstypen können einen Beitrag zum Kaltlufthaushalt leisten, bspw. dadurch, dass neue Kaltluft entsteht oder die Kaltluft weitertransportiert und somit die Durchlüftung gewährleistet wird.



VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

13 Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch	Kurzerläuterung - Gebäudeanordnung geöffnet zu angrenzenden Freiflächen am Siedlungsrand bzw. innerörtlich zu anliegenden Grünflächen und Parkanlagen - Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsge-schehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht		
Wirkung	Maßstabs-ebene	Räumliche Umsetzung	
- Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme - Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung	Block	Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks	Bild: Mit einem Park vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). (Zürich, 2020)
Hinweise zur Umsetzung			

Am Siedlungsrand sind großräumige, möglichst wasserversorgte und durch flache Vegetation geprägte Grünflächen wie Wiesen, extensives Grünland, Felder, Kleingärten und Streuobstwiesen die Lieferanten für kühle Ausgleichsströmungen, die nachts in die bebauten Bereiche dringen. Um den Luftaustausch aufrecht zu erhalten, sollten bauliche Barrieren - vor allem Strukturen, welche riegelartig die Strömung behindern – vermieden werden. Grundsätzlich ist aus klimatologischer Sicht ein Bauen in die Höhe dem Bauen in die Fläche vorzuziehen, weil weniger Fläche versiegelt und der bodennahe Kaltluftaustausch gefördert wird.



VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

14	Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen	Kurzerläuterung ▪ 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 ▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung ▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung ▪ Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage	Maßstabsebene Kaltluftprozessraum	Räumliche Umsetzung Grün- und Freiflächen



Bild: Blick von der Flutbrücke auf den Wiesengrund am Scherbsgraben, Fürth
(Quelle: © E. Hipler / Geo-Net)

Hinweise zur Umsetzung

Strukturen, die den Luftaustausch ermöglichen und Kaltluft an die Siedlungsbereiche heranführen, sind als Kaltluftleitbahnen das zentrale Bindeglied zwischen Kaltluftentstehungsflächen und bioklimatisch belasteten Wirkungsräumen. Dabei sind die vegetationsgeprägten Leitbahnkorridore von besonderer Bedeutung. Durchlüftungsbereiche sollten daher einen generell geringen Überbauungsgrad und einen hohen Grünflächenanteil aufweisen sowie linear auf die Wirkungsräume ausgerichtet sein. Dahingehend wurden in Fürth unter anderem die Flussauen von Regnitz, Rednitz und Pegnitz (Wiesengrund), größere Freiräume wie Kleingärten (z.B. Gartenkolonie Südstadt) aber auch die Leitbahnstruktur entlang des Farrnbachs als geeignete Strukturen identifiziert. Kaltluftleitbahnen und Leitbahnkorridore sind in ihrer Funktion zu erhalten und zu sichern. Als wichtigste Maßnahmen gelten die Vermeidung von Austauschbarrieren gegenüber bebauten Randbereichen sowie die Vernetzung mit benachbarten Freiflächen.

Kleinere Grünareale können als „grüne Trittsteine“ das Eindringen von Kaltluft in die Bebauung unterstützen und damit den klimatischen Einwirkungsbereich vergrößern. Eine hohe Bedeutung kommt dabei auch den kleineren siedlungsnahen Park-, Ruderal- und Brachflächen oder gering versiegelten Sportplätzen zu, da sie eine Entlastungswirkungen für die benachbarte Bebauung erzeugen können.



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

15 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 mit Niederschlagswasser-management und Biodiversität	Räumliche Umsetzung ▪ Flachdächer, ▪ ggf. flach geneigte Dächer ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)	

Bild: Dachgarten auf dem Hamburger Bunker (Quelle: © E. Hipler, GEO-NET)

Hinweise zur Umsetzung

Die Dachbegrünung kann die Erwärmung der Gebäude am Tage abschwächen. Sie wirkt positiv auf einen Gebäudebestand ein, da die Verdunstungskälte des Wassers an Pflanzenbestandteilen einen abkühlenden Effekt auf umgebende Luftmassen hat. Die Vegetation wirkt zusammen mit dem Substrat isolierend und verringert damit das Aufheizen darunter liegenden Wohnraums. Allerdings können nur relativ niedrige Gebäude (wie z.B. Einzel- und Reihenhäuser) mit Dachbegrünung zu einem im bodennahen Bereich positiven Abkühleffekt beitragen. Gründächer auf Gebäuden mit 4 oder mehr Geschossen zeigen in der untersten Schicht der Stadtatmosphäre (= Aufenthaltsbereich des Menschen, 2 m ü. Grund) keinen nennenswerten positiven Temperatureffekt. Voraussetzung für die Kühlwirkung ist allerdings immer ein ausreichendes Wasserangebot für die Vegetation. Im Winter isoliert ein Gründach zusätzlich und kann zur Senkung des Heizenergiebedarfes beitragen. Ein weiterer Vorteil von Dachbegrünung ist im Retentionsvermögen von Regenwasser zu sehen, wodurch die Kanalisation vor allem bei Starkregenereignissen entlastet wird. In der folgenden Abbildung sind die unterschiedlichen Ausführungen der Dachbegrünung dargestellt. Sie verdeutlicht die Unterschiede beim Dach- und Substrataufbau zwischen extensiven, intensiven Dachbegrünungen und Dächern, die in der Lage sind, Wasser zurückzuhalten und zwischenzuspeichern. Dabei ist es schwierig genau festzulegen, ab welchen Substratdicken die Kühlwirkung von Dachbegrünung am größten ist. Eine Ausführung von Gründächern als Retentionsdach oder Wassergärten erzielt die größte Wirkung für die unmittelbare Temperaturreduktion. Die Bereithaltung von ausreichend Wasser zur Bewässerung des Gründaches besitzt eine stärkere Wirkung als eine größere Mächtigkeit der Substratschicht. Intensive Gründächer können zudem begangen werden und bieten damit auch unmittelbar eine thermische Komfortzone. Dachbegrünungen sind mit vielen weiteren Synergieeffekten verbunden. Hierzu zählen u.a. Reduktion des Niederschlagsabflusses, Lärminderung und die Erhöhung der Biodiversität (Pfoser et al., 2013). Die Fürther Versiegelungsverbots- und Begrünungssatzung schreibt eine Begrünung eines Dachs bis zu einer Neigung von 20° von über 50m² vor. Das Förderprogramm „Fürth blüht auf“ bietet finanzielle Unterstützung für die Begrünung von Privatgrundstücken und Wohneigentum (Baumpflanzungen, Dachbegrünungen, Fassadenbegrünungen, die Entsiegelung asphaltierter bzw. sonstiger versiegelter Flächen, insektenfreundliche Blühflächen) (Stadt Fürth, 2026).



Potenziale der Dachgestaltung

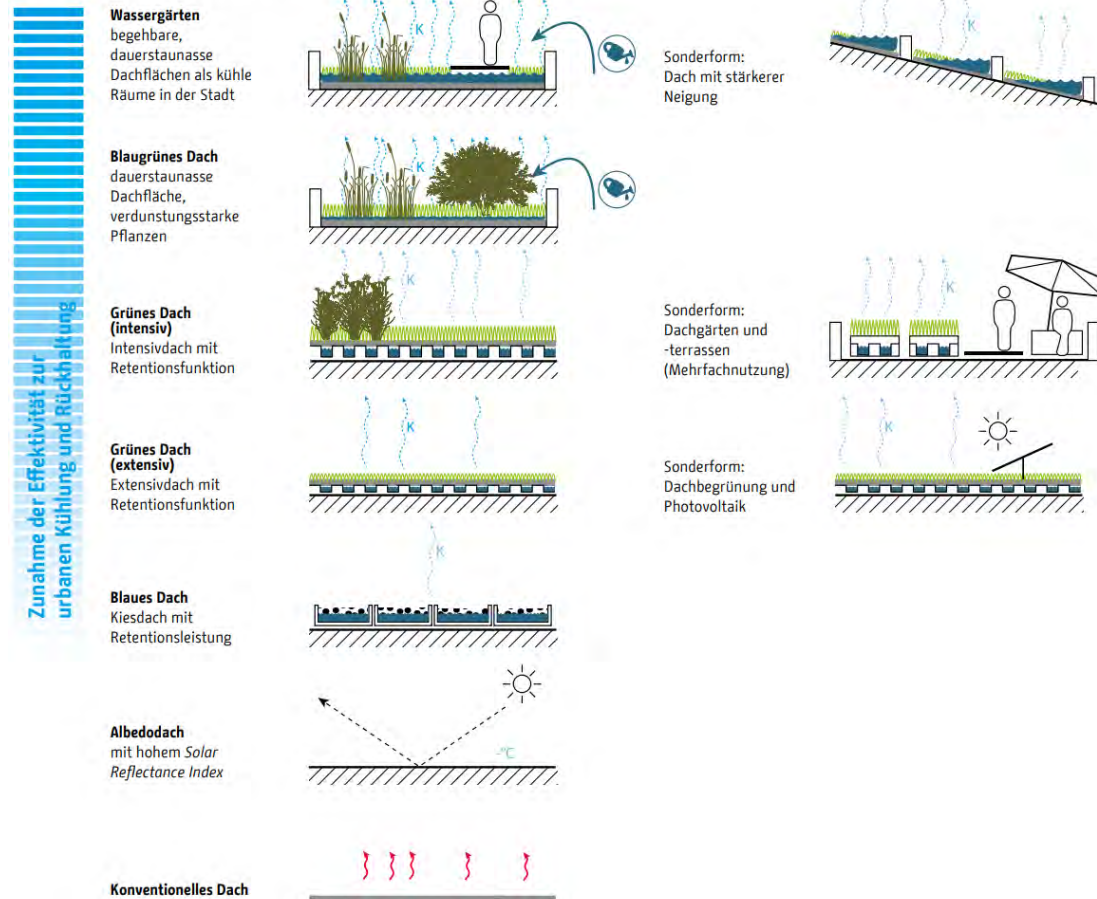


Abbildung zu M16: Dachaufbau bei unterschiedlich ausgeführten Gründächern und ihre Kühlwirkung und Rückhaltung (Quelle: Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt Berlin 2016, S. 27)

Sollen zusätzlich Photovoltaikmodule (PV) installiert werden, wird zum einen der Wirkungsgrad der PV-Systeme um bis zu 4 % pro Jahr (Berliner Regenwasseragentur 2025) gesteigert. Zum anderen kann das Dach nicht mehr als intensiv genutztes Dach mit großen Stauden und Sträuchern ausgeführt werden, sondern eher mit kleinwüchsigen Pflanzen, die gut mit Wasser versorgt sind, um auch den Pflegeaufwand (Schnitt) gering zu halten. Am meisten verdunsten Pflanzen, die ihre Spaltöffnungen auch bei Hitze geöffnet lassen können und darüber verdunsten (keine Sedumpflanzen (dickblättrige Gewächse)). Die Pflanzen sind in der Lage, die Umgebungstemperatur und damit die Photovoltaikmodule zu kühlen. So reduzieren sie den wärmebedingten Leistungsverlust und erhöhen damit die Effizienz der Anlage (BBSR & BBR, 2019, S. 191; BUE, o. J., S. 29). Dabei ist durch Aufständigung der Module und bewusster Pflanzenwahl darauf zu achten, dass die Dachbegrünung die Module nicht verschattet. Alle Dachbauweisen bis ca. 15° sind für Begrünungen grundsätzlich geeignet. Eine Prüfung der statischen Verhältnisse ist erforderlich. Vor allem für die intensive Begrünung ist eine massive Baukonstruktion unabdingbar. Außerdem muss das Dach wasserdicht sein und gegen Durchwurzelung geschützt werden (FLL, 2018). In Abhängigkeit dieser bautechnischen Vorgaben besteht in Fürth ein vielfältiges Potential für Dachbegrünungen. Die entscheidenden Akteure sind die Gebäudeeigentümer, so dass für die Öffentliche Hand für ihre eigenen Liegenschaften eine unmittelbare Umsetzungscompetenz besteht.



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

16 Fassadenbegrünung	Kurzerläuterung ▪ Boden- oder 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 mit Biodiversität sowie Lärm- und Gebäudeschutz	Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)	

Bild: Fassadenbegrünung in der Fürther Altstadt (Quelle: © C. Sadi)

Hinweise zur Umsetzung

Der planmäßige und kontrollierte Bewuchs geeigneter oder speziell vorgerichteter Fassaden mit Pflanzen wird als Fassadenbegrünung bezeichnet. Es wird zwischen erd- und fassadengebundenen Systemen unterschieden. In erster Linie wirkt die Grünfassade dämmend auf das Gebäude und führt zu Abmilderung der Innentemperaturextreme im Tages- und Jahresverlauf. Das schattenwerfende Blattwerk, die Luftschicht zwischen der Vegetation und der Hauswand sowie die Evaporation des Fassadengrüns verringern die Wärmeaufnahme und die Oberflächentemperatur der Gebäudehülle und erhöhen den thermischen Komfort in allen Stockwerken des Gebäudeinneren sowie im unmittelbar angrenzenden Außenklima. Ein weiterer positiver Effekt ist die Verbesserung der Luftqualität in der Nähe der Fassadenbegrünung. Die relativ große Pflanzenoberfläche adsorbiert und absorbiert den Feinstaub und andere Luftschadstoffe. Auch eine lärmindernde Wirkung der Fassadenbegrünung ist messtechnisch nachgewiesen. Ähnlich wie Dachbegrünung tragen auch Fassadenbegrünungen zur Speicherung und Verdunstung von Niederschlagswasser sowie zur Erhöhung der Biodiversität bei (Pfoser et al., 2013).

Es gibt diverse Ausführungsmöglichkeiten einer Fassadenbegrünung. Die Entscheidung hängt hauptsächlich von den Bauwerkseigenschaften ab und sollte gut geplant werden, um eventuelle Schäden am Gebäude oder der Begrünung zu vermeiden. Dabei ist sowohl der Aufbau (Pflanzenart, Befestigungsart und die entstehende Last) zu berücksichtigen als auch die späteren pflegerischen Maßnahmen (Bewässerung, Pflanzenschnitt). Aufgrund ihrer umfassenden thermischen Wirkung und der Multieffektivität in Bezug zu anderen Schutzgütern (s.o.) kann die Maßnahme als absolut prioritär bezeichnet werden. Analog zur Dachbegrünung liegt auch hier die Verantwortung für die Umsetzung der Maßnahme vor allem bei den Gebäudeeigentümern. Im Förderprogramm „Fürth blüht auf“ kann Fassadengrün im Rahmen von Hauseingangsbegrünungen gefördert werden (Stadt Fürth, 2026).



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

17 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	Kurzerläuterung Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie	 Bild: Gebäudeverschattung in der Paul-Gossen Str., Erlangen (Quelle: © J. Löbig, GEO-NET)
Wirkung - Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -> Erhöhung der Aufenthaltsqualität - Verbesserung des Innenraumklimas - Synergien zum Klimaschutz - Bereitstellung von Energieberatungsangeboten	Räumliche Umsetzung Gebäude (Neubau und Bestand)	

Hinweise zur Umsetzung

Der Überhitzung von Räumen vorzubeugen ist das wesentliche Ziel des sommerlichen Wärmeschutzes. Dabei geht es darum, ein behagliches Innenraumklima während der Sommermonate sicherzustellen und gleichzeitig den Energieverbrauch für die Kühlung möglichst gering zu halten. Prioritär sollten Maßnahmen zur Reduzierung der Wärmebelastung an West- und Südfassaden ergriffen werden. Die Forschenden (HeatResilientCity 2020) weisen mehrfach darauf hin, dass eine Kombination von unterschiedlichen Maßnahmen wie Verschattung am Gebäude, plus Wärmedämmung und korrektes Lüftungsverhalten (tagsüber geschlossene Fenster und Rollläden/Jalousien; abends und in der Nacht querlüften) die Innenraumtemperatur deutlich reduzieren kann (HeatResilientCity, 2022). Gebäude können durch Vegetation wie Bäume oder Gebäudebegrünung oder auch durch bautechnische Maßnahmen verschattet werden.

Für die Verschattung sind großkronige Laubbäume gegenüber Nadelbäumen zu bevorzugen, da sie im Winter einen geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Die meisten architektonischen Möglichkeiten bieten Neubauten. Viele bautechnische Elemente lassen sich aber auch nachrüsten (z. B. Vordächer und Vertikallamellen (auch Brise Soleils genannt), sowie Markisen und Sonnensegel). Der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz ist in der EnEV geregelt und für neu zu errichtende Wohngebäude und Nichtwohngebäude verpflichtend (EnEV 2013 in Verbindung mit DIN 4108-2 2005). Auch für die Höhe der Raumtemperatur in Arbeitsstätten gibt es technische Regeln. Effektive Maßnahmen um möglichst wenig Wärme in das Gebäude zu lassen, beziehen sich vor allem auf Fenster- und sonstige Glasflächen. Hier sind insbesondere außen liegende Sonnenschutzelemente wie Jalousien, Markisen und Fensterläden zu nennen. Eine weitere Möglichkeit stellt reflektierendes oder absorbierendes Sonnenschutzglas oder -folie dar. Innenliegende Elemente sind deutlich weniger effektiv, aber z. B. bei bestimmten Vorgaben des Denkmalschutzes eine gute Alternative. Neben der Verglasung sind aber auch die verwendeten



Baumaterialien und Wanddicken entscheidend. Je geringer ihre Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit sind, desto weniger tragen sie zur Aufheizung des Innenraums bei bzw. unterstützen dessen nächtliche Auskühlung. Dieser Effekt wird durch Beschattung der Gebäudehülle unterstützt (siehe Ausführungen oben).

Auch wenn der gesetzlich geregelte sommerliche Wärmeschutz speziell für Neubauten gilt, besteht das weitaus größere Potential im Bestand. Hier sind vor allem sämtliche Ansätze, die in Verbindung mit der Verglasung stehen, von Relevanz.

Für die Maßnahmen direkt am Gebäude trägt der (private) Eigentümer die Verantwortung; bzgl. der kommunalen Liegenschaften ist dies die öffentliche Hand. Im Randbereich von Straßenräumen zu Liegenschaften anderer Eigentümer kann die öffentliche Hand aber auch zugunsten dieser Eigentümer tätig werden.



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

18	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	Kurzerläuterung ▪ Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme ▪ Bereitstellung von Energieberatungsangeboten	 Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)
Wirkung	▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs ▪ Verbesserung des Innenraumklimas am Tage	Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude (Bestand)	

Hinweise zur Umsetzung

Die energetische Gebäudesanierung ist in erster Linie eine Klimaschutzmaßnahme, die durch technische und bauliche Maßnahmen den (Heiz- und Kühl-)Energiebedarf des Gebäudes verringern soll. Allerdings weisen die gängigen Dämmmaterialien auch einen geringeren Wärmedurchgang von außen nach innen auf, so dass im Sommer auch der thermische Komfort im Innenraum verbessert wird. Die Energieeinsparverordnung (EnEV 2013) regelt die einzuhaltende Qualität der Dämmstoffe. Es besteht eine enge Verbindung zu M03 – Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten, auch zu Maßnahme M18 – Verschattung von Gebäuden. Dachbegrünungen (vgl. M15) weisen dämmende Eigenschaften auf. Relevante Akteure sind die jeweiligen Eigentümer der Gebäude, aber auch finanzierende Banken spielen eine entscheidende Rolle (z. B. die Kreditanstalt für Wiederaufbau).



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19 Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

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

Wirkung

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung

Räumliche Umsetzung

Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können

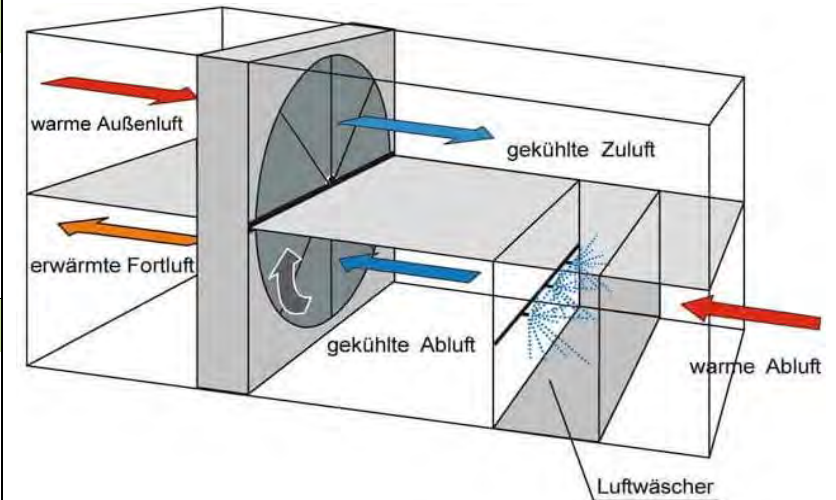


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/bautechnik/coole-sache/>)



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

20	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) ▪ Korrektes Lüftungsverhalten (tagsüber geschlossene Fenster und Rollläden/Jalousien; abends und in der Nacht querlüften) ▪ Informationen zum Umgang mit Hitze auf der „Themensseite Hitze“ der Stadt Fürth ¹²	 Bild: Aufnahme eines nach Westen ausgerichteten Büroraums (Quelle: © G. Meusel, GEO-NET)
	Wirkung	Räumliche Umsetzung ▪ Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege) ▪ Optimierte Raumverteilung: vorwiegend im Neubau umsetzbar	

¹² <https://www.fuerth.de/umwelt-abfall/klima/anpassung-an-den-klimawandel/gegen-die-hitze/hitze-und-gesundheit/>



8.6 PLANUNGSRECHTLICHE ANKNÜPFUNGSPUNKTE

Es gibt unterschiedliche Möglichkeiten, Maßnahmen für eine klimagerechte Stadtplanung im kommunalen Handeln zu berücksichtigen und rechtlich umzusetzen. Zu nennen sind hier das Baugesetzbuch mit den Instrumentarien des **Flächennutzungsplanes** (FNP) und des **Bebauungsplanes** (B-Plan) als auch die Baunutzungsverordnung (BauNVO) sowie die Bayerische Bauordnung (BayBO). Der FNP stellt die Grundzüge der kommunalen Entwicklung für die gesamte Stadt dar, die B-Pläne regeln die Vorschriften zu räumlich abgegrenzten Vorhaben und müssen dabei auf einer detaillierteren Planungsebene die Belange des Klimas und die Anpassung an den Klimawandel berücksichtigen. Im Folgenden werden formelle und informelle Instrumente zusammengetragen.

BAULEITPLANUNG

Mit der Novelle des Baugesetzbuches (BauGB) im Jahr 2011 wurde der Stellenwert der Klimaanpassung erhöht, indem mit einer neuen Klausel im § 1 Abs. 5 BauGB den Klimabelangen (Klimaschutz und Klimaanpassung) bei der planungsrechtlichen Abwägung ein zusätzliches rechtliches Gewicht verliehen wurde. Die Klimaanpassung wird nun als Aufgabe der Bauleitplanung ausdrücklich benannt.

In der ersten und vorbereitenden Stufe der Bauleitplanung – dem **Flächennutzungsplan** (FNP) – können Vorgaben für eine klimagerechte Stadtentwicklung erfolgen. Als abstrahierender Strukturplan für das gesamte Stadtgebiet stellt der FNP die städtebaulichen Planungs- und Entwicklungsziele dar und ist Grundlage für die nachfolgenden Planungsebenen. Im Vergleich zum Bebauungsplan ist der FNP nicht verbindlich und somit für Bürger:innen nicht rechtswirksam. Er kann allein über die abstrahierende Darstellung der allgemeinen Nutzungsart (Flächennutzung) wirken und ist dabei an die inhaltlichen Vorgaben des § 5 BauGB gebunden. Die Darstellungsmöglichkeiten des FNP zur Klimaanpassung umfassen beispielsweise:

- Darstellung von Bauflächen und Baugebieten, Anlagen und Einrichtungen, Verkehrsflächen, Ver- und Entsorgungsanlagen sowie Grünflächen (§ 5 Abs. 2 Nr. 1 bis Nr. 5 BauGB) als Ergebnis einer kompakten,utzungsgemischten Stadt entsprechend dem Leitbild „Stadt der kurzen Wege“,
- Darstellung von Grün- und Wasserflächen sowie Flächen für den Wald und die Landwirtschaft (§ 5 Abs. 2 Nr. 5, 7, 9 und 10 BauGB) zum Erhalt und zur Schaffung von Kaltluftentstehungsflächen sowie Kalt- und Frischluftbahnen,
- Hinweise auf das Erfordernis einer baulichen Vorsorge gegenüber Naturgefahren auf besonders gefährdeten Flächen (Kennzeichnung des Gefährdungspotenzials durch Naturgewalten, § 5 Abs. 3 Nr. 1 BauGB),
- Darstellung der Überschwemmungsgebiete und weiterer fachplanerischer Festlegungen zu Klimaschutz und Klimaanpassung (Wasserwirtschaft, Luftreinhaltung, etc., § 5 Abs. 4a und Abs. 2 Nr. 7 BauGB).

Neben den Flächendarstellungen in der Planzeichnung und entsprechenden Erläuterungen in der Begründung sowie im Umweltbericht besteht die Möglichkeit, eine separate Beikarte „Klimaanpassung“ zum Flächennutzungsplan zu erstellen.

Der **Bebauungsplan** (B-Plan) als zweite und verbindliche Stufe der Bauleitplanung besitzt eine weitaus größere Relevanz für die Planungspraxis, da erst hier die rechtsverbindliche Festsetzung und somit die Realisierung von Klimaanpassungsmaßnahmen stattfindet. Dabei ist der Bebauungsplan an die Festsetzungsmöglichkeiten des § 9 Abs. 1 BauGB gebunden. Hier bestehen u.a. folgende Regelungsgegenstände:



- Festsetzungen zur Begrenzung der Verdichtung und Versiegelung zur Vermeidung von Überwärmung durch Festsetzung zum Maß der baulichen Dichte, Grundflächenzahlen, zur Bauweise, den überbaubaren und nicht überbaubaren Grundstücksflächen sowie zur Stellung der Anlagen,
- Festsetzungen zur Freihaltung von Luftleitbahnen und Kaltluftentstehungsflächen durch optimierte Stellung baulicher Anlagen, Festsetzung von Flächen, die freizuhalten sind und ihre Nutzung, die Festsetzung öffentlicher und privater Grünflächen sowie die Festsetzung von Wasserflächen,
- Festsetzungen zur Verbesserung des Mikroklimas und der Verminderung der Überwärmung durch schattenspendende Elemente im öffentlichen Raum, Pflanzgebote und Bindungen für Bepflanzungen, die Erhaltung von Bäumen, Sträuchern, Dach- und Fassadenbegrünung, sonstige Bepflanzungen und Gewässern, durch Festsetzung von Fassadenmaterial und -farben (Gestaltungssatzungen),
- Festsetzungen zur Schließung lokaler Wasserkreisläufe durch Festsetzung des Nutzungszweckes von Flächen (Parkplätze, Freiflächen, Grünflächen, etc.) zur Speicherung von Extremniederschlägen und die Festsetzung von Flächen für die Abwasserbeseitigung einschließlich Rückhaltung und Versickerung von Niederschlagswasser.

Für die Klimaanpassung dürften insbesondere auch Kennzeichnungen nach § 9 Abs. 5 Nr. 1 BauGB relevant sein: „Flächen, bei deren Bebauung besondere bauliche Vorkehrungen gegen äußere Einwirkungen oder bei denen besondere bauliche Sicherungsmaßnahmen gegen Naturgewalten erforderlich sind“.

In einem B-Plan können stadtklimatische Belange in der Planzeichnung sowie der textlichen Festsetzung integriert werden. Insbesondere im Textteil besteht die Möglichkeit, Vorgaben zur Gestaltung, zu Umweltauflagen, zur Erschließung, etc. festzusetzen. Die Erkenntnisse und Hinweise aus der stadtklimatischen Planungshinweiskarte können im Umweltbericht die Argumentation und Begründung der Vorgaben unterstützen. Spezielle Belange, wie die der Klimaanpassung, gehen über die Mindestanforderungen an einen qualifizierten Bebauungsplan (§ 30 Abs. 1 BauGB) hinaus und erfordern eine Festlegung von konkreten Maßnahmen. Daher sollte ein **Grünordnungsplan** (§ 11 BNatSchG) ein wesentlicher Planungsbestandteil des B-Plans sein, der auch die Themen der Klimaanpassung behandelt.

Zur Vorbereitung und Durchführung städtebaulicher Maßnahmen kann im Rahmen von Bauleitplanverfahren auf **städtebauliche Verträge** nach § 11 BauGB zurückgegriffen werden, wenn die städtebaulichen Ziele nicht allein über die Festsetzungen des B-Plans geregelt werden können. Der Katalog von möglichen Gegenständen städtebaulicher Verträge ist dabei nicht abschließend (§ 11 Abs. 1 BauGB). Es muss jedoch immer ein „bodenrechtlicher Bezug“ vorliegen und die vereinbarten Leistungen müssen den gesamten Umständen nach angemessen sein. Städtebauliche Verträge dienen der Förderung und Sicherung der Ziele des Städtebaurechts und können somit auch Aufgaben und Maßnahmen einer klimaangepassten Stadtentwicklung einfordern. Hierzu zählen beispielsweise die Realisierung bestimmter baulicher Standards, Anforderungen an die Freiflächengestaltung oder Stellplatzkonzepte, die Erstellung mikroklimatischer Gutachten, die Schaffung von Retentionsflächen oder Pflanzgebote.

VORHABEN IM STÄDTEBAULICHEN INNENBEREICH NACH § 34 BAUGB

Bei privaten Bauvorhaben, für die keine B-Planaufstellung erforderlich ist (§ 34 BauGB im Innenbereich, § 35 BauGB im Außenbereich), ist es schwierig, vollumfängliche Vorgaben zur Berücksichtigung von Klimaanpassungsmaßnahmen zu machen. Bei Baulücken im Innenbereich nach § 34 ist ein Bauvorhaben zulässig, welches sich „nach Art und Maß der baulichen Nutzung, der Bauweise und der Grundstücksfläche, die überbaut werden



soll, in die Eigenart der näheren Umgebung einfügt und die Erschließung gesichert ist“¹³. Solange diesem Einfügungsgebot gefolgt wird, muss die Baubehörde eine Genehmigung erteilen, auch wenn dadurch ggf. ein klimatischer Missstand entsteht oder verstärkt wird.

Mit dem am 30. Oktober 2025 in Kraft getretenen „Gesetz zur Beschleunigung des Wohnungsbaus und zur Wohnraumsicherung“ wurden neue Möglichkeiten zur Schaffung von Wohnraum eröffnet. Insbesondere die Änderungen der §§ 31 Abs. 3 und 34 Abs. 3b BauGB sowie die befristete Experimentierklausel des § 246e BauGB ermöglichen unter bestimmten Voraussetzungen weitergehende Abweichungen von bestehenden planungsrechtlichen Vorgaben. Voraussetzung bleibt jedoch, dass die Vorhaben unter Würdigung nachbarlicher Interessen mit den öffentlichen Belangen vereinbar sind und die Gemeinde zustimmt. Zu den **öffentlichen Belangen** zählen auch die Belange des Klimaschutzes und der Klimaanpassung (vgl. Deutscher Städtetag, 2023; Klimabündnis, 2022).

Im Sinne einer nachhaltigen Stadtentwicklung gilt der planerische Grundsatz „Innenentwicklung vor Außenentwicklung“, mit dem Ziel, der fortschreitenden Inanspruchnahme unbebauter Flächen im Außenbereich entgegenzuwirken. Insbesondere in Fürth – einer Stadt mit hohem Nutzungsdruck – stellt der sogenannte unbeplante Innenbereich – neben behutsamen Abrundungen am Siedlungsrand – ein wichtiges Potenzial für weitere bauliche Entwicklung dar. Hierbei müssen auch die damit verbundenen stadtklimatischen Veränderungen Berücksichtigung finden. Gerade stark versiegelte und dicht bebaute innerstädtische Bereiche sind vergleichsweise am stärksten von Hitze und Überwärmung betroffen und besitzen folglich einen hohen Bedarf an Klimaanpassungsmaßnahmen. Der Stadtumbau sollte in diesem Zusammenhang als Chance zur Anpassung bestehender Stadtstrukturen an den Klimawandel verstanden werden.

Auch wenn die Stadt einen nur sehr begrenzten Einfluss auf die klimaresiliente Entwicklung von privaten Bauvorhaben gemäß § 34 BauGB hat, stehen verschiedene Handlungsoptionen bereit. Dazu gehören:

- Förderung von privatem Engagement zur Umsetzung von Klimaanpassungsmaßnahmen, z.B. Begrünung, Regenwassermanagement (Nutzung, Rückhalt, Versickerung), Entsiegelungsmaßnahmen, etc. durch finanzielle Anreize im Rahmen **kommunaler Förderprogramme** in Verbindung mit einer entsprechenden **Beratung**,
- **Befreiung bzw. Reduzierung von Gebühren**, beispielsweise bei einer Versickerung von Niederschlagswasser auf dem eigenen Grundstück oder eine geplante Dachbegrünung,
- bei klimatisch besonders sensiblen Vorhaben Prüfung der Option, das Gebiet über einen **Bebauungsplan** zu entwickeln, um dabei Klimaanpassungsmaßnahmen rechtlich zu verankern,
- Erlass von **kommunalen Satzungen** oder Rechtsverordnungen mit stadtweiten Vorgaben für baulich-planerische Richtlinien zur Klimaanpassung, z.B. Freiflächengestaltungssatzung, Verbot von Schottergärten, Baumschutzsatzung, Entwässerungssatzung, (Fahrrad-)Stellplatzsatzung, etc.

ORTSSATZUNGEN

Gemäß Artikel 81 der Bayerischen Bauordnung (BayBO 2025) können Gemeinden durch Satzung im eigenen Wirkungskreis **örtliche Bauvorschriften** erlassen, bspw. zur Gestaltung von Kinderspielflächen, von Stellplätzen für Pkw und Fahrräder sowie der unbebauten Flächen der bebauten Grundstücke, zur Begrünung baulicher Anlagen oder der Untersagung bzw. Einschränkung zur Herstellung von Stellplätzen und Garagen. Im Rahmen dieser **Ortssatzungen** können somit auch Regelungen zur Klimaanpassung für das gesamte Stadtgebiet oder

¹³ Baugesetzbuch (BauGB), § 34 Zulässigkeit von Vorhaben innerhalb der im Zusammenhang bebauten Ortsteile, Abs. 1



Teile davon festgesetzt werden. Es besteht hierbei die Möglichkeit, nach und nach die stadträumlich wichtige Begrünung zu verbessern, indem auf die Gestaltung der Baugrundstücke und der baulichen Anlagen Einfluss genommen wird. In Fürth wird dies bspw. in Form der „Satzung über die Begrünung baulicher Anlagen und das Verbot von Bodenversiegelungen (Versiegelungsverbots- und Begrünungssatzung - VVBS)“ bereits umgesetzt¹⁴.

Eine **Gestaltungssatzung** als formelles Planungsinstrument kann innerhalb oder außerhalb eines B-Planes aufgestellt werden. Dafür müssen besondere gebietsspezifische Gründe vorliegen, da die Gestaltungssatzung die städtebauliche Gestaltung von baulichen Anlagen und Freiflächen festlegt und damit in die Eigentumsfreiheit eingreift. In vielen Fällen gibt es Gestaltungssatzungen aus gebietsspezifischen Gründen wie dem Denkmalschutz, der historischen Bedeutung von Gebäuden oder Naturdenkmälern. Enthalten sind dann u.a. Vorgaben zu Dachformen, Fassadengestaltung, Farben, Materialien, usw. Die Stadt Frankfurt am Main hat darüber hinaus im Mai 2023 eine „**Gestaltungssatzung Freiraum und Klima**“ erlassen, in der die in der Hessischen Bauordnung bereits enthaltenen Vorschriften weitergehend geregelt werden¹⁵. Die Satzung schreibt für alle Neu- und Umbauten eine klimaangepasste Gestaltung von Gebäuden und Freiflächen vor. Dächer und Fassaden müssen in Zukunft umfassend begrünt, Versiegelungen vermieden und Schattenbereiche geschaffen werden. Außerdem sind Schottergärten verboten. Falls aufgrund von Denkmalschutzvorgaben keine Dach- oder Fassadenbegrünung möglich ist, müssen die Außenbereichsflächen, wenn sie groß genug sind, mit zusätzlichen Laubbäumen bepflanzt werden.

WEITERE INSTRUMENTE

In der VDI 3787, Blatt 8 (VDI 3787, Blatt 8, 2020, S. 55ff) sind formelle und informelle Instrumente dargestellt, die für die kommunale Klimaanpassung angewendet werden können. In der Richtlinie wird zudem die kommunale Ebene als zentraler Akteur in der Klimaanpassung und dem Klimaschutz unterstrichen. Vor allem sollten die Fachplanungen einer Stadt durch bspw. einen **Ratsbeschluss zur Klimaanpassung** verpflichtet werden, die Belange der Klimaanpassung in ihrer Verwaltungsarbeit zu berücksichtigen und umzusetzen. Es können ämterübergreifende Anforderungen an bspw. Fachgutachten oder Wettbewerbe stadtweit festgelegt werden, an die sich die verschiedenen Fachbereiche und Eigenbetriebe halten müssen, bspw. bei der Vergabe von externen Dienstleistungen über Ausschreibungen.

Als **informelle Instrumente** nennt die VDI-Richtlinie 3787, Blatt 8 zudem **kommunale Leitbilder, integrierte Stadt(teil)entwicklungskonzepte, städtebauliche Planungen, Rahmenpläne**, die Ziele und Maßnahmen der Klimaanpassung integrieren können. Des Weiteren können noch die **Städtebauförderung** mit der **Stadtsanierung, Modell- und Leuchtturmvorhaben** sowie **Klimaanpassungskonzepte** genannt werden.

Kommunale Leitbilder können entwickelt bzw. erneuert werden, so dass die Belange der Klimaanpassung und des -schutzes enthalten sind. Gerade für die kommunale Verwaltung ist ein abteilungsübergreifendes Leitbild, v. a. für die Stadtplanung und -entwicklung von zentraler Bedeutung.

Integrierte Stadt(teil)entwicklungskonzepte beschreiben die Gegebenheiten und zeigen zukünftige Entwicklungen in Form von Leitsätzen und strategischen Zielen von Stadtteilen auf. Sie sind intersektoral und ganzheitlich und dienen als Handlungskonzept in der Verwaltung. Hier können Belange einer klimaangepassten Stadtentwicklung integriert und damit die Voraussetzung für deren Umsetzung geschaffen werden. In Fürth befindet sich das Integrierte Stadtentwicklungskonzept ISEK aktuell im Entstehungsprozess.

¹⁴ https://www.fuerth.de/fileadmin/redaktion/01-Rathaus/Ortsrecht/61_16-VVBS-2026-04-09.pdf

¹⁵ <https://frankfurt.de/themen/klima-und-energie/klimaanpassung/gestaltungssatzung-freiraum-und-klima>



Bei **städtebaulichen Planungen** können durch die Stadtverwaltung die Rahmenbedingungen so gesetzt werden, dass eine klimaangepasste Stadtentwicklung verfolgt wird. Gleiches gilt für **Rahmenpläne**, die als informelle Planungsinstrumente, Leitlinien und Zielsetzungen für die Entwicklung eines Gebietes oder Stadtteiles beinhalten. Hiermit kann ebenso eine klimaangepasste Stadtplanung verfolgt werden.

Die **Städtebauförderung** ist ein zentrales Instrument der Stadtentwicklungspolitik in Deutschland. Sie hilft, über **städtebauliche Sanierungsmaßnahmen** (§136 BauGB) die städtebaulichen Missstände zu beseitigen und stellt Fördermittel vom Bund und Land bereit. Sie kann dafür genutzt werden, stadtklimatische Missstände zu beseitigen – dazu zählt auch eine fehlende Klimaanpassung. Dies ist in Fürth bspw. mit der klimatischen Planungshinweiskarte als Ergebnis der Stadtklimaanalyse begründbar. So können in Teilgebieten oder im gesamten Stadtgebiet Maßnahmen für den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel vorangetrieben werden, indem bspw. klimafreundliche Mobilitätskonzepte oder das Anlegen von Grün- und Freiflächen gefördert werden.

Über **Modell- und Leuchtturmvorhaben** kann eine Kommune als Vorbild einer nachhaltigen klimaangepassten Stadtentwicklung vorangehen und die Lebensqualität in der Stadt erhalten und erhöhen. Als Positivbeispiel ist hier die Bahnstadt in Heidelberg zu nennen, wo energieeffizient gebaut wurde, die Energie aus erneuerbarer Energie stammt und viele Grünflächen vorhanden sind, die auch für eine Regenwasserbewirtschaftung dienen. Weiterhin wurde das Gebiet an den ÖPNV angebunden und Fahrradwege errichtet.

Förderprogramme können positive Anreize für Bauherren und Investoren bieten, bspw. mehr Grün auf Dächern, an Fassaden oder in Innenhöfen zu bringen oder weniger zu versiegeln. Die Städte Mannheim, Bremen oder Hamburg fördern bspw. Dachbegrünung und Entsiegelungsmaßnahmen.

In der untenstehenden Tabelle sind Beispiele aus Fürth und weiteren Städten aufgeführt, wie stadtklimatische Belange und die Anpassung an den Klimawandel verbindlich umgesetzt werden. Gängige Praxis ist es, Dach- und Fassadenbegrünung bei Neubauvorhaben und einer gewissen Dachgröße vorzuschreiben, wie es in Fürth schon der Fall ist, und bspw. auch in Hamburg und Berlin praktiziert wird. Dies geschieht einerseits über Gestaltungssatzungen (bspw. Fürth, Aachen, München) oder die Festsetzungen über Grünsatzungen in B-Plänen (bspw. B-Plan 460a (Golfpark) in Fürth) oder über Festlegungen im BauGB/Bau NVO wie Stuttgart es umsetzt. Aber auch Regelungen zur Baumpflanzung auf Grundstücken werden über Begrünungssatzungen wie bspw. in Frankfurt am Main oder Leipzig vorgeschrieben, wo ab einer Freifläche von 150m² mindestens ein Baum zu pflanzen ist. In Bremen sind die nicht für bauliche Anlagen genutzten Grundstücksflächen dauerhaft zu begrünen oder zu bepflanzen, großflächig angelegte Schottergärten sind unzulässig.

In fast allen Städten gibt es dazu Beratungsangebote und Förderungen, v. a. für Dach- und Fassadenbegrünung sowie Entsiegelungsmaßnahmen, um Investor:innen, Hausbesitzer:innen und Bürger:innen zu ermutigen, stadtklimatische Anpassungsmaßnahmen umzusetzen. In Fürth geschieht dies bspw. durch die Programme „Fürth blüht auf“ und das Programm zur Förderung von Hauseingangsbegrünung. Im Integrierten Stadtentwicklungskonzept werden weitere Ziele und Leitlinien sowie eine Umsetzungsstrategie entwickelt. Ein weiteres Mittel im städtebaulichen Planungsverfahren in Fürth ist, Vorgaben zur klimaangepassten Gestaltung in neu aufgestellten Bauplänen festzusetzen. Des Weiteren hat der Fürther Stadtrat am 21.12.2022 einen Grundsatzbeschluss zur Umsetzung einer blau-grünen Stadtentwicklung beschlossen. Zur schrittweisen Implementierung der Schwammstadtprinzipien sollen Maßnahmen wie Entsiegelung, versiegelungsarme Neubauplanung, wasserwirtschaftliche Konzepte sowie Dach- und Fassadenbegrünungen umgesetzt werden.



Tabelle 28: Best Practice Beispiele aus Fürth und verschiedenen anderen Städten für die Umsetzung von stadtklimatischen (Anpassungs-) Belangen. Quelle: Eigene Recherche (kein Anspruch auf Vollständigkeit)

Stadt	Was?	Wie?
Fürth	Die Versiegelungsverbots- und Begrünungssatzung regelt seit November 2025 verbindlich die Begrünung baulicher Anlagen und verbietet unnötige Bodenversiegelungen im gesamten Fürther Stadtgebiet. Dabei sollen entsiegelte Grundstücksflächen sichergestellt werden, um die Entstehung von lokalen Wärmeinseln oder überschwemmungsanfälligen Flächen zu verringern und somit ein gesundes Wohn- und Arbeitsumfeld in der Stadt Fürth zu erhalten und zu verbessern. Gleichzeitig soll durch die positive stadtgestalterische Wirkung der Dachbegrünungen eine gestalterische Aufwertung der Wohnquartiere erzielt werden. Konkrete Vorgaben: Dächer mit einer Neigung bis 20° und ab 50 m² müssen extensiv oder intensiv begrünt werden; nicht überbaute Grundstücksflächen dürfen nur versiegelt werden, wenn dies für ihre Nutzung zwingend erforderlich ist.	Versiegelungsverbots- und Begrünungssatzung https://www.fuerth.de/fileadmin/redaktion/01-Rathaus/Ortsrecht/61_16-VVBS-2026-04-09.pdf
Fürth	Das Förderprogramm „Fürth blüht auf“ unterstützt Privatpersonen, Unternehmen und Eigentümergemeinschaften bei der Begrünung von Privatgrundstücken, Fassaden, Dächern und der Anlage von Blühflächen sowie der Entsiegelung versiegelter Flächen. Ziel ist die Verbesserung des Stadtklimas, die Reduzierung des Hitzeinseleffekts und die Förderung der Artenvielfalt. Gefördert werden bis zu zwei Maßnahmen pro Grundstück und Jahr. Gefördert werden Baumpflanzungen, Dach- und Fassadenbegrünungen, Entsiegelungen, insektenfreundliche Blühflächen und baumpflegerische Maßnahmen mit, je nach Maßnahme, 50 bis 100 Prozent der Kosten.	Förderprogramm „Fürth blüht auf“ https://www.fuerth.de/umwelt-abfall/foerderprogramme/fuerth-blueht-auf/
Fürth	Die Hauseingangsbegrünung in Fürth fördert die Begrünung von Fassaden und Hauseingängen im Innenstadtbereich, insbesondere im sogenannten "Sanierungsgebiet Innenstadt". Ziel ist die Aufwertung des Stadtbilds, die Verbesserung des Mikroklimas und die Steigerung der Lebensqualität durch mehr Grünflächen. Interessierte Eigentümer:innen erhalten vom Quartiersmanagement umfassende Beratung und Unterstützung bei der Antragstellung. Das Programm "Sozialer Zusammenhalt" übernimmt die Kosten für den Einbau von Pflanzsteinen in den Gehwegbelag und die Montage von Edelstahl-Rankseilen.	Förderung Hauseingangsbegrünungen: https://www.fuerth.de/bauen-mobilitaet/stadtplanung-und-stadterneuerung/staedtebauforderung/quartiersmanagement/hauseingangsbegrueenungen/
Fürth	Um auf die aktuellen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und globalen Entwicklungen reagieren und die Stadt zukunftsweisend weiterentwickeln zu können, erarbeitet die Stadt Fürth im Dialog mit Bürger:innen, der Verwaltung und der Politik sowie weiteren Stakeholdern ein integriertes städtebauliches Entwicklungskonzept (ISEK). Das ISEK bezieht sich auf das gesamte Stadtgebiet (ca. 63 km²) von Fürth und wird die zukünftige Stadtentwicklung maßgeblich prägen. Ziel ist es, die Stadt mit ihrer dicht besiedelten Kernstadt sowie den umliegenden Stadtteilen zukunftsfähig aufzustellen und hierzu Leitlinien und Zielvorstellungen sowie eine Umsetzungsstrategie zu entwickeln.	ISEK https://www.fuerth.de/bauen-mobilitaet/stadtplanung-und-stadterneuerung/
Fürth	Fürth verfolgt seit 2022 die Umsetzung des Integrierten Klimaschutzkonzepts (IKSK). Dort sind einzelne Maßnahmen beschrieben, die sich der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels widmen und eine Verstärkung der Effekte auf die Bürger:innen und die Stadt vermindern und bestenfalls aufhalten sollen.	Integriertes Klimaschutzkonzept https://www.fuerth.de/fileadmin/redaktion/03-Umwelt/02-Dokumente-Allgemein/Integriertes-Klimaschutzkonzept-Stadt-Fuerth-barrierefrei.pdf



Fürth	Neu aufgestellte Bebauungspläne der Stadt Fürth enthalten klimafreundliche Festsetzungen. Hierzu zählen beispielsweise Festsetzungen zur Verwendung heller Materialien für Gebäudeoberflächen zur Reduzierung von Aufheizungseffekten sowie zur Begrünung von Dächern und Fassaden (Beispiel: Bebauungsplan Nr. 460a „Bereich entlang der Flugplatzstraße und westlich der Vacher Straße – Golfpark“).	Klimafreundliche Festsetzungen in neuen Bebauungsplänen
Fürth	Das Solar- und Gründachkataster der Stadt Fürth ist ein digitales Planungswerkzeug, das Eigentümer:innen zeigt, ob und wie sich ihr Dach für Photovoltaik, Solarthermie oder Begrünung eignet. Ziel ist die Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energien und die Verbesserung des Stadtklimas durch mehr Grünflächen, die Hitzeinseln reduzieren und die Biodiversität fördern. Es bietet eine einfache, datenbasierte Entscheidungshilfe für Bürger:innen und Unternehmen und wird gezielt mit Förderprogrammen wie „Fürth blüht auf“ verknüpft, um die Umsetzung zu beschleunigen	Solar- und Grünflächenkataster https://geoportal.fuerth.de/portal/apps/instant/portfolio/index.html?apid=f7b204c599ca4c92a5a83f7edbe74990
Zürich	Klimagerechtes Bauen wird bereits in Ausschreibungen für Bauprojekte und Architekturwettbewerbe gefordert. Als Grundlage dienen dafür Strategien und Konzepte. Es wird versucht, die gesetzlichen Vorgaben im Planungs- und Baugesetz und des Richtplanes des Kantons Zürichs anzupassen, um hitzemindernde Maßnahmen rechtlich zu verankern. Stadtklimatische Anliegen wurden in den behördenverbindlichen kommunalen Richtplänen Siedlung, Landschaft, öffentliche Bauten und Anlagen und Verkehr verankert.	Beratungsangebote und Förderprogramme https://www.stadt-zuerich.ch/de/umwelt-und-energie/klima/klimaanpassung/hitze/massnahmen-hitzeminderung.html Stadtratsbeschluss zur Massnahmenumsetzung aus der Umsetzungsagenda 2020 bis 2023 in den Dienstabteilungen. Gesetzliche Vorgaben Behördeninstrumente Strategien, Konzepte Beratung, Förderprogramme
Aachen	Grün- und Gestaltungssatzung mit Vorgaben zur Bepflanzung von Dächern, Stellplatzanlagen und gewerblichen Lagerplätzen (alle Flachdächer ab einer Größe von 200 m ² müssen dauerhaft zu 60% begrünt werden; alle Dachflächen von Tiefgaragen ab 200m ² müssen als Freiflächen nutzbar sein und intensiv begrünt werden (mind. 60%); pro 200 m ² Stellplatzanlage ist ein Baum mit einem Mindeststammumfang von 18-20cm innerhalb der Stellplatzanlage zu pflanzen; alle gewerblich genutzten Lager- und Ausstellungsflächen sind durch eine Hecke zu umgeben)	Satzung der Stadt Aachen https://www.aachen.de/in-aachen-leben/politik-und-verwaltung/stadtrecht/umweltschutz-gruenflaechen-und-friedhofe/fb-36-gruen-und-gestaltungssatzung.pdf
Mannheim	Finanzielle Förderung für Dach- und Fassadenbegrünung sowie Entsiegelungsmaßnahmen	Begrünungsförderrichtlinie https://api.klima-ma.de/api/subsidy-downloads/220601-forder-richtlinie-begrueung.pdf
Freiburg im Breisgau	Finanzielle Förderung und Beratungsangebot für Dach- und Fassadenbegrünung sowie Entsiegelungsmaßnahmen	GebäudeGrün hoch ³ – Förderrichtlinie https://www.freiburg.de/pb/1700720.html
Berlin	Finanzielle Förderung von Dach- und Fassadenbegrünung, Gesetzliche Vorschriften für Neubauprojekte zur Begrünung von Flachdächern größer 100m ²	GründachPLUS – Förderrichtlinie https://www.berlin.de/sen/uvk/natur-und-



		gruen/stadtgruen/gebaeu-degruen/gruendachplus/ 6. Änderung der Bauordnung https://www.berlin.de/rbms-kzl/aktuelles/pressemitteilungen/2023/pressemitteilung.1369717.php
Bremen	Finanzielle Förderung für Entsiegelungsmaßnahmen, Gesetzliche Vorschriften für Neubauprojekte zur Begrünung von Freiflächen (unbebaute Grundstücksflächen) und Flachdachflächen ab einer Größe von 100m ²	Begrünungsortsgesetz Bremen https://www.transparenz.bremen.de/metainformationen/ortsgesetz-ueber-die-begrueung-von-freiflaechen-und-flachdachflaechen-in-der-stadt-gemeinde-bremen-be-gruenungsortsgesetz-bremen-vom-28-maerz-2023-190867?asl=bremen203_tpge-setz.c.55340.de&temp-late=20_gp_ifg_meta_detail_d Förderrichtlinie für die Gewährung von Zuschüssen bei der Entsiegelung (bis 31.12.2024) https://www.transparenz.bremen.de/metainformationen/foerderrichtlinie-fuer-die-gewaehrung-von-zuschuessen-bei-der-entsiegelung-von-flaechen-im-land-bremen-213482?asl=bremen203_tpge-setz.c.55340.de&temp-late=20_gp_ifg_meta_detail_d
Stuttgart	Finanzielle Förderung von Dach-, Fassaden und Freiflächenbegrünung sowie der Anlage von artenreichen Blühflächen, Planungsrechtliche Zusatzfestsetzungen im BauGB für das Stadtgebiet: Begrünungsverpflichtung für Oberflächen von Unterbauten Flachdächern und Stellplätzen	Förderprogramme Urbanes Grün https://www.stuttgart.de/leben/stadtentwicklung/stadtplanung/stadterneuerung/foerderprogramme-urbanes-gruen Richtlinie Stuttgarter Grünprogramm https://www.stuttgart.de/rathaus/verwaltung/stadtrecht/3/3-9-richtlinie-stuttgarter-gruenprogramm-foerderung-der-dach-fassaden-und-freiflaechenbegrueung-sowie-der-anlage-von-artenreichen-bluehflaechen-in-der-landeshauptstadt-stuttgart
München	Pflicht zur Begrünung von Flachdächern und vergleichbar geeigneten Dächern ab einer Gesamtfläche von 100m ² (inkl. Garagen und Tiefgaragenzufahrten); Pflicht zur Begrünung von Stellplätzen und der Verwendung von wasserdurchlässigen Belägen (je ein Baum (20-25cm Stammdurchmesser) pro 5 Stellplätzen)	Gestaltungs- und Begrünungssatzung https://stadt.muenchen.de/rathaus/stadtrecht/vorschrift/924.pdf



	Gesetzliche Festschreibung des sozial gerechten Klimaschutz (Klimastrategie) und der Klimaanpassung (Umsetzung hoher energetischer Gebäudestandards in Verbindung mit erneuerbaren Energien, Steigerung der Nutzung von Solarenergie, klimafreundliche Mobilität, Klimaanpassung durch grüne und blaue Infrastruktur, Schwammstadtprinzip, zirkuläre Wirtschaftskreisläufe, nachhaltige Lebensstile) Finanzielle Förderung für Begrünungsmaßnahmen (Dachbegrünung, Fassadenbegrünung) Entsiegelungsmaßnahmen oder der Gestaltung von naturnahen Firmengeländen	Satzung zur Umsetzung sozial gerechter Klimaziele https://stadt.muenchen.de/rat-haus/stadtrecht/vorschrift/380.pdf mittels Finanzierung, Monitoring, Bildung und Fortbildung, einem Klimarat, Klimaschutzvereinbarungen mit privaten Unternehmen, Klimaschutzpreis Richtlinie Förderprogramm zur Begrünung https://stadt.muenchen.de/infos/foerderprogramm-priv-gruen.html
Offenbach	Finanzielle Förderung für Entsiegelungsmaßnahmen	Entsiegelungsrichtlinie https://gruene-offenbach.de/2021/11/08/schwammstadt-offenbach-entsiegeln-statt-verdoerren-und-ueberschwemmen/
Bergkamen	Finanzielle Förderung für Entsiegelungs- und Rückbaumaßnahmen von Schottergärten und versiegelten Vorgartenflächen	Entsiegelungsrichtlinie https://www.bergkamen.de/files/bk/pdf/aktuelles/wirtschaft-bauen-verkehr-umwelt/entsiegelung-und-ruckbau-von-schottergarten_antragsformular-forderrichtlinie.pdf
Ettlingen	Finanzielle Förderung von Entsiegelungs- und Dachbegrünungsmaßnahmen	Förderrichtlinie Entsiegelungs- und Dachbegrünungsmaßnahmen https://www.ettlingen.de/entwickeln/klima+und+umwelt/Umwelt+Natur+und+Klimaschutz/dachbegruenungs+und+entsiegelungsmassnahmen
Leipzig	Finanzielle Förderung für Gründächer (Höhe des Zuschlages richtet sich nach Gründachkategorie (Extensiv Gründach, Intensiv Gründach, Solar Gründach, Biodiversitäts Gründach, Retentions Gründach) Finanzielle Förderung zur Erhaltung und Entwicklung der grün-blauen Infrastruktur (Parks, Grünanlagen, städtischer Baumbestand, Stadtwald, Spiel- und Naturerfahrungsräume, Gewässer) Gesetzliche Untersagung von Stein- und Schottergärten durch Vorgartensatzung Entwurf zur Begrünungssatzung enthält unter anderem folgende Regelungen: pro 150m² Freifläche ist mind. 1 Baum (18-20cm Stammumfang) gepflanzt werden; Decken von Tiefgaragen sollen künftig begrünt werden; auf mind. 10% der Freiflächen sind Sträucher zu pflanzen	Gründachförderung https://www.leipzig.de/umwelt-und-verkehr/energie-und-klima/klimawandelanpassung-und-stadtklima/gruendachfoerderung#c256940 Förderprogramm der Stadt Leipzig Naturbasierte Lösungen zur Anpassung an den Klimawandel https://www.leipzig.de/buergerservice-und-verwaltung/aemter-und-behoerdengaenge/satzungen/details/satzung/8-17



		Förderrichtlinie grün-blaue Infrastruktur https://www.leipzig.de/buer-gerservice-und-verwaltung/aem-ter-und-behoerdengaenge/satzungen/details/satzung/3-21 Begrünungssatzung - Satzung der Stadt Leipzig über die Gestaltung und Ausstattung der unbebauten Flächen der bebauten Grundstücke und über die Begrünung baulicher Anlagen https://www.leipzig.de/buer-gerservice-und-verwaltung/aem-ter-und-behoerdengaenge/satzungen/details/satzung/6-28
--	--	--



Quellenverzeichnis

- Augter, G. (1997). *Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte*. Deutscher Wetterdienst.
- BBSR & BBR. (2019). *KLIBAU – Weiterentwicklung und Konkretisierung des Klimaangepassten Bauens*. (K:_GRUNDLAGENLiteraturMaßnahmen_HumanbioklimaBBSR_2019_KlimaangepasstesBauen_endbericht.pdf). https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2018/klibau/endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- 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>
- BlueGreenStreets (Hrsg.). (2022). *BlueGreenStreets Toolbox – Teil A. Multifunktionale Straßenraumgestaltung urbaner Quartiere* (Stand: März 2022). HafenCity Universität Hamburg.
- BUE. (o. J.). *Mehr Gründächer für Hamburg: Broschüre* (Freie und Hansestadt Hamburg, Hrsg.). (K:_GRUNDLAGENLiteraturBegrünungGründach_Solarthermie_S.29.pdf). Abgerufen <https://www.hamburg.de/contentblob/4599638/baf6f2302bfa9162490113babe005269/data/d-broschuere.pdf>
- 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/>
- 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>
- Chen, Y.-C., Tan, C.-H., Wei, C., & Su, Z.-W. (2014). Cooling Effect of Rivers on Metropolitan Taipei Using Remote Sensing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(2), 1195–1210. <https://doi.org/10.3390/ijerph110201195>



- de Martonne, E. (1926). L'indice d'aridité. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 3(9), 3–5.
<https://doi.org/10.3406/bagf.1926.6321>
- Deutscher Städtetag. (2023). *Klimaschutz und Klimaanpassung als Pflichtaufgabe. Diskussionspapier Deutscher Städtetag*. <https://www.staedtetag.de/files/dst/docs/Publikationen/Positionspapiere/2024/diskussionspapier-klimaschutz-klimaanpassung-pflichtaufgabe-2024-2.pdf>
- 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. (2020). *Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut*. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20201112_stadtklimastation_dresden_neustadt_news.html
- DWD. (2022). *Nationaler Klimareport* (6. überarbeitete Auflage). Deutscher Wetterdienst. https://www.dwd.de/DE/leistungen/nationalerklimateport/download_report.pdf;jsessionid=B0A90BE96E70B4EB4F9FD6717A50D3C6.live21063?__blob=publicationFile&v=15
- DWD. (2023). *Stadtklima—Die städtische Wärmeinsel*. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/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, März). *Bodenfeuchte*. https://www.dwd.de/DE/fachnutzer/landwirtschaft/dokumentationen/allgemein/bf_erlaeuterungen.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- DWD. (2026a). *Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD. (2026b). *Datenbasis Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD. (2026c). *Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur*. Erläuterungen zur Gefühlten Temperatur. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/gefahrendizesthermisch/gefuehltetemp.html?lsbid=463812>



- DWD. (2026d). *Wetter- und Klimalexikon*. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html>
- DWD. (2026e). *Wetter- und Klimalexikon—Klima*. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=101334&lv3=101462>
- 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>
- Fischer, A. M., Weigel, A. P., Buser, C. M., Knutti, R., Künsch, H. R., Liniger, M. A., Schär, C., & Appenzeller, C. (2012). Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *International Journal of Climatology*, 32(15), 2348–2371. <https://doi.org/10.1002/joc.3396>
- FLL. (2018). *Dachbegrünungsrichtlinien—Richtlinien für Planung, Bau und Instandhaltung von Dachbegrünungen* (Ausgabe 2018, 6. Ausgabe). Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. <https://shop.fll.de/de/dachbegruenungsrichtlinien-richtlinien-fuer-die-planung-bau-und-instandhaltungen-von-dachbegruenungen-2018-broschuere.html>
- 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 – Arbeitskreis Stadtbäume. (2023). *Zukunftsbäume für die Stadt*. Bund deutscher Baumschulen (BdB). <https://www.galk.de/component/jdownloads/?task=download.send&id=664&catid=4&Itemid=2057>
- Geo - Net Umweltconsulting GmbH. (2025). *Klimaökologisches Gutachten für das Bebauungsplanverfahren 350a Seeackerstraße in Fürth*. Geo - Net Umweltconsulting GmbH.
- Gilfillan, D., Marland, G., Boden, T., & Andres, R. (2020). *Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2 Emissions: 1751-2017* [Dataset]. Environmental System Science Data Infrastructure for a Virtual Ecosystem; CDIAC-FF, Research Institute for Environment, Energy, and Economics, Appalachian State University. <https://doi.org/10.15485/1712447>
- 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. (1992). Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research*, 10(4–6), 483–498. (K:_GRUNDLAGENLiteraturFITNAH_DOKUResultsOfSupercomputerSimulationsOfMeteorologicalMesoscalePhenomena_Gross_1992.pdf).
[https://doi.org/10.1016/0169-5983\(92\)90035-U](https://doi.org/10.1016/0169-5983(92)90035-U)
- Gross, G. (2002). The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model. *Meteorologische Zeitschrift*, 11(4), 295–302. (K:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2002_Exploration of boundary layer phenomena mesoscale model.pdf).
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2002/0011-0295>
- Gross, G. (2012a). Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments. *Meteorologische Zeitschrift*, 21(4), 399–412. (K:_GRUNDLAGENLiteraturModelleAsmusGross_2012_effects_of_different_vegetation_on_temperature_in_an_urban_building_enviroment_ggross.pdf). <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. (2017). Some effects of water bodies on the n environment–numerical experiments. *Journal of Heat Island Institute International*. (k:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2017_Some effect of water bodies on the urban environment.pdf). https://www.heat-island.jp/web_journal/JGM8SpecialIssue/2-1_gross.pdf
- Gross, G. (2021). A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area. *Meteorologische Zeitschrift*, 30(3), 227–236.
<https://doi.org/10.1127/metz/2021/1066>
- Gross, G., Frey, T., & Trute, P. (2002). On the applicability of numerical models for calculating local winds in complex terrain; Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhaeltnisse in komplexem Gelaende. *DEWI-Magazin*, (20). (K:_GRUNDLAGENLiteraturPublikationen_GuenterGross 2001_On the applicability of a numerical model system for calculating new European air pollution measures.pdf).



- HeatResilientCity. (2022). *Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten: Wissenschaftliches Konzept zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes eines Gründerzeit-Mehrfamilienhauses der Erfurter Oststadt*. http://heatresilientcity.de/fileadmin/user_upload/heatresilientcity/files/Konzepte/Gebaeudekonzept_fuer_Mehrfamilienhaeuser_der_Gruenderzeit.pdf
- 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
- Höppe, P., & Mayer, H. (1987). Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt*, 19, 22–29.
- 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>
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Core Writing Team, R. K. Pachauri, & L. A. Meyer, Hrsg.). <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- ISO. (1989). *ISO7243:1989. Hot environments—Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature (7243; Version 2nd)*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/13895/59f0e814f83345bba03bd2bba1632cb6/ISO-7243-1989.pdf>
- Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A., & Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research*, 10(1), 99–106. <https://doi.org/10.5194/asr-10-99-2013>



- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., & Engelmann, W. H. (2001). The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): A resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 11(3), 231–252. <https://doi.org/10.1038/sj.jea.7500165>
- Klimabündnis. (2022). *Klimaschutz und Klimaanpassung als kommunale Pflichtaufgabe(n) verankern*. https://www.klimabuendnis.org/wp-content/uploads/2025/07/Klima-Buendnis-Positionspapier_Klimaschutz-und-Klimaanpassung-als-kommunale-Pflichtaufgaben-verankern_Kurzfassung_092022.pdf
- Knutti, R., Furrer, R., Tebaldi, C., Cermak, J., & Meehl, G. A. (2010). Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate*, 23(10), 2739–2758. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1>
- 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
- Kowarik, I., Bartz, R., & Brenck, M. (Hrsg.). (2016). *Ökosystemleistungen in der Stadt*. Naturkapital Deutschland-TEEB DE. https://www.ufz.de/export/data/global/190508_TEEB_DE_Stadtbericht_Langfassung.pdf
- Kuttler, W. (2013). *Klimatologie* (2., aktualisierte und erg. Aufl., Bd. 3099). Schöningh. <https://doi.org/10.36198/9783838540597>
- 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, März). *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“*.
- Lozan, J., Graßl, H., Jendritzky, G., Karbe, L., & Reise, K. (2008). *Warnsignal Klima*.
- maribus. (2024). *Die Szenarien des Weltklimarats*. World Ocean Review. <https://worldoceanreview.com/de/wor-5/bedrohung-durch-klimawandel-und-naturgefahren/der-klimawandel-und-die-kuesten/die-szenarien-des-weltklimarats/>



- Mayer, H., Beckroege, W., & Matzarakis, A. (1994). *Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen* (UVP-Report 5, S. 265–268).
- 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>
- Migliari, M., Chesne, L., Postal, A., Despax, J., Dogbo, A.-M., Ulanowski, Y., Laporte, S., Nicholson, S., & Baverel, O. (2025). Street albedo distribution's impacts on air temperature and outdoor thermal sensation during heat and cold waves. *Urban Climate*, (63).
- 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>
- 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. (K:_GRUNDLAGENLiteraturMossetal.2010.pdf). <https://doi.org/10.1038/nature08823>
- Müller, U., & Kuttler, W. (Hrsg.). (1999). Human-biometeorologische Bewertung stadtklimatologischer Erkenntnisse für die Planungspraxis. In *Workshop Stadtklima: 17./18. Februar 1999 in Leipzig*. Inst. für Troposphärenforschung. Workshop Stadtklima, Leipzig.
- 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>



- Pfoser, N., Jenner, N., Heusinger, J., & Weber, S. (2013). *Gebäude, Begrünung und Energie: Potenziale und Wechselwirkungen*. (S. 307). TU Darmstadt. (K:_GRUNDLAGENLiteraturBegrünungForschungsprojekt_BauBuildingGreeningEnergy_Abschlussbericht_F_2881.pdf). <https://www.irbnet.de/daten/rswb/13109006683.pdf>
- Pinto, J. G., & Reyers, 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>
- Rodríguez Castillejos, Z., Kruse, E., Dickhaut, W., & Dietrich, U. (Hrsg.). (2017). *Mein Haus—In Zukunft klimaangepasst!* (1. Auflage). Tutech Verlag. (K:_GRUNDLAGENLiteraturMaßnahmen_HumanbioklimaLeitfaden_Mein_Haus_in_Zukunft_Klimaangepasst_HCU_BUE.pdf).
- Roloff, A., Bonn, S., & Gillner, S. (2008). *Klimawandel und Baumartenwahl in der Stadt – Entscheidungsfindung mit der Klima-Arten-Matrix (KLAM)* (S. 9). (K:_GRUNDLAGENLiteraturMaßnahmen_HumanbioklimaBaumartenklam_stadt.pdf). <https://62.96.236.95/sixcms/media.php/738/KLAM-Stadt%20Frankfurt%2009-2008.pdf>
- 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>
- Schlünzen, K. H., Riecke, W., Bechtel, B., Boettcher, M., Buchholz, S., Grawe, D., Hoffmann, P., Petrik, R., Schoetter, R., Trusilova, K., & Wiesner, S. (2018). Stadtklima in Hamburg. In H. Von Storch, I. Meinke, & M. Claußen (Hrsg.), *Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen*



in Hamburg und Norddeutschland (S. 37–53). Springer Berlin Heidelberg.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-55379-4_3

Stachowiak, H. (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Springer Verlag.

Stadt Freiburg i. Br. (2025). *Klimaanpassungsstrategie*. https://www.freiburg.de/pb/site/Freiburg/get/documents_E734943764/freiburg/daten/umwelt/Klimaanpassungsstrategie-FR_2025-04-10.pdf

Stadt Fürth. (2021). *Integriertes Klimaschutzkonzept der Stadt Fürth*. <https://www.fuerth.de/umwelt-abfall/klima/konzept-und-weg-zur-klimaschutzstadt/>

Stadt Fürth. (2026). *Förderprogramm „Fürth blüht auf“*. <https://www.fuerth.de/umwelt-abfall/foerderprogramme/fuerth-blueht-auf/>

Stadt Karlsruhe. (2015). *Klimaanpassungsplan*. <https://www.karlsruhe.de/mobilitaet-stadtbild/stadtplanung/staedtebauliche-projekte/klimaanpassungsplan>

STMUV. (2026). *Wassersensible Siedlungsentwicklung*. https://www.stmuv.bayern.de/themen/wasserwirtschaft/abwasser/wassersensible_siedlungsentwicklung/index.htm

UBA (Hrsg.). (2021a). *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland—Kurzfassung. Climate Change*, (26), 117. (k:_GRUNDLAGENLiteraturUBA_Veröffentlichungenkwra2021_teilbericht_zusammenfassung_bf_211027_0.pdf).

UBA. (2021b, März 15). *Häufige Fragen zum Klimawandel*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel>

UBA. (2023). *Dreifache Innenentwicklung*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/1410/publikationen/230515_uba_hg_dreifacheinnenentwicklung_2auflg_br.pdf

UBA. (2025a). *Trends der Lufttemperatur* [Text]. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur>

UBA. (2025b). *Trends der Niederschlagshöhe* [Text]. Umweltbundesamt. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>



- Urban, H., & Steininger, K. W. (2015). Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In K. Steininger, M. König, B. Bednar-Friedl, L. Kranzl, W. Loibl, & F. Prettenthaler (Hrsg.), *Economic Evaluation of Climate Change Impacts* (S. 301–322). Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12457-5_16
- VDI 3783, Blatt 7. (2017). *Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle—Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder: VDI 3783/7*. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3783-blatt-7-umweltmeteorologie-prognostische-mesoskalige-windfeldmodelle-evaluierung-fuer-dynamisch-und-thermisch-bedingte-stroemungsfelder>
- VDI 3785, Blatt 1. (2008, Dezember). *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, September). *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. (2008, November). *Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung von Klima und Lufthygiene für die Stadt- und Regionalplanung—Teil I: Klima*. https://www.vdi.de/nc/richtlinie/vdi_3787_blatt_2-umweltmeteorologie_methoden_zur_human_biometeorologischen_bewertung_von_klima_und_lufthy_/
- VDI 3787, Blatt 5. (2003). *Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft*. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-3787-blatt-5-umweltmeteorologie-lokale-kaltluft>
- 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
- Zürich, S. (Hrsg.). (2020). *Fachplanung Hitzeminderung*. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>



Anhang

Anhang A1

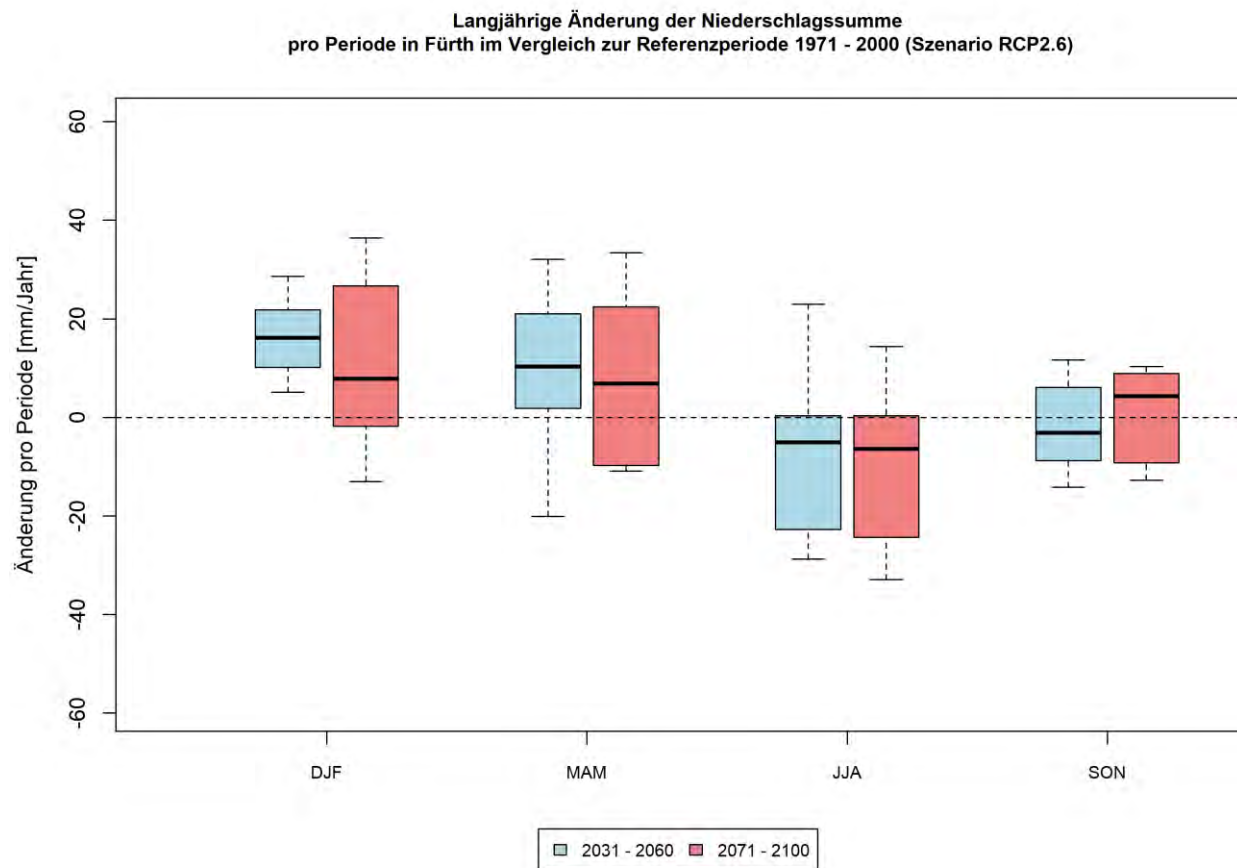


Abb. A 1: Änderung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen in Fürth (RCP 2.6)



Anhang A2

Liste der im Rahmen der Klimaanalyse Fürth erstellten Karten (*png 300 dpi, Format DIN A0)

Modellergebnisse

- 7 Karten: Modellergebnis PET 14 Uhr
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien
- 7 Karten: Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien
- 7 Karten: Modellergebnis Strömungsgeschwindigkeit 4 Uhr Ist-Situation
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien
- 7 Karten: Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom 4 Uhr Ist-Situation
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien
- 7 Karten: Modellergebnis Kaltluftproduktion 4 Uhr Ist-Situation
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien

Klimaanalysekarten

- Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien

Bewertungskarten

- 7 Karten: Bewertungskarte Nachtsituation
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien
- 7 Karten: Bewertungskarte Tagsituation
 - Jeweils einzeln für die Ist-Situation und die 6 Zukunftsszenarien

Sensitivitätsanalyse

- Sensitivitätsanalyse Kinder
- Sensitivitätsanalyse Senioren
- Sensitivitätsanalyse Gesamt

Planungshinweiskarte