



# Stadtklimaanalyse 2024

## Klimaanalyse für das Hanauer Stadtgebiet



Auftraggeberin:

Magistrat der Stadt Hanau



erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

November 2024





# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abbildungsverzeichnis .....	IV
Tabellenverzeichnis .....	IX
Glossar .....	XI
1. Hintergrund und Anlass .....	1
2. Fachliche Grundlagen .....	3
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit .....	3
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse.....	8
2.3 Stadtklima und Lufthygiene .....	10
2.4 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik.....	13
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess.....	18
4. Klima und Klimawandel in Hanau .....	21
4.1 Datengrundlage und Methodik.....	21
4.2 Gegenwärtiges Klima .....	26
4.3 Autochthone Wetterlagen.....	28
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen.....	29
4.4.1 Temperaturerhöhung & Hitze.....	30
4.4.2 Niederschlagsverschiebung & Trockenheit.....	38
4.4.3 Starkniederschlag.....	44
4.4.4 Wind & Sturm .....	48
4.5 Zusammenfassung.....	48
5. Analysemethoden.....	53
5.1 Messkampagne.....	53
5.1.1 Stationsbasierte Messung: Langzeitmesskampagne (01.06. – 31.08.2022).....	54
5.1.1.1 Standorte der Langzeitmesskampagne .....	54
5.1.1.2 Messgeräte und Methodik der Langzeitmesskampagne.....	60
5.1.1.3 Regionale Klimatologie des Messzeitraumes .....	60
5.1.2 Profilmessfahrt: Intensivmesskampagne: Messfahrten (19./20.07.2022) .....	61
5.1.2.1 Befahrene Route .....	61
5.1.2.2 Messgeräte und Methodik der Messfahrten.....	62
5.1.2.3 Wettersituation am Tag der Messfahrten (19./20.07.2022) .....	64
5.2 Numerische Modellierung .....	64





5.2.1	Das Stadtklimamodell FITNAH-3D.....	64
5.2.2	Szenarientwicklung .....	70
5.2.3	Aufbereitung der Modelleingangsdaten .....	73
5.2.4	Rahmen- und Randbedingungen .....	78
5.2.5	Modellausgabegrößen .....	81
5.2.6	Modellierung der Lufthygiene.....	83
5.2.7	Qualitätssicherung .....	90
5.2.8	Unsicherheiten und Herausforderungen .....	91
6.	Analyseergebnisse .....	94
6.1	Messkampagne.....	94
6.1.1	Stationsbasierte Messung: Langzeitmesskampagne (01.06. – 31.08.2022).....	94
6.1.1.1	Auswertung von Klimakenntagen im untersuchten Zeitraum (01.06.2022 – 31.08.2022)	94
	6.1.1.1.1 Heiße Tage .....	94
	6.1.1.1.2 Sommertage .....	96
	6.1.1.1.3 Tropennächte.....	97
6.1.1.2	Auswertung dominierender Windrichtungen im untersuchten Zeitraum (01.06.2022 – 31.08.2022).....	98
6.1.1.3	Auswertung einer exemplarischen Hitzeperiode vom 17.07.2022 bis 20.07.2022 ....	103
6.1.2	Profilmessfahrt: Intensivmesskampagne: Messfahrten (19./20.07.2022) .....	108
6.1.2.1	Erste Nachthälfte – Auswertzeitpunkt 23 Uhr.....	108
6.1.2.2	Zweite Nachthälfte – Auswertzeitpunkt 04 Uhr .....	110
6.2	Numerische Modellierungen Klimaökologie .....	113
6.2.1	Nachtsituation.....	113
6.2.1.1	Nächtliches Temperaturfeld.....	113
6.2.1.2	Kaltluftströmungsfeld in der Nacht .....	116
6.2.2	Tagsituation .....	120
6.2.2.1	Wärmebelastung am Tag (PET) .....	120
6.3	Numerische Modellierungen Lufthygiene .....	123
6.3.1	Allgemeines.....	123
6.3.2	Räumliche Ausprägung der Stickstoffdioxidbelastung .....	124
7.	Zwischenprodukte .....	126
7.1	Klimatopkarte .....	126
7.1.1	Grundlagen .....	126
7.1.2	Eingangsdaten.....	126



7.1.3	Konzept zur Ableitung der Klimatope .....	126
7.2	Klimaanalysekarte .....	131
8.	Kartenprodukte für Bewertung und Planung.....	136
8.1	Grundlagen .....	136
8.2	Geometrische Basis .....	137
8.3	Bewertungskarten .....	138
8.3.1	Wirkraum .....	138
8.3.2	Ausgleichsraum.....	140
8.3.3	Zusätzliche Karteninhalte zum Kaltluftprozessgeschehen – Methodik.....	142
8.3.4	Ergebnisse Bewertungskarten .....	143
8.3.4.1	Nachtsituation.....	143
8.3.4.2	Tagsituation.....	146
8.4	Sensitivitätsanalyse.....	150
8.4.1	Datengrundlage .....	150
8.4.2	Methodik.....	151
8.4.3	Sensitivitätsanalysekarte.....	153
8.4.4	Empfehlungen und Maßnahmen .....	155
8.5	Planungshinweiskarte .....	156
8.5.1	Stadtklimatische Handlungspriorität im Wirkraum.....	158
8.5.2	Stadtklimatischer Schutzbedarf im Ausgleichsraum .....	160
8.6	Vergleich mit der Stadtklimaanalyse 1992.....	163
8.7	Maßnahmenkatalog.....	165
8.8	Stadtklimamanagementsystem .....	181
	Zusammenfassung.....	183
	Quellenverzeichnis.....	186
	Anhang.....	193





# Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020)) .....	3
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018) .....	5
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN ET AL. 2021).....	6
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019) .....	7
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 BIS 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019) .....	8
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)) .....	9
ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015) .....	14
ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER PLANUNGSHINWEISKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015) .....	15
ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022A, 18) .....	16
ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE .....	18
ABBILDUNG 11: ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN IPCC-KLIMASZENARIEN, DIE SCHWARZE LINIE REPRÄSENTIERT MESSWERTE (CUBASCH ET AL. 2013). .....	24
ABBILDUNG 12: KLIMADIAGRAMM DER STADT HANAU FÜR DEN ZEITRAUM 1981 BIS 2010, BASIEREND AUF DEN DWD-GRID-DATEN) (NACH DWD 2020B).....	26
ABBILDUNG 13: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN HANAU IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2021 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022A) .....	27
ABBILDUNG 14: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN HANAU FÜR DEN ZEITRAUM 1981 – 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION FRANKFURT/MAIN (DWD 2022A).....	28
ABBILDUNG 15: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN HANAU (74 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1981 BIS 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION FRANKFURT/MAIN (DWD 2020A) .....	29
ABBILDUNG 16: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN HANAU ALLE SZENARIEN. DIE DURCHGEZOGENEN LINIEN SIND DIE MEDIANE DER EINZELNEN SZENARIEN DES ENSEMBLES. DER MÖGLICHKEITSBEREICH BILDET DIE BANDBREITE ZWISCHEN KLEINSTEM UND GRÖßTEM WERT DES ENSEMBLES.....	30
ABBILDUNG 17: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS. ....	32
ABBILDUNG 18: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN HANAU, SZENARIO RCP 8.5.(OBEN) UND RCP 2.6 (UNTEN). .....	34
ABBILDUNG 19: ÄNDERUNG DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN (AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT TMAX ≥ 30 °C) IN HANAU, SZENARIO RCP 2.6. ....	36
ABBILDUNG 20: ÄNDERUNG DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN (AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT TMAX ≥ 30 °C) IN HANAU, SZENARIO RCP 8.5. ....	37
ABBILDUNG 21: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN HANAU, ALLE SZENARIEN. ....	38
ABBILDUNG 22: LANGJÄHRIGE MITTLERE ÄNDERUNGEN DER JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN HANAU, SZENARIO RCP 2.6. ....	39
ABBILDUNG 23: LANGJÄHRIGE MITTLERE ÄNDERUNGEN DER JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN HANAU, SZENARIO RCP 8.5. ....	40
ABBILDUNG 24: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN HANAU, SZENARIO RCP 2.6 (OBEN) UND RCP 8.5 (UNTEN). ....	41



ABBILDUNG 25: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN HANAU, SZENARIO RCP 2.6 (OBEN) UND RCP 8.5 (UNTEN). .....43

ABBILDUNG 26: ZEITLICHER TREND DER ANZAHL AN TAGEN MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG ( $N \geq 20$  MM/D) IN HANAU, ALLE SZENARIEN. ....45

ABBILDUNG 27: TRENDBEWERTUNG DES ZEITLICHEN TRENDS DER TAGE MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG ( $N \geq 20$  MM/D), SZENARIO RCP 8.5. ....45

ABBILDUNG 28: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT  $N \geq 30$  MM/D INNERHALB DES JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN ZEITRAUMES IN HANAU, SZENARIO RCP 2.6. ....46

ABBILDUNG 29: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT  $N \geq 30$  MM/D INNERHALB DES JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN ZEITRAUMES IN HANAU, SZENARIO RCP 8.5. ....47

ABBILDUNG 30: URBANER STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AM ALTENHILFEZENTRUM BERNHARD EBERHARD IN HANAU MIT BLICKRICHTUNG OST-NORDOST (OBEN) UND ALS GOOGLE EARTH-DRAUFSICHT AUS 500 M HÖHE; PINKER PIN MARKIERT DEN STANDORT (UNTEN). ....56

ABBILDUNG 31: RURALER STANDORT DER LANGZEITMESSUNG AUF DER WIESENFLÄCHE DER GRÜNGUTANNAHME KLEIN-AUHEIM IM SÜDWESTEN HANAUS MIT BLICKRICHTUNG NORDWEST (LINKS) UND ALS GOOGLE EARTH-DRAUFSICHT AUS 500 M HÖHE; GRÜNER PIN MARKIERT DEN STANDORT (RECHTS). ....57

ABBILDUNG 32: STANDORT „INNERSTÄDTISCHE AUSGLEICHFLÄCHE“ DER LANGZEITMESSUNG AUF DEM GELÄNDE DES HEINRICH-FISCHER-BADS IN HANAU MIT BLICKRICHTUNG SÜDWEST (LINKS) UND ALS GOOGLE EARTH-DRAUFSICHT AUS 500 M HÖHE; TÜRKISER PIN MARKIERT DEN STANDORT (RECHTS). ....58

ABBILDUNG 33: STANDORT IN MAINNÄHE DER LANGZEITMESSUNG AUF DER WIESENFLÄCHE DES FLURSTÜCKS 191 MIT BLICKRICHTUNG NORDOST (LINKS) UND ALS GOOGLE EARTH-DRAUFSICHT AUS 500 M HÖHE; BLAUER PIN MARKIERT DEN STANDORT (RECHTS). ....59

ABBILDUNG 34: MOBILE MESSROUTE IM STADTGEBIET HANAU (ROTE LINIE) SOWIE DIE VIER MESSSTATION IM STADTGEBIET HANAU (URBAN – PINKER PIN, RURAL – GRÜNER PIN, INNERSTÄDTISCHE AUSGLEICHFLÄCHE – HELLBLAUER PIN UND MAINNÄHE – DUNKELBLAUER PIN) LUFTBILD: HLBG, MAXAR, MICROSOFT, 2023. ....61

ABBILDUNG 35: ANBRINGUNG DES TEMPERATURSENSORS FÜR DIE MESSFAHRT AM PKW (LINKS), HÖHE ÜBER GRUND (MITTE) UND SEITLICHER ABSTAND VOM FAHRZEUG (RECHTS). ....62

ABBILDUNG 36: SYMBOLBILD ZUR ERLÄUTERUNG DER 30 M-PUFFERZONE RUND UM DIE MESSROUTE ZUR MODELLMITTELWERTBILDUNG. DER BLAUE PUNKT IM AUSSCHNITT MARKIERT DIE KLIMAMESSSTATION IN MAINNÄHE. ....63

ABBILDUNG 37: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D .....67

ABBILDUNG 38: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRALUNGSTAGES .....69

ABBILDUNG 39. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE) .....71

ABBILDUNG 40: DIGITALE GELÄNDEMOMENT FÜR HANAU UND DIE NÄHERE UMGEBUNG. ....75

ABBILDUNG 41: MODELLEINGANGSDATEN „NUTZUNGSKLASSEN“ (LEGENDE IN DER RECHTEN ABBILDUNG) FÜR DAS HANAUER STADTGEBIET IN EINEM AUSSCHNITT DER HANAUER KERNSTADT (LINKS). ....76

ABBILDUNG 42: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION .....77

ABBILDUNG 43: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992) .....78

ABBILDUNG 44: AUSGANGSPROFIL DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE MODELLIERUNG DER BESTANDSSITUATION (GRÜNE KURVE) SOWIE FÜR DIE SZENARIEN „SCHWACHER“ (BLAUE) UND „STARKER“ KLIMAWANDEL (ROT). .79

ABBILDUNG 45: BERÜCKSICHTIGTES STRAßENNETZ IM STADTGEBIET VON HANAU, KLASSIFIZIERT NACH DEN DURCHSCHNITTLICHEN TÄGLICHEN VERKEHRSMENGEN (DATEN: HESSEN MOBIL (2021), STADT HANAU (2022)) .....85

ABBILDUNG 46: STRAßENVERKEHRSBEDINGTE EMISSIONSDICHEN VON STICKOXIDEN (NOX) IN GRAMM PRO METER UND TAG ( $G / M \cdot D$ ) .....86





ABBILDUNG 47: AKTERM DER STATION 7341 OFFENBACH WETTERPARK DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES (DATEN UND GRAFIK: IFU 2022).....	87
ABBILDUNG 48: JAHRESKENNGRÖßEN DER NO <sub>2</sub> - UND PM <sub>10</sub> -KONZENTRATION AN DER STATION HANAU DEHE011 DES LUFTMESSNETZES HESSEN IM VERGLEICH ZUM GRENZWERT. DATENQUELLE: HLNUG [HRSG.] (2022B) ....	88
ABBILDUNG 49: HEIßE TAGE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 BIS 31.08.2022 AN DEN VIER TEMPORÄREN MESSSTATIONEN HANAUS UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IM OFFENBACH-WETTERPARK .....	95
ABBILDUNG 50: SOMMERTAGE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 BIS 31.08.2022 AN DEN VIER TEMPORÄREN MESSSTATIONEN HANAUS UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IM OFFENBACH-WETTERPARK .....	96
ABBILDUNG 51: TROPENNÄCHTE BEI AUTOCHTHONEN (A) UND NICHT-AUTOCHTHONEN WETTERSITUATIONEN IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 BIS 31.08.2022 AN DEN VIER TEMPORÄREN MESSSTATIONEN HANAUS UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD IM OFFENBACH-WETTERPARK .....	97
ABBILDUNG 52: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 – 31.08.2022 FÜR ALLE STUNDEN AN DER DWD-REFERENZSTATION OFFENBACH-WETTERPARK (RECHTS) UND AN DEN VIER TEMPORÄREN KLIMAMESSTATIONEN IN HANAU (LINKS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN. ....	98
ABBILDUNG 53: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 – 31.08.2022 FÜR ALLE TAGSTUNDEN (07:00-19:00 UHR MESZ) AN DER DWD-REFERENZSTATION OFFENBACH-WETTERPARK (RECHTS) UND AN DEN VIER TEMPORÄREN KLIMAMESSTATIONEN IN HANAU (LINKS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN. ....	99
ABBILDUNG 54: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 – 31.08.2022 FÜR ALLE NACHTSTUNDEN (19:00-07:00 UHR MESZ) AN DER DWD-REFERENZSTATION OFFENBACH-WETTERPARK (RECHTS) UND AN DEN VIER TEMPORÄREN KLIMAMESSTATIONEN IN HANAU (LINKS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN. ....	100
ABBILDUNG 55: VORHERRSCHENDER WIND (GESCHWINDIGKEIT UND RICHTUNG) IM MESSZEITRAUM VOM 01.06.2022 – 31.08.2022 FÜR ALLE AUTOCHTHONEN NACHTSTUNDEN (19:00-07:00 UHR MESZ) AN DER DWD-REFERENZSTATION OFFENBACH-WETTERPARK (RECHTS) UND AN DEN VIER TEMPORÄREN KLIMAMESSTATIONEN IN HANAU (LINKS). DIE KONZENTRISCHEN KREISE ZEIGEN VON INNEN NACH AUßEN DIE AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN PROZENTSCHRITTEN AN. ....	101
ABBILDUNG 56: MODELLIERTE NÄCHTLICHE WINDRICHTUNG UND -GESCHWINDIGKEIT UM 04:00 UHR IM UMFELD DER URBANEN UND RURALEN MESSSTANDORT (OBEN LINKS UND RECHTS) SOWIE AN DEN STANDORTEN DER INNERSTÄDTISCHEN AUSGLEICHSFLÄCHE UND IN MAINNÄHE (UNTEN LINKS UND RECHTS) ZU EINER AUTOCHTHONEN WETTERSITUATION. DIE STRÖMUNGSPFEILE WURDEN AUF 10 M HORIZONTALE AUFLÖSUNG AGGREGIERT UND IN EINHEITLICHER GRÖßE DARGESTELLT.....	103
ABBILDUNG 57: SONNENSCHINDAUER (SD) UND BEDECKUNGSGRAD (N) ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 17.-20.07.2022, ERMITTELT AN DER DWD-STATION OFFENBACH-WETTERPARK.....	104
ABBILDUNG 58: GEMESSENE STÜNDLICHE WINDGESCHWINDIGKEITEN (FF) UND -RICHTUNGEN (DD) AUF 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 17.-20.07.2022, ERMITTELT AN DEN VIER TEMPORÄREN MESSSTATIONEN HANAUS UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD OFFENBACH-WETTERPARK.....	105
ABBILDUNG 59: GEMESSENE STÜNDLICHE TEMPERATUREN AUF 2 M UND 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 17.-20.07.2022, ERMITTELT AN DEN VIER TEMPORÄREN MESSSTATIONEN HANAUS UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD OFFENBACH-WETTERPARK. ....	106
ABBILDUNG 60: GEMESSENE STÜNDLICHE RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT (RH) AUF 2 M UND 10 M Ü. GR. ZUR BETRACHTETEN HITZEPERIODE VOM 17.-20.07.2022, ERMITTELT AN DEN VIER TEMPORÄREN MESSSTATIONEN HANAUS UND AN DER REFERENZ-STATION DES DWD OFFENBACH-WETTERPARK. ....	107
ABBILDUNG 61: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT VOM 19./20.07.2022 DER ERSTEN NACHHÄLFTE (AUF 23:00 UHR NORMIERT) UND DEM FITNAH-MODELLLAUF VON 23 UHR. AN DEN	



KLIMAMESSSTATIONEN WIRD DER EBENFALLS AUF DAS MODELLMITTEL NORMIERTE TEMPERATURWERT DER JEWEILIGEN STATION ANGEZEIGT. ....	109
ABBILDUNG 62: VERGLEICH DER TEMPERATUREN ZWISCHEN DER MESSFAHRT VOM 19./20.07.2022 DER ZWEITEN NACHHÄLFTE (AUF 04 UHR NORMIERT) UND DEM FITNAH-MODELLLAUF VON 04 UHR. AN DEN KLIMAMESSSTATIONEN WIRD DER EBENFALLS AUF DAS MODELLMITTEL NORMIERTE TEMPERATURWERT DER JEWEILIGEN STATION ANGEZEIGT. ....	111
ABBILDUNG 63: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR (T04) IM STATUS QUO IN DER HANAUER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE) .....	114
ABBILDUNG 64: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN DEN SZENARIEN SCHWACHER KLIMAWANDEL (LINKS) UND STARKER KLIMAWANDEL (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT DES HANAUER STADTGEBIETS (VERKÜRZTE LEGENDE). ....	115
ABBILDUNG 65: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO IM HANAUER STADTGEBIET (VERKÜRZTE LEGENDE). ....	117
ABBILDUNG 66: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO IN DER HANAUER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). ....	118
ABBILDUNG 67: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO IN DER HANAUER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). ....	118
ABBILDUNG 68: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM SZENARIO STARKER KLIMAWANDEL IN DER HANAUER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE). ....	119
ABBILDUNG 69: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM STATUS QUO IN DER HANAUER KERNSTADT. ....	121
ABBILDUNG 70: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IN DEN SZENARIEN SCHWACHER KLIMAWANDEL (OBEN) UND STARKER KLIMAWANDEL (UNTEN); (VERKÜRZTE LEGENDE). ....	122
ABBILDUNG 71: SCHEMA DER BELASTUNGSSITUATION IN STÄDTISCHEN GEBIETEN UND BALLUNGSRÄUMEN (VDI 2019) .....	124
ABBILDUNG 72: JAHRESMITTELWERTE DER NO <sub>2</sub> -KONZENTRATION IM STADTGEBIET VON HANAU .....	125
ABBILDUNG 73: SKIZZE DES BEISPIELHAFTEN VERFAHRENSABLAUFS ZUR AUTOMATISIERTEN ABLEITUNG VON KLIMATOPEN (KT = KLIMATOPTYP, SIEHE LEGENDE) .....	129
ABBILDUNG 74: KLIMATOPKARTE FÜR DAS HANAUER STADTGEBIET.....	130
ABBILDUNG 75: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTE (VERKÜRZTE DARSTELLUNG).....	132
ABBILDUNG 76: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS MIT UND RECHTS OHNE ENTSPRECHENDE AUSWEISUNG).....	134
ABBILDUNG 77: KLIMAANALYSEKARTE FÜR DAS HANAUER STADTGEBIET. ....	135
ABBILDUNG 78: LINKS DAS AUSGANGSRASTER (BEISPIEL) UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE, BEISPIELHAFT FÜR DIE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR. ....	137
ABBILDUNG 79: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) .....	138
ABBILDUNG 80: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION. ....	141
ABBILDUNG 81: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM. ....	142
ABBILDUNG 82: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION FÜR EINEN AUSSCHNITT DES HANAUER STADTGEBIETS. ....	145
ABBILDUNG 83: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM IST-ZUSTAND (2022) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES HANAUER STADTGEBIETS. ....	147
ABBILDUNG 84: KONZENTRATION DER SENSITIVITÄT VON HOCHALTRIGEN (OBEN), SENIOREN (MITTE) UND KLEINKINDERN (UNTEN) IN EINEM AUSSCHNITT DES HANAUER STADTGEBIETS. ....	152
ABBILDUNG 85: SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE DES HANAUER STADTGEBIETS. ....	154
ABBILDUNG 86: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA IN EINEM AUSSCHNITT DER STADT HANAU (VERKÜRZTE LEGENDE).....	157





ABBILDUNG 87: PLANUNGSHINWEISKARTE DES HANAUER STADTGEBIETS..... 162

ABBILDUNG 88: PLANUNGSHINWEISKARTE DES HANAUER STADTGEBIETS AUS DEM JAHR 1992 (DWD & IFP 1992).  
..... 163

ABBILDUNG 89: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB DES  
STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“ ..... 182



# Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AKTUELL RECHTSVERBINDLICHE IMMISSIONSGRENZWERTE IN $\mu\text{G}/\text{M}^3$ (= MIKROGRAMM PRO KUBIKMETER) EINZELNER LUFTSCHADSTOFFKOMPONENTEN IN DER AUßENLUFT GEMÄß 39. BIMSCHV (2010). FÜR ULTRAFEINE PARTIKEL (UFP) GIBT ES ZUM JETZIGEN ZEITPUNKT KEINE RICHT- UND GRENZWERTE.....	12
TABELLE 2: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN. ....	17
TABELLE 3: FÜR DAS VERWENDETE MODELLENSEMBLE VERFÜGBARE ENSEMBLEMITGLIEDER (MODELLKOMBINATIONEN) UND SZENARIEN (HISTORICAL, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM BZW. RCM = GLOBALES BZW. REGIONALES KLIMAMODELL (GLOBAL / REGIONAL CLIMATE MODEL).....	22
TABELLE 4: BEWERTUNG DER STATISTISCHEN SIGNIFIKANZ ANHAND DES TREND-/RAUSCHVERHÄLTNISSSES, (SIEHE OBEN).....	25
TABELLE 5: MITTLERER LANGJÄHRIGER TEMPERATURANSTIEG (IN °C) IN HANAU, SZENARIO RCP 2.6 .....	31
TABELLE 6: MITTLERER LANGJÄHRIGER TEMPERATURANSTIEG (IN °C) IN HANAU, SZENARIO RCP 8.5 .....	31
TABELLE 7: LANGJÄHRIGE MITTLERE ÄNDERUNG (ANZAHL PRO JAHR) THERMISCHER KENNTAGE IN HANAU IN RCP 2.6.....	35
TABELLE 8: LANGJÄHRIGE MITTLERE ÄNDERUNG (ANZAHL PRO JAHR) THERMISCHER KENNTAGE IN HANAU IN RCP 8.5.....	35
TABELLE 9: MITTLERE LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMME (IN MM/JAHR) IN HANAU, RCP 2.6 UND RCP 8.5. ....	38
TABELLE 10: ÄNDERUNG DER MITTLEREN AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN TAGEN VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN INNERHALB DES JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN ZEITRAUMS IN HANAU, RCP 2.6.....	47
TABELLE 11: ÄNDERUNG DER MITTLEREN AUFTRITTSHÄUFIGKEIT IN TAGEN VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN INNERHALB DES JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN ZEITRAUMS IN HANAU, RCP 8.5.....	47
TABELLE 12: ERWARTETE KLIMÄÄNDERUNGEN FÜR HANAU ALS ALLGEMEINGÜLTIGE TENDENZEN, DIE SICH IN ALLEN KLIMAWANDELSZENARIEN ABLESEN LASSEN .....	50
TABELLE 13: GESAMTHAFTE DARSTELLUNG DER ÄNDERUNGSSIGNALE IN DEN JEWEILIGEN SZENARIEN UND ZEITHORIZONTEN GEGENÜBER DEM REFERENZZEITRAUM 1971-2000. DARGESTELLT IST DABEI DIE SPANNWEITE DER GESAMTHEIT DER SIMULATIONEN ANHAND DER PERZENTILE DER VERTEILUNG MIT DEM 15. (P15), DEM 50. (P50) UND DEM 85. PERZENTIL (P85).....	51
TABELLE 14: STANDORTE, MESSZEITRÄUME UND INSTRUMENTIERUNG WÄHREND DER IM SOMMER 2022 IM RAHMEN DER KLIMAANALYSE HANAU DURCHGEFÜHRTE METEOROLOGISCHE MESSKAMPAGNE (RH = RELATIVE FEUCHTE, T = TEMPERATUR, WS = WINDGESCHWINDIGKEIT, WD = WINDRICHTUNG) .....	53
TABELLE 15: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLEAUFLÖSUNG VON 5 M.....	66
TABELLE 16: MODELL-SZENARIEN ZUR ABBILDUNG DES HANAUER STADTKLIMAS (2021 UND 2055) UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	72
TABELLE 17: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.....	81
TABELLE 18: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT .....	82
TABELLE 19: EINGANGSDATEN UND RANDBEDINGUNGEN DER EMISSIONSBERECHNUNG .....	84
TABELLE 20: EINGANGSDATEN UND RANDBEDINGUNGEN DER IMMISSIONSBERECHNUNG .....	89
TABELLE 21: ERGEBNISSE DER QUALITÄTSSICHERUNG.....	90
TABELLE 22: BEZEICHNUNG UND KRITERIEN FÜR KLIMATOLOGISCHE KENNTAGE.....	94
TABELLE 23: ÜBERSICHT DER FÜR DIE KLIMATOPKARTE VERWENDETEN GEODATEN .....	126
TABELLE 24 PRIMÄRE ZUORDNUNG DER OBJEKTARTEN ZU KLIMATOPTYPEN .....	127





TABELLE 25: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DER KLIMAANALYSEKARTE .....	133
TABELLE 26: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH TAGESZEIT UND STRUKTURTYP .....	139
TABELLE 27: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSPAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP.....	142
TABELLE 28: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM IST-ZUSTAND.....	146
TABELLE 29: KLASSIFIZIERUNG DER SENSITIVITÄT DER BEVÖLKERUNG.....	153
TABELLE 30: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS .....	158
TABELLE 31: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZU DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM .....	159
TABELLE 32: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSPAUMS .....	160
TABELLE 33: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZUM SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM .....	161
TABELLE 34: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT HANAU. ....	168



# Glossar

**Advektion:** Heranströmen von Luftmassen in überwiegend horizontaler Richtung, ausgelöst durch einen Energie-/Wärmeaustausch.

**Air Quality Guidelines (AQG):** Von der World Health Organization (WHO) eingeführte Richtlinien, die zum übergeordneten Ziel haben, auf sowohl nationaler, wie auch regionaler und städtischer Ebene dafür zu sorgen, dass Luftverschmutzungen reduziert werden, um die Gesundheit der Einwohner zu verbessern.

**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. Ein Albedowert von 1 bedeutet ein Rückstrahlvermögen von 100 %.

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

**Berg-/Talwindssystem:** Es handelt sich um ein tagesperiodisches Windsystem, das im Gebirge bei ruhigen Hochdruckwetterlagen entsteht. Die grundlegende Voraussetzung ist starke Sonneneinstrahlung. Die Sonne bestrahlt die Berghänge früher als die Täler. Es kommt zur Ausprägung eines Hangaufwindes. Die Luft kühlt sich beim Aufsteigen ab und sinkt über Ursprungs- oder Nachbartal bzw. im Gebirgsvorland wieder in tiefere Lagen ab. Die aufsteigende Luft muss ersetzt werden, sodass sich eine aus dem Vorland die Täler und Berghänge hinauffließende, im Tagesgang immer stärker werdende Ausgleichsströmung einstellt - der Talwind. Werden die Hänge nicht mehr beschienen (spätestens nach Sonnenuntergang), kommen Hang- und Talwind allmählich zum Erliegen. Nachts kühlen sich die Berghänge und die bodennahe Luft über ihnen stärker ab als die Luft im Tal. Die nun kühlere Luft und somit schwerere Luft fließt als Bergwind die Hänge hinab. Der nächtliche Bergwind ist meist schwächer ausgeprägt als der Talwind am Tage, mitunter ist er kaum zu spüren,



sorgt jedoch am Talgrund für frische Luft. Typischerweise beginnt er zwei bis drei Stunden nach Sonnenuntergang und dauert bis kurz nach Sonnenaufgang an.

**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).

**Bodeninversion:** Liegt eine Bodeninversion vor, bedeutet das, dass in Bodennähe kältere Luft vorliegt als in den darüber liegenden Schichten. So findet kein Austausch zwischen den Luftschichten statt. Dies tritt meist nachts auf, dabei nimmt die Lufttemperatur vom Erdboden bis in eine gewisse Höhe zu und erst darüber wieder ab, wie es der normalen Schichtung der Atmosphäre entspricht. In industriell genutzten Gebieten kann sich daraus Smog bilden. Dies wiederum kann zu gesundheitlichen Schäden führen.

**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.

**GRZ:** Die Grundflächenzahl (GRZ) bezeichnet die maximal zulässige Grundfläche (von Gebäuden oder baulichen Anlagen) pro Grundstücksfläche und wird als Dezimalzahl bis höchstens 1 (= vollständig überbaute Grundstücksfläche) angegeben.

**Inversion:** Unter Inversion versteht man in der Meteorologie die Umkehr des normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlaufs in einer mehr oder weniger dicken Schicht. Inversionen können durch großräumige Advektion (s. Advektion) von Warmluft oder durch Absinkvorgänge in der entsprechenden Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen.

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

**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).

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



**Kaltluftleitbahnen:** Kaltluftleitbahnen verbinden Kaltluftentstehungsgebiete ( $\rightarrow$  *Ausgleichsräume*) und Belastungsbereiche ( $\rightarrow$  *Wirkräume*) miteinander und sind mit ihren hohen  $\rightarrow$  *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  $\rightarrow$  *Kaltluft*, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts (Durchflussbreite; Einheit  $\text{m}^3/\text{s}$ ). Der Kaltluftvolumenstrom beschreibt somit diejenige Menge an  $\rightarrow$  *Kaltluft*, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt beispielsweise eines Hanges oder einer  $\rightarrow$  *Kaltluftleitbahn* fließt. Der in dieser Arbeit modellierte Kaltluftvolumenstrom bezieht sich auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit  $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ ). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ verwendet. Anders als das  $\rightarrow$  *Strömungsfeld* berücksichtigt der Kaltluftvolumenstrom auch Fließbewegungen oberhalb der bodennahen Schicht.

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

**Morbidität:** Die Morbidität (Sterblichkeit) ist ein Sterblichkeitsmaß für eine bestimmte Erkrankung. Sie beschreibt die Anzahl der an einer Krankheit in einem bestimmten Zeitraum verstorbenen Patientinnen/Patienten bezogen auf die Gesamtbevölkerung oder spezifische Gruppen (bspw. Säuglinge).

**Partikelfractionen (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>):** Feinstaub besteht aus einem komplexen Gemisch fester und flüssiger Partikel und wird abhängig von deren Größe in unterschiedliche Fraktionen eingeteilt. Unterschieden werden PM<sub>10</sub> (PM, particulate matter) mit einem maximalen Durchmesser von 10 Mikrometer ( $\mu\text{m}$ ), PM<sub>2,5</sub> und ultrafeine Partikel mit einem Durchmesser von weniger als 0,1  $\mu\text{m}$ .

**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 ( $\rightarrow$  *Wirkräume*) sowie der Bedeutung von Grünflächen als  $\rightarrow$  *Ausgleichsräume* in getrennten Karten für die Tag- und die Nachtsituation inklusive der Ableitung von allgemeinen Planungshinweisen.

**RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathway):** Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre. Die RCP-Szenarien lösen im fünften Sachstandsbericht des „Weltklimarats“ der Vereinten Nationen (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  $\text{W}/\text{m}^2$  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, un bebauten 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.

**Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>):** Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) ist ein ätzendes Reizgas, es schädigt unmittelbar das Schleimhautgewebe im gesamten Atemtrakt und kann auch die Augen reizen. Stickstoffdioxid zeigt eine stärkere schädliche



Wirkung als Stickstoffmonoxid (NO) und entsteht bei Verberennungsvorgängen, wie bspw. bei Automotoren und wird als Abgas emittiert.

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

**Strahlungswetterlage** → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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





# 1. Hintergrund und Anlass

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte „Stadtklimaanalyse Hanau 2024“ stellt die Fortschreibung und schwerpunktmäßige Neuausrichtung der vorangegangenen gesamtstädtischen Klimaanalyse vom Deutschen Wetterdienst (DWD & ifp 1992) nach heutigem Stand der Technik dar. Die Notwendigkeit einer Aktualisierung rührt vor allem daher, dass die letztmalige Analyse bereits über 30 Jahre zurückliegt. In der Zwischenzeit hat sich nicht nur die Stadtstruktur entwickelt, sondern auch grundlegend die Methodik sowie die Herangehensweise an eine derartige Untersuchung. Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels räumlich hochaufgelöster Modellrechnungen auch das zukünftige Hanauer Stadtklima im Jahr 2055 in zwei verschiedenen Szenarien simuliert. Die Stellschrauben zur Bestimmung des zukünftigen Stadtklimas bestehen in klimatischen Änderungen (Temperaturzunahmen und Trockenheit) infolge des Klimawandels.

Im Folgenden sind rechtliche, fachliche, planerische und politische Gründe aufgetragen, die eine Neufassung anraten:

- Die heutige Stadtstruktur unterscheidet sich aus der klimaökologischen Perspektive wesentlich von der Ausgangslage der 1992er Version der Klimaanalyse.
- Die Stadt Hanau steht, wie viele Kommunen in Ballungsräumen, vor der Aufgabe, den enormen Wachstumsschub von heute und der kommenden Jahre im Spannungsfeld naturräumlicher, wirtschaftlicher und sozialer Belange zu steuern. Die räumliche Planung ist auf Erkenntnisse verschiedener Fachdisziplinen angewiesen, um einer querschnittsorientierten Stadtentwicklung verantwortungsbewusst Rechnung tragen zu können.
- Durch die aktuellen Handlungsempfehlungen und „Leitplanken für die räumliche Entwicklung“ wird ein gewichtiger Beitrag für eine Klimavorsorge- und Klimaanpassungsstrategie auf kommunaler Ebene gewährleistet.
- Mit den Klima-Novellen des Baugesetzbuches (BauGB) im Jahr 2011 sowie des Gesetzes über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG) im Jahr 2017 haben sich die für die Stadtklimatologie relevanten Rechtsnormen noch deutlicher als zuvor für stadtklimatische Fragen mit Blick auf das Schutzgut der menschlichen Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse geöffnet. Mit diesen Entwicklungen sind die Ansprüche an die inhaltliche Aussagetiefe und räumliche Aussagegenauigkeit der benötigten Analysen noch einmal deutlich gestiegen.
- Die für Stadtklimaanalysen maßgebliche VDI-Richtlinie 3787, Blatt 1 „Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen“ ist heutzutage ein umweltmeteorologischer Standard, der zuletzt im Jahr 2015 aktualisiert wurde (VDI 2015).
- Mit numerischen Stadtklimamodellen stehen heute entsprechende Instrumente zur Verfügung, die einen hohen Detaillierungsgrad bei der Identifizierung von Belastungsräumen ermöglichen. Die Modelle sind dabei in der Lage, die meteorologisch-physikalischen Zusammenhänge zwischen Wärmeinseleffekt in den besiedelten Wirkungsräumen und (planerisch beeinflussbaren) kühlenden Kaltluftabflüssen und Flurwinden aus dem Ausgleichsraum für bestimmte thermisch belastende Wetterlagen umfassend abzubilden. Zudem ist es mit solchen Modellen möglich, szenariobasierte Ansätze (z.B. zur summarischen Wirkung von Stadtentwicklungsvorhaben und/oder Anpassungsmaßnahmen) zu untersuchen und zu bewerten.
- Mit diesem Gutachten werden für die Stadt Hanau vertiefende Erkenntnisse über die Auswirkungen des Stadtklimas und des Klimawandels ermittelt. Gleichzeitig werden Handlungsempfehlungen auf gesamtstädtischer sowie kleinräumigerer Quartiersebene identifiziert. Damit können



schließlich Strategien hinsichtlich vermeidbarer Belastungen entwickelt und die unvermeidbaren Auswirkungen des Klimawandels auf kommunaler Ebene abgemildert werden.

- Mit dem Klimagutachten wird auch das Ziel verfolgt, nicht nur Fachleuten und der Politik ein Bewertungs- und Planungsinstrument an die Hand zu geben, sondern auch dem Bürger Möglichkeiten aufzuzeigen, wie auf individueller Ebene Mitverantwortung gelebt werden kann.

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



## 2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kap. 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 4) über stadtklimatische relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten. Zum besseren Verständnis werden im Folgenden zentrale Punkte dieses Spektrums überblicksartig skizziert. Die entsprechenden Quellenhinweise regen bei Bedarf zum Weiterlesen an und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### 2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

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

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

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

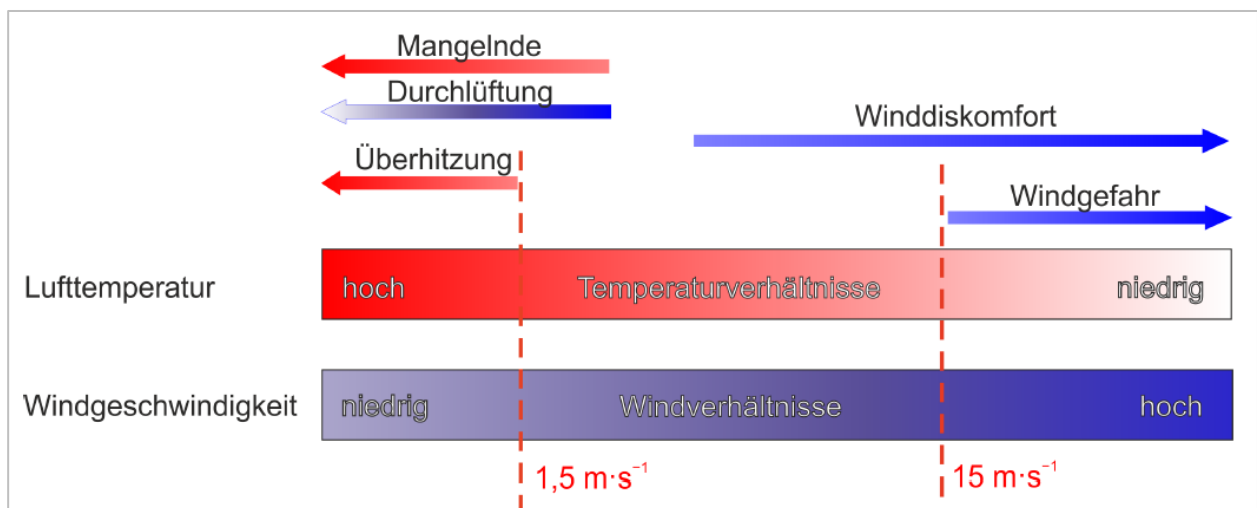


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))



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

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

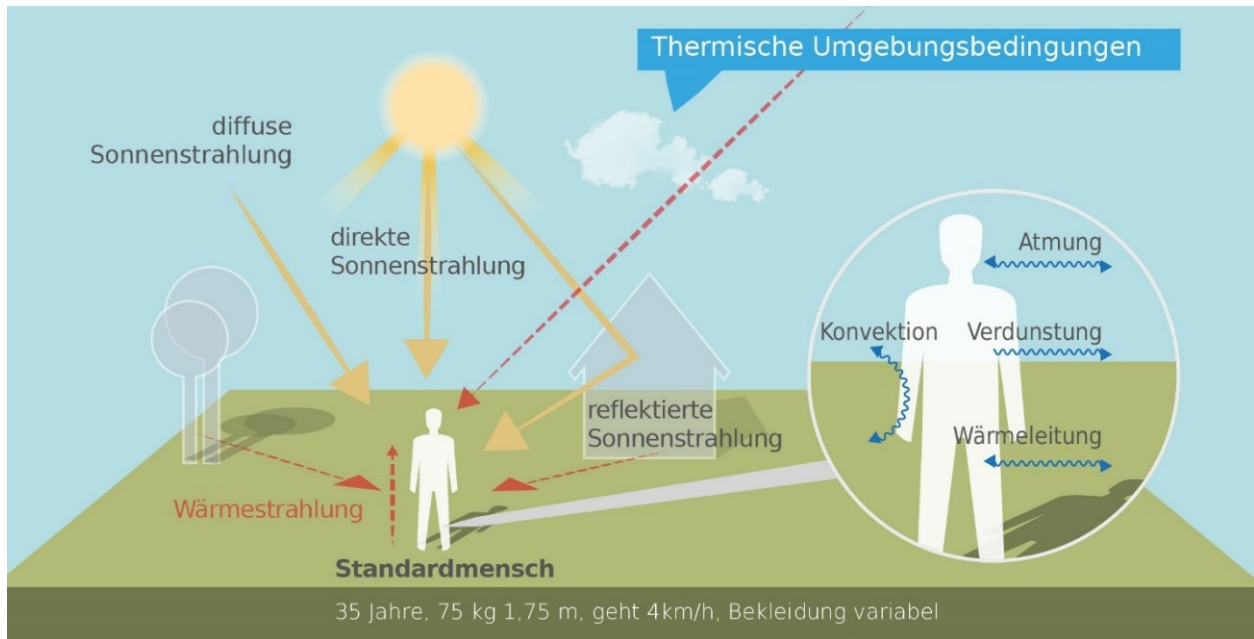


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

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 2008, 23). Das Umweltbundesamt empfiehlt für einen entsprechend erholsamen Schlaf eine Schlafzimmertemperatur in der Spannweite von 17-20 °C (UBA 2005). Dass die Einhaltung dieser Wertespanne in den weitgehend nicht-klimatisierten Wohngebäuden in Deutschland über die Sommermonate schwierig bis unmöglich ist, dürfte der Alltagserfahrung vieler Bürger:innen entsprechen. Den empirischen Beleg hierfür liefert eine wissenschaftliche Studie, in der Stundenwerte der Temperaturen in 500 über das Augsburger Stadtgebiet verteilten Schlafzimmern während der Sommermonate 2019 gemessen und ausgewertet wurden (Abbildung 3). Die Ergebnisse veranschaulichen, dass, unabhängig von der räumlichen Lage im Stadtgebiet, nur an einzelnen Standorten und an einzelnen Tagen die vom Umweltbundesamt empfohlenen Komfortwerte von 20 °C unterschritten wurden. Tatsächlich schwankten die Mittelwerte auch nachts um 25 °C (bei Maximalwerten von nahe oder sogar über 30 °C; BECKMANN et al. 2021).



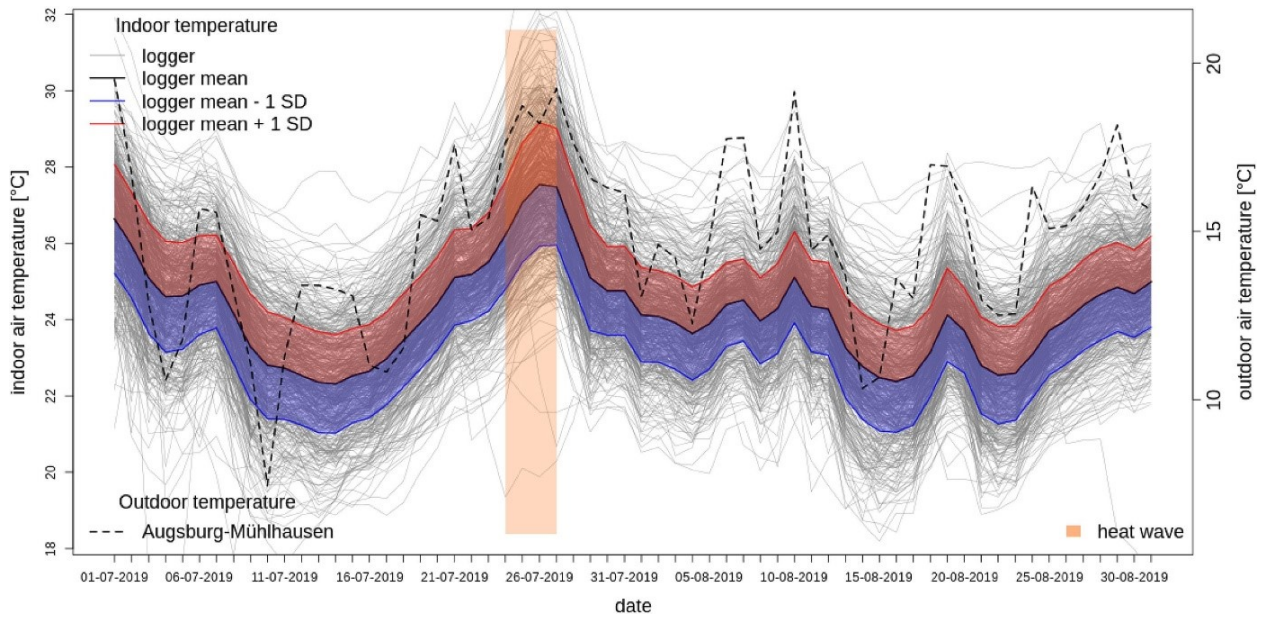


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburgur Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (BECKMANN et al. 2021)

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 2017). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (URBAN UND 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 Jahren (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). SANTHOLZ UND SETT (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozio-ökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt und Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

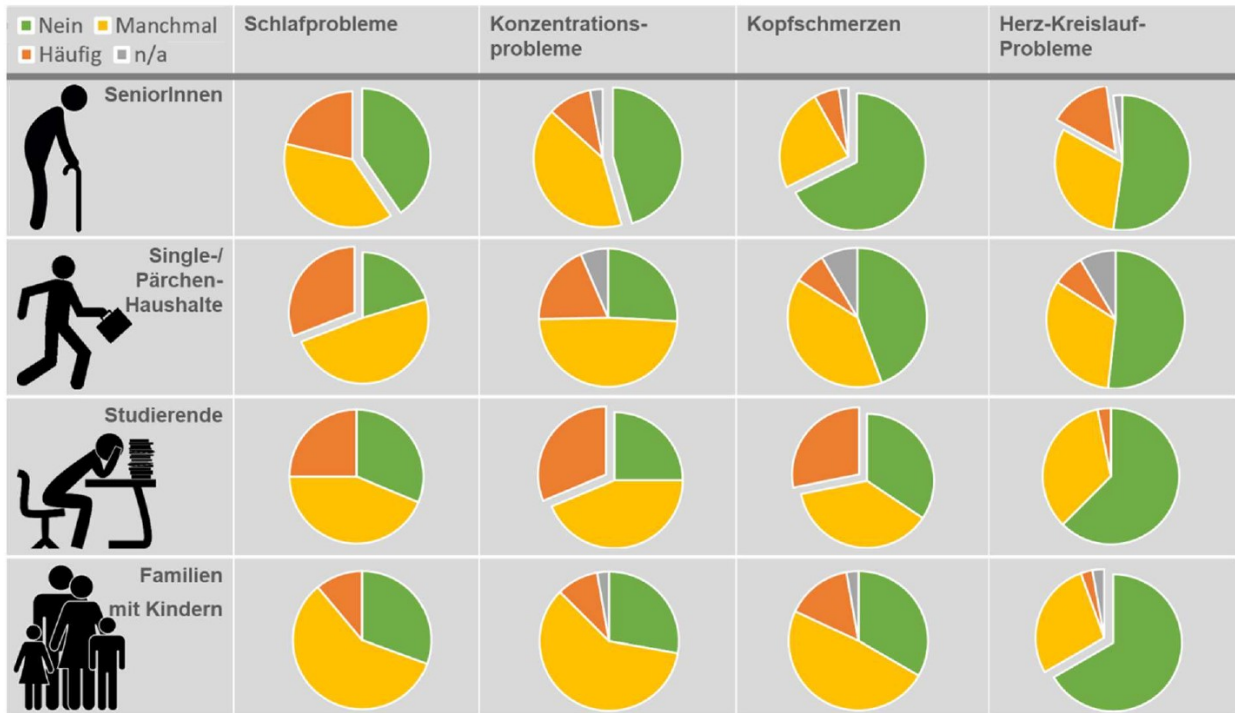


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)

Hinsichtlich der Mortalitätsrate hat eine Analyse der Jahre 2001-2015 für Deutschland ergeben, dass es während Hitzeperioden insbesondere bei den Altersgruppen 75 – 84 und vor allem 85+ zu einer signifikant erhöhten Übersterblichkeit kommt. Als besonders relevant sind dabei Wochenmitteltemperaturen von > 20 °C ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet (Abbildung 5). Die Jahre 2003, 2006 und 2015 zeigten bundesweit mit 6.000 – 7.000 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen die höchsten Übersterblichkeiten (AN DER HEIDEN et al. 2019). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 °C Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

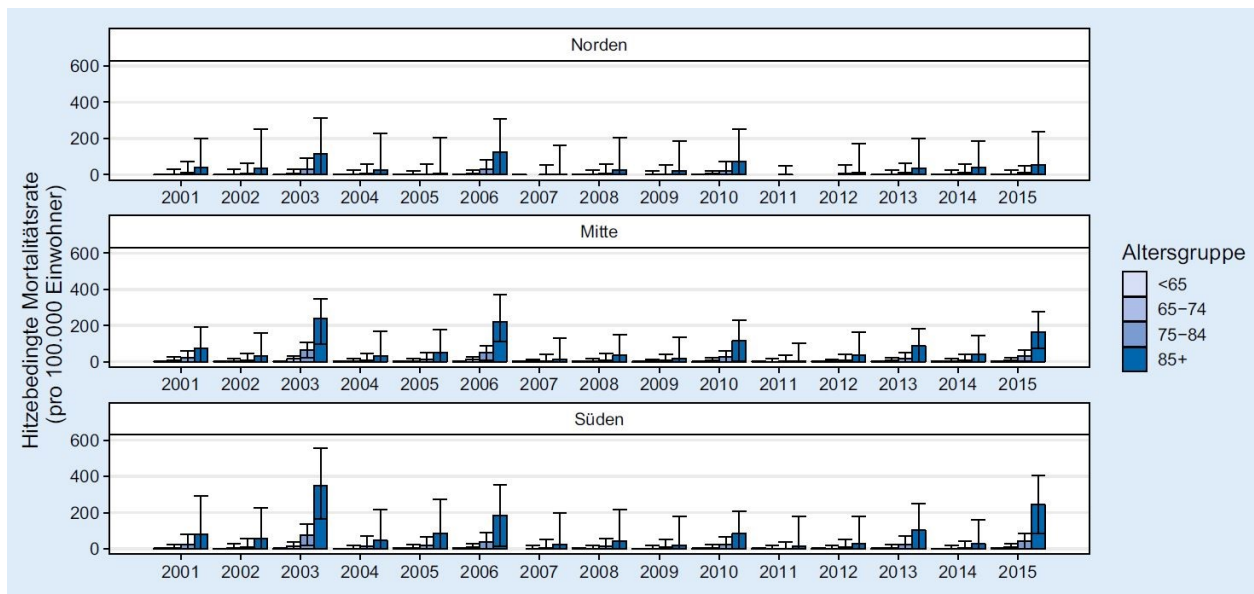


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 bis 2015 (AN DER HEIDEN et al. 2019)

## 2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

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

Als Prämisse für die vorliegende Analyse werden die relevanten Kaltluftprozesse und Zusammenhänge im Folgenden überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet. Wie Abbildung 6 zeigt, sind insbesondere Berg-/Talwindssysteme, flächenhafte Kaltluftabflüsse an Hängen sowie durch den Wärmeinseleffekt induzierte Flurwindssysteme zu nennen. Allen Prozessen ist gemein, dass sie vermehrt während windschwacher Strahlungswetterlagen mit nächtlicher Bodeninversion auftreten. Bei einer Inversion kehrt sich der normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlauf um. Der Boden und damit auch die darüber liegende bodennahe Luftschicht kühlen sich durch Ausstrahlung stärker ab, sodass die bodennahe Schicht kälter ist als die darüber liegende Luftschicht. Die obere Begrenzung dieser Bodeninversionsschicht liegt dabei in der Höhe über Grund, in der sich die Abkühlung des Erdbodens nicht mehr auswirkt (vgl. DWD 2023a). Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft, durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt damit eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tief liegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert (sie wirken in der Atmosphäre stabilisierend). In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.



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

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (OKE et al. 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmefluss) spielen ebenfalls eine Rolle. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus 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  $> 2$  m/s sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

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

### 2.3 STADTKLIMA UND LUFTHYGIENE

Insbesondere in der Stadt beeinflusst neben dem Klima auch der Umweltfaktor Luftgüte maßgeblich die gesunden Wohn- und Arbeitsverhältnisse ihrer Bewohner. Städte sind Zentren menschlicher Aktivitäten, durch die täglich große Schadstoffmengen in die Atmosphäre emittiert werden. Gleichzeitig fördert die raumstrukturelle Form der Verdichtung und die damit einhergehende Charakteristik der städtischen Strömungsverhältnisse eine Anreicherung dieser Schadstoffe im Siedlungsraum. Da die Luftqualität und die klimatischen Sonderbedingungen der Städte häufig eng miteinander in Zusammenhang stehen, und sowohl klimatische als auch lufthygienische Aspekte durch den Menschen beeinflussbar sind, empfiehlt es sich, bei der planungsrelevanten Analyse des Stadtklimas immer auch die Lufthygiene zu berücksichtigen.

Ein überwiegender Anteil der Luftschadstoffe im städtischen Umfeld wird durch den Straßenverkehr freigesetzt. Anders als bei industriellen Quellen und Kleinf Feuerungsanlagen werden die straßenverkehrsbedingten Emissionen in geringen Höhen und in direkter Nähe zum Schutzgut (menschliche Gesundheit) emittiert. Als Folge davon treten insbesondere an Straßen mit hohen Verkehrsströmen und unmittelbar angrenzender Wohnbebauung hohe Immissionsbelastungen mit Grenzwertüberschreitungen auf. Diese Zusammenhänge betonen die besondere Relevanz der Berücksichtigung des Straßenverkehrs als Schadstoffquelle in stadtklimatischen Untersuchungen.





Kleinfeuerungs- und Industrieanlagen bewirken zusammen in der Regel etwa ein Drittel der relevanten Luftschadstoff-Emissionen. Aufgrund der Quellhöhe können sich die industriebedingten Abgase und in gewissen Grenzen auch die Emissionen der Gebäudeheizungen mit der freien Luftströmung relativ schnell verteilen, sodass ihr Verursacheranteil an der Immissionskonzentration im Bereich von Belastungsschwerpunkten meist geringer ist als ihr Anteil an der Emission. Weitere bedeutende Quellen insbesondere für Feinstaub sind die Landwirtschaft und der Güterumschlag.

### ***Luftschadstoffe bei austauscharmen Wetterlagen***

Für das Ziel, die lufthygienische Belastung so gering wie möglich zu halten, stellen austauscharme Wetterlagen ein besonderes Problem dar. Die Durchmischung der Luft ist während solcher Wetterlagen mehr oder weniger stark eingeschränkt, was wegen der vielfach auftretenden Inversionen hauptsächlich für die vertikale, aufgrund des schwachen Windes aber auch für die horizontale Richtung gilt. Halten austauscharme Wetterlagen, insbesondere im Herbst und Winter, über längere Zeit an, können sich Schadstoffe in Bodennähe anreichern und die Immissionsgrenzwerte überschreiten.

Eine spezielle Situation ergibt sich während der durch Kaltluftbildung und Ausgleichsströmungen beeinflussten Nachtstunden. Die Kaltluft kann sich dabei positiv oder negativ auf die lufthygienische Situation auswirken: Zunächst einmal bildet die vom Boden her abkühlende Luft eine stabile vertikale Schichtung aus, die mit einer geringen turbulenten Diffusion und einer eingeschränkten Verdünnung von bodennah emittierten Luftschadstoffen einhergeht. Dieser Effekt kann noch deutlich verstärkt werden, wenn die Schadstoffe innerhalb von stagnierenden Kaltluftschichten freigesetzt werden. Ist die kaltluftproduzierende Fläche hingegen frei von Emittenten, weist die Kaltluft die Qualität der Grundbelastung auf und kann als Frischluftstrom zu einer Verbesserung der Luftqualität in höher belasteten Räumen beitragen. Führt der Strömungsweg der Kaltluft allerdings über Emissionsquellen hinweg in die Siedlungsräume hinein, werden die Luftbeimengungen in mitunter quellferne Flächen transportiert und verursachen dort, insbesondere in Stau-Bereichen, eine signifikante Erhöhung der Luftschadstoffbelastung.

### ***Luftschadstoffe im Jahresmittel***

Um den Menschen vor Gesundheitsgefahren durch Luftschadstoffe zu schützen, wurden von der Europäischen Union (EU) Immissionsgrenzwerte festgelegt (EU-Richtlinie 2008/50/EG), die mit der 39. Bundesimmissionsschutzverordnung (39. BImSchV) in deutsches Recht umgesetzt wurden. Diese Grenzwerte legen ihren Fokus nicht unmittelbar auf spezielle meteorologische Ereignisse wie Inversionswetterlagen oder Heizperioden, die einen großen Einfluss auf die Schadstoffkonzentrationen ausüben, sondern auf Mittelwerte, die sich entweder auf ein Kalenderjahr beziehen oder die Häufigkeit von Werteüberschreitungen kürzerer Zeitintervalle berücksichtigen. In der Tabelle 3 sind die aktuell rechtsverbindlichen Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid  $\text{NO}_2$  und die Feinstaubkomponenten  $\text{PM}_{10}$  und  $\text{PM}_{2.5}$  in der Außenluft aufgeführt.



Tabelle 1: Aktuell rechtsverbindliche Immissionsgrenzwerte in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (= Mikrogramm pro Kubikmeter) einzelner Luftschadstoffkomponenten in der Außenluft gemäß 39. BImSchV (2010). Für Ultrafeine Partikel (UFP) gibt es zum jetzigen Zeitpunkt keine Richt- und Grenzwerte

Schadstoffkomponente	Mittelungszeitraum	Immissionsgrenzwert ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Zulässige Überschreitungen im Kalenderjahr
<b>Stickstoffdioxid (<math>\text{NO}_2</math>)</b>	Stunde	200	18 x
	Kalenderjahr	40	–
<b>Feinstaub (<math>\text{PM}_{10}</math>)</b>	Tag	50	35 x
	Kalenderjahr	40	–
<b>Feinstaub (<math>\text{PM}_{2,5}</math>)</b>	Kalenderjahr	25	–

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Weltgesundheitsorganisation (WHO) im September 2021 ihre globalen Luftgüteleitlinien aktualisiert hat (WHO 2021). Die Richtwerte der neuen „Air Quality Guidelines“ (AQG) sind sehr ambitioniert und liegen weit unter den derzeit rechtsgültigen Grenzwerten der in der 39. BImSchV umgesetzten europäischen Luftqualitätsrichtlinie. So empfehlen die AQG beispielsweise eine mittlere jährliche  $\text{NO}_2$ -Konzentration von höchstens  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , eine mittlere jährliche Feinstaub  $\text{PM}_{10}$ -Konzentration von höchstens  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  und eine maximale mittlere jährliche Feinstaub  $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration von  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Die Leitlinien sind keine rechtlich verbindlichen Normen, sondern als Instrument für die Erarbeitung von Rechtsvorschriften und Handlungskonzepten aufzufassen. Letztlich sollen sie dazu beitragen, die Luftschadstoffwerte weiter zu senken und so die gesundheitliche Belastung aufgrund der Exposition gegenüber Luftverschmutzung zu verringern. Ein näherer Bezug auf die neuen AQG-Werte wird in dieser Arbeit nicht angestrebt, ihre Erwähnung soll aber verdeutlichen, dass der wissenschaftliche und gesellschaftliche Diskurs über die Ziele der Luftreinhaltung mit Unterschreitung der derzeit rechtsverbindlichen Immissionsgrenzwerte nicht abgeschlossen ist.



## 2.4 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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

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

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

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

### ***Klimaanalysekarte und Planungshinweiskarte***

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



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

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehört demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen.

Dies erfolgt im Rahmen der Erstellung einer Planungshinweiskarte (PHK) als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse. Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte um eine „Informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält.“ (VDI 2015, 5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben.“ (VDI 2015, 5-6). Kerngegenstand der Planungshinweiskarte ist also die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Seit der letzten Überarbeitung der Richtlinie sollen bei der Bewertung auch die Themen Klimawandel und Umweltgerechtigkeit Berücksichtigung finden. Auf weitergehende methodische Hinweise verzichtet die Richtlinie jedoch. Somit erfolgt die Erstellung der Planungshinweiskarte auch weiterhin im Spannungsfeld zwischen fachgutachterlichen Empfehlungen, planerischen Zielsetzungen und politischer Willensbildung. Mögliche Legendenpunkte einer Planungshinweiskarte sind in Abbildung 8 aufgeführt.












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

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

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten weitere Normen neben die VDI-Richtlinien, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System<sup>1</sup>, das für Quartiere, Gebäude und Innenräume u.a. den „Thermischen Komfort“, das „Stadtklima – Mesoklima“ oder das „Mikroklima“ als zu wertende Kriterien definiert. Für die Bewertung werden eigene Methodenvorgaben gemacht, die z.T. deutlich (und notwendigerweise) über die Inhalte der VDI-Richtlinien hinausgehen.

### Untersuchungsansätze einer Stadtklimaanalyse

Stadtklimaanalysen können dem Stand der Technik nach auf verschiedenen methodischen Analyseverfahren basieren. Das Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) unterscheidet in einer aktuellen Veröffentlichung die Methoden der „Abschätzung“, des „Klimatopansatzes“ (bisweilen auch 2D- GIS-Modellierung benannt) sowie der „(numerischen) Stadtklimamodellierung“ (Abbildung 9). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).

Darüber hinaus stellen die in der Übersicht nicht genannten Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bisweilen aber auch als rein messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden zudem auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierende

<sup>1</sup> Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (Online: <https://www.dgnb-system.de>) (DGNB; 2020)





Lösungen das Methodenset ergänzen, indem sie von Ergebnissen der übrigen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
<b>Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet</li> <li>• Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klimateigenschaften der Flächen</li> <li>• Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume</li> <li>• Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.)</li> <li>• Kaltluftentstehung und -abfluss</li> </ul>
<b>Rahmenbedingungen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kleine und mittlere Kommunen</li> <li>• Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen</li> <li>• Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden</li> <li>• Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen</li> <li>• Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mittlere/große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel</li> <li>• Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen.</li> </ul>
<b>Erforderliche Daten</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse oder andere</li> <li>• Bebauungsstruktur/-typ</li> <li>• Flächennutzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung)</li> <li>• Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell)</li> <li>• Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bauungsart</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe</li> <li>• Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung</li> <li>• Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/-höhe, Bauungsart, Rasterdaten zur Bauungsstruktur</li> <li>• Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur</li> </ul>
<b>Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Klimatope</li> <li>• Klimaanalysekarte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zur Kaltluft</li> <li>• Je nach Aufbereitung entsprechende Karten</li> </ul>

Abbildung 9: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022a, 18)

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

### Übersicht stadtklimatischer Modelle

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft werden verschiedene numerische Modelle im Rahmen von Stadtklimaanalysen genutzt (Tabelle 2). Grundsätzlich unterscheiden sich die aufgezählten Modelle in vielen Eigenschaften, welche letzten Endes auch den Zweck des beabsichtigten Anwendungsgebiets dienen. Jedem Modell ist dabei ein Anwendungsfall zugeordnet, zu welchem das jeweilige Modell im operationellen Einsatz geeignet ist. Grundlegend unterscheiden sich die aufgeführten Modelle in der Art und Weise, wie naturgetreu sie die Atmosphäre abbilden. Dies lässt sich grob in die folgenden Kategorien einteilen:

1. Modelle, die die Atmosphäre zur Reduktion des rechnerischen Aufwandes über annähernde Gleichungen modellieren oder stark vereinfachte Annahmen zur Reduktion des zu rechnenden Modellgebiets treffen.



2. Modelle, die zwar die physikalischen Grundgleichungen zur Beschreibung des atmosphärischen Zustands (Bewegungsgleichungen, erster Hauptsatz der Thermodynamik, Kontinuitätsgleichung und die Zustandsgleichung für ideale Gase) lösen, dabei aber die atmosphärische Turbulenz vollständig parametrisieren (RANS-Modelle).
3. Modelle, die auch die atmosphärische Turbulenz bis zu einer sog. „Subgridskala“ auflösen und so nur einen Teil der Turbulenz parametrisieren, welcher per se durch die gewählte Auflösung der Modellrechnung parametrisiert eingeht (LES-Modelle).

Dabei steigt über 1. zu 3. der Grad der naturgetreuen Modellierung und gleichzeitig die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Modelle der Kategorie 3 werden derzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet, da für ihre Verwendung aufgrund des hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt wird.

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

Tabelle 2: Auswahl an numerischen Modellen für den Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen.

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D (Gross 1992)	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM (Lohmeyer und Schädler, 1998)	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21 (Sievers 2005)	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3 (DWD 2012)	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U (Maronga et al. 2020)	3	1 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder



### 3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 10). Die Bearbeitungszeit lag zwischen April 2021 und Juni 2024. Bei den Arbeitsschritten in der Analyse- und Synthesephase handelt es sich um weitgehend standardisierte gutachterliche Tätigkeiten auf der Sachebene. Kernelement sind szenarienbasierte numerische Stadtklimamodellierungen zu den Themenkomplexen Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Luftqualität, eine meteorologische Messkampagne sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Stadt Hanau, insbesondere der dortigen Projektleitung beim Amt für Umwelt-, Natur- und Klimaschutz sowie zu speziellen Einzelthemen (vor allem Luftqualität, Klimaszenarien, Entwicklungsflächen) zusätzlich mit weiteren Fachstellen (wie bspw. der Stadtplanung) innerhalb der Stadtverwaltung, wie auch extern mit dem Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie (HLNUG) gelöst.



Abbildung 10: die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (GAEDE UND HÄRTLING 2010, 32). Im stadt- und umweltplanerischen Kontext ebenso wie beim Klimaschutz und der Klimaanpassung sind Bewertungen nur im Kontext eines möglichst



vollständig operationalisierten Zielsystems sowie auf der Basis von transparenten, reproduzierbaren und akzeptierten Bewertungsmaßstäben und -verfahren zulässig (FÜRST UND SCHOLLES 2008). Ohne diese Prämissen hängen Bewertungen sprichwörtlich in der Luft, weil ihnen die Anknüpfungspunkte fehlen. Die in diesem systemischen Ansatz so zentralen Umweltqualitätsziele basieren dabei bestenfalls auf rechtlichen Normen (Gesetzen, Verordnungen, Richtlinien). Für rechtlich nicht normierte Bereiche müssen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauende politische bzw. planerische Abwägungs-/Entscheidungsprozesse die Rechtsnormen anlassbezogen ersetzen.

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

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

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



Folgende Institutionen der Stadt Hanau waren Mitglied der PAG:

Amt für Umwelt-, Natur- und Klimaschutz  
Untere Naturschutzbehörde  
Stadtplanungsamt  
Baugesellschaft Hanau GmbH  
Amt für Grundstücke und Geoinformation  
Hanau Immobilien- und Baumanagement (IBM)  
Hanau Infrastruktur Service (HIS)  
Bauaufsicht  
Hanau Wirtschaftsförderung GmbH  
Brandschutzamt

Insgesamt fanden 5 Sitzungen der PAG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

PAG 1 (Einführung und Zentrale Produkte der Stadtklimaanalyse) am 26.10.2021  
PAG 2 (Ergebnispräsentation Status Quo) am 15.08.2022  
PAG 3 (Ergebnispräsentation Zukunft) am 08.03.2023  
PAG 4 (Vorstellung & Diskussion Bewertungskarten zur PHK) am 24.05.2023  
PAG 5 (Vorstellung & Diskussion Planungshinweiskarte) am 06.10.2023



## 4. Klima und Klimawandel in Hanau

### 4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

#### ***Gegenwärtiges Klima***

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Hanau basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD; KASPAR et al. 2017). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

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

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

#### ***Zukünftiges Klima***

Die Analyse zukünftiger klimatischer Änderungen für die Stadt Hanau basiert auf Daten von numerischen, regionalen Klimamodellen der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX erstellt Ensembles von Klimasimulationen basierend auf einer Vielzahl von Downscaling-Modellen, angetrieben von verschiedenen globalen Klimamodellen für Europa. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, welche regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5; 2013) und darüber hinaus erstellt. Verwendet wurden tägliche Daten mit einer räumlichen Auflösung von ca. 12,5 km (0,11 °).

Tabelle 3 listet die zum Zeitpunkt der Auswertungen verfügbaren Modellrechnungen von EURO-CORDEX auf, welche die Grundlage für das zusammengestellte Ensemble bilden. EURO-CORDEX ist ein fortlaufendes Projekt, d.h. die Datenbanken mit den verfügbaren Modellergebnissen werden permanent aktualisiert. Somit sind eventuell in der Zeit bis zur Erstellung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen, die jedoch im Rahmen dieses Projektes nicht mehr berücksichtigt werden konnten. Ein erheblicher Einfluss dieser Daten auf die hier präsentierten Ergebnisse ist allerdings nicht zu erwarten.

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



ein sogenanntes Modellensemble. Diesem Ansatz folgend wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Hanau auf ein Ensemble bestehend aus 12 Regionalen Klimamodellen zurückgegriffen.

Tabelle 3: Für das verwendete Modellensemble verfügbare Ensemblemitglieder (Modellkombinationen) und Szenarien (Historical, RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). GCM bzw. RCM = Globales bzw. Regionales Klimamodell (Global / Regional Climate Model).

	GCM	RCM	Historical	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 8.5
1	CanESM2	CCLM	✓	✗	✗	✓
2	EC-EARTH	CCLM	✓	✓	✓	✓
3	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
4	EC-EARTH	RACMO22E	✓	✗	✓	✓
5	EC-EARTH	RCA4	✓	✓	✓	✓
6	IPSL-CM5A	RCA4	✓	✗	✓	✓
7	MIROC5	CCLM	✓	✓	✗	✗
8	MIROC5	REMO2015	✓	✗	✗	✓
9	HadGEM2-ES	WETTREG2013	✓	✗	✗	✓
10	HadGEM2-ES	CCLM	✓	✗	✓	✓
11	HadGEM2-ES	RACMO22E	✓	✓	✓	✓
12	HadGEM2-ES	STARS3	✓	✓	✗	✗
13	HadGEM2-ES	RCA4	✓	✓	✓	✓
14	MPI-ESM	WETTREG2013	✓	✓	✗	✗
15	MPI-ESM	CCLM	✓	✗	✓	✓
16	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
17	MPI-ESM	REMO2009	✓	✓	✓	✓
18	MPI-ESM	STARS3	✓	✓	✗	✗
19	MPI-ESM	RCA4	✓	✓	✓	✓

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 (vgl. 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 Klimamodelltdaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelltdaten“ durchgeführt (LINKE et al. 2016).

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen zukünftig entwickeln, werden





diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa standen zum Bearbeitungsstand des Projekts drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, RCP 4.5 und RCP 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*). Die Zahl in der Bezeichnung der Szenarien benennt den mittleren Strahlungsantrieb in W/m<sup>2</sup>, der in ihrem projizierten Verlauf zum Ende des 21. Jahrhunderts erreicht wird (Moss et al. 2010):

- Das Szenario RCP 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 Watt pro Quadratmeter (W/m<sup>2</sup>). Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m<sup>2</sup> ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel (maximaler Anstieg der globalen Mitteltemperatur um 2 °C) nicht überschreiten, sodass das RCP 2.6 oft auch als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird. Nach der aktuellen Entwicklung nähern wir uns inzwischen global immer mehr dieser anvisierten Grenze, sodass das Ziel wahrscheinlich nur noch mit einer besonderen Anstrengung der Weltgemeinschaft zu erreichen ist (IPCC 2021).
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das Szenario RCP 8.5 weist hingegen den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und einen Anstieg der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem Zeitraum 1985 bis 2005 bewirken würde. Das Szenario RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher Szenario“ bezeichnet, da es eben den Weg darstellt, auf dem wir uns ohne Umsetzung von mehr Klimaschutzmaßnahmen als bisher, befinden.

Wie bereits die Ergebnisse des Global Carbon Projektes<sup>2</sup> 2013 proklamierten, befanden und befinden wir uns, gemessen an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen, aktuell noch immer auf dem „Pfad“ des RCP 8.5-Szenarios (SCHWALM et al. 2020). Zwar werden immer wieder Zweifel in der Wissenschaft geäußert, ob das Szenario noch immer als das „Weiter wie bisher Szenario“ zu nennen ist, aber dennoch entsprechen die aktuellen globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen am ehesten dem RCP 8.5. Somit bietet dieses Szenario auch aktuell noch die beste Prognose für den aktuellen Weg und beschreibt unter dem Vorsorgeaspekt am besten die Klimawandelfolgen, die ohne eine weltweite Anstrengung zu erwarten sind. Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Die Stadt Hanau hat für die beauftragten Modellberechnungen für die Prognose das Szenario RCP 2.6 und 8.5 im Sinne der Minimal- und Maximalabschätzung zugrunde gelegt und so finden sich auch die betreffenden Abbildungen in den folgenden Ausführungen zu den beiden jeweiligen Szenarien wieder. Die in der Abbildung 11 ebenfalls aufgeführten SRES-Kurven entsprechen differenzierteren "Special Report on Emission Scenarios", die hier nicht näher betrachtet werden sollen. Sie entsprechen dem Stand der Wissenschaft aus dem Jahr 2000 und stellen die damaligen Versuche dar, die Emissionspfade zu prognostizieren (IPCC, 3.Sachstandsbericht 2001).

Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Ermittlung des dem Stadtzentrum von Hanau am nächsten gelegenen Gitterpunktes sowie den 8 umliegenden Gitterpunkten. Die an den Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (täglich) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten (vgl. DWD 2020). Alle Auswertungen basieren auf diesen Zeitreihen.

---

<sup>2</sup> [www.globalcarbonproject.org](http://www.globalcarbonproject.org)

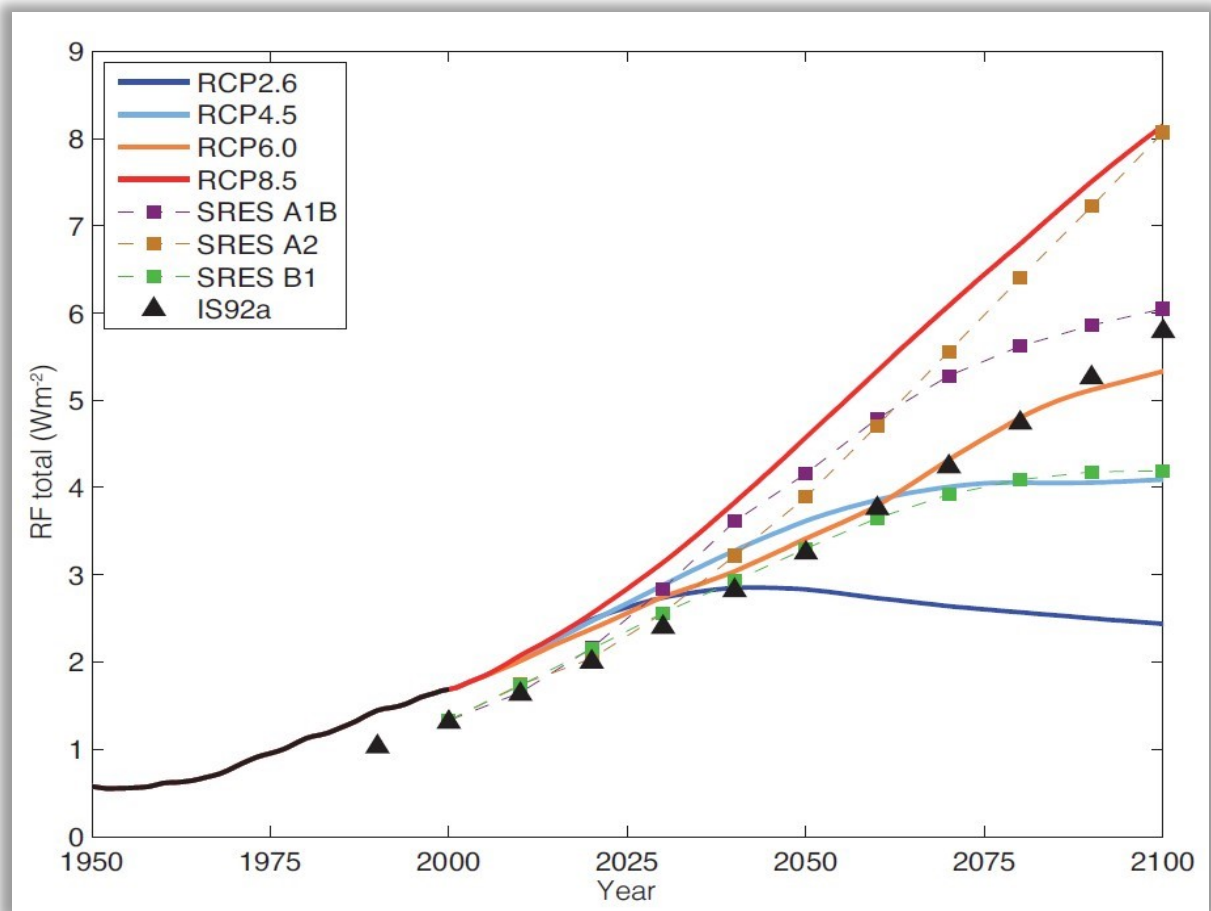


Abbildung 11: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien, die schwarze Linie repräsentiert Messwerte (Cubasch et al. 2013).

Die Analyse des Klimawandels in Hanau wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im Ansatz 1 wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 bis zum Jahr 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob erstens ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und zweitens die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/ Rauschverhältnisses ermittelt und klassifiziert (vgl. Tabelle 4).



Tabelle 4: Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses, (siehe oben).

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

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in welchem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 bis 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten Regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt, wurde im Rahmen dieses Projektes der Zeitraum von 1971 bis 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, so dass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt.

Es ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Zeitskalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar.

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren, deshalb wurden im Ansatz 2 für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende 30-jährige Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 bis 2000
- Zukunftsperiode 1 (kurzfristiger Planungshorizont): 2023 bis 2050
- Zukunftsperiode 2 (mittelfristiger Planungshorizont): 2041 bis 2070
- Zukunftsperiode 3 (langfristiger Planungshorizont): 2071 bis 2100

Die Wahl der 30 - jährigen Zeiträume erfolgte nach dem Stand der Technik. Im vorliegenden Fall entspricht das Vorgehen dem des Deutschen Wetterdienstes.

Von den einzelnen Variablen-Mittelwerten der jeweiligen Zukunftsperiode wurden die zugehörigen Mittelwerte der Referenzperiode subtrahiert und somit die langjährigen mittleren Änderungen für jede Variable berechnet. Die statistische Signifikanz der Änderungen wurde nach einem vom Bund-Länder Fachgespräch zur „Interpretation von Modelldaten“ vorgeschlagenen statistischen Testschema ermittelt (vgl. LINKE et al. 2016). Das Signifikanzniveau wurde einheitlich auf 95 % festgelegt. Dabei ist unbedingt zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten,



statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar.

#### 4.2 GEGENWÄRTIGES KLIMA

Hanau ist gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 10,4 °C (DWD 2020b) und eine mittlere Niederschlagssumme von 682 mm/Jahr, wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Monaten Mai bis Juli auftreten (Abbildung 12). Damit ist die Stadt um 1,5 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 8,9 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt unter dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 818 mm/Jahr.

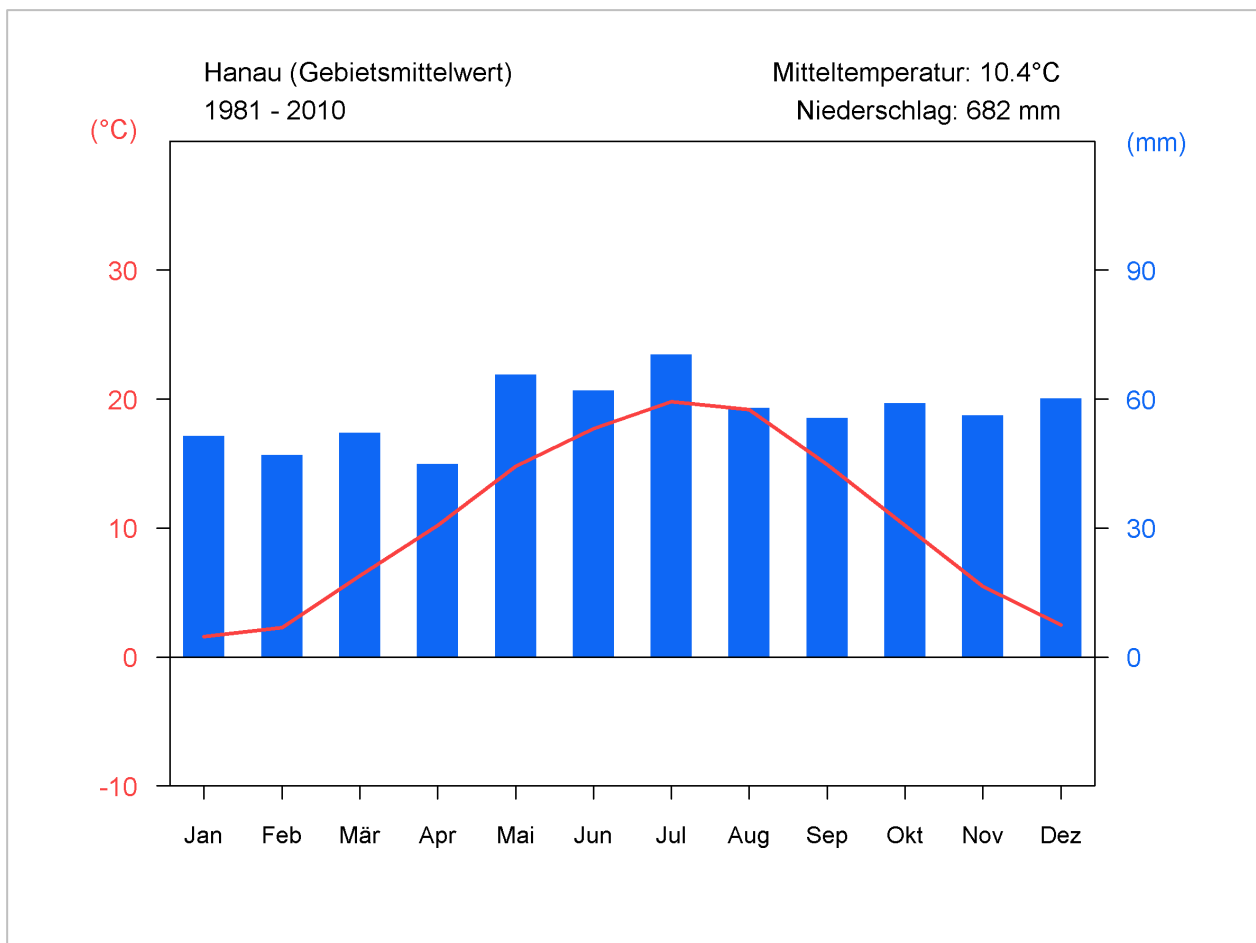


Abbildung 12: Klimadiagramm der Stadt Hanau für den Zeitraum 1981 bis 2010, basierend auf den DWD-Grid-Daten) (nach DWD 2020b)

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Hanau – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,4 °C gestiegen (Mittelwert 1981 bis 2010 im Vergleich zu 1881 bis 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 13).

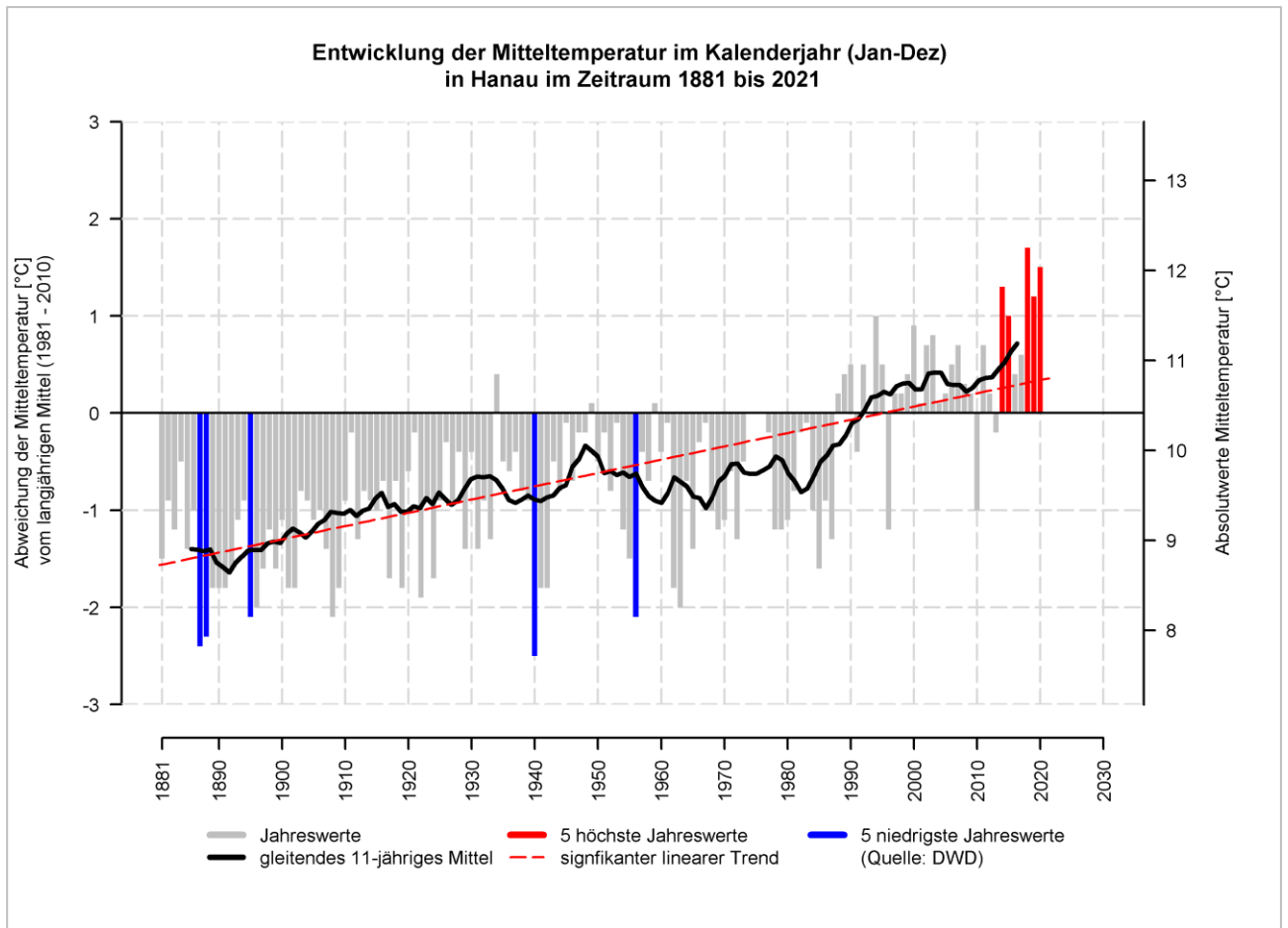


Abbildung 13: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Hanau im Zeitraum von 1881 bis 2021 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2022a)

Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1981 bis 2010 traten in Hanau 51 Sommertage und 12 Heiße Tage pro Jahr auf, was über dem deutschlandweiten Durchschnitt (35 Sommertage bzw. 7 Heiße Tage pro Jahr) liegt. Die warmgemäßigte Lage Hanau zeigt sich in der Anzahl meteorologischer Kenntage im Winter. In Hanau wurden in den letzten drei Dekaden im Mittel 65 Frosttage und 12 Eistage pro Jahr und damit eine deutlich geringere Auftrittshäufigkeit im Vergleich zum deutschlandweiten Mittel registriert (85 Frosttage bzw. 26 Eistage pro Jahr).

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Frankfurt/Main dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Hanau. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 3,3 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 5,4 m/s am häufigsten auftraten (leichte Brise bis schwacher Wind). In den Nachtstunden, wie auch am Tage, dominieren Winde aus südwestlichen und nordnordöstlichen Richtungen (Abbildung 14).

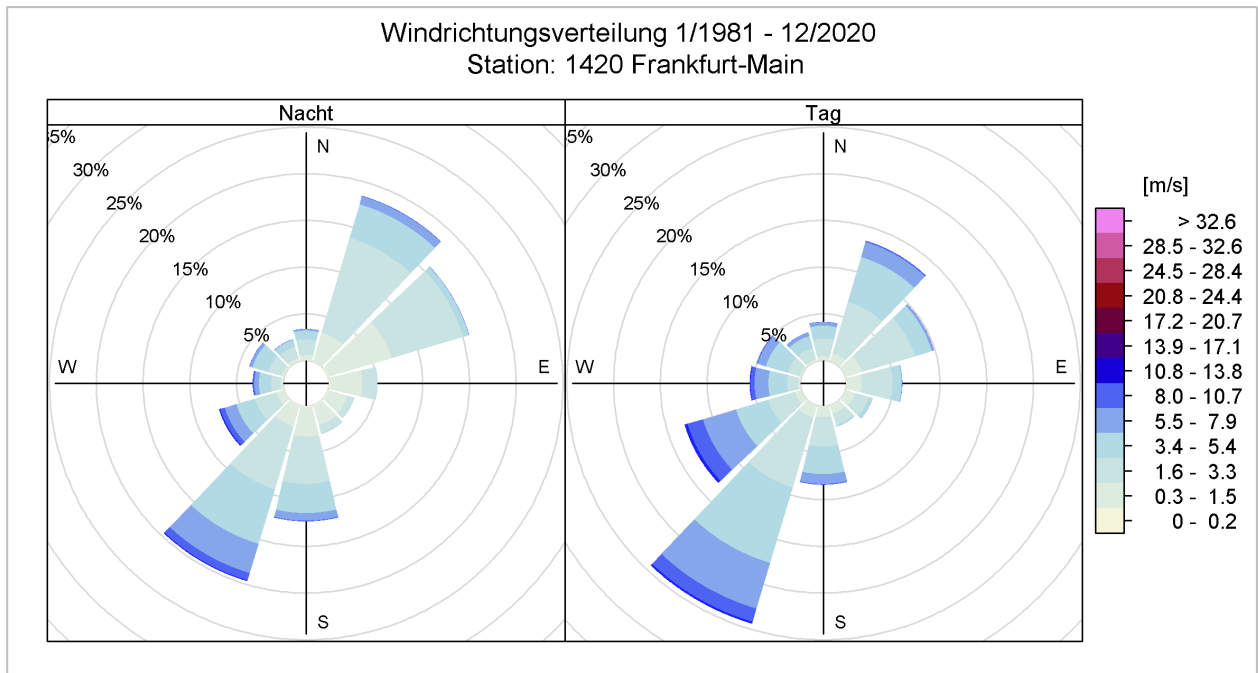


Abbildung 14: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Hanau für den Zeitraum 1981 – 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Frankfurt/Main (DWD 2022a)

### 4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

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

In Hanau traten im langjährigen Mittel von 1981 bis 2020 rund 74 windschwache Strahlungsnächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 15). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im jährlichen Mittel knapp 23 windschwache Strahlungsnächte beobachtet, was einem Anteil von 25 % entspricht – jede vierte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.



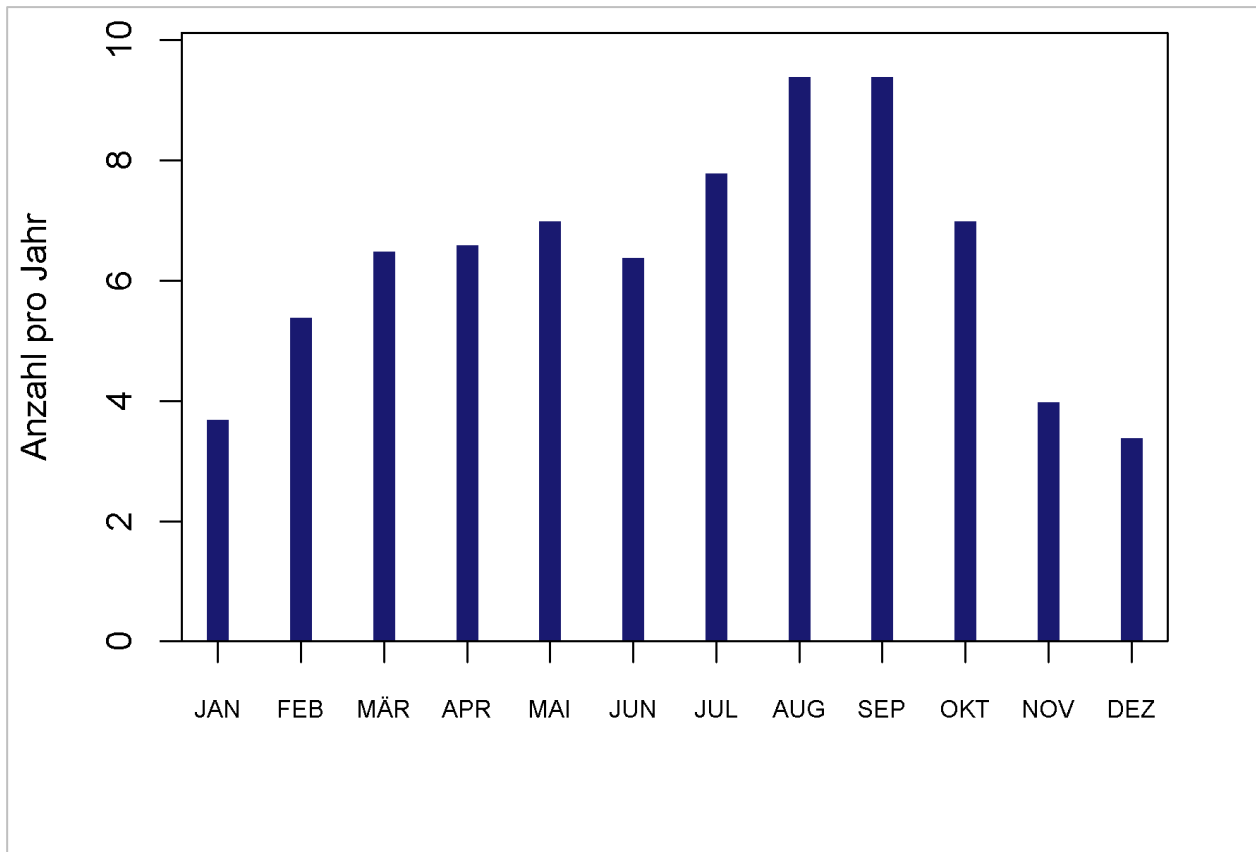


Abbildung 15: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Hanau (74 pro Jahr) für den Zeitraum 1981 bis 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Frankfurt/Main (DWD 2020a)

#### 4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Der menschengemachte Klimawandel ist bereits heute erkenn-, mess- und spürbar (IPCC 2021). Besonders im Hinblick auf die Entwicklung von Anpassungsstrategien und Konzepten zum Umgang mit veränderten klimatischen Bedingungen ist es wichtig zu wissen, in welchem Umfang sich die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag und Wind in den nächsten Dekaden verändern.

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

Neben der Hitze als Folge des Klimawandels werden abnehmende Niederschläge im Sommer und zunehmende Niederschläge im Winter erwartet. Weiterhin nehmen Starkniederschlagsereignisse zu, die v.a. Abflusssysteme überlasten und für Überschwemmungen sorgen können. Hinzu kommt eine Häufung starker bis extremer Sturmereignisse in den vergangenen Jahren mit teilweise verheerenden Folgen für die Verkehrsinfrastruktur, Gebäude und Stadtbäume. Diese Auswirkungen können regional recht unterschiedlich sein und müssen somit für jeden betrachteten Raum individuell analysiert und bewertet werden (JACOB et



al. 2016). Auf Basis dieser Informationen können effektive Maßnahmen entwickelt werden, die auf die jeweiligen lokalen Auswirkungen und Bedürfnisse ausgerichtet sind.

#### 4.4.1 TEMPERATURERHÖHUNG & HITZE

Im zeitlichen Verlauf von 1971 bis zum Jahr 2100 zeigt der Median der Jahresmitteltemperaturen des Regionalmodellensembles einen deutlichen Anstieg beim Szenario RCP 8.5 (Abbildung 16). Dieser Trend ist äußerst robust, ein Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen wird von allen Modellkombinationen des Ensembles bestätigt. Zum Ende des Jahrhunderts nimmt neben der Jahresmitteltemperatur auch die Variabilität zu, dies wird durch die Darstellung der Bandbreite des Modellensembles in Abbildung 16 deutlich (Möglichkeitsbereich). Hierbei sei darauf hingewiesen, dass der im Diagramm abgebildete, bereits vergangene Zeitraum durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (Dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

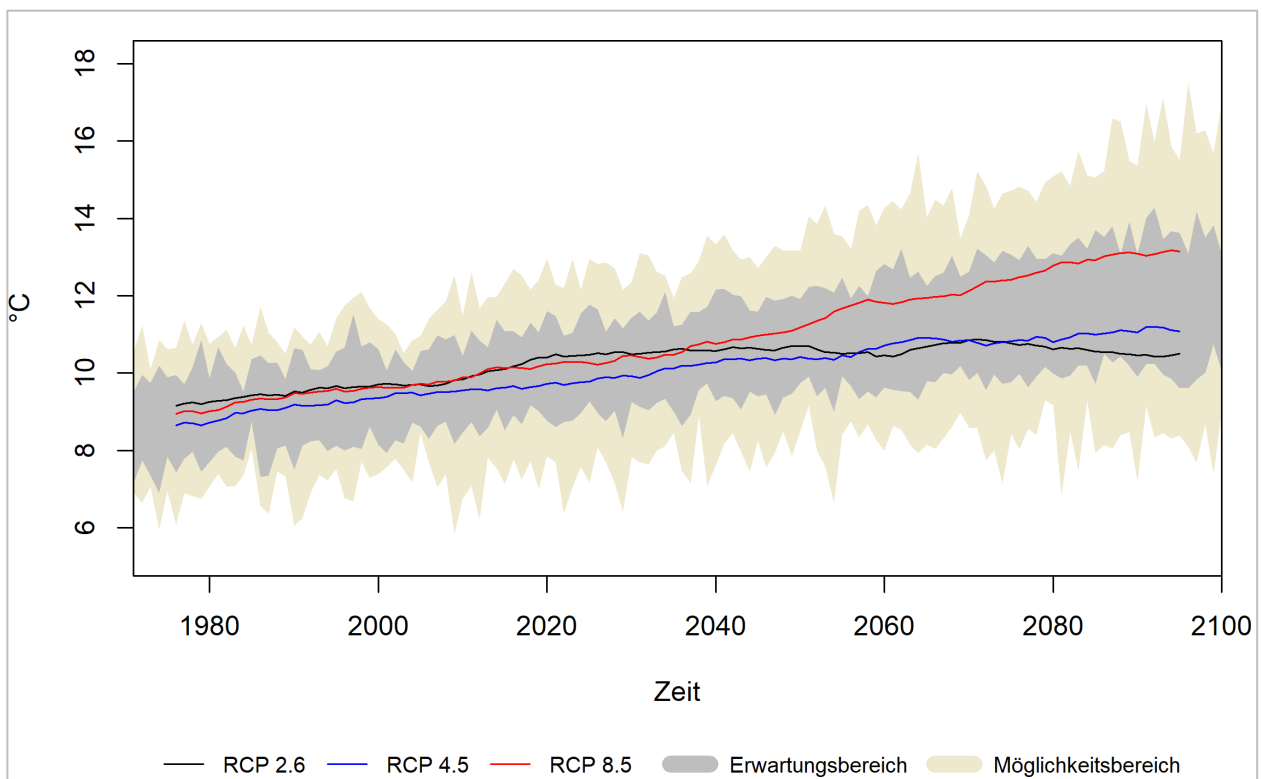


Abbildung 16: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Hanau alle Szenarien. Die durchgezogenen Linien sind die Mediane der einzelnen Szenarien des Ensembles. Der Möglichkeitsbereich bildet die Bandbreite zwischen kleinstem und größtem Wert des Ensembles<sup>3</sup>.

Die Änderungen der langjährigen Mittelwerte der Temperatur zeigen für Hanau ebenfalls einen deutlichen Anstieg in allen Zeiträumen, wobei im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts die stärksten Zunahmen zu verzeichnen sind (Tabelle 5, Tabelle 6). Die jährlichen Minimumtemperaturen steigen am stärksten. Die Änderungen der Temperaturmaxima fallen höher aus als die der Mitteltemperaturen. Die höchsten Zunahmen der Mitteltemperatur treten in der Zukunftsperiode von 2071 bis 2100 bei Szenario RCP 8.5 auf, beim Szenario RCP 2.6 ist ein leichter Rückgang der Temperatur zu erkennen (Tabelle 5). Hier zeigen sich die projizierten positiven Auswirkungen globaler Klimaschutzmaßnahmen deutlich.

<sup>3</sup> Der Möglichkeitsbereich ist synonym dem Begriff Vertrauensbereich zu verwenden und bildet die Bandbreite zwischen kleinstem und größtem Wert des Ensembles, der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Ensembles



Eine Zunahme der Temperaturen ist in allen Regionen Deutschlands beobachtbar und auch in den regionalen Klimaprojektionen erkennbar (DWD 2020, DEUTSCHLÄNDER UND MÄCHEL 2017). In der 3. Zukunftsperiode (2071-2100) liegt die Temperaturänderung des Szenarios RCP 8.5 in Hanau mit 3,9 °C leicht über dem deutschlandweiten Mittelwert von 3,8 °C. Bei der Annahme dieses Szenarios würde die Jahresmitteltemperatur in Hanau zum Ende des Jahrhunderts somit bei ca. 14 °C bis 15 °C liegen. Dies entspricht beispielsweise der heutigen Jahresmitteltemperatur von Madrid.

Tabelle 5: Mittlerer langjähriger Temperaturanstieg (in °C) in Hanau, Szenario RCP 2.6

	Mitteltemperatur	Maximumtemperatur	Minimumtemperatur
<b>1971 - 2000</b>	10,3	33,2	-12,0
<b>2021 - 2050</b>	+1 (11,3)	+1,4 (34,6)	+2,6 (-9,4)
<b>2041 - 2070</b>	+1,2 (11,5)	+1,6 (34,8)	+2,6 (-9,4)
<b>2071 - 2100</b>	+1,1 (11,4)	+1,8 (35,0)	+2,5 (-9,5)

Tabelle 6: Mittlerer langjähriger Temperaturanstieg (in °C) in Hanau, Szenario RCP 8.5

	Mitteltemperatur	Maximumtemperatur	Minimumtemperatur
<b>1971 - 2000</b>	10,3	33,2	-12,0
<b>2021 - 2050</b>	+1,5 (11,8)	+1,9 (35,1)	+3,1 (-8,9)
<b>2041 - 2070</b>	+2,5 (12,8)	+3,4 (36,6)	+5,6 (-6,4)
<b>2071 - 2100</b>	+3,9 (14,2)	+5,4 (38,6)	+8,1 (-3,9)



Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form von sogenannten *Box-Whisker Plots*. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (siehe nachfolgende Abbildung 17 zur Erläuterung der Plots).

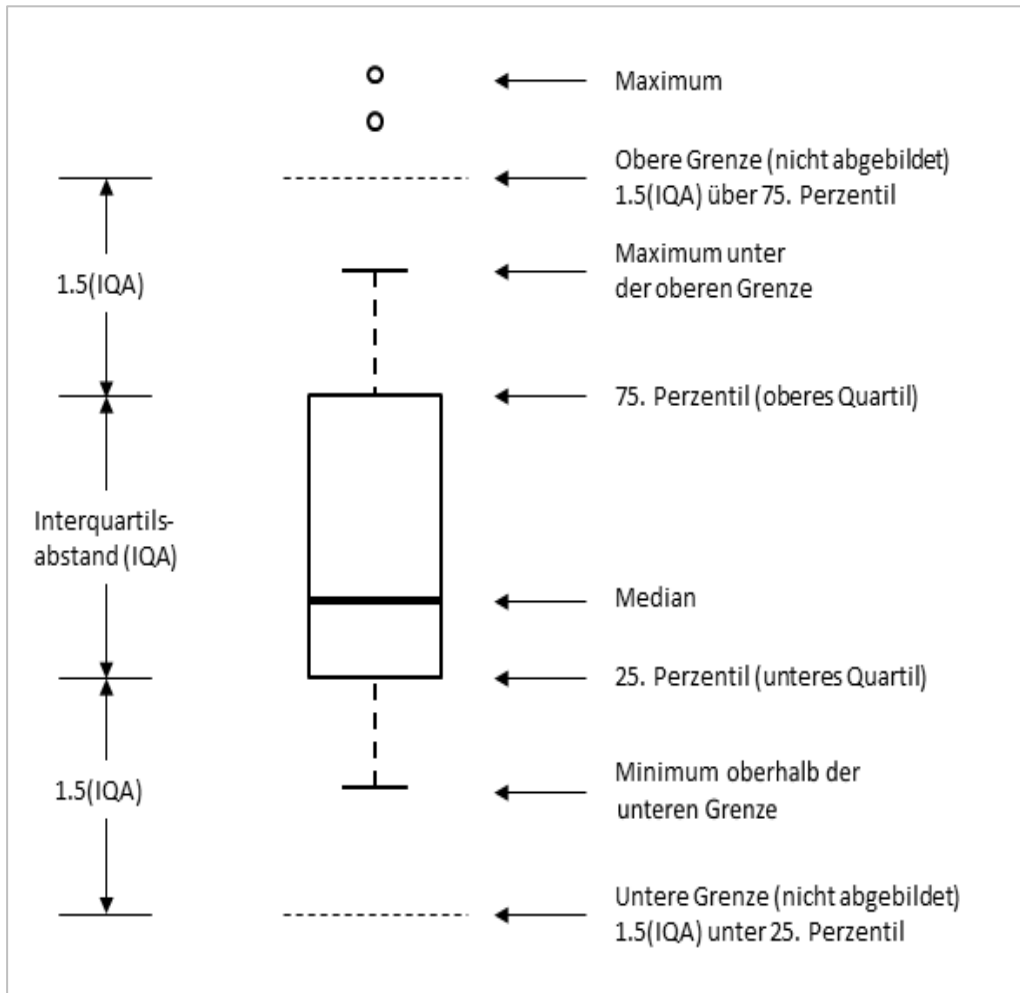
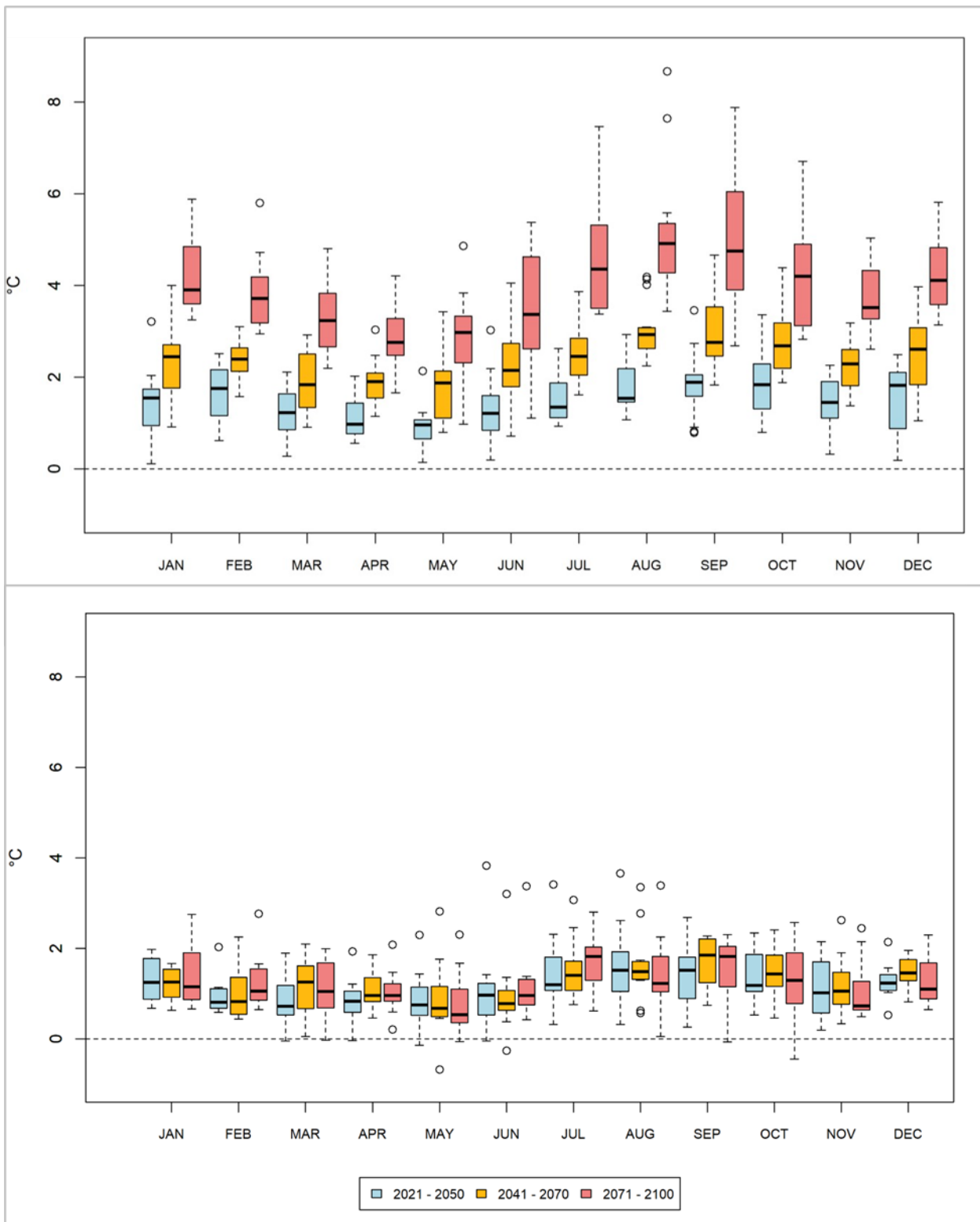


Abbildung 17: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, wobei im Spätsommer, Herbst und Frühwinter vergleichsweise größere Temperaturänderungen auftreten als im Spätwinter, Frühjahr und Frühsommer (Abbildung 18). Dieses Muster zeigen alle drei Szenarien, wobei die Ausprägung bei Szenario 8.5 am stärksten ist. Wie bei den jährlichen Mitteltemperaturen verstärkt sich auch hier das Klimaänderungssignal deutlich zum Ende des Jahrhunderts. Das RCP 2.6 bleibt moderater in der prognostizierten Zu-



nahme der monatlichen Mitteltemperatur und auch in der monatlichen Betrachtung zeigt sich ein leichter Rückgang der prognostizierten Zunahmen in der fernen Zukunft.





Abbildung

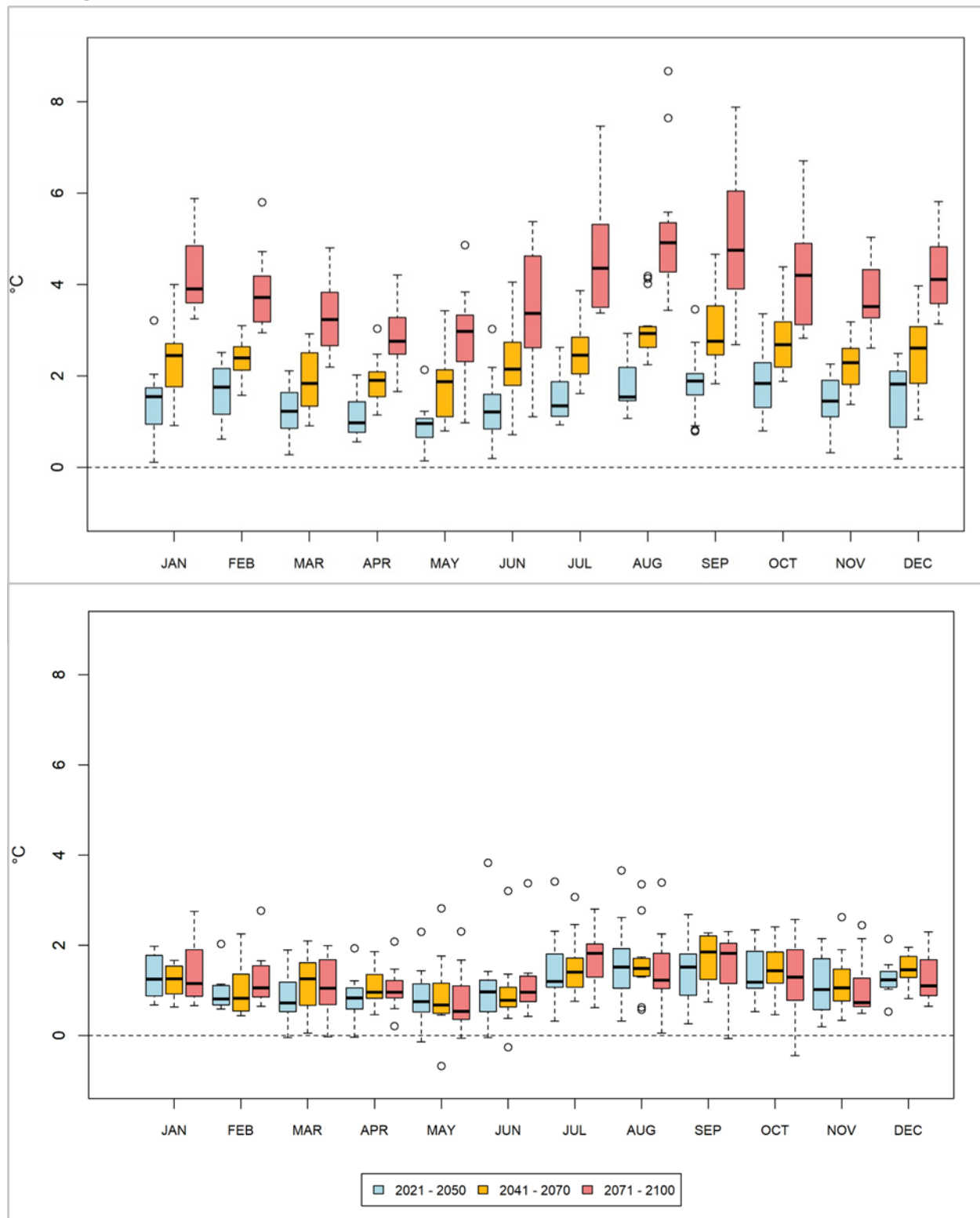


Abbildung 18: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Hanau, Szenario RCP 8.5.(oben) und RCP 2.6 (unten).

Der projizierte Anstieg der Temperatur steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung meteorologischer Kenntage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. In Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die langjährigen mittleren Änderungen ausgewählter Kenntage für die betrachteten Szenarien aufgeführt. Die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen, Heißen Tagen und Tropennächten





nimmt bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich zu. So ist bspw. in der Zukunftsperiode 3 beim Szenario RCP 8.5 mit 29 zusätzlichen Heißen Tagen zu rechnen. Damit würden zukünftig im Mittel ca. 36 Heiße Tage im Gegensatz zu aktuell ca. 7 Heißen Tagen pro Jahr auftreten. Im RCP 2.6 hingegen ist die größte Zunahme direkt in der nahen Zukunft zu sehen, die Entwicklung bis zum Ende des Jahrhunderts stagniert hingegen, der dem Szenario zugrundeliegenden eintretenden Wirksamkeit der globalen Klimaschutzmaßnahmen folgend.

Tropennächte treten bislang selten auf, weshalb beobachtete Änderungen statistisch nur unzureichend belastbar sind. Trotzdem können sie als Anhaltspunkte für die Tendenz zur zunehmenden Erwärmung dienen. Tropennächte treten ab Mitte des Jahrhunderts im RCP 8.5 häufiger auf. Dieser Kennwert beschreibt die zunehmende nächtliche Temperaturbelastung besonders in urbanen eng bebauten Räumen sehr gut. Zum Ende des Jahrhunderts führt die projizierte Erwärmung zu 22 zusätzlichen Tropennächten im Jahr (siehe Tabelle 8).

Tabelle 7: Langjährige mittlere Änderung (Anzahl pro Jahr) thermischer Kenntage in Hanau in RCP 2.6

	Sommertage ( $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ )	Heiße Tage ( $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ )	Tropennächte ( $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ )	Frosttage ( $T_{max} < 0 \text{ °C}$ )	Eistage ( $T_{min} < 0 \text{ °C}$ )
1971 - 2000	48	7	0	66	10
2024 - 2050	+13 (61)	+5 (12)	+2 (2)	-15 (51)	-5 (5)
2041 - 2070	+13 (61)	+5 (12)	+2 (2)	-21 (45)	-5 (5)
2071 - 2100	+13 (61)	+6 (13)	+3 (3)	-16 (50)	-5 (5)

Tabelle 8: Langjährige mittlere Änderung (Anzahl pro Jahr) thermischer Kenntage in Hanau in RCP 8.5

	Sommertage ( $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$ )	Heiße Tage ( $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ )	Tropennächte ( $T_{min} \geq 20 \text{ °C}$ )	Frosttage ( $T_{max} < 0 \text{ °C}$ )	Eistage ( $T_{min} < 0 \text{ °C}$ )
1971 - 2000	48	7	0	66	10
2024 - 2050	+14 (62)	+6 (13)	+3 (3)	-24 (42)	-7 (3)
2041 - 2070	+28 (76)	+14 (21)	+8 (8)	-36 (30)	-9 (1)
2071 - 2100	+48 (96)	+29 (36)	+22 (22)	-51 (15)	-10 (0)

Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen steht die eingangs beschriebene intensive Zunahme der Minimumtemperaturen im Zusammenhang mit einer Abnahme an Frost- und Eistagen. Dies lässt ein häufigeres Auftreten wesentlich milderer Winter und eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechsellern erwarten. In Hanau treten im langjährigen Mittel ca. 66 Frosttage pro Jahr auf. Darin enthalten sind etwa zehn Eistage pro Jahr. Beim Szenario RCP 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel nur noch 15 Frosttage und kein Eistag mehr pro Jahr auftreten.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt in Zukunft eine zunehmende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzeperioden erwarten. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition, was nicht deren eigentliche Relevanz in der Belastung der Bevölkerung durch eben diese widerspiegelt. Es handelt sich dabei im Wesentli-



chen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen und so einer extremen Hitzebelastung für die Bevölkerung. Wird der Schwellenwert einer Tageshöchsttemperatur  $\geq 30\text{ °C}$  verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Wert erreicht oder überschritten haben, zeigt sich für Hanau, dass die Länge von Hitzeperioden in Zukunft zunimmt (Abbildung 19 und Abbildung 20). Grundsätzlich wird dabei eine Hitzeperiode ab einer Länge von mindestens 3 aufeinanderfolgenden Tagen mit Tageshöchsttemperatur  $\geq 30\text{ °C}$  gezählt. Je nach Szenario erhöht sich die Länge der Hitzeperioden in Hanau von 3 Tagen in 1971 – 2000 auf 4 bis 8 Tage bis zum Ende des Jahrhunderts.

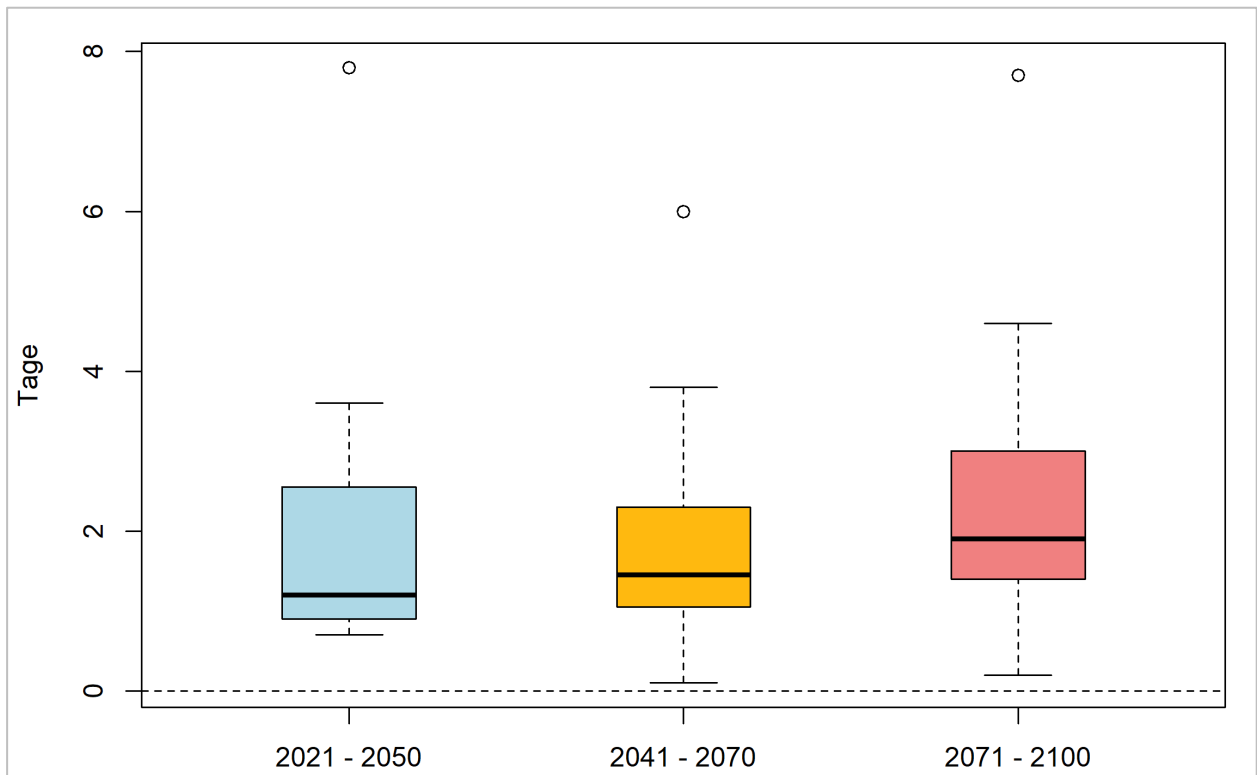


Abbildung 19: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit  $T_{max} \geq 30\text{ °C}$ ) in Hanau, Szenario RCP 2.6.

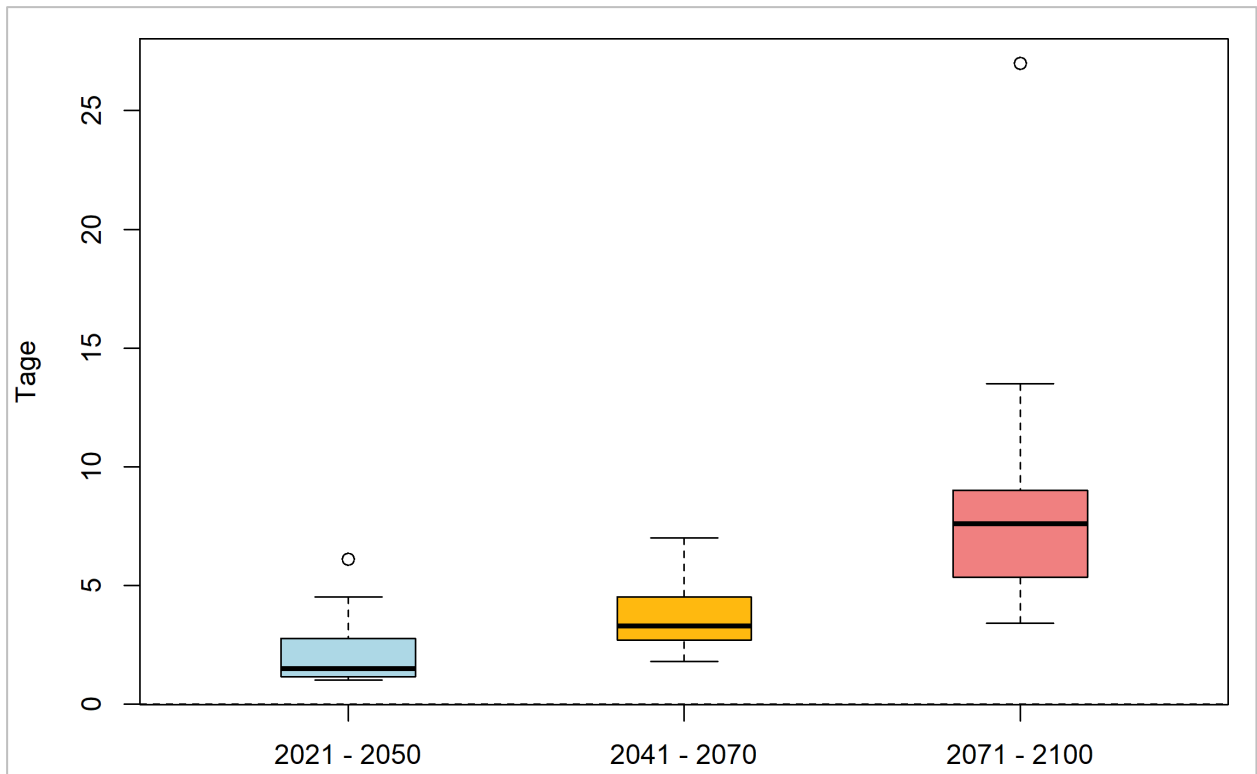


Abbildung 20: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit  $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$ ) in Hanau, Szenario RCP 8.5.



4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG & TROCKENHEIT

**Niederschlagsverschiebung**

Die jährlichen Niederschlagssummen in Hanau zeigen für alle Szenarien einen nur schwachen Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts (Abbildung 21). Der Niederschlag nimmt in allen drei Zukunftsperioden zu (Tabelle 9), wobei zum Ende des Jahrhunderts laut RCP 8.5 durchschnittlich 63 mm Niederschlag mehr pro Jahr zu erwarten sind. Im Verhältnis zur natürlichen Schwankung, die bis zu ca. 450 mm von Jahr zu Jahr betragen kann, sind die Änderungen der jährlichen Niederschlagsmengen eher gering. Jedoch zeigt die Mehrzahl der Regionalmodelle eine Zunahme, wobei diese beim Szenario RCP 8.5 in der Zukunftsperiode von 2071 bis 2100 in der Mehrzahl auch statistisch signifikant ist (Abbildung 22 und Abbildung 23).

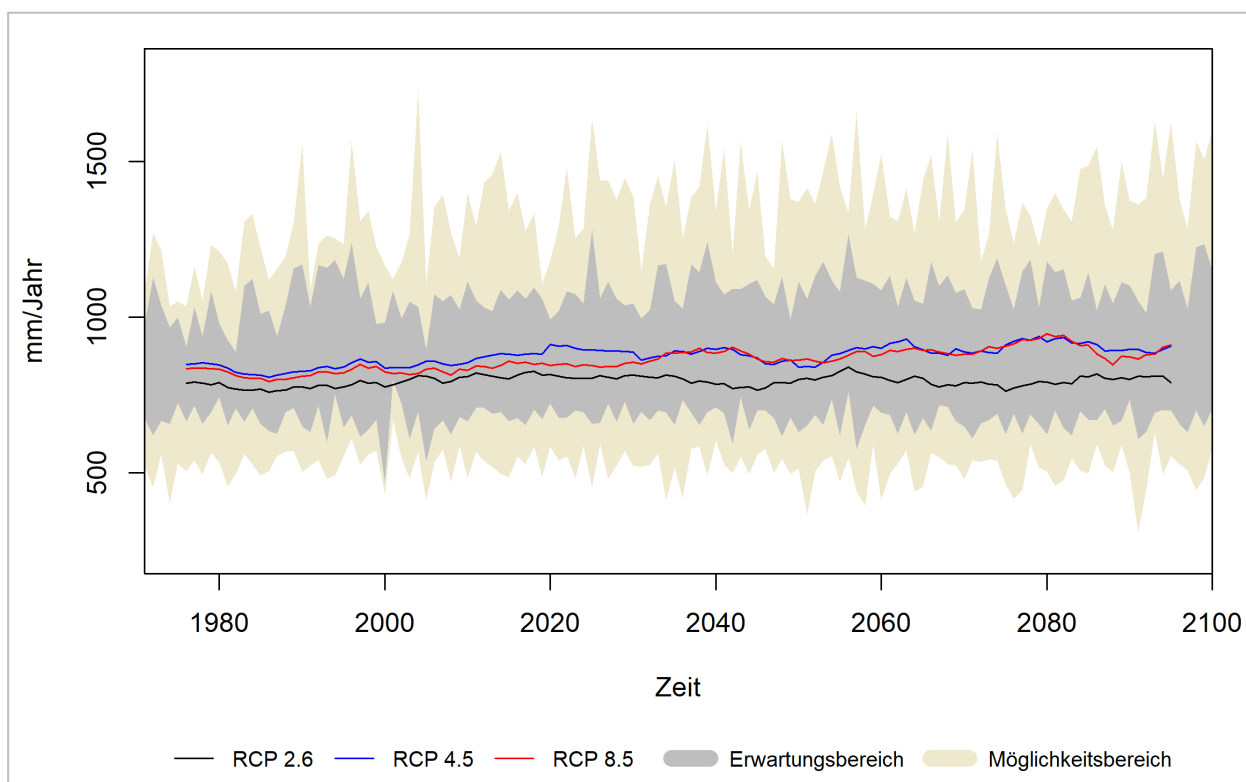


Abbildung 21: Zeitlicher Trend der jährlichen Niederschlagssummen in Hanau, alle Szenarien.

Tabelle 9: Mittlere langjährige Änderung der jährlichen Niederschlagssumme (in mm/Jahr) in Hanau, RCP 2.6 und RCP 8.5.

	Niederschlag (RCP 2.6)	Niederschlag (RCP 8.5)
<b>1971 – 2000</b>	625	625
<b>2021 – 2050</b>	+26 (651)	+32 (657)
<b>2041 – 2070</b>	+3 (628)	+38 (663)
<b>2071 – 2100</b>	-2 (623)	+63 (688)



Im Jahresgang zeigen sich auffällige Unterschiede der Niederschlagsänderungen. Es ist eine Tendenz zur Verschiebung erkennbar. In den Monaten Juli - September sind im Zeitraum von 2071 bis 2100 abnehmende Niederschlagsmengen prognostiziert (Abbildung 24). Die Modellvariabilität innerhalb des Ensembles ist recht hoch, was wiederum auf relativ hohe Unsicherheiten in der Aussage hindeutet. Die in den Abbildungen erkennbare Niederschlagsverschiebung mit Zunahmen des Niederschlags vornehmlich im Winter und Abnahmen im Sommer kann trotz bestehender Unsicherheiten zumindest als auffallende Tendenz interpretiert werden.

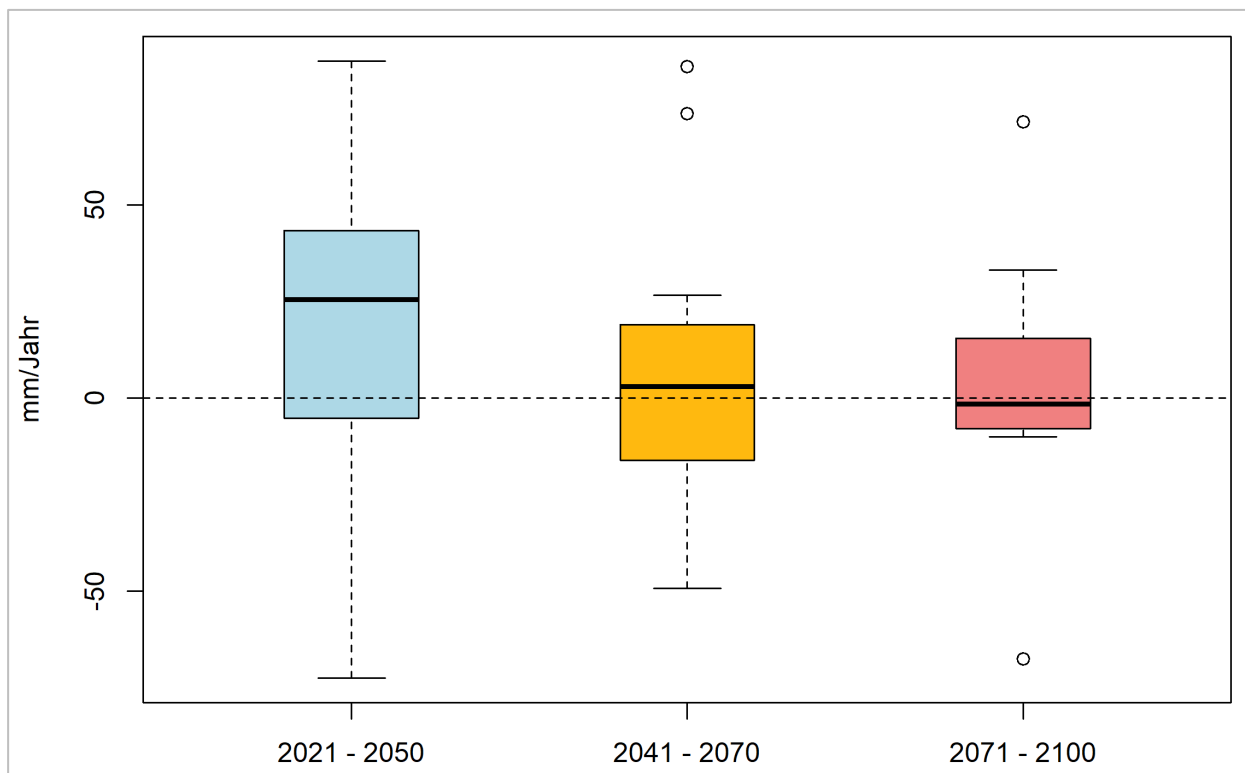


Abbildung 22: Langjährige mittlere Änderungen der jährlichen Niederschlagssummen in Hanau, Szenario RCP 2.6.

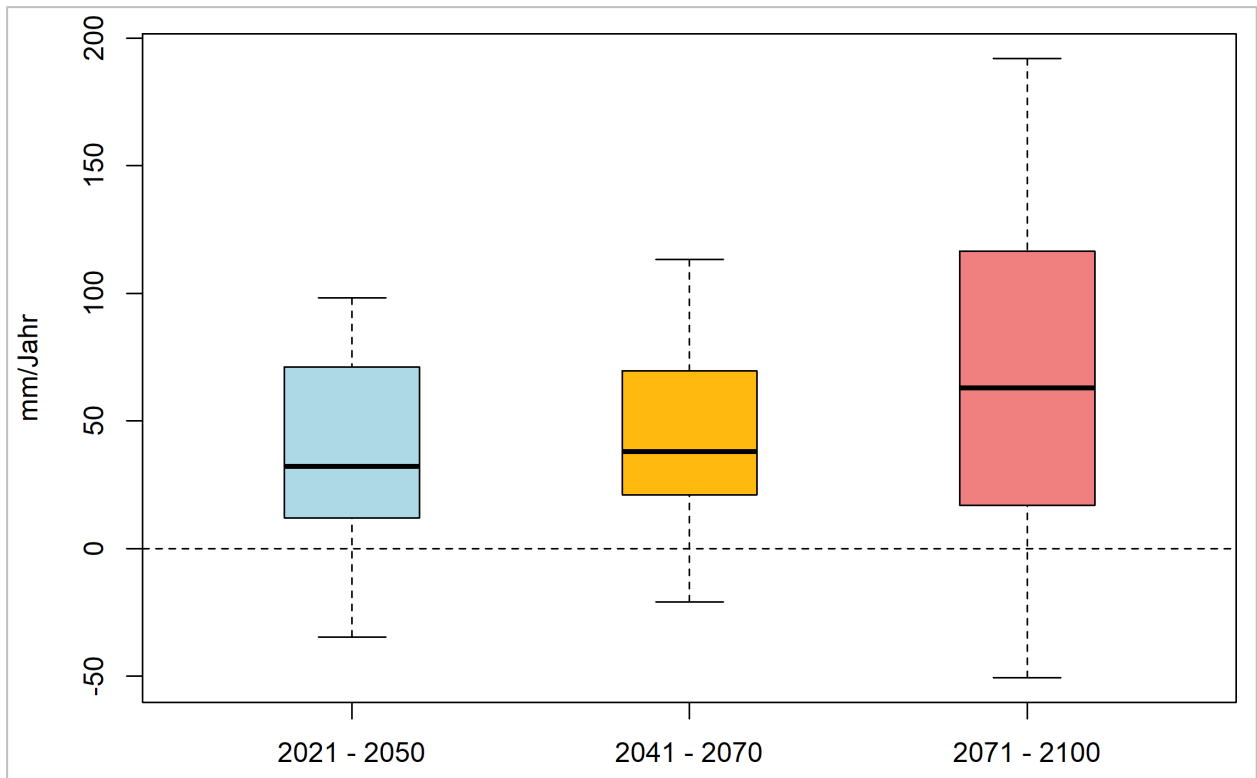


Abbildung 23: Langjährige mittlere Änderungen der jährlichen Niederschlagssummen in Hanau, Szenario RCP 8.5.



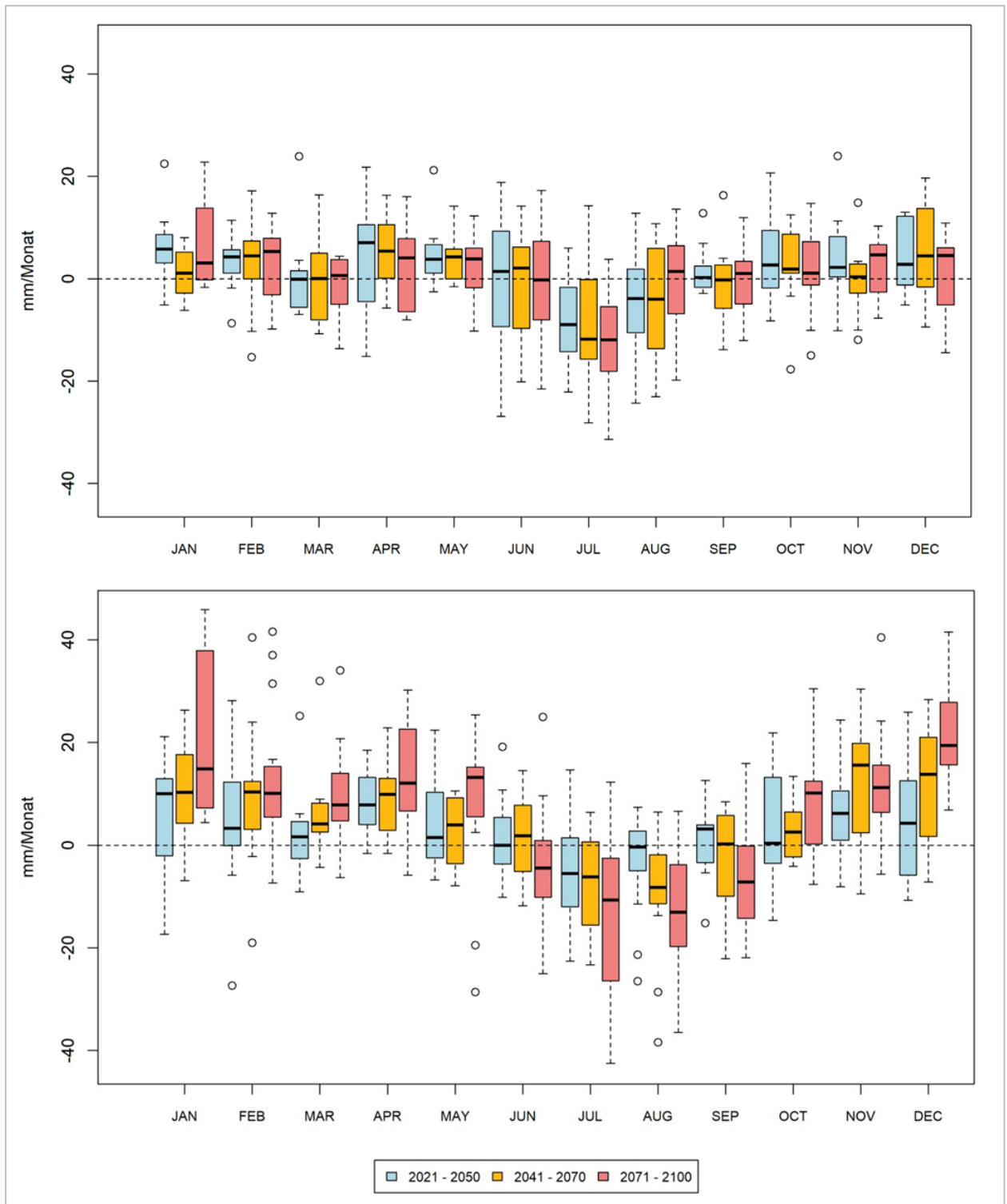


Abbildung 24: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Hanau, Szenario RCP 2.6 (oben) und RCP 8.5 (unten).

**Trockenheit**

Im allgemeinen Verständnis sind Trockenheit und Dürre durch einen Mangel an Wasser oder Feuchtigkeit gekennzeichnet, wie er in niederschlagsarmen und/oder warmen bis heißen Perioden auftreten kann. Ein Indikator für Trockenheit ist beispielsweise die Klimatische Wasserbilanz (Differenz von Niederschlag und



potenzieller Verdunstung), die eine Gegenüberstellung des potenziellen (natürlichen) Wasserangebots durch Niederschlag und Wasserverlust aufgrund der potenziellen Verdunstung erlaubt.

Die monatlichen Änderungen der klimatischen Wasserbilanz weisen entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf (Abbildung 25). Während die Winter- und Frühjahrsmonate größtenteils positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz zeigen, vor allem im RCP 8.5, sind in den Monaten von Juni bis September in allen drei Zukunftsperioden und in beiden Szenarien Abnahmen erkennbar. Auch wenn die Änderungen in den Sommermonaten teilweise recht gering sind, deutet dies zumindest auf die Tendenz zu einer Verminderung des natürlichen Wasserdargebots in der Zukunft hin. Dies kann in heißen Sommern die Situation, in bereits heute schon von Wasserknappheit oder Trockenheit betroffenen Bereichen, noch verschärfen. Ähnlich wie beim Niederschlag sind auch die Änderungen der klimatischen Wasserbilanz mit Unsicherheiten behaftet, da diese zu einem nicht unwesentlichen Teil durch die Variabilität des Niederschlags beeinflusst sind. Die klimatische Wasserbilanz ist bei den Szenarien RCP 2.6 und RCP 4.5 ähnlich, jedoch weniger deutlich ausgeprägt als beim Szenario RCP 8.5.

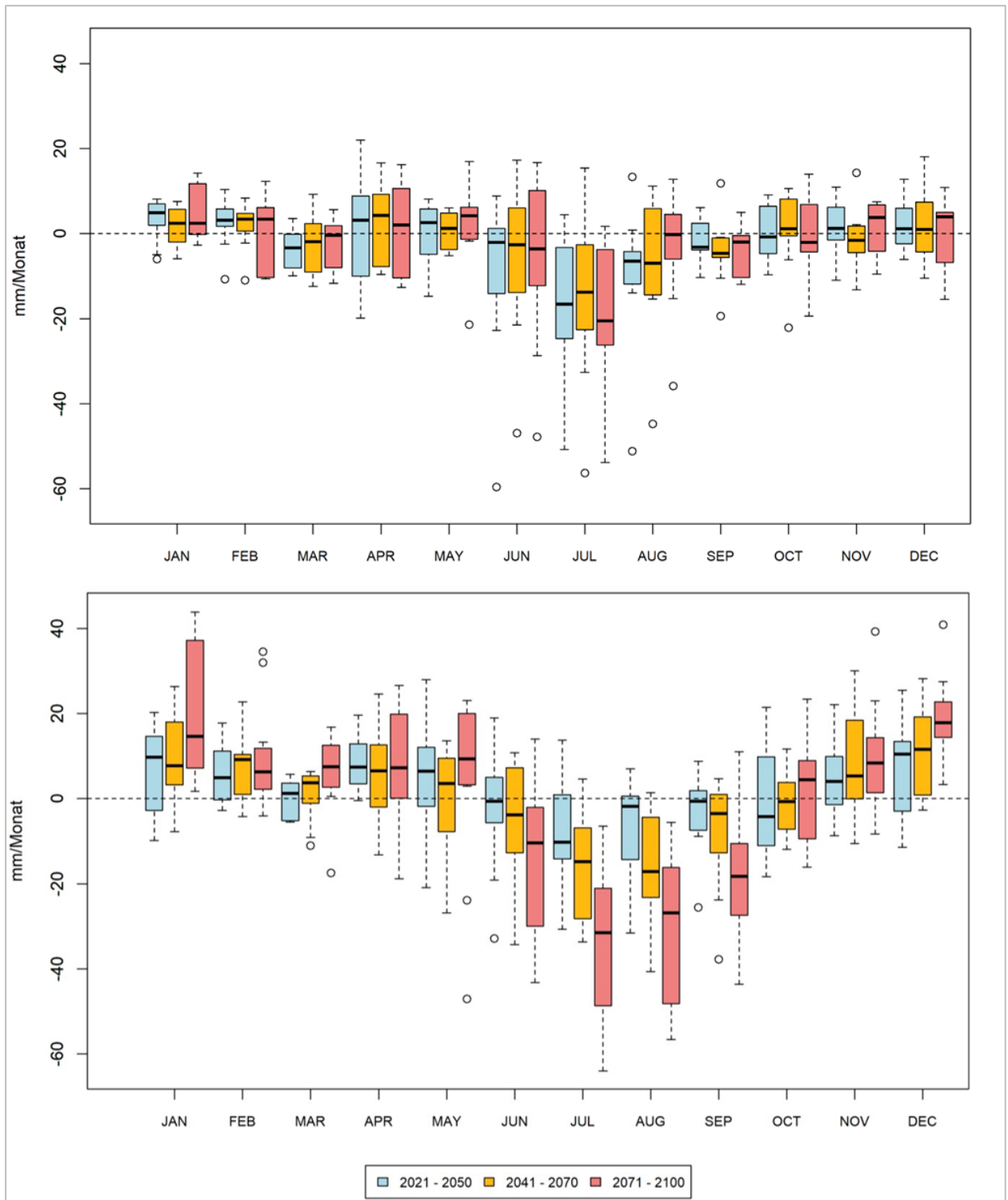


Abbildung 25: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Hanau, Szenario RCP 2.6 (oben) und RCP 8.5 (unten).



### 4.4.3 STARKNIEDERSCHLAG

Mehr noch als die mittleren Niederschlagssummen ist für Städte die Frage nach der Häufigkeit und der Intensität von Starkniederschlägen relevant. Verschiedene Ereignisse in jüngster Vergangenheit, wie die Flutkatastrophe im Ahrtal 2021, haben deutlich gezeigt, dass Starkregenereignisse ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotenzial besitzen.

Als Starkniederschläge werden Niederschläge bezeichnet, die eine hohe Intensität, d.h. im Verhältnis zu ihrer Dauer eine hohe Niederschlagshöhe, aufweisen. Starkniederschlagsereignisse können dabei sowohl Niederschläge kurzer Dauer als auch mehrere Stunden oder Tage anhaltende Niederschläge mit entsprechend großen Niederschlagshöhen sein (RAUTHE et al. 2014). Neben der Dauer eines gegebenen Starkniederschlagsereignisses ist die Größe der betroffenen Fläche wesentlich. Der DWD warnt vor Starkregen in drei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge  $\geq 15$  mm/1 h bzw.  $\geq 20$  mm/6 h (markante Wetterwarnung), Regenmenge  $\geq 25$  mm/1 h bzw.  $\geq 35$  mm/6 h (Unwetterwarnung) und Regenmenge  $\geq 40$  mm/1 h bzw.  $\geq 60$  mm/6 h (Warnung vor extremen Unwetter; DWD 2023a). In der Klimaforschung wird meist die Tagesniederschlagssumme betrachtet. Hier werden Schwellenwerte definiert (z.B.  $N \geq 10$  mm/d oder  $\geq 20$  mm/d), deren Überschreitung als Starkniederschlag verstanden werden kann. Diese sind jedoch nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze zur Festlegung der Schwellenwerte für Starkniederschlag existieren. In diesem Bericht werden folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt (der Datenquelle des Climate Data Centers (DWD) für die Auswertung folgend):

- starker Niederschlag:  $N \geq 10$  mm/d
- stärkerer Niederschlag:  $N \geq 20$  mm/d
- Starkniederschlag:  $N \geq 30$  mm/d

Beispielhaft für den Trend von Starkniederschlagsereignissen in Hanau ist die zeitliche Entwicklung der Auftretshäufigkeit von Tagen mit einem Niederschlag  $\geq 20$  mm/d dargestellt (Abbildung 26). Die Werte zeigen einen leicht ansteigenden positiven Trend, wobei dieser beim Szenario RCP 8.5 bei 11 von 15 Modellläufen auch statistisch signifikant ist (Abbildung 27).

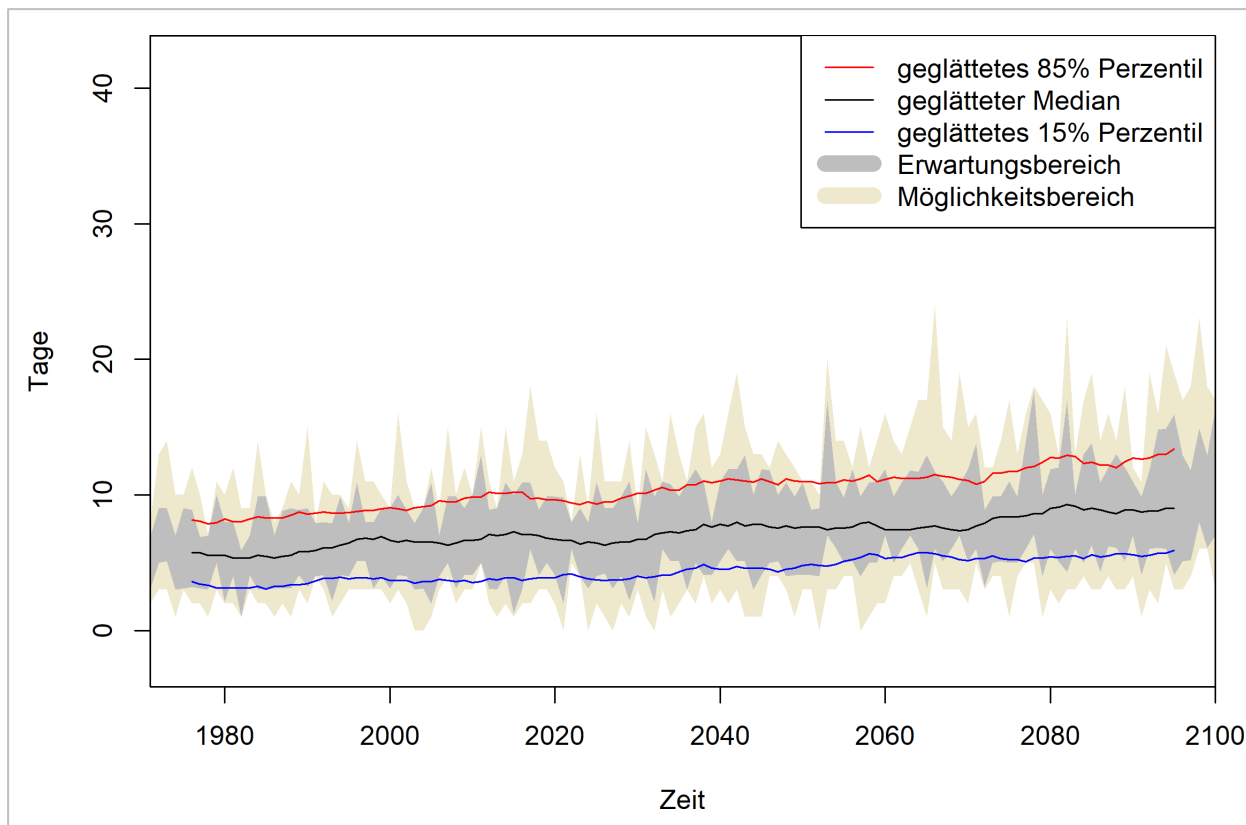


Abbildung 26: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen mit stärkerem Niederschlag ( $N \geq 20$  mm/d) in Hanau, alle Szenarien.

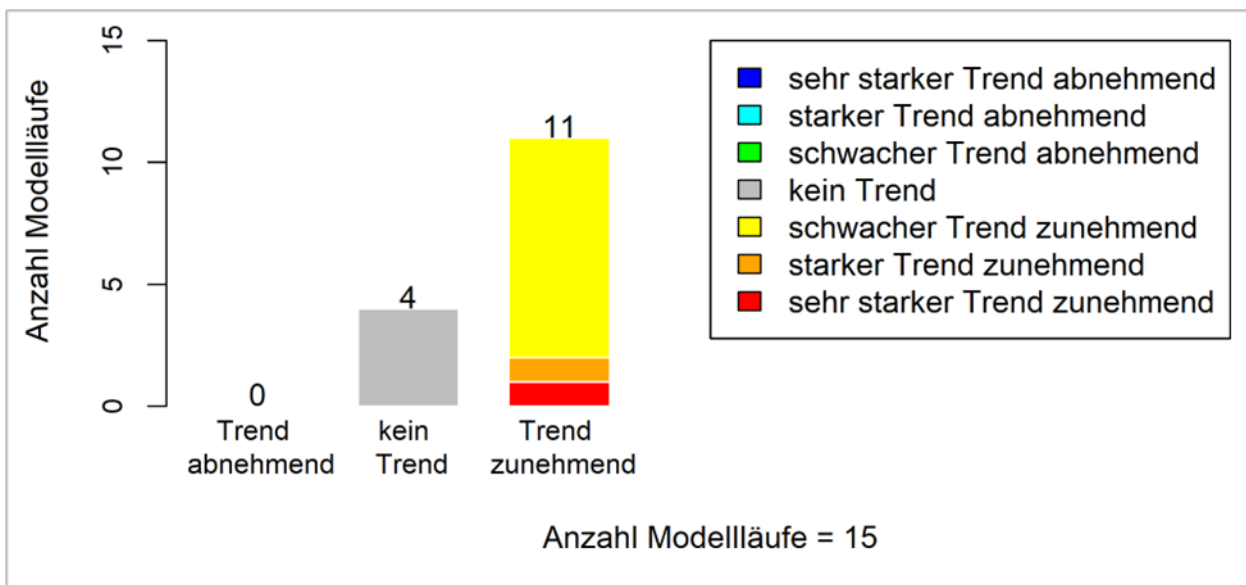


Abbildung 27: Trendbewertung des zeitlichen Trends der Tage mit stärkerem Niederschlag ( $N \geq 20$  mm/d), Szenario RCP 8.5.

Starkniederschläge treten relativ selten auf und lassen sich somit statistisch nur bedingt erfolgreich auswerten. Bei Betrachtung der Änderungen des Auftretens dieser seltenen Ereignisse pro Jahr fallen die Ergebnisse äußerst gering und wenig anschaulich aus, da diese unter Umständen gar nicht jährlich in Erscheinung treten. Werden jedoch Ereignisse mit starkem Niederschlag innerhalb der eingangs beschriebenen



30-jährigen Zeiträume gezählt, zeigen sich Veränderungen im Vergleich zum Referenzzeitraum. Für die Kategorien  $N \geq 10$  mm/d und  $N \geq 20$  mm/d des Starkniederschlages wird bei allen regionalen Klimamodellen für alle Szenarien eine Zunahme der Ereignisse festgestellt, wobei zum Ende des Jahrhunderts die Zunahmen am größten sind (vgl. Abbildung 28, Abbildung 29, Tabelle 10 und Tabelle 11). Niederschlagsereignisse  $\geq 30$  mm/d treten generell sehr selten auf und in Hanau wurde von 1971 bis 1999 kein Niederschlagsereignis  $\geq 30$  mm/d registriert. Beim Szenario RCP 8.5 tritt die höchste Zunahme von Starkniederschlagsereignissen im Zeitraum von 2071 bis 2100 mit zusätzlich zwei Ereignissen in 30 Jahren auf. Dies würde eine Zunahme der Auftrittshäufigkeit auf „einmal pro 15 Jahre“ bedeuten.

Generell zeigt sich bei der Anzahl der Niederschlagstage im Jahr ein leichter Trend hin zur Abnahme der Tage (im Zeitraum 2071-2100 und RCP 8.5 um etwa 3 Tage). Bei wenig veränderten oder gar zunehmenden Jahresniederschlagssummen bedeutet dies, dass die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die Niederschlagsintensität jedoch zunimmt. Mit einfachen Worten: Es regnet seltener, aber wenn, dann stärker als im Referenzzeitraum.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, dass der von den Regionalmodellen abgebildete Niederschlag relativ großen Unsicherheiten unterliegt. Dies gilt umso mehr für die Extreme. Deshalb sollten die hier aufgeführten Auswertungen nur unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis interpretiert werden. Prinzipiell wird jedoch offensichtlich, dass die zunehmende Erwärmung mit einer Intensivierung des Niederschlagsgeschehens einhergeht. Zudem steigt die Wahrscheinlichkeit der Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen, in Abhängigkeit vom betrachteten Klimaszenario und Zukunftszeitraum, in einer allgemein wärmeren Atmosphäre. Denn grundlegend ist es so, dass in einer wärmeren Atmosphäre auch mehr Wasserdampf aufgenommen werden kann (pro °C ist 7 % mehr Wasserdampf aufnahmefähig), was wiederum zu intensiveren Niederschlagsereignissen führen kann.

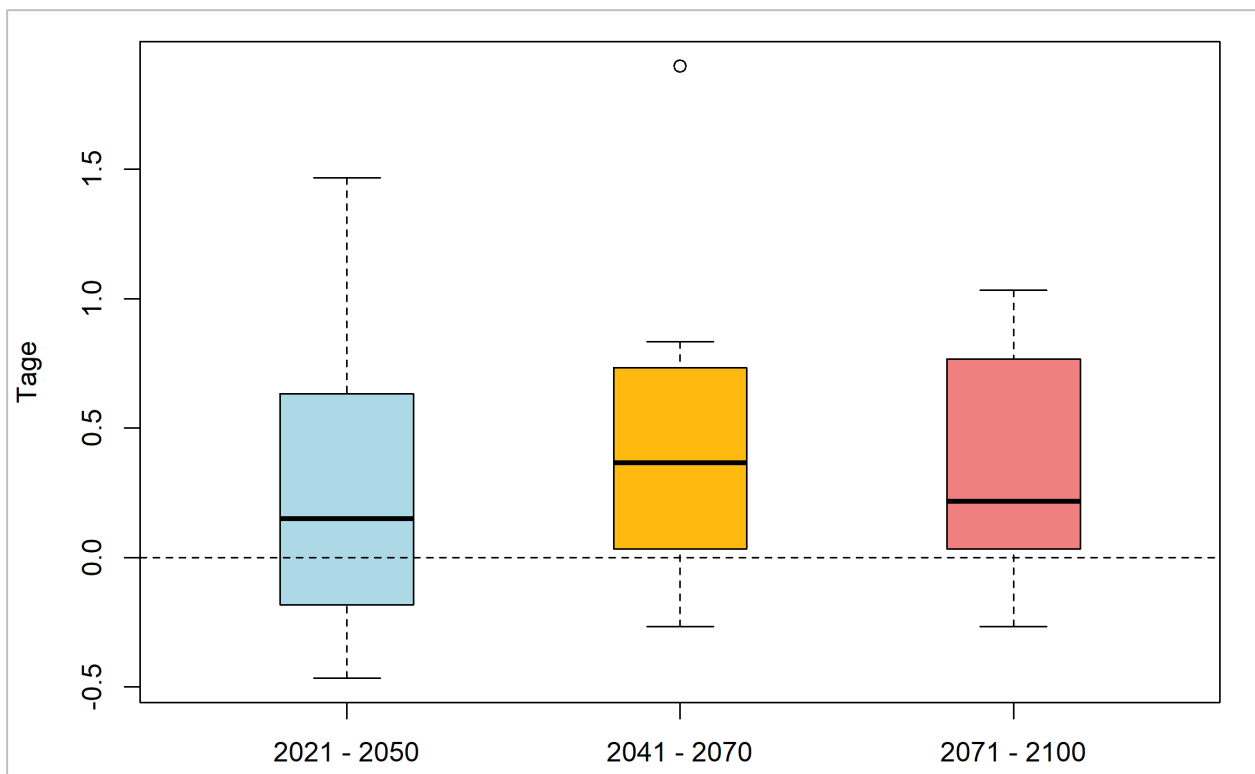


Abbildung 28: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit  $N \geq 30$  mm/d innerhalb des jeweiligen 30-jährigen Zeitraumes in Hanau, Szenario RCP 2.6.

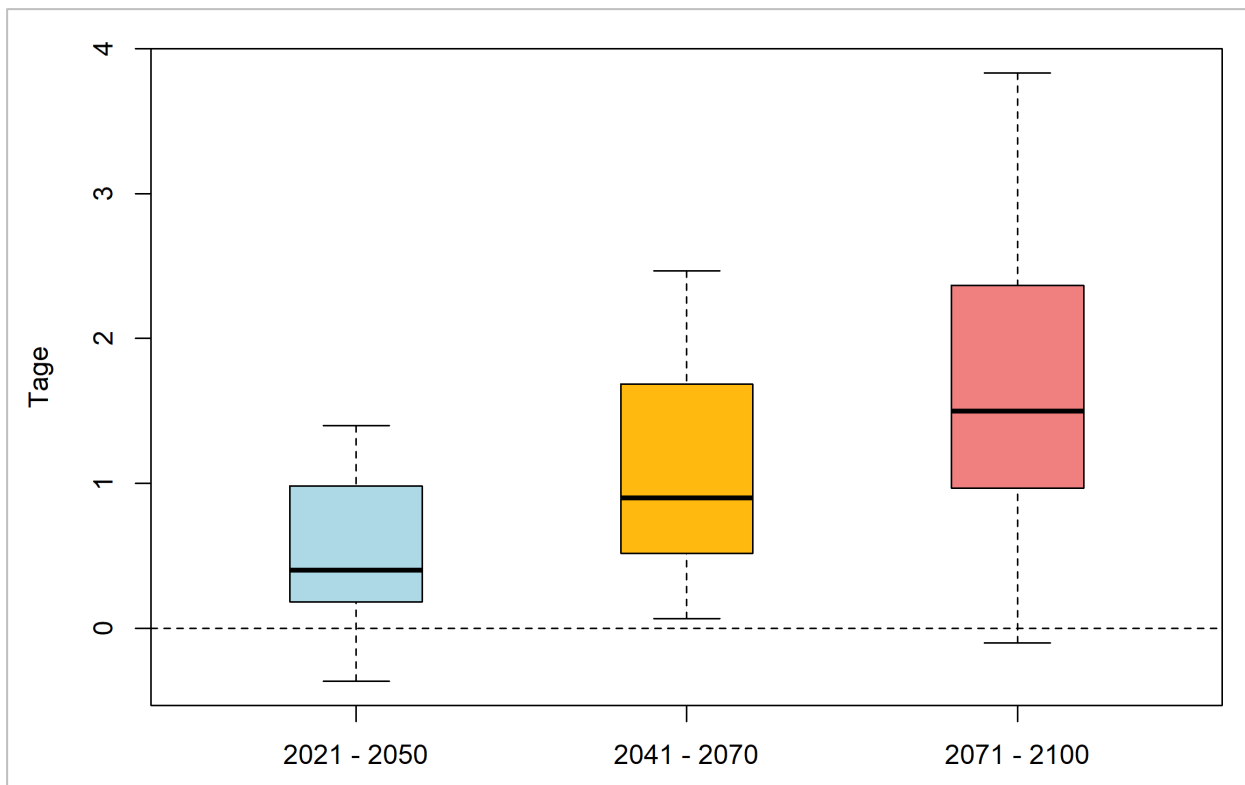


Abbildung 29: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit  $N \geq 30$  mm/d innerhalb des jeweiligen 30-jährigen Zeitraumes in Hanau, Szenario RCP 8.5.

Tabelle 10: Änderung der mittleren Auftrittshäufigkeit in Tagen von Starkniederschlagsereignissen innerhalb des jeweiligen 30-jährigen Zeitraums in Hanau, RCP 2.6.

	starker Niederschlag ( $N \geq 10$ mm/d)	stärkerer Niederschlag ( $N \geq 20$ mm/d)	Starkniederschlag ( $N \geq 30$ mm/d)
1971 - 2000	15	2	0
2024 - 2050	+1 (16)	+0 (2)	+0 (0)
2041 - 2070	+1 (16)	+0 (2)	+1 (1)
2071 - 2100	+1 (16)	+1 (3)	+1 (1)

Tabelle 11: Änderung der mittleren Auftrittshäufigkeit in Tagen von Starkniederschlagsereignissen innerhalb des jeweiligen 30-jährigen Zeitraums in Hanau, RCP 8.5

	starker Niederschlag ( $N \geq 10$ mm/d)	stärkerer Niederschlag ( $N \geq 20$ mm/d)	Starkniederschlag ( $N \geq 30$ mm/d)
1971 - 2000	15	2	0
2024 - 2050	+2 (17)	+1 (3)	+0 (0)
2041 - 2070	+3 (18)	+2 (4)	+1 (1)
2071 - 2100	+4 (19)	+3 (5)	+2 (2)



#### 4.4.4 WIND & STURM

Sturmereignisse besitzen, ebenso wie Starkniederschläge, ein sehr hohes Schadenspotenzial. Der DWD definiert Sturm folgendermaßen: „Bezeichnung für Wind von großer Heftigkeit, nach der Beaufort-Skala der Stärke 9 bis 11 (74 bis 117 km/h), die erheblichen Schäden und Zerstörungen anrichten kann“. Folgende Sturmklassen werden anhand ihrer Windstärke eingeteilt (DWD 2023a):

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

Auch Stürme gehören zu den vereinzelt auftretenden Ereignissen, sodass sie generell wie der Starkregen nur bedingt erfolgreich statistisch auswertbar sind. Hinzu kommt, dass regionale Klimamodelle teilweise nicht in der Lage sind Böen korrekt zu reproduzieren und daher Sturmereignisse oftmals nur unzureichend abbilden können. Es ist jedoch davon auszugehen, dass es in einer wärmeren Atmosphäre aufgrund von mehr verfügbarer latenter Wärme, die beim Phasenübergang von Wasserdampf zu Flüssigwasser frei wird, zu besseren Wachstumsbedingungen für starke Zyklonen kommen kann und somit zu potenziell stärkeren Stürmen (PINTO et al. 2009, FINK et al. 2012, PINTO UND RYERS 2017). Dies hätte eine Zunahme der Sturmaktivität über Westeuropa zur Folge (PINTO et al. 2009, DONAT et al. 2010, McDONALD 2011). In diesem Zusammenhang konnte bisher jedoch noch nicht eindeutig wissenschaftlich geklärt werden, ob die Häufigkeit der Sturmereignisse an sich zunimmt oder ob bei gleichbleibender Häufigkeit die Intensität steigt, also die Höhe der auftretenden Windgeschwindigkeiten (vgl. PINTO und RYERS 2017).

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

## 4.5 ZUSAMMENFASSUNG

### Gegenwärtiges Klima

Die Betrachtung des gegenwärtigen Klimas der Stadt Hanau zeigt, dass die langjährige Jahresmitteltemperatur mit 10,4 °C (1981 – 2010) 1,5 °C über dem deutschlandweiten Mittel liegt. Den Niederschlag betreffend liegt die jährliche Summe ca. 130 mm unter dem deutschen Durchschnitt. Es wird deutlich, dass der globale und nationale Trend hin zu trockeneren und heißeren Bedingungen auch für die Stadt Hanau aus der Analyse der meteorologischen Daten hervorgeht.

### Zukünftiges Klima

Die Analysen zum zukünftigen Klima in Hanau zeigen für die Jahresmitteltemperaturen einen deutlichen Anstieg bis zum Ende des Jahrhunderts, wobei die Temperaturen im Winter stärker zunehmen als im Sommer. Deutlich zunehmen wird die Anzahl an Sommertagen, heißen Tagen und Tropennächten während Frost- und Eistage weniger häufig auftreten. Weiterhin wird die Länge von Hitzeperioden sowie die Anzahl von Hitzewellen zunehmen.





Die jährlichen Niederschlagsmengen nehmen leicht zu. Im Jahresgang treten geringere Niederschlagsmengen im Sommer und höhere Niederschlagsmengen im Winter und Frühjahr auf. Aufgrund der Erwärmung kommt es zu zunehmenden Verdunstungsraten, die vornehmlich in den Sommermonaten zu einer Abnahme der klimatischen Wasserbilanz und somit zu einem Rückgang des natürlichen Wasserdargebots im Sommer führt. Es muss in den Sommermonaten zunehmend mit erhöhter Trockenheit gerechnet werden. Besonders betroffen dürften dabei Gebiete sein, die bereits heute schon Trockenheitstendenzen (bspw. Ostdeutschland) aufweisen.

Die regionalen Klimamodelle projizieren für die nahe, mittlere und ferne Zukunft in Hanau eine zunehmende Auftrittshäufigkeit von Starkregenereignissen, wobei sie nach wie vor vereinzelt auftretende Ereignisse bleiben werden, die auch nicht die gesamte Stadt Hanau auf einmal betreffen müssen, da es nur sehr lokale Ereignisse sind. Bei einer gleichzeitigen Abnahme von Tagen mit Niederschlag bedeutet dies, dass bei wenig veränderten oder gar zunehmenden Jahresniederschlagssummen die Häufigkeit von Tagen mit Niederschlag im Mittel abnimmt, die Niederschlagsintensität jedoch zunimmt. Als Beispiel ist hier der Durchzug von Tief Lambert vom 22. auf den 23. Juni 2023 zu nennen. Das Tief brachte mit Durchzug seiner Kaltfront örtlich Gewitter und zudem eine Niederschlagsmenge innerhalb von etwa einem halben Tag mit sich, die lokal über dem deutschlandweiten Mittel der zu erwartenden Niederschläge des Monats Juni von 85 l/m<sup>2</sup> lagen.

Stürme können von den regionalen Klimamodellen für kleinräumige Analysen nicht ausreichend abgebildet werden und sind aufgrund ihres seltenen Auftretens nur unzureichend statistisch auswertbar. Eine durch die zunehmende Erwärmung aufgeheizte Atmosphäre deutet jedoch darauf hin, dass es in Zukunft zu besseren Wachstumsbedingungen für starke Zyklonen kommen kann und somit zu potenziell stärkeren Stürmen. Dies hätte eine Zunahme der Sturmaktivität über Westeuropa zur Folge. Stürme beinhalten ein äußerst hohes Schadenspotenzial und sollten, auch wenn eine Zunahme der Ereignisse auf Basis der EURO-CORDEX Modellsimulationen nicht nachweisbar ist, bei Klimaanpassungsmaßnahmen angesichts des Ausmaßes der jüngsten Ereignisse mit in Betracht gezogen werden (z.B. Sturmtiefs „Ylenia“, „Xandra“, „Zeynep“ und „Antonia“ zwischen dem 17. und 21. Februar 2022). In Tabelle 12 sind die wichtigsten Ergebnisse zum erwarteten Klimawandel in Hanau noch einmal überblicksartig und zusammenfassend aufgeführt. Tabelle 13 stellt für den interessierten Leser alle im Kapitel betrachteten Änderungssignale der Kenngrößen unter dem Klimawandel für alle Zeitschnitte und Zukunftsszenarien zusammen.



Tabelle 12: Erwartete Klimaänderungen für Hanau als allgemeingültige Tendenzen, die sich in allen Klimawandelszenarien ablesen lassen





Erwartete Klimaveränderungen	
 <b>Temperaturzunahme und Hitze</b>	↑ Zunahme der <b>Jahresmitteltemperaturen</b>
	↑ Anstieg der <b>Jahresmitteltemperaturen</b> um 1,1 K (2024-2050) bis 3,9 K (2071-2100)
	↑ Mehr <b>Sommertage, Heiße Tage und Tropennächte</b>
	↑ Anstieg der Anzahl der <b>Heißen Tage</b> pro Jahr von 7 auf 13 in der nahen (2024-2050) bis 36 in der fernen Zukunft (2071-2100)
	↑ Anstieg der Anzahl der <b>Tropennächte</b> pro Jahr von 0 auf 2 (2024-2050) bis zu 22 in der fernen Zukunft (2071-2100)
	↑ Häufigere und länger andauernde <b>Hitzeperioden</b> mit einer Dauer von bis zu 15 Tagen
	↓ Abnahme von <b>Frost- und Eistagen</b>
	↓ Rückgang der Anzahl der <b>Eistage</b> pro Jahr von 10 auf 5 (2024-2050) bis 0 (2071-2100)
 <b>Niederschlagsverschiebung und Trockenheit</b>	↑ Zunahme des <b>Jahresniederschlages</b> um bis zu 11 %
	↑ Trockenere <b>Sommer</b> , feuchtere <b>Winter</b>
	↑ Längere <b>Trockenperioden</b> im Sommer
	↓ Abnahme der <b>Klimatischen Wasserbilanz</b> im Sommer
 <b>Starkregen</b>	↑ Zunahme des Anteils von <b>Starkniederschlägen</b> am Gesamtniederschlag
	↑ Zunahme der <b>Niederschlagsintensität</b> (Zunahme der Tage mit Niederschlag $\geq 20$ mm/d von ca. 2 auf 3 (2024-2050) bis 6 Tagen pro Jahr in der fernen Zukunft (2071 – 2100))
 <b>Wind und Sturm</b>	→ Änderungen durch den Klimawandel sind nicht sicher durch die verschiedenen Klimamodellierungen nachweisbar, eine Tendenz zur Zunahme der <b>Sturmintensität</b> ist jedoch erkennbar
	↑ Selbst wenn die <b>Auftrittshäufigkeit von Stürmen</b> sich nicht ändert, wird es auch zukünftig starke bis extreme <b>Sturmereignisse</b> geben



Tabelle 13: Gesamthafte Darstellung der Änderungssignale in den jeweiligen Szenarien und Zeithorizonten gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000. Dargestellt ist dabei die Spannweite der Gesamtheit der Simulationen anhand der Perzentile der Verteilung mit dem 15. (P15), dem 50. (P50) und dem 85. Perzentil (P85)

Szenario	Projizierte Klimaänderung	2024 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
RCP 8.5	Jahresmitteltemperatur [°C]	0,9	1,5	2	1,8	2,5	3	3	3,9	4,8
	Sommertage (Tage/Jahr)	11,2	14,4	18,9	21	27,5	36,8	41,6	47,1	62,4
	Heiße Tage (Tage/Jahr)	5,2	6,2	13,5	10,3	13,7	21,1	20,8	28,9	40,5
	Tropennächte (Tage/Jahr)	2	3	4	5,4	8,1	9,6	13,5	21,6	24,1
	Frosttage (Tage/Jahr)	-29,4	-23,5	-15,7	-39,1	-35,6	-28,5	-55,4	-51	-49,5
	Eistage (Tage/Jahr)	-7,2	-6,5	-2,5	-9,9	-8,8	-4,9	-11,6	-11	-10,3
	Maximale Dauer von Hitzeperioden (Tage)	1,1	1,5	4	2,4	3,3	4,6	4,4	7,6	9,6
	Starker Niederschlag (Tage/Jahr)	0,6	1,9	3,4	1,4	2,9	5,2	2,3	4,4	8,4
	Stärkerer Niederschlag (Tage/Jahr)	0,3	1,4	2,2	0,9	1,9	2,8	1,6	2,9	4,4
	Starkniederschlag (Tage/Jahr)	0	0,4	1,2	0,2	0,9	2,2	0,8	1,5	2,9
RCP 4.5	Jahresmitteltemperatur [°C]	0,8	1,3	1,6	1	1,6	2,3	1,5	2,1	2,7
	Sommertage (Tage/Jahr)	8	13,1	17,4	10,8	20,9	30,5	17,3	21,8	28,4
	Heiße Tage (Tage/Jahr)	3,8	6,4	9	6,6	9,7	14	8,6	11,3	15,1
	Tropennächte (Tage/Jahr)	1,5	2,5	3,5	3,5	4	5,8	4,2	6	8
	Frosttage (Tage/Jahr)	-27,6	-20	-15,2	-36,4	-27,1	-16,1	-39,5	-35,5	-26,3



Sze- nario	Projizierte Klimaänderung	2024 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P15	P50	P85	P15	P50	P85	P15	P50	P85
RCP 8.5	Eistage (Tage/Jahr)	-7,8	-5,5	-1,8	-9,8	-6,9	-2,6	-10	-7,5	-6,5
	Maximale Dauer von Hitzeperio- den (Tage)	0,8	1,8	2,9	1,7	2,6	3,1	2,5	3,5	5
	Starker Nieder- schlag (Tage/Jahr)	0	1	4,3	0,7	2,4	4,8	1,5	2,3	5,1
	Stärkerer Nieder- schlag (Tage/Jahr)	0,1	1	2,5	0,4	1,1	2,3	0	1,9	2,8
	Starkniederschlag (Tage/Jahr)	0	0,5	1,4	0	0,6	1,3	0,1	0,8	1,6
RCP 2.6	Jahresmitteltem- peratur [°C]	0,8	1	1,6	0,9	1,2	1,6	0,9	1,1	1,7
	Sommertage (Tage/Jahr)	8,7	12,7	19,6	10,6	12,9	21,2	9,1	12,7	18,9
	Heiße Tage (Tage/Jahr)	3,2	5	10,7	3,7	5,3	10,5	4,3	6,1	10,9
	Tropennächte (Tage/Jahr)	1,1	2	4,7	0,8	2	3,8	2,1	2,5	4,7
	Frosttage (Tage/Jahr)	-22,7	-15,4	-12,5	-22,1	-20,7	-13,5	-22,1	-16,3	-13,1
	Eistage (Tage/Jahr)	-5,8	-4,8	-3,5	-6	-4,6	-3,8	-7,5	-5,2	-4
	Maximale Dauer von Hitzeperio- den (Tage)	0,9	1,2	3,5	0,7	1,4	3,1	1,1	1,9	3,6
	Starker Nieder- schlag (Tage/Jahr)	0	1,1	2,8	0	0,2	1,8	0	1,1	1,7
	Stärkerer Nieder- schlag (Tage/Jahr)	0	0,3	1,5	0	0,4	1,7	0	0,8	1,6
	Starkniederschlag (Tage/Jahr)	0	0,1	1	0	0,4	0,8	0	0,2	0,9



# 5. Analysemethoden

## 5.1 MESSKAMPAGNE

Im Rahmen der Stadtklimaanalyse Hanau wurde zusätzlich zur Modellierung mit FITNAH 3D eine umfassende Messkampagne beauftragt. Analog zu den modellgestützten Untersuchungen sollten insbesondere die temporären Messungen möglichst zu hochsommerlichen Belastungssituationen durchgeführt werden, um eine Aussage zur nächtlichen Kaltluftproduktion und zu nachts besonders belasteten Quartieren treffen zu können. Hierfür fanden in einer Nacht im Sommer 2022 mobile Messfahrten statt. Zusätzlich wurden im Vorfeld an vier teils städtisch und teils ländlich geprägten Standorten im Stadtgebiet stationäre Klimamessstationen installiert. Das Ziel dieser Langzeitmessungen war es, die Hauptwindrichtungen zu autochthonen und nicht-autochthonen Wetterlagen zu ermitteln und Klimakenntagstatistiken des Sommers 2022 anzufertigen. Gleichzeitig ermöglichen die Langzeitmessung die Einbettung der temporären Messfahrten in einen meteorologischen Rahmen. Der durch sämtliche Messdaten gefütterte Datenpool kann darüber hinaus zur Validierung der Modellsimulationen herangezogen werden. Tabelle 14 zeigt eine genaue Aufstellung der Standorte, Messzeiträume und Instrumentierungen aller im Untersuchungsgebiet durchgeführten Messkampagnen. Die tiefergehende Darstellung der Standorte, Messgeräte und Methodiken erfolgt in den Kapiteln 5.1.1.1 (Langzeitmessung) und 5.1.1.2 (Messfahrten); jene der Ergebnisse aller Messkampagnen in Kapitel 6.1.

Tabelle 14: Standorte, Messzeiträume und Instrumentierung während der im Sommer 2022 im Rahmen der Klimaanalyse Hanau durchgeführten meteorologischen Messkampagne (rH = relative Feuchte, T = Temperatur, WS = Windgeschwindigkeit, WD = Windrichtung)

Untersuchung	Standort (Koordinaten)	Auswertzeit- raum	Uhr- zeit MESZ	Höhe über Grund	Mess- größen	Auflösung der Messung
Urbane Messstation	Altenhilfezentrum Bernhard Eberhard (50.131395 °N, 8.923835 °O)	01.06.2022- 31.08.2022	-	2 m, 10 m 10 m	T, rH WS, WD	1 s intern auf 10 min aggregiert
Rurale Messstation	Grüngutannahme Klein- Auheim (Kompostieran- lage) (50.092201 °N, 8.906919 °O)	01.06.2022- 31.08.2022	-	2 m, 10 m 10 m	T, rH WS, WD	1 s intern auf 10 min aggregiert
Station Innerstädti- sche Ausgleichsflä- che	Heinrich-Fischer-Bad (50.141007 °N, 8.915643 °O)	01.06.2022- 31.08.2022	-	2 m, 10 m 10 m	T, rH WS, WD	1 s intern auf 10 min aggregiert
Station Mainnähe	Wiesenfläche Flurstück 191 (Hr. Weber) (50.104774 °N, 8.936257 °O)	01.06.2022- 31.08.2022	-	2 m, 10 m 10 m	T, rH WS, WD	1 s intern auf 10 min aggregiert
Messfahrt 1. Nachthälfte	-	19./20.07.2022	22:00 – 00:12	1,5 m	T	1s (ca. 8 m)
Messfahrt 2. Nachthälfte	-	19./20.07.2022	02:52 – 04:57	1,5 m	T	1s (ca. 8 m)

### 5.1.1 STATIONSBASIERTE MESSUNG: LANGZEITMESSKAMPAGNE (01.06. – 31.08.2022)

#### 5.1.1.1 STANDORTE DER LANGZEITMESSKAMPAGNE

Für die Langzeitmesskampagne vom 01.06.-31.08.2022 wurden ein urbaner und ein ruraler Standort gewählt, um den Unterschied zwischen Stadt und Umland klimatologisch zu vermessen. Ferner kam es zur Installation einer weiteren Station auf einer innerstädtischen Ausgleichsfläche zur Ermittlung des lokalen Einflusses von blau-grünen Strukturen im urbanen Raum. Eine vierte Station wurde auf einer Wiesenfläche in Mainnähe aufgestellt, um den Einfluss des prägnanten Fließgewässers auf die Umgebung abschätzen zu können. Alle Stationen befinden sich auf einem sehr ähnlichen Höhenniveau zwischen 103 m ü. NHN (Standort in Mainnähe) und 106 m ü. NHN (Urbane Station), wodurch deren Messwerte sehr gut miteinander zu vergleichen sind (Standorte „rural“ und „innerstädtische Ausgleichsfläche auf 104 m ü. NHN).

Der urbane Standort befand sich im Innenhof des in der Innenstadt gelegenen Altenhilfezentrums Bernhard Eberhard, ca. 100 m nördlich des Kurt-Blaum-Platzes und südöstlich der Hanauer Altstadt (Abbildung 30). Der Untergrund rund um die Station bestand aus einer gemähten Rasenfläche oberhalb einer Tiefgarage. In unmittelbarer Umgebung grenzten im Süden eine Baumreihe sowie nachfolgend die Röderstraße mit mehrgeschossigen Bauwerken an. In den übrigen Himmelsrichtungen umgaben die Station die ebenfalls mehrgeschossigen Gebäude der genannten Pflegeeinrichtung und versiegelte Geh- und Zufahrtswege. Trotz der urbanen Lage der Messstation konnte über den Großteil des Tages ein weitgehend unverschatteter Messaufbau realisiert werden.

Die rurale Klimamessstation wurde am südwestlichen Rand Hanaus inmitten der Grüngutannahme Klein-Auheim (Kompostieranlage) installiert (Abbildung 31). Ähnlich wie an der urbanen Station war der Erdboden von einer Wiese überwachsen, jedoch ungemäht mit Wuchshöhen von teils über 50 cm. Auch zeigte sich die Umgebung insgesamt deutlich rauhgkeitsärmer. Die das Areal umgebene Baumreihe, das westlich angrenzende Wäldchen und die ca. 10 m hohen, aber durchströmbaren Überdachungen der Kompostieranlage sind die einzigen höheren Hindernisse in unmittelbarer Umgebung. Im Westen schließen sich an die Anlage die Bundesstraße 43A und weitere Waldareale an, während unmittelbar südlich der an das Grundstück angrenzenden Fasaneriestraße Wiesenflächen und der Tistrasee folgen. Gen Nordwesten, in Richtung Klein-Auheim, erstrecken sich über eine Länge von knapp einen Kilometer eine Vielzahl strukturarmer Agrarflächen.

Als innerstädtische Ausgleichsfläche fiel die Wahl auf das Heinrich-Fischer-Bad in der nördlichen Hanauer Innenstadt, auf dessen Liegewiese eine temporäre Klimamessstation errichtet wurde (Abbildung 32). Die Station befand sich nordwestlich der Schwimmbecken sowie der Funktionsgebäude des Freibades. Nördlich des Messstandorts lag die Kinzig mit von Bäumen umsäumten Uferbereichen. Insgesamt zeigt sich auch das Areal des Schwimmbades mit einer Vielzahl von Einzelbäumen bestanden – lediglich die Liegewiese rund um die Klimamessstation ist rauhgkeitsarm und erfährt zu den meisten Tagesstunden direkte Sonneneinstrahlung.

Inmitten der Ackerflächen nördlich des Siedlungsbereiches von Klein-Auheim wurde auf dem Flurstück 191 die vierte Klimamessstation in Mainnähe installiert (Abbildung 33). Das Flurstück hat zum Zeitpunkt der Messung die Funktion einer Koppel inne und zeichnet sich wie alle anderen Standorte durch einen mit Rasen bewachsenen Erdboden als Untergrund aus. Durch die sehr geringe Rauigkeit im nahen Umfeld ist der Messstandort dem ruralen Standort an der Kompostieranlage sehr ähnlich, unterscheidet sich aber durch die geringe, ca. 130 m umfassende Entfernung vom nördlich gelegenen Mainufer. Zwischen Station und Main liegen gen Norden, aber auch in Richtung Westen einige Alleebäume der Straße „Am Alemannia



Sportplatz“. Das Sportgelände mit Funktionsgebäuden und dem Rasenplatz des FC Alemannia Klein-Auheim 1916 e.V. folgt dem Messtandort gen Osten und ist von einer einzelnen Baumreihe umschlossen.





Abbildung 30: Urbaner Standort der Langzeitmessung am Altenhilfezentrum Bernhard Eberhard in Hanau mit Blickrichtung Ost-Nordost (oben) und als Google Earth-Draufsicht aus 500 m Höhe; pinker Pin markiert den Standort (unten).





Abbildung 31: Ruraler Standort der Langzeitmessung auf der Wiesenfläche der Grüngutannahme Klein-Auheim im Südwesten Hanaus mit Blickrichtung Nordwest (links) und als Google Earth-Draufsicht aus 500 m Höhe; grüner Pin markiert den Standort (rechts).





Abbildung 32: Standort „Innerstädtische Ausgleichsfläche“ der Langzeitmessung auf dem Gelände des Heinrich-Fischer-Bads in Hanau mit Blickrichtung Südwest (links) und als Google Earth-Draufsicht aus 500 m Höhe; türkiser Pin markiert den Standort (rechts).





Abbildung 33: Standort in Mainnähe der Langzeitmessung auf der Wiesenfläche des Flurstücks 191 mit Blickrichtung Nordost (links) und als Google Earth-Draufsicht aus 500 m Höhe; blauer Pin markiert den Standort (rechts).



### 5.1.1.2 MESSGERÄTE UND METHODIK DER LANGZEITMESSKAMPAGNE

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

Nach der Installation der vier Stationen am 11.05.2022 (Mainnähe), 12.05.2022 (rural), 18.05.2022 (urban) und 19.05.2022 (innerstädtische Ausgleichsfläche) standen jeweils umgehend Messdaten zur Verfügung. Die Demontage erfolgte aus logistischen Gründen erst am 28./29.11.2022. Da vorrangig hitzestressbedingte Belastungssituationen von Interesse waren und eine Vergleichbarkeit zur Modellierung hergestellt werden sollte, wurde der Untersuchungszeitraum der sommerlichen Langzeitmessung auf die Zeitspanne des meteorologischen Sommers vom 01.06.2022 bis 31.08.2022 festgelegt.

### 5.1.1.3 REGIONALE KLIMATOLOGIE DES MESSZEITRAUMES

Der Juni 2022 war in Hessen nach anfänglich kühlen Temperaturen im Vergleich zur langjährigen Klimareferenzperiode von 1961 bis 1990 deutlich zu warm, zu trocken und zu sonnig. So übertraf die mittlere Temperatur des Monats jene der Referenzperiode um 3,3 K (18,5 °C gegenüber 15,2 °C); die Sonnenscheindauern waren mit 285 Stunden gegenüber den 192 Stunden der langjährigen Referenz ebenfalls überdurchschnittlich hoch (DWD 2022A). Bzgl. der Niederschlagsmengen zeigte sich der Juni 2022 mit rund 45 l/m<sup>2</sup> im Vergleich zu o.g. Klimareferenzperiode viel trockener (80 l/m<sup>2</sup>), wobei große Niederschlagsarmut eher in der ersten Monatshälfte vorherrschte, wohingegen sich die zweite eher zu feucht darstellte.

Den gegenüber dem klimatologischen Mittel mit 19,5 °C um ca. 2,6 K wärmeren Juli 2022 dominierte in Hessen extreme Trockenheit, die den viertrockensten Juli seit Beginn der Datenaufzeichnung im Jahr 1881 bedeuteten und zu mehreren Feld- und teils größeren Waldbränden führte (DWD 2022B). Auch die gegen Ende des Monats aufkommende erhöhte Gewitterneigung ließ die Monatsniederschlagssumme nur geringfügig auf 25 l/m<sup>2</sup> ansteigen – 48 l/m<sup>2</sup> weniger als im langjährigen Mittel (73 l/m<sup>2</sup>). Zudem wurde mit 275 Sonnenstunden (klimatologisches Mittel: 204 h) im Bundesland die klimatologische Referenz klar überboten. Der heißeste Tag des Jahres wurde bei Höchstwerten zwischen 37-39 °C am 20.07. registriert.

Im August 2022 setzte sich die durchweg sommerlich warme bis heiße Witterung der Vormonate fort. Bei einer Monatsmitteltemperatur von 21 °C wurde nicht nur die Klimareferenz um fast 5 K überboten (16,4 °C), sondern auch die größte Zahl an Sommertagen seit Messbeginn erfasst. Mit knapp 15 l/m<sup>2</sup> stellte Hessen das trockenste Bundesland dar (Klimareferenz: 70 l/m<sup>2</sup>) bei einer weit überdurchschnittlichen Zahl an Sonnenstunden (300 im Vergleich zu 190 der Klimareferenzperiode von 1961-1990).



## 5.1.2 PROFILMESSFAHRT: INTENSIVMESSKAMPAGNE: MESSFAHRTEN (19./20.07.2022)

### 5.1.2.1 BEFAHRENE ROUTE

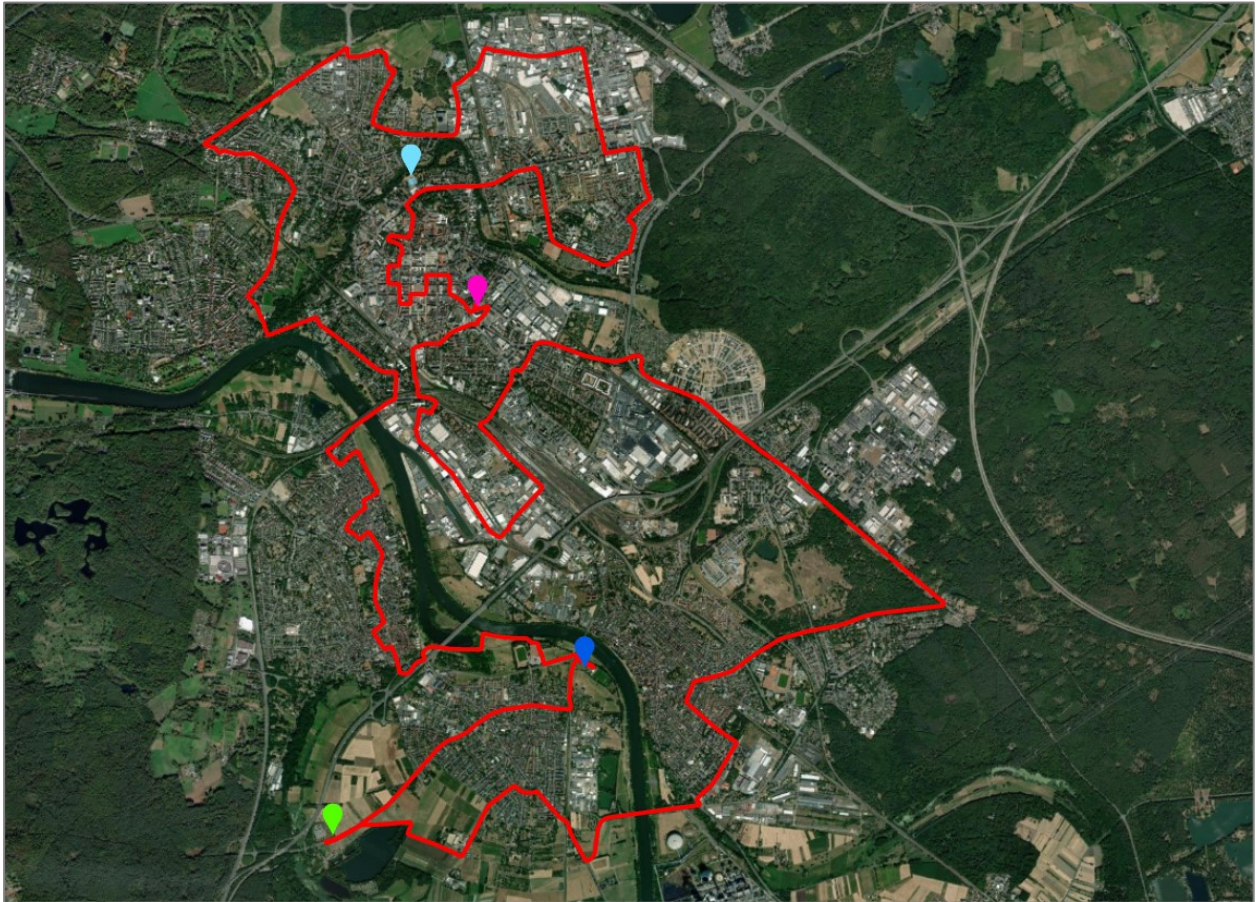


Abbildung 34: Mobile Messroute im Stadtgebiet Hanau (rote Linie) sowie die vier Messstation im Stadtgebiet Hanau (urban – pinker Pin, rural – grüner Pin, Innerstädtische Ausgleichsfläche – hellblauer Pin und Mainnähe – dunkelblauer Pin) Luftbild: HLBG, Maxar, Microsoft, 2023.

Bei der Planung der mobilen Messroute stand die Befahrung möglichst aller relevanten Stadtstrukturtypen Hanaus im Fokus. Hierfür wurde eine insgesamt 41,2 km umfassende Messstrecke entwickelt, die an der urbanen Messstation am Altenhilfezentrum Bernhard Eberhard begann und endete (Abbildung 34) und entgegen dem Uhrzeigersinn befahren wurde. Bei der Konzeption der Messroute wurde zwar darauf geachtet, möglichst alle Stadtteile Hanau zu befahren, eine Messroute von weit über 40 km Länge hätte allerdings zu Ungenauigkeiten bei der Korrektur des Tagesgangs geführt. Aus diesem Grund konnte etwa Mittelbuchen nicht befahren werden, welches ähnliche Stadtstrukturtypen wie beispielsweise Klein-Auheim und Umgebung aufzeigt.

Befahrene Stadtstrukturtypen, die vornehmlich den urbanen Raum beschreiben, sind die hohe Zentrumsbebauung im Bereich des Kurt-Blaum-Platzes, die dicht bebaute und hochversiegelte Innenstadt mit dem Marktplatz und ihrer Blockrandbebauung, aber auch Industrie- und Gewerbeflächen wie z.B. das Industriegebiet Nord in Lamboy oder der Hafenbereich. Deutlich entsiegelter, teils begrünter aber noch immer vielgeschossig bebaut ist der Stadtstrukturtyp der Zeilenbebauung, der beispielweise an der August-Schärttner-Straße in Lamboy zu finden ist. Der Großteil des Hanauer Siedlungsbereiches wird durch den Flächentypen „Einzel- und Reihenhausbebauung“ beschrieben, der zentrumsfern in nahezu allen Stadtteilen wie

Klein- und Groß-Auheim, Kesselstadt, Steinheim oder Hanau Nordwest zu finden ist. Befahren wurden darüber hinaus innerstädtische Grün- und Ausgleichsflächen wie der Kleingartenverein Bulau, der Kleingartenverein Alte May oder der Schlossgarten. Zusätzlich führte die Messfahrt entlang des Waldareals an der Neuwirtshäuser Straße. Auch der Mainbereich wurde durch zwei Flussquerungen an der Steinheimer Mainbrücke und der Limesbrücke sowie anhand eines längeren Streckenabschnitts nördlich des Klein-Auheimer Siedlungsbereiches in Mainnähe abgedeckt. Bei der Planung der Messroute wurde darauf geachtet, dass die Strecke an allen vier temporären Klimamessstationen vorbeiführt.

### 5.1.2.2 MESSGERÄTE UND METHODIK DER MESSFAHRTEN

Zur Einordnung klimatologischer Prozesse wie die nächtliche Überwärmung der Stadt gegenüber dem Umland bzw. ruraler Phänomene wie der Entstehung von Kaltluft auf den Grün- und Freiflächen wurden die Messfahrten in der Nacht vom 19. zum 20.07.2022 zu möglichst stabilen atmosphärischen Bedingungen im Sommer angesetzt. Als Messfahrzeug wurde ein Subaru Forester verwendet, der mittels spezieller Halterung am Radkasten in einer seitlichen Entfernung von ca. 50 cm vom Fahrzeug als Träger für ein PT100 Widerstandsthermometer auf ca. 1,5 m Höhe ü. Gr. fungierte (Abbildung 35).



Abbildung 35: Anbringung des Temperatursensors für die Messfahrt am PKW (links), Höhe über Grund (Mitte) und seitlicher Abstand vom Fahrzeug (rechts).

Das PT100 eignet sich durch seine hohe Ansprechgeschwindigkeit sehr gut für mobile Messungen und zeichnet bei einer Frequenz von 1 s und einer Fahrtgeschwindigkeit von ca. 25 und 30 km/h etwa alle 7-8 m einen Temperaturmesswert auf. Um den zeitlichen Verlauf der Temperaturentwicklung im Stadtgebiet aufzeichnen zu können, wurden insgesamt zwei Messfahrten durchgeführt – von 22:00 Uhr bis 00:12 Uhr Ortszeit in der ersten Nachthälfte und von 02:52 Uhr bis 04:57 Uhr Ortszeit in der zweiten Nachthälfte.

Start- und Endpunkt der Messroute war das Altenhilfezentrum Bernhard Eberhard nördlich des Kurt-Blaum-Platzes. An diesem Ort befand sich die urbane Messstation, deren Messwerte dazu verwendet wurden den Tagesgang nach dem Stand der Technik aus jedem einzelnen Messpunkt der Route herauszurechnen und die Werte dadurch untereinander vergleichbar zu machen. Um darüber hinaus den Vergleich mit dem flächenhaften Temperaturfeld der Modellrechnung zu ermöglichen, erfolgte mithilfe der urbanen Klimamessstation eine Interpolation aller Temperaturwerte der Befahrung von der zweiten Nachthälfte auf den Standardmodellausgabezeitpunkt von 04:00 Uhr sowie auf 23:00 Uhr als Vergleichswert für die erste Nach-





hälfte. Dieses Vorgehen stellt ein Standardverfahren dar, bei welchem die tagesgangbedingten Temperatur-Differenzen der urbanen Referenzstation zwischen den beiden o.g. diskreten Zeitpunkten und allen Zeiten der Messfahrt gebildet wurden. Durch Addition dieser Differenzen auf jedem Messpunkt der Temperaturmessfahrt konnten im Anschluss auch alle Zeiten der Messfahrten auf die benannten Zeitpunkte der Modellkarten approximiert werden.

Da sich die Wetterbedingungen am Messtag deutlich heißer darstellten als in der mittleren sommerlichen Wetterlage des Modells angenommen, wurde zudem eine Angleichung der Messwerte an das Modell vorgenommen, um Modell- und Messwerte in gemeinsamen Karten darstellen zu können. Hierfür wurde der Mittelwert aller Messwerte gebildet und vom Modellmittelwert subtrahiert. Die Berechnung des letztgenannten erfolgte jedoch nicht aus den Temperaturwerten des gesamten Rasters, sondern nur aus denjenigen, die nicht mehr als 15 m rechts- und linksseitig von der Messroute entfernt lagen. Durch diese insgesamt 30 m breite Pufferzone (Abbildung 36) wurde erreicht, dass von der Messroute entlegene Temperaturwerte für die Modellmittelwertbildung ausgespart und ausschließlich nahezu identische Räume von Modell und Messung für die statistische Anpassung einbezogen wurden. Für die erste Nachthälfte erfolgte so eine Absenkung der gemessenen Werte um 6,04 K, für die zweite Nachthälfte wurden die Temperaturmesswerte um 1,65 K verringert.

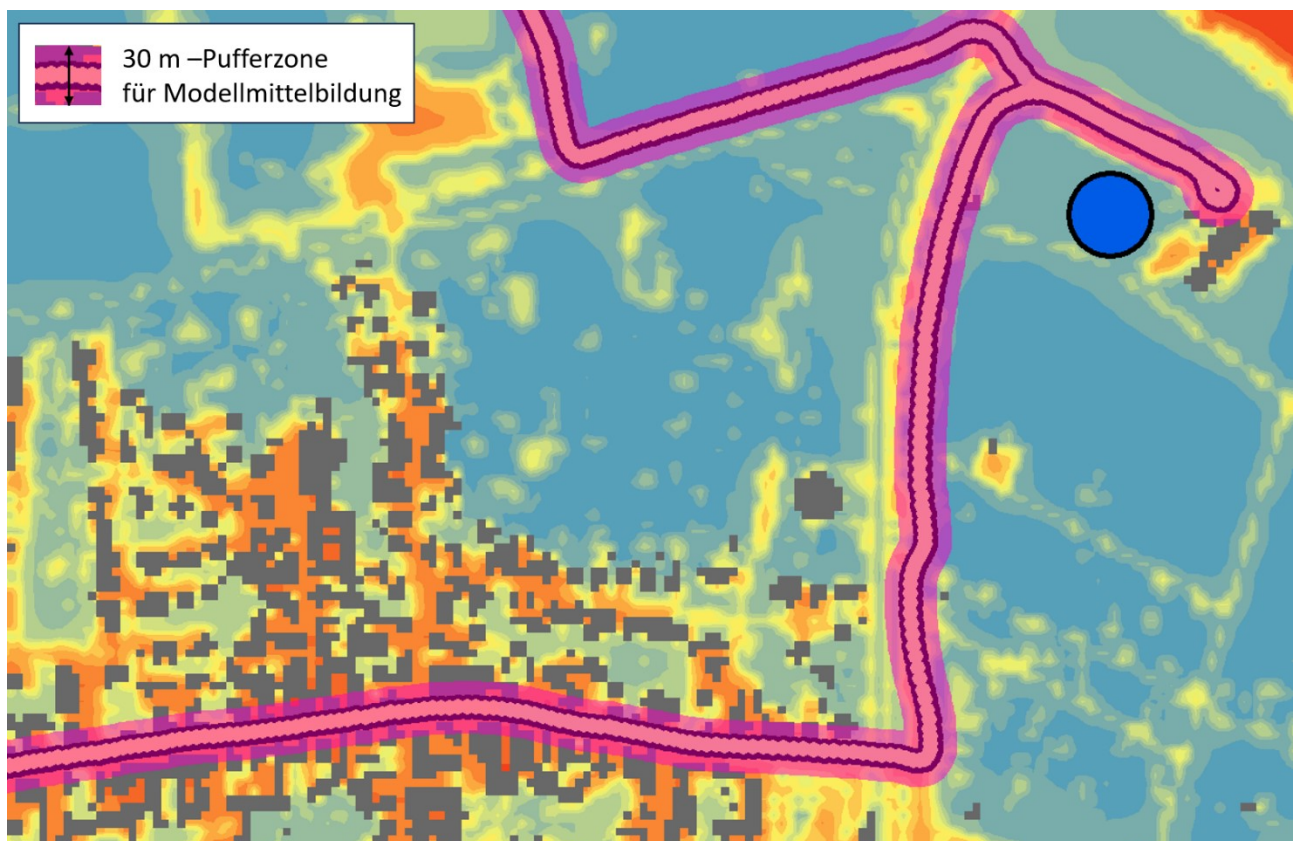


Abbildung 36: Symbolbild zur Erläuterung der 30 m-Pufferzone rund um die Messroute zur Modellmittelwertbildung. Der blaue Punkt im Ausschnitt markiert die Klimamessstation in Mainnähe.



### 5.1.2.3 WETTERSITUATION AM TAG DER MESSFAHRTEN (19./20.07.2022)

Das Phänomen der urbanen Wärmeinsel (UHI<sup>4</sup>), das den Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland beschreibt, bildet sich am zuverlässigsten zu sommerlichen, windschwachen Strahlungswetterlagen – den sogenannten autochthonen Wetterlagen – aus. Zu diesen Zeiten ist der überlagernde Wind in einem Untersuchungsraum nahezu Null und Belüftungseffekte bilden sich fast ausschließlich aus dem Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland heraus. Diese besondere Wetterlage ist ebenfalls Grundlage der Modellrechnung, daher bietet sich beim Vorhaben eines Vergleichs zwischen Modell und Messung die Durchführung der mobilen Messkampagne zu einer solchen Wettersituation an.

Aufgrund der Vorhersage autochthoner Messbedingungen wurden die Messfahrten am 19./20.07.2022 durchgeführt. Tagsüber heizten sich die Temperaturen bei vornehmlich wolkenlosem Himmel und 14,7 Sonnenstunden bis auf 37,8 °C auf, was die Auswertungen der Daten der DWD-Klimamessstation Offenbach-Wetterpark (Stationskennzahl 7341) aufzeigten. Der 19.07. ging demnach als Heißer Tag (s. Kapitel 6.1.1.1.1) in die Statistiken ein und war mit extremen Hitzestress assoziiert. Während der ersten Messfahrt zwischen 22:00 Uhr und 00:12 Uhr Ortszeit blieb der Himmel klar, weshalb eine ungestörte nächtliche Ausstrahlung und eine optimale Ausbildung der Urbanen Wärmeinsel zu erwarten war. Erst in Nachthälfte zwei, während der Messfahrt zwischen 02:52 Uhr und 04:57 Uhr Ortszeit stellten sich teils Bedeckungsgrade von bis zu 6 Achtel ein, die jedoch größtenteils aus hoher Cirrusbewölkung bestanden. Diese stellten weiterhin gute Bedingungen für die langwellige Ausstrahlung bereit, die weiterhin in guter Näherung als autochthon anzusehen sind.

Da die mobile Messung in die Zeit der stärksten Hitzeperiode des gesamten Messzeitraums fiel, die im Rahmen dieser Analyse ebenfalls ausgewertet wurde, finden sich in den Abbildungen von Kapitel 6.1.1.3 weitere Informationen zu den während der Messfahrten vorherrschenden Wetterbedingungen, auch an den vier im Stadtgebiet installierten temporären Klimamessstationen.

## 5.2 NUMERISCHE MODELLIERUNG

### 5.2.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

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

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

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre werden aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft

---

<sup>4</sup> UHI = Urban Heat Island (engl. für urbane Wärmeinsel)





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 3783, Bl.9 (VDI 2017b) 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 Hanau und angrenzendes Umland rd. 7 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 m<sup>2</sup> großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 15 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Tabelle 15: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 5 m

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

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

Abbildung 37 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 Uhr morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin (K) unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

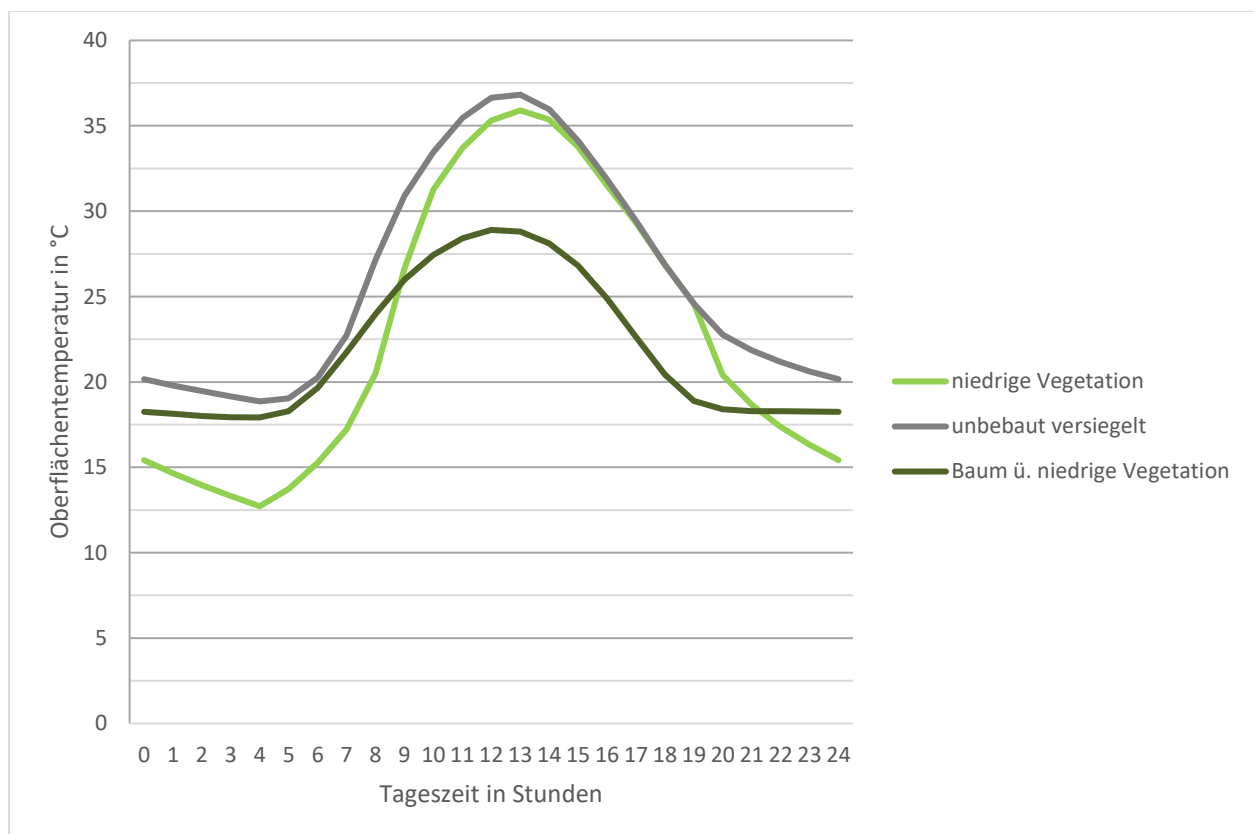


Abbildung 37: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlich träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt



die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 38 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 38 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 Entsigelung 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 deren 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.

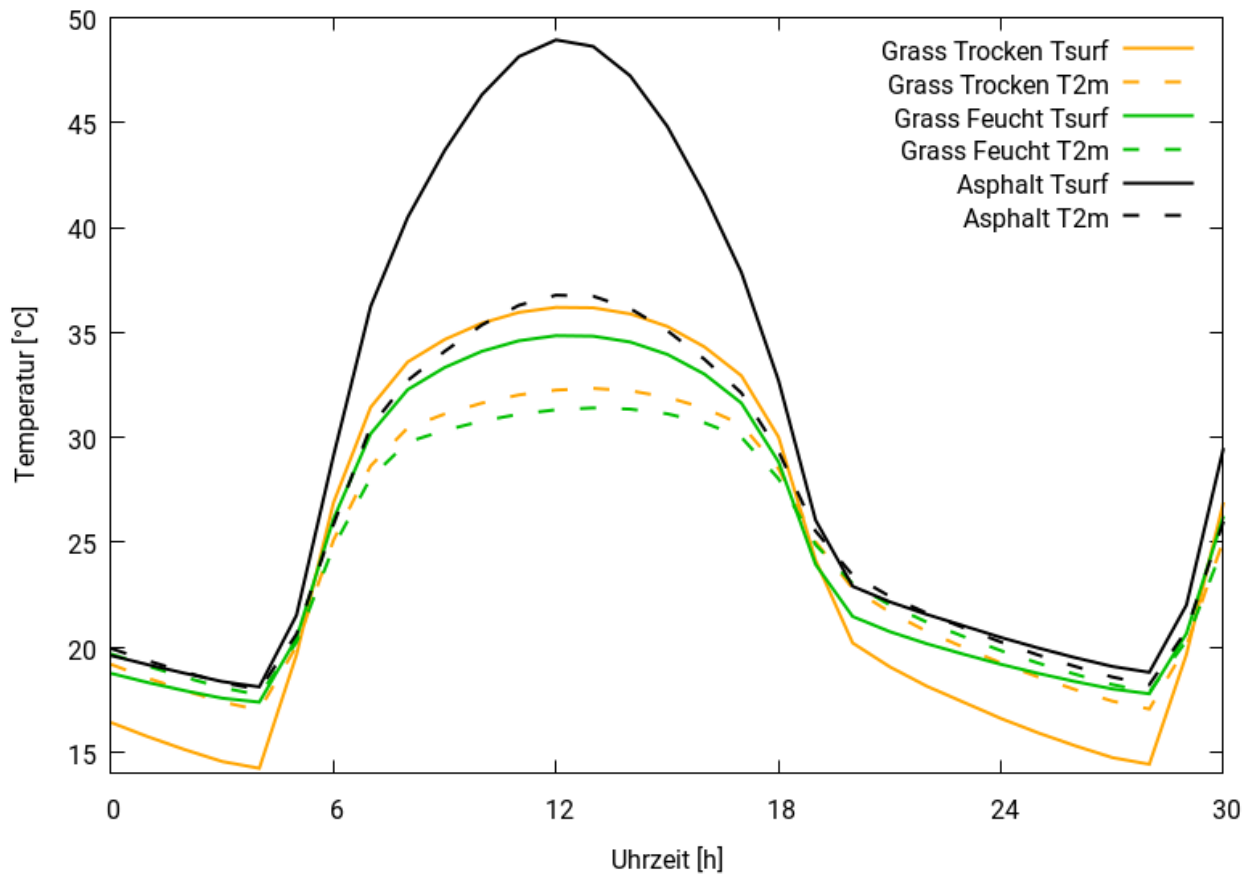


Abbildung 38: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages



### 5.2.2 SZENARIENENTWICKLUNG

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

Im analytischen Kern basiert die Delta-Methode auf einem Vergleich zwischen der gegenwärtigen stadt-/regionalklimatischen Referenzsituation (vor allem Belastungsschwerpunkte im Wirkraum, Bedeutung des Kaltluftprozessgeschehens im Ausgleichsraum) und einem individuellen Set an Vergleichsszenarien der zukünftigen Situation. Über diesen Analyseansatz hinaus ist auch die planerische Inwertsetzung der Erkenntnisse z.B. im Rahmen einer Planungshinweiskarte (vgl. LfU Bayern 2020 oder Stadt Bielefeld 2019) oder eines Masterplans Stadtklimawandel (vgl. Stadt Karlsruhe 2015, Stadt Freiburg 2018 oder Stadt Zürich 2020) erweiterter Bestandteil des Methodenpaketes.

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

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

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

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

Ausgangspunkt der Delta-Methode ist stets die Szenarientwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu projizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Zukunft aufmerksam zu machen, ohne dabei davon auszugehen, dass diese Szenarien tatsächlich real werden. Eine Hauptfunktion von Szenarien ist auf Alternativen und Varianten von Entwicklungen aufmerksam zu machen, um gegensteuern zu können (Abbildung 39, Wilms 2006; Kosow und Gaßner 2008). Es gibt



unterschiedliche Ansätze der Szenarientwicklung, 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 (siehe Abbildung 39). In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sog. Wirkmodellen - hat sich zur Reduktion dieser enormen Herausforderung die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

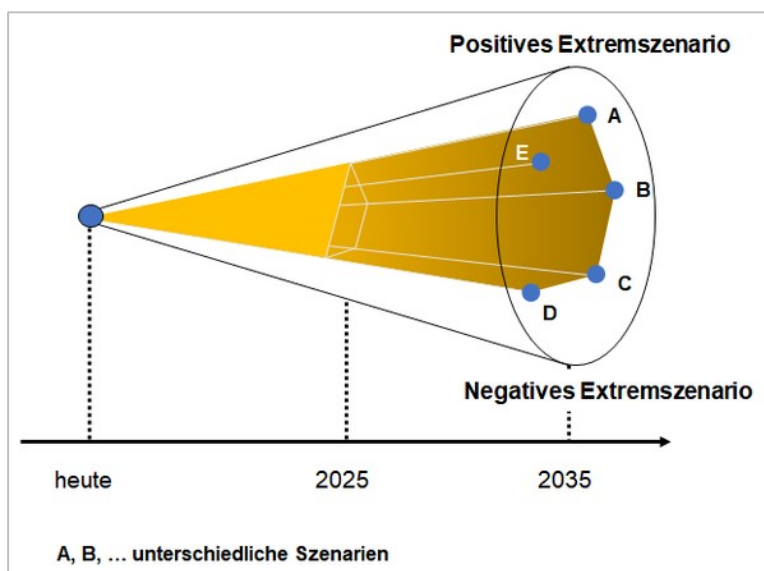


Abbildung 39. Der Szenariotrichter (Quelle: [www.business-wissen.de](http://www.business-wissen.de))

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das zukünftige Hanauer Stadtklima im Jahr 2055 in zwei verschiedenen Szenarien simuliert (

Tabelle 16). Als Stellschrauben zur Bestimmung des zukünftigen Stadtklimas wurden das Modul 1 (klimatischer Änderungen infolge des Klimawandels) und Modul 2 (Landnutzungsänderungen).

Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für Hanau Aussagen getroffen werden können, wie sich der Klimawandel etwa auf die Temperatur, Trockenheit oder den Niederschlag auswirkt (vgl. Kap. 4.4). Dennoch besteht beim Blick in die Zukunft zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit, wie stark die jeweiligen Klimaänderungen tatsächlich auftreten. Aus diesem Grund wird für das zukünftige Stadtklima in Hanau 2055 in zwei verschiedene Szenarien „Schwacher Klimawandel“ und „Starker Klimawandel“ unterschieden. Die beiden Szenarien können als best case- bzw. worst case-Varianten verstanden werden und es gilt als äußerst wahrscheinlich, dass sich die tatsächlich eintretenden Klimaänderungen in Hanau innerhalb der beiden Szenarien bewegen. Im „schwachen Klimawandel“ wird die Lufttemperatur zu Beginn der Modellrechnung um 1,1 °C, im „starken Klimawandel“ um



2,3 °C erhöht<sup>5</sup>. Diese Aufprägung des Temperatursignals basiert auf dem in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatz (Schär et al. 1996).

Tabelle 16: Modell-Szenarien zur Abbildung des Hanauer Stadtklimas (2021 und 2055) und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in Hanau (Stand 2021)</li> <li>■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung<sup>6</sup>: 21,0 °C</li> <li>■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %</li> </ul>
Szenario 1 Schwacher Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung</li> <li>■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,1 °C</li> <li>■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %</li> </ul>
Szenario 2 Starker Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung (analog Szenario 1)</li> <li>■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 23,3 °C</li> <li>■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 %</li> </ul>

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 0,53 bzw. 1,27 °C). Zum anderen wird dem Modell für das Szenario „starker Klimawandel“ eine geringere Bodenfeuchte infolge zunehmender sommerlicher Trockenheit vorgegeben: In Szenario 2 sinkt die Bodenfeuchte von 60 % (Status quo, Szenario 1) auf 30 %. Die Bodenfeuchte zählt zu den Antriebsgrößen des Modells, wird durch das Modell aber nicht verändert, d.h. das Modell gibt keine Ergebnisse zur zukünftigen Bodenfeuchte in Hanau aus. Eine geringere Bodenfeuchte beeinflusst aber die stadtklimatischen Modellergebnisse und sorgt insbesondere der Tagsituation für eine höhere bodennahe Lufttemperatur. Diese ist auf die wegfallende Verdunstung von Landnutzungsklassen mit niedriger Vegetation zurückzuführen, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird. Der Wärmeeintrag in Wasserkörpern kann aufgrund der guten Durchmischung über ein größeres Volumen verteilt werden, sodass die mittlere Temperatur langsamer einer allgemeinen Erwärmung der Atmosphäre folgt (vgl. IPCC 2013). Dieser Effekt wurde bei den Modellrechnungen durch die Anpassung der Wassertemperatur mit einer Erhöhung von 1/2 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 0,4 bzw. 0,95 °C). Generell wurden im Status Quo für die Kinzig eine Ausgangswassertemperatur von 19,0 °C und für den Main von 20,5°C angenommen. Diese Werte wurden den zur Verfügung gestellten Messdaten entnommen (Stadt Hanau, 2022). Für alle übrigen Gewässer im Modellgebiet wurde eine Temperatur von 20,0 °C angenommen.

<sup>5</sup> 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 der Zukunftsperiode 20241-2070 (Bezugsjahr 2055) und der Referenzperiode 1971-2000. Für den „schwachen Klimawandel“ beruht das Änderungssignal auf dem 15. Perzentil aller Modellläufe des RCP 2.6, für den „starken Klimawandel“ auf dem 85. Perzentil des RCP 8.5.

<sup>6</sup> Lufttemperatur und Bodenfeuchte zum Start der Modellierung entsprechen den Standard-Werten, die bei stadtklimatischen Modellierungen mit FITNAH-3D angenommen werden.





### 5.2.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, um die Stadtstruktur und die Topografie im Umfeld abbilden zu können. Für das Hanauer Stadtgebiet wurden folgende Geodaten von der Stadt Hanau bzw. der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation (HLBG) zur Verfügung gestellt.

- Geländehöhe
  - Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2021)
- Landnutzung
  - ALKIS (Stand 2021)
  - ATKIS-Daten (Stand 2021)
  - Gebäude: (ALKIS-Gebäudeumrisse mit Höhen aus DOM, Stand 2021; Umland: Open Street Map (OSM) Daten mit Annahme der Gebäudehöhe von 8 m)
  - Straßennetz (aus ALKIS-Nutzung; Stand 2021)
  - CIR-Luftbilder<sup>7</sup> (Stand 2019)
- Strukturhöhe
  - Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Stand 2021)
  - Lage von Lärmschutzwänden (Stand 2017 (EBA, Stadt Hanau (2024)))
- Versiegelungsgrad
  - Versiegelungskartierung für große Teile des Stadtgebiets (Stand 2021)
  - CIR-Luftbilder (Stand 2019)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Hanaus wird aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2019 aufweisen. Da die Eingangsdaten zudem mittels der in der Software ArcGIS von ESRI integrierten Luftbilder hinsichtlich ihrer Plausibilität verglichen wurden, kann 2021 als Bezugsjahr für den Status quo der Klimaanalyse verstanden werden.

Außerhalb des Hanauer Stadtgebiets wurde auf online frei verfügbare Daten zurückgegriffen, darunter Urban Atlas-Daten zur Landnutzung aus dem Copernicus Land Monitoring Service<sup>8</sup> der Europäischen Umweltagentur (EUA) sowie Daten aus OpenStreetMap. Die Eingangsdaten für das Hanauer Umland besitzen eine geringere Auflösung (25 m), sind aber ausreichend genau, um das Prozessgeschehen zwischen Hanau und seinem Umland zu erfassen.

#### **Untersuchungsgebiet**

Das Stadtgebiet Hanau erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 12 km in Ost-West- und 13 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von knapp 76 km<sup>2</sup>. Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 175 km<sup>2</sup> auf (ca. 12,5 km x 14 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Hanauer Stadtklima berücksichtigt werden können.

---

<sup>7</sup> Color-Infrared (CIR) – Bilder sind Multispektralbilder mit der Kanalbelegung (Nahes Infrarot, Rot und Grün)

<sup>8</sup> <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas>



### **Geländehöhe**

Die Topographie im Hanauer Stadtgebiet wird in der Kernstadt vorrangig durch die Flüsse Kinzig und Main geprägt. Aufgrund dessen sind die Höhenunterschiede hier verhältnismäßig moderat (Abbildung 40). Die Kernstadt liegt auf einer Höhe von ca. 100 m ü. NN. Deutliche Höhenunterschiede gibt es am Nord- und Ostrand des Stadtgebietes, wo die Erhebungen jenseits des Stadtgebietes jeweils auf über 200 m ü. NN reichen. Nördlich des Stadtteils Mittelbuchen ist das der Fall und im Anschluss an die Bulau im weiteren Verlauf in Ost-Richtung bis über die bayerische Grenze hinweg.

Die Topografie nimmt Einfluss auf die nächtliche Kaltluftströmung. In den benannten Bereichen treten Kaltluftabflüsse auf, die das klimatische Geschehen im Hanauer Stadtgebiet beeinflussen.

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

### **Landnutzung**

Die Hanauer Landnutzung wird über verschiedene Landnutzungsklassen definiert, die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 41). Mit der vorliegenden Rasterzellenbreite von 5 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsklassifizierung aufzulösen (vgl. Tabelle 15).

Zur Erfassung der Bäume wurden die CIR-Luftbilder aus dem Jahr 2019 in den Vegetationsindex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) überführt. Über einen NDVI-Schwellwert von 0,15 konnten Bäume automatisiert von vegetationslosen Flächen getrennt und somit in Kombination mit der Strukturhöhe Baumstandorte identifiziert werden. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass auch Bäume im privaten Bestand erfasst werden, die i.d.R. kein Bestandteil öffentlicher Baumkataster sind. Allerdings war es bei der vorgegebenen Modellauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von 2,5 m und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

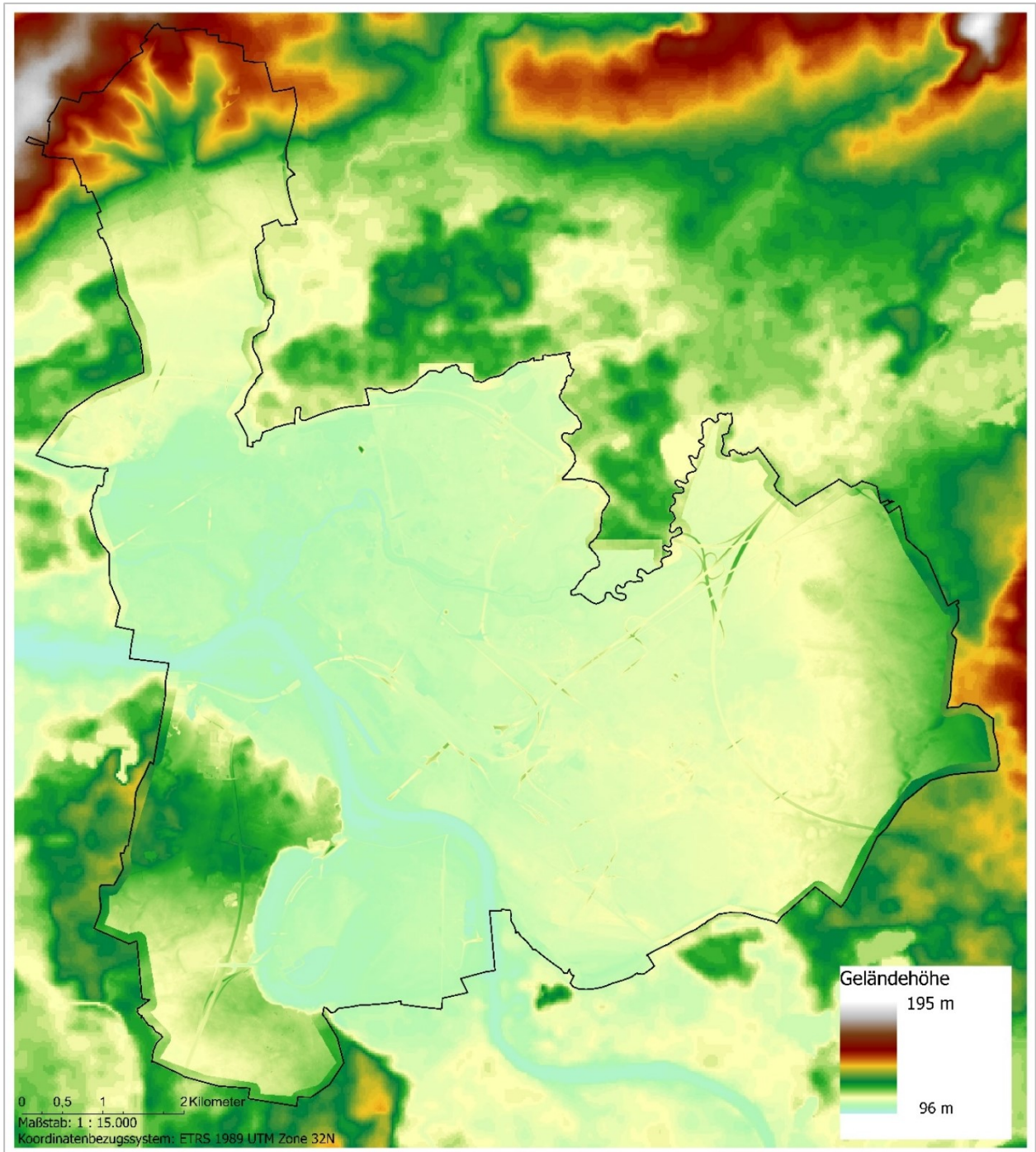


Abbildung 40: Digitales Geländemodell für Hanau und die nähere Umgebung.



**Nutzungsklassen**

- 7 - Gleis
- 9 - Rasen mit Vegetation
- 14 - Gewässer
- 20 - Gebäude
- 22 - Unbebaut versiegelt
- 23 - Naturferner Boden
- 24 - Baum über Versiegelung
- 25 - Baum über Rasen
- 26 - Baum über naturf. Boden
- 27 - Solaranlage
- 28 - Sandboden

Landnutzung

Abbildung 41: Modelleingangsdaten „Nutzungsklassen“ (Legende in der rechten Abbildung) für das Hanauer Stadtgebiet in einem Ausschnitt der Hanauer Kernstadt (links).

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 42). Aus diesen punkthaften Eingangsdaten ergeben sich die in gleicher Weise aufgelösten rasterbasierten Modellergebnisse der Klimaparameter (Schritt 3). Die Modellergebnisse erlauben eine erste Analyse der klimaökologischen Gegebenheiten in einem Gebiet. Planerische Aussagen zur bioklimatischen Bedeutung bestimmter Areale können sich allerdings nicht auf einzelne Rasterzellen beziehen. Hierfür muss eine Zonierung des Untersuchungsraumes in klimatisch ähnlichen Flächeneinheiten erfolgen. Diese Blockflächen sollten in der Realität nachvollziehbar und administrativ oder nutzungstypisch abgrenzbar sein. Die wichtigste Datengrundlage hierfür bildeten die ALKIS-Daten (Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem; Stand 2021), die auf Basis von CIR-Luftbildern (Stand 2019) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

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



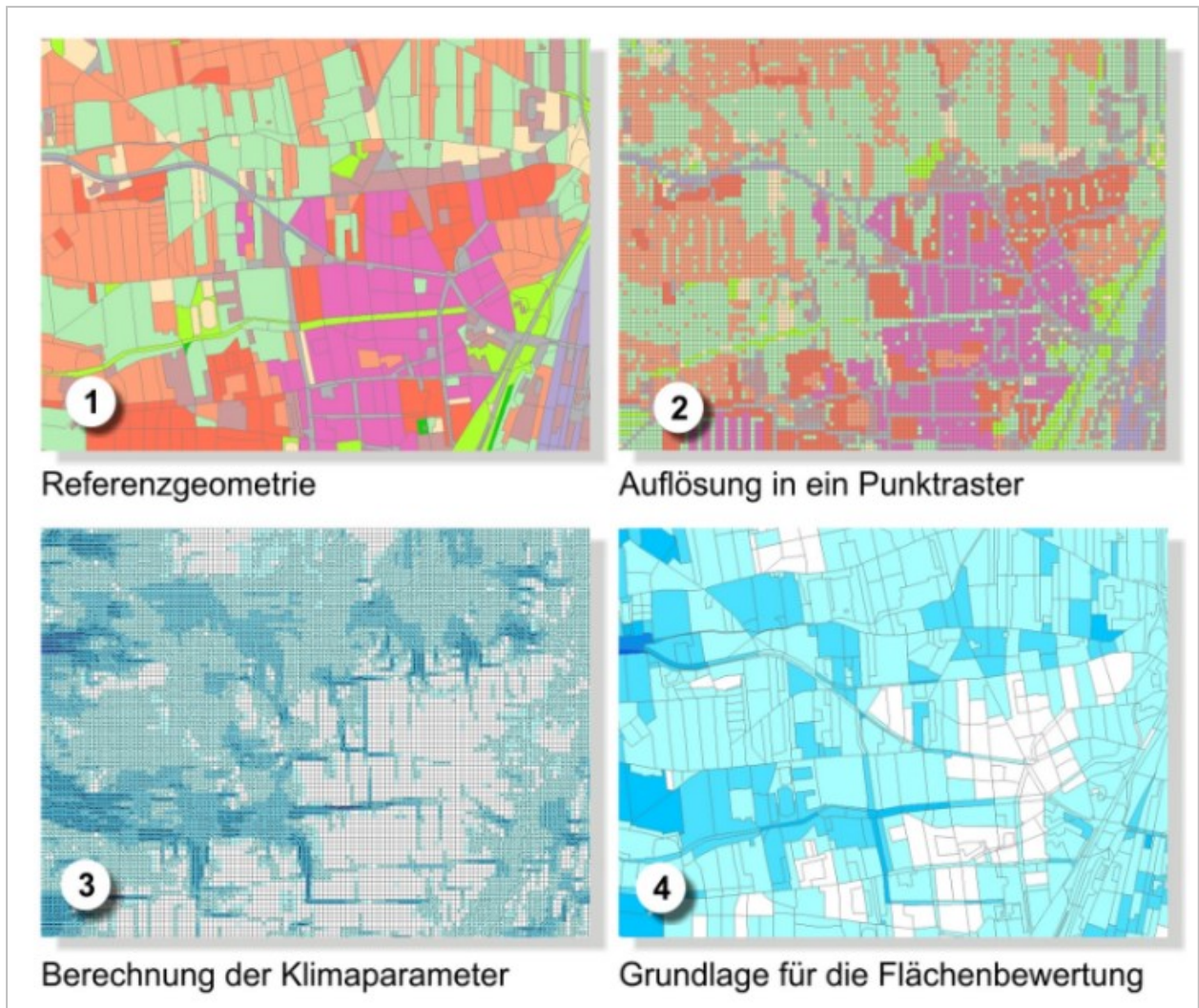


Abbildung 42: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

## 5.2.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

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

In Abbildung 43 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.

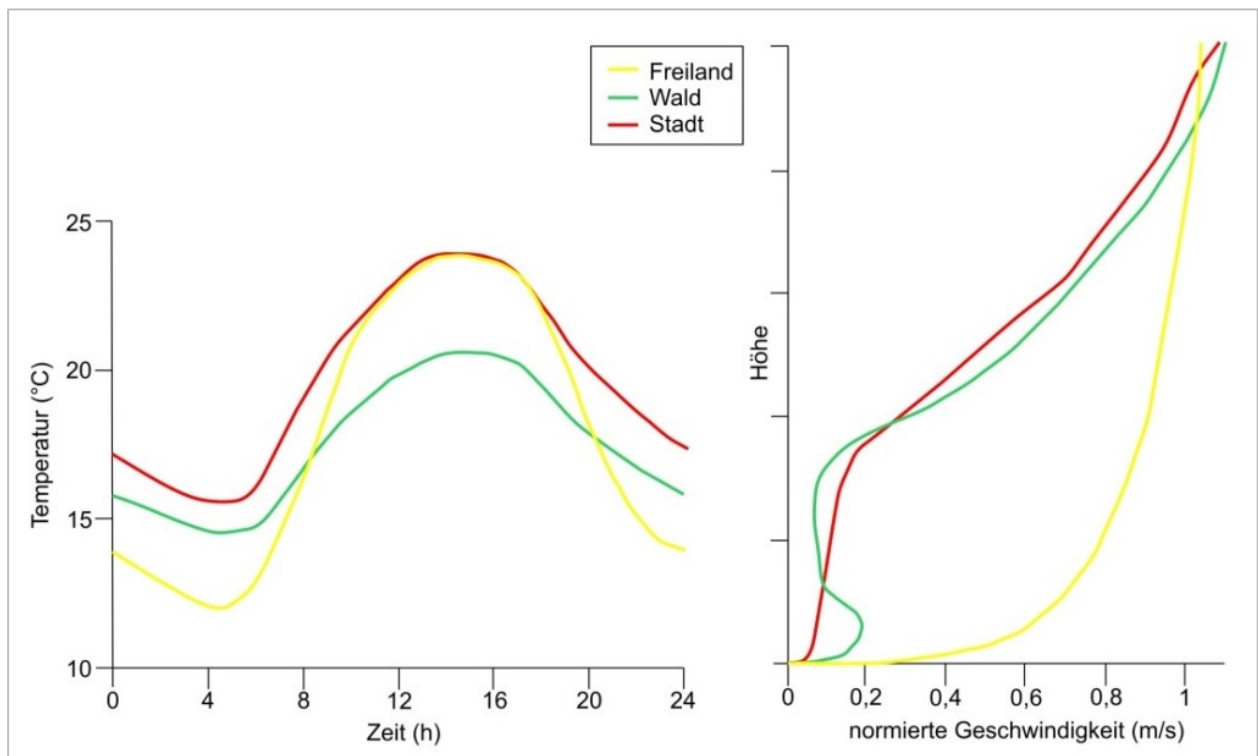


Abbildung 43: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach GROB 1992)

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen erfolgte auf der Basis des in der Literatur



als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes (Schär et al. 1996). Demnach wurden die beiden Modellsimulationen mit einem entsprechenden Delta von +1,1K (Ensemble zum RCP 2.6; Szenario „schwacher Klimawandel“) und einem Delta von +2,3 K (Ensemble 8.5; Szenario „starker Klimawandel“) versehen. Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert (Abbildung 44).

Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21:00 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100 m mit der Höhe ab (Abbildung 44). Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21 °C bzw. 22,1 °C bzw. 23,3 °C.

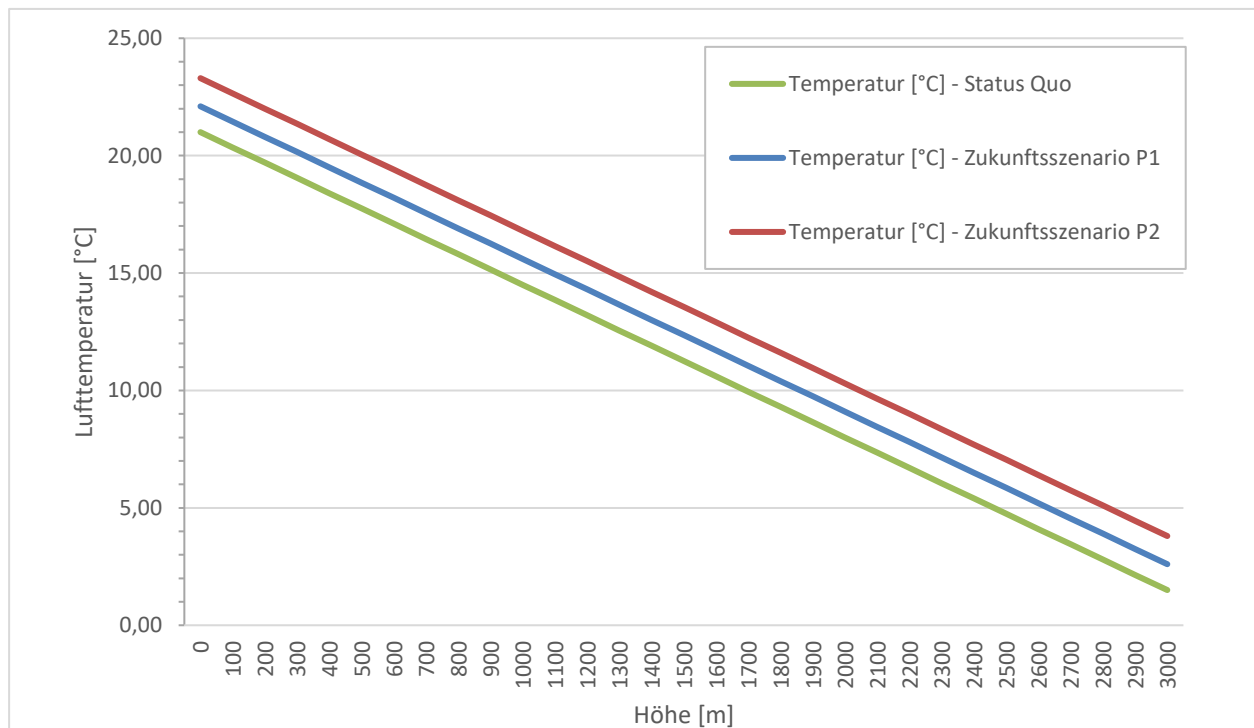


Abbildung 44: Ausgangsprofil der Lufttemperatur für die Modellierung der Bestandssituation (grüne Kurve) sowie für die Szenarien „schwacher“ (blaue) und „starker“ Klimawandel (rot).

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



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





### 5.2.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf auch für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 17). 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 17: von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter

Parameter	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 <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Turbulente kinetische Energie	[m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]	Stündlich, dreidimensional für alle Vertikalschichten
Wärmestrom der Oberflächen	[W/s <sup>2</sup> ]	Stündlich, zweidimensional für die Oberflächen
Luftdruck	[N/m <sup>2</sup> ]	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 sog. post-processing Schritt werden aus den in der Tabelle 16 genannten Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertzeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 18). In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt – handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen



entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Die Vorwärtstrajektorien werden in einer Zeitspanne von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang ausgewertet.

Tabelle 18: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

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



## 5.2.6 MODELLIERUNG DER LUFTHYGIENE

Die lufthygienische Untersuchung greift – wie die Rechnung zu den Klimaparametern – auf das Modell FITNAH zurück. Weil FITNAH dezidiert für klimatische Fragestellungen optimiert wurde, ist diese Ausbreitungsrechnung als „synergetische“ Zusatzinformation aufzufassen, die sich das Vorhandensein der bereits für das Klima aufgearbeiteten Eingangsdaten zunutze macht und auf die Fähigkeit des Modells zurückgreift, Gase oder Partikel in ihrer variablen Konzentration im dreidimensionalen Windfeld verdriften zu lassen.

Da Parameter wie Strukturhöhe, Porosität und dreidimensionales Kaltluftströmungsfeld aus der Klimarechnung vorliegen, könnte ohne weitere Umwege die **Ausbreitung von Luftschadstoffkomponenten innerhalb der Kaltluft** berechnet werden. Die aus solchen Modellierungen hervorgehenden Immissionsfelder beziehen sich explizit auf eine Ausbreitungssituation, die nur bei speziellen meteorologischen Gegebenheiten und nur in den Frühstunden des Tages auftritt. Sie wären damit nicht geeignet, Schadstoffkonzentrationen in Bezug zu den in der 39. BImSchV (2010) genannten Werten zu setzen, da sich die Immissionsgrenzwerte dieser Verordnung auf jahresmittlere Luftschadstoffkonzentrationen oder Überschreitungshäufigkeiten beziehen. Ausbreitungsrechnungen im Kaltluftströmungsfeld können allerdings dazu dienen, Luftaustauschbereiche zwischen Grün- und Siedlungsflächen zu identifizieren, in denen bei autochthonen Wetterlagen mit erhöhten Schadstoffbelastungen zu rechnen ist (Indikatorfunktion).

Die hier durchgeführte Betrachtung der lufthygienischen Belastungssituation wählt ein anderes Vorgehen: Nicht die spezielle autochthone Wetterlage steht im Vordergrund, sondern eine **jahresdurchschnittliche Ausbreitungssituation**. Diese berücksichtigt die Verteilung der im Jahresverlauf innerhalb des Rechengebietes zu erwartenden Windgeschwindigkeiten, Windrichtungen und Turbulenzzustände der Atmosphäre. Auf diese Weise liefert die Ausbreitungsrechnung Mittelwerte der Immissionskonzentration, aus denen sich in gewissem Rahmen grenzwertrelevante Aussagen im Sinne der 39. BImSchV ableiten lassen.

Standard bei der Ermittlung von Kfz-Emissionen ist in Deutschland das „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA) in der Version 4.2 (UBA 2022). Das HBEFA stellt Emissionsfaktoren für alle gängigen Fahrzeugkategorien jeweils in emissionsrelevanter Differenzierung für eine große Bandbreite von Eingangsgrößen zur Verfügung. Die durchschnittlichen Emissionsfaktoren des HBEFA weisen für zukünftige Jahre gegenüber der heutigen Situation eine zunehmende Reduktion auf. Dies steht im Zusammenhang mit den Erwartungswerten einer veränderten Verkehrszusammensetzung, d.h. mit der Verringerung der Emissionen einer verjüngten Fahrzeugflotte. Daher ist das angesetzte Prognosejahr (hier 2021) von entscheidender Bedeutung für die Berechnung des Schadstoffausstoßes. Im Standard-Szenario „REF D HB42“ ist (neben der aktuellen Situation) ein nach Emissionsstufen differenzierter Fahrzeugbestand („Flottenmix“) für jedes zukünftige Bezugsjahr festgelegt. Berechnet werden die Anteile über die Fortschreibung der gegenwärtigen Neuzulassungszahlen und die „Überlebenswahrscheinlichkeit“ der verbleibenden Fahrzeuge. Die aufgrund der Verkehrssituationen im HBEFA berechneten Emissionsfaktoren beruhen auf Tests zur Zulassung im Rahmen der europäischen Abgasgrenzwerte (Euro-Norm-Stufen). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das HBEFA auf Messungen von nicht legislativen Fahrzyklen basiert und somit innerhalb gewisser Grenzen reale Fahrsituationen reflektiert.

Für die **Stickstoffoxide** berechnet das HBEFA die Emissionsfaktoren von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) zunächst gemeinsam als Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) in Gramm pro Fahrzeug und Kilometer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass NO<sub>x</sub> zu einem großen Teil als NO emittiert und erst in den bodennahen Luftschichten zu NO<sub>2</sub> oxidiert werden. Der entsprechende Gleichgewichtsprozess ist unter anderem abhängig von der Ozonkonzentration und der Strahlung. Die Ermittlung der NO<sub>2</sub>-Immission aus der NO<sub>x</sub>-Emission



über unterschiedlich komplexe Regressionsanalysen sowie die Ableitung der Gesamtmission unter Berücksichtigung der weiteren Rahmenbedingungen obliegt dem jeweiligen Ausbreitungsmodell. Im vorliegenden Fall wird für die NO-NO<sub>2</sub>-Umwandlung der Ansatz nach Romberg verwendet (ROMBERG et al. 1996).

Bei den **Feinstaub**missionen nimmt – neben den Auspuffemissionen – auch die Partikelfreisetzung infolge von verkehrsinduzierten Abrieben (Reifen-, Bremsen-, Kupplungs-, und Straßenbelagsabrieb) sowie die Wiederaufwirbelung von akkumuliertem Straßenstaub eine wesentliche Rolle ein. Die Emissionsfaktoren dieses „Non-Exhaust“-Anteils sind seit der Version 4.1 ebenfalls im HBEFA integriert.

Die wichtigsten Eingangsgrößen für das HBEFA sind:

- der DTV-Wert (die jeweiligen Emissionsfaktoren werden mit der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke verrechnet)
- die Verkehrszusammensetzung (Pkw, Lkw, Bus usw.)
- die Verkehrsdynamik („Verkehrssituationen“ abhängig von Gebiet, Straßentyp, Tempolimit und Level of Service)
- die Flottenzusammensetzung (Anteil Fahrzeuge nach Motortyp, Hubraum, Emissionskonzept = EURO-Stufen im verwendeten Bezugsjahr)

Die **Level of Services** (LOS „Verkehrszustände“: frei, dicht, gesättigt, Stop+Go, Stop+Go II) lassen sich prozentual kombinieren, um beispielsweise Variationen der Kapazitätsauslastung im Laufe des Tages abzubilden. Aufgrund der hohen Sensitivität, den die Verkehrszustände auf die Emission haben, ist eine realistische Bestimmung dieser Anteile besonders wichtig. Auch die Anteile von schweren Lkw und Bussen, die einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen haben, müssen besonders sorgfältig bestimmt werden. Die Emissionen der einzelnen Quellgruppen basieren auf Eingangsdaten und z.T. stark vereinfachten Rahmenbedingungen der folgenden Tabelle 19.

Tabelle 19: Eingangsdaten und Randbedingungen der Emissionsberechnung

Emission	Ausprägung	Quelle / Annahmen
<b>Straßennetz und Verkehrsmengen</b>	DTV (Pkw, Lkw) z.T. DTVw5, richtungsgetrennt	Hessen Mobil (2021), Stadt Hanau (2022)
<b>Schwere Nutzfahrzeuge</b>	Lkw >= 3,5 t	Hessen Mobil (2021), Stadt Hanau (2022)
<b>Leichte Nutzfahrzeuge</b>	Lkw < 3,5 t	5% am DTV.
<b>Busse</b>	keine	Subsummiert im Schwerverkehr
<b>Verkehrssituation</b>	Funktionaler Straßentyp	Hessen Mobil (2015), Stadt Hanau (2022) ansonsten HVS
<b>Gebietstyp</b>	ländlich/agglo	Gemäß GIS-Verschneidung
<b>Verkehrszustand</b>	Level of Service 1 – 5	konstant
<b>Berücksichtigung Kaltstart</b>	Durchschnitt	HBEFA 4.2 ØDE
<b>Geschwindigkeit</b>	variabel	Hessen Mobil (2021), Stadt Hanau (2022)
<b>Freisetzungshöhe</b>	Festsetzung 0,5 m	Vertikale Höhe im Modell
<b>Bezugsjahr</b>	Zeitpunkt Flottenmix 2021	Absprache Stadt Hanau (2021)
<b>Flottenzusammensetzung</b>	HBEFA REF D HB42	HBEFA Flottenmix
<b>Steigung</b>	unberücksichtigt	+/- 2% (HBEFA)
<b>Berücksichtigung VDI-RL 3782, Bl. 7</b>	Ja, zumeist vereinfacht	VDI (2020b)



Die **Verkehrsmengen** zur Berechnung der Emissionen wurden von HESSEN MOBIL (2021) und von der STADT HANAU (2022) zur Verfügung gestellt (Abbildung 45). Die Werte von Hessen Mobil entstammen den Berechnungen des hessenweiten Verkehrsmodells für das Jahr 2015. Der **Gebietstyp** wurde gemäß Abgleich mit dem Nutzungsshape entweder als „ländlich geprägt“ oder als „Agglomeration“ definiert. Der bereits erwähnte **Verkehrszustand**, der über den „Level of Service“ die Auswirkung des Verkehrsflusses zwischen „frei fließend“ und „Stop+Go“ auf die Emissionsfaktoren berücksichtigt, wurde mangels genauerer Daten über ein LOS-Modell aus der Anzahl der Fahrstreifen berechnet (IVU 2022). Auch zur Beschaffenheit der **Fahrzeugflotte** lagen keine detaillierten Angaben vor, so dass ein Flottenmix angenommen wurde, der im HBEFA als Standard-Szenario der Verkehrsentwicklung in Deutschland vorgegeben wird (REF D HB42). Die ermittelten verkehrsbedingten Emissionsdichten sind in Abbildung 46 dargestellt.

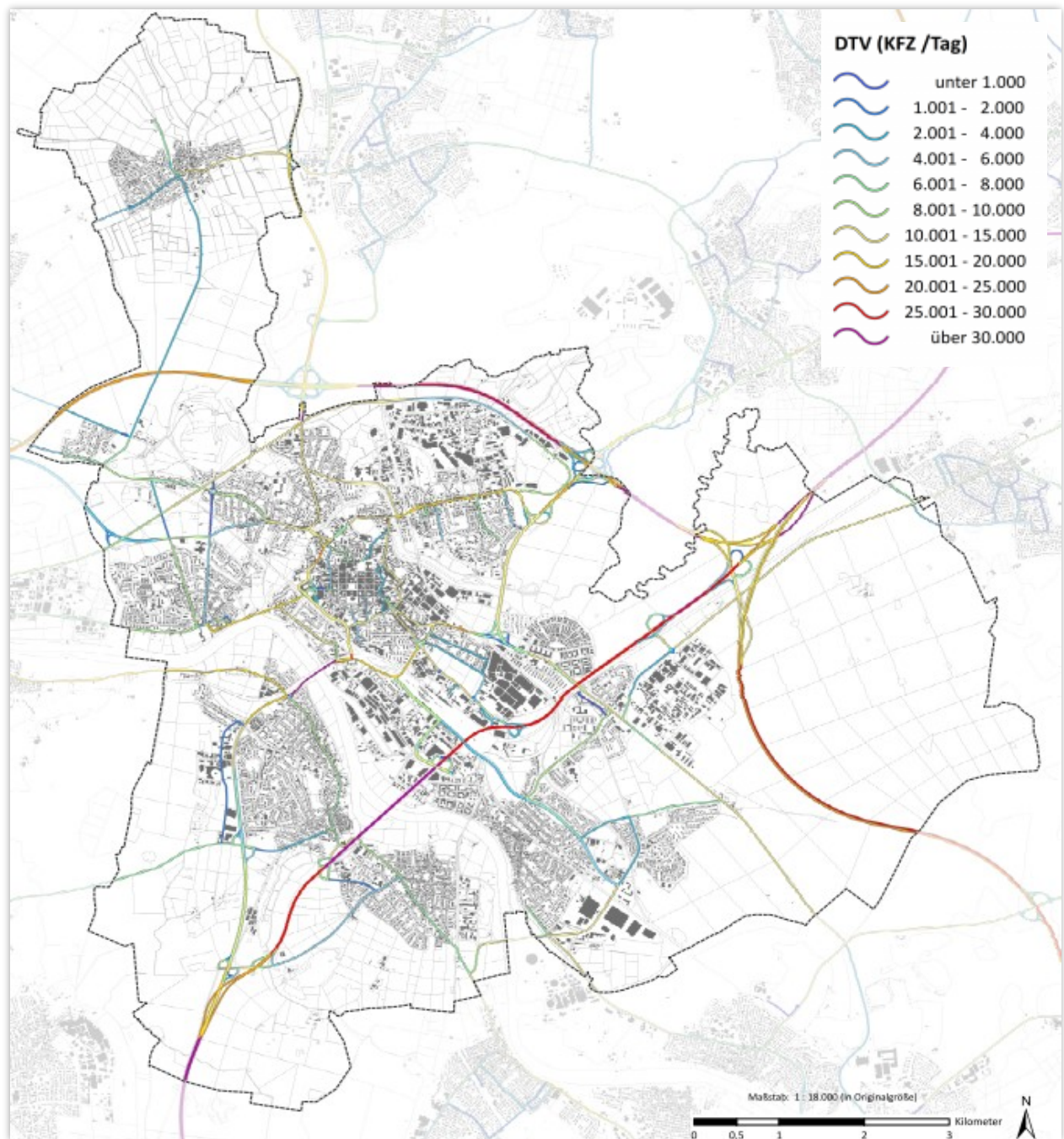


Abbildung 45: Berücksichtigtes Straßennetz im Stadtgebiet von Hanau, klassifiziert nach den durchschnittlichen täglichen Verkehrsmengen (Daten: Hessen Mobil (2021), Stadt Hanau (2022))



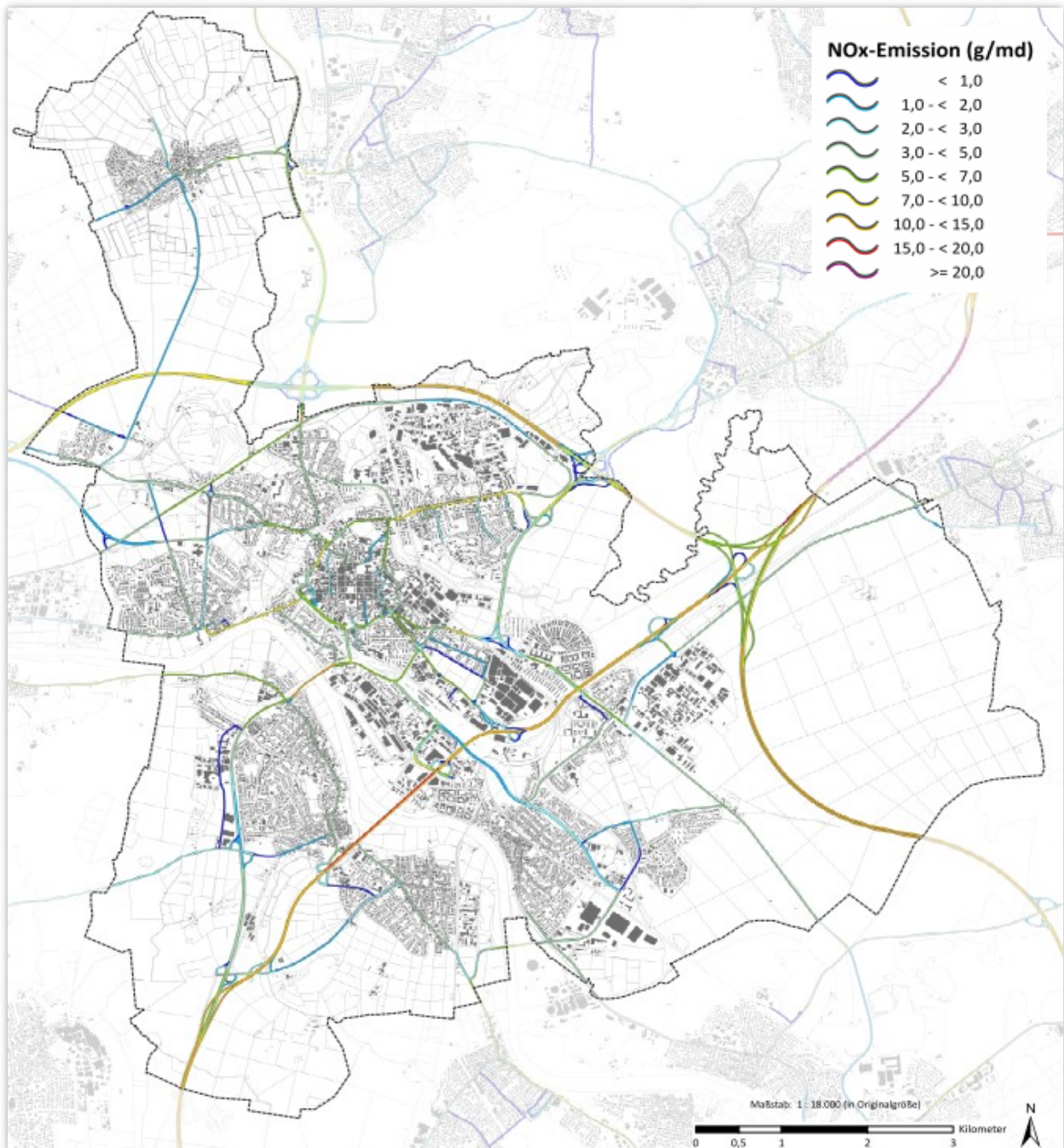


Abbildung 46: Straßenverkehrsbedingte Emissionsdichten von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) in Gramm pro Meter und Tag (g / m·d)

Für eine Modellierung der jahresdurchschnittlichen Luftschadstoffbelastung ist es zunächst notwendig, über dem Eingangsdatenraster der Klimarechnung eine repräsentative jahresmittlere Strömungssituation zu erzeugen. Zur Definition der meteorologischen Rahmenbedingungen für diese Ausbreitungsbedingungen wird eine meteorologische Zeitreihe in Form einer AKTerm der Station 7341 Offenbach Wetterpark des Deutschen Wetterdienstes verwendet (Abbildung 47). Eine AKTerm enthält für einen repräsentativen zwölfmonatigen Zeitraum (in der Regel ein Kalenderjahr) stündliche Werte der Windrichtung, der Windgeschwindigkeit und der Ausbreitungsklasse nach Klug/Manier. Sie bildet somit die übergeordneten Strömungsbedingungen ab, die durch die lokalen Gegebenheiten (Boden und Gebäudeeinfluss) im Windfeldmodell modifiziert werden.



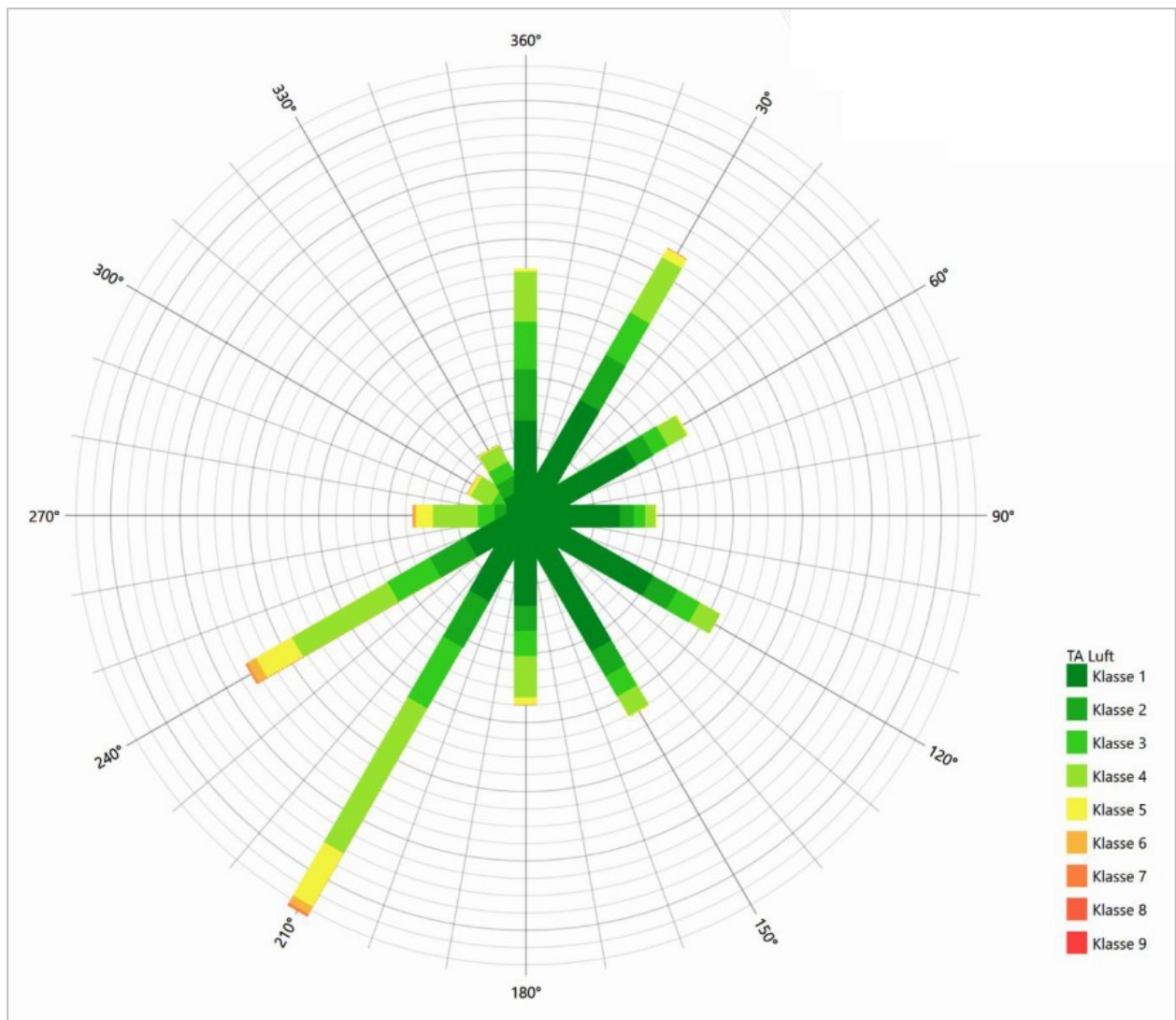


Abbildung 47: AKTerm der Station 7341 Offenbach Wetterpark des Deutschen Wetterdienstes (Daten und Grafik: IFU 2022)

Um die Gesamtimmissionsbelastung im Plangebiet abschätzen zu können, sind Daten zur **Hintergrundkonzentration** der Schadstoffkomponenten nötig (siehe auch Abbildung 71 auf S. 127). Diese Vorbelastungs-Immissionen treten unabhängig von lokalen Zusatzbelastungen auf und stammen aus Quellen wie Kleinfeuerungsanlagen, Gewerbe und regionalem Verkehr. Zur Bestimmung der NO<sub>2</sub>-Vorbelastung wurde auf Grundlage der Messergebnisse an der Probenahmestelle DEHE011 Hanau (HLUNG 2022b) ein über das gesamte Untersuchungsgebiet konstanter Jahresmittelwert von 23,5 µg/m<sup>3</sup> angenommen (vgl. Abbildung 48: ). Die Station wird im Luftmessnetz Hessen des Landesamtes als Station im städtischen Hintergrund eingestuft. Entsprechend werden die Luftschadstoffkonzentrationen außerhalb des Stadtgebietes (also eigentlich im großräumigen ländlichen Hintergrund) in der Modellrechnung überschätzt. Für die Festlegung der Vorbelastung des Feinstaubes PM<sub>10</sub> wurde das gleiche Prinzip angewandt und anhand der Messdaten ein Wert von 16,2 µg/m<sup>3</sup> festgesetzt. Die Feinstaubfraktion PM<sub>2.5</sub> hingegen wird an der Probenahmestelle Hanau nicht explizit gemessen, so dass sich die angenommene PM<sub>2.5</sub>-Vorbelastung von 10,8 µg/m<sup>3</sup> am Verhältnis der Konzentrationen von PM<sub>10</sub> und PM<sub>2.5</sub> anderer Stadthintergrundstationen in Hessen orientiert.

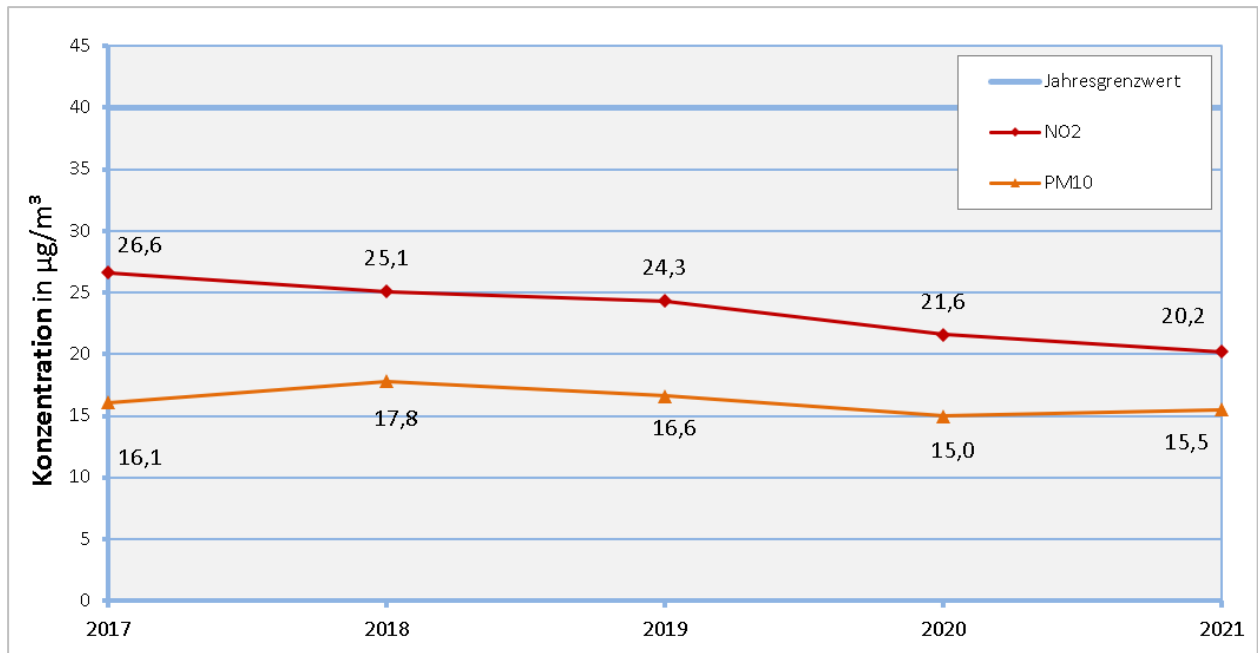


Abbildung 48: Jahreskenngrößen der NO<sub>2</sub>- und PM<sub>10</sub>-Konzentration an der Station Hanau DEHE011 des Luftmessnetzes Hessen im Vergleich zum Grenzwert. Datenquelle: HLNUG [Hrsg.] (2022b)

Neben den zahlreichen Vereinfachungen und Unsicherheiten, die sich bereits bei der Ermittlung der Emissionen ergeben haben, sind bei der Aussagekraft der Immissionsfelder auch **Einschränkungen** zu berücksichtigen, die sich aus der Ausbreitungsrechnung ergeben: Das Modell FITNAH-3D eignet sich vornehmlich für stadt- und regionalklimatische Fragestellungen und ist auch dahingehend optimiert und validiert. Die Möglichkeit zur Berechnung der Schadstoffbelastung ist lediglich eine „Synergie-Leistung“, die auf dem Vorhandensein des für die Klimarechnung erstellten Nutzungsrasters beruht. Viele Parameter gehen – verglichen mit einem Detailmodell – nur sehr vereinfacht in die Ausbreitungsrechnung ein. Die Modellierung der Schadstoffimmission muss validiert werden und ist auf einen Abgleich (z.B. mit Messungen) angewiesen.

Ebenso ist die Konzeption der Rasterauflösung und des Untersuchungsgebietes für die Berechnung der Klimaparameter bei autochthonen Wetterlagen optimiert – nicht für die Berechnung von jahresmittleren Luftschadstoffkonzentrationen. Sie entsprechen damit (z.B. was ihre horizontale und vertikale Auflösung betrifft) nicht den diesbezüglichen Vorgaben der VDI-RL 3783, Bl. 9 (VDI, 2017b), weshalb die aus ihnen resultierenden Ergebnisse für belastbare Aussagen gemäß BImSchG z.T. nicht ausreichen. Aus der Rasterauflösung von 5 m ergeben sich beispielsweise Einschränkungen bei der Aussagekraft der Ergebnisse in Gebieten mit hohem Bauvolumen und engen Straßenräumen. Die Strömungs- und Ausbreitungsbedingungen, die beispielsweise Straßenschlucht- und Eckenwirbel ausbilden, können hier nicht hinreichend repräsentiert werden. Damit stellt das Immissionsfeld die Luftschadstoffbelastung generalisiert dar und sollte im Wesentlichen als Grundlage zur Identifizierung von Belastungsschwerpunkten im Untersuchungsgebiet verstanden werden. Die Rahmenbedingungen der Immissionsrechnungen sind in Tabelle 20 zusammengestellt.



Tabelle 20: Eingangsdaten und Randbedingungen der Immissionsberechnung

Immission	Ausprägung	Quelle / Annahmen
Meteorologie	AKTerm 2019 der Station 7341 Offenbach Wetterpark	DWD, IFU GmbH 2022
Hintergrundkonzentration NO <sub>2</sub>	Konstant 23,5 µg/m <sup>3</sup>	(DEHE011, Ø 2017 - 2021)
Stickstoffchemie	Weitgehend unberücksichtigt	Statistische NO <sub>2</sub> -Konversion (modellintern)
Hintergrundkonzentration PM <sub>10</sub>	Konstant 16,2 µg/m <sup>3</sup>	(DEHE011, Ø 2017 - 2021)
Hintergrundkonzentration PM <sub>2,5</sub>	Konstant 10,8 µg/m <sup>3</sup>	Festlegung Anteil an PM <sub>10</sub>
Verwendetes Modell zur Ausbreitungsrechnung	FITNAH-3D	Prof. Dr. G. Groß
Nutzungsraaster, Strukturhöhe, Porosität, Geländehöhe usw.	Vorhanden	Klimarechnung
Horizontale Auflösung	5 m	Klimarechnung
Vertikale Auflösung	2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 40, 70 m	Klimarechnung
Berücksichtigung VDI-RL 3783, Bl. 9	Nein	VDI (2017)



### 5.2.7 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 für getrennt nach den drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere die klimawandelbedingten Signale für Temperaturerhöhung und Trockenheit in den Fokus genommen wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Demnach durchliefen alle Modellläufe erfolgreich die Qualitätssicherung.

Tabelle 21: Ergebnisse der Qualitätssicherung

Modellauf	Ergebnis der Qualitätssicherung
Bestandssituation	Qualitätssicherung erfolgreich
Szenario 1 „“	Qualitätssicherung erfolgreich
Szenario 2 „“	Qualitätssicherung erfolgreich



### 5.2.8 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 lediglich 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 auch das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern lediglich die, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2017a) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. 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 aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E<sup>9</sup>-Vorhaben ist.

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

---

<sup>9</sup> Forschung und Entwicklung



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 m<sup>2</sup> repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Städte in der Größenordnung Hanau modelliert werden kann. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders klein-kronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell (ALKIS-Gebäudeumrisse mit Höhen aus DOM, Stand 2021) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt auch für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer flächendeckenden Stadtbodenkartierung abgeleitet werden und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Ein städtischer Geodatensatz ist aber nicht verfügbar, sodass diese Informationen in einer gesamtstädtischen Analyse nicht mit vertretbarem Aufwand verwendet werden können. Folglich wird im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum auch zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (GROß 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten





– sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamtstädtische Ebene bereitstehen und dann auch modelltechnisch abgebildet werden können.

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und den Szenarien differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.2.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation muss attestiert werden, dass deren Veröffentlichung zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Analysetätigkeit bereits ca. 2 Jahre in der Vergangenheit lag.

Darüber hinaus existiert keine groß- oder kleinräumige Prognose über die Entwicklung von Versiegelungen oder das Absterben, Neupflanzen oder Wachstum von Bäumen für die Zukunft, die hätten Berücksichtigung finden können. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist. Diese Ausführungen lassen sich grundsätzlich auch auf die Berücksichtigung der zukünftigen Stadtentwicklung übertragen. Die Szenarien enthalten zwar abgestimmte Annahmen darüber, wo in den nächsten 10-30 Jahren Entwicklungen stattfinden könnten und zumindest für einen Teil der Flächen liegen auch Informationen zu Art und Maß der baulichen Nutzung vor. Ob diese aber tatsächlich (in der geplanten bzw. im Modell angenommenen Weise) umgesetzt werden, ist mal mehr und mal weniger unsicher. Selbiges gilt in vermutlich deutlich ausgeprägterem Maße (hoffentlich) auch für die den Szenarien immanente Annahme, dass keine (weiteren) Anpassungsmaßnahmen im Bestand umgesetzt werden. Die skizzierten Umstände sind der Arbeit mit Szenarien jedoch immanent, die per Definition ja die Entscheidung unter Unsicherheit nicht vollends auflösen, sondern diese „nur“ evidenzbasiert unterstützen wollen. Hier muss also mit – gut hergeleiteten und vor allem auch gut abgestimmten – Annahmen gearbeitet werden, was im Projekt über den intensiven Kommunikationsprozess sichergestellt wurde.

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



# 6. Analyseergebnisse

## 6.1 MESSKAMPAGNE

### 6.1.1 STATIONSBASIERTE MESSUNG: LANGZEITMESSKAMPAGNE (01.06. – 31.08.2022)

#### 6.1.1.1 AUSWERTUNG VON KLIMAKENNTAGEN IM UNTERSUCHTEN ZEITRAUM (01.06.2022 – 31.08.2022)

Eine etablierte Methode zur Beschreibung der klimatischen Situation an verschiedenen Standorten ist die Verwendung von klimatologischen Kenntagen, kurz „Klimakenntage“ genannt. Dies sind beispielsweise die Anzahl von Hitzetagen, Sommertagen oder Tropennächten innerhalb eines zu benennenden Zeitraumes – in diesem Fall für den Zeitraum der Messkampagne. Die Bestimmung dieser Kenntage kann entweder anhand von Schwellenwerten wie bspw. der Tageshöchsttemperatur ( $T_{max} \geq 25 \text{ °C}$  für Sommertage (schwellenwertbasiert) oder anhand von statistischen Maßen wie bspw. dem 95. Perzentil der statistischen Verteilung erfolgen (perzentilbasiert; s. REKLIES-DE (HÜBENER ET AL., 2017)). Für den Vergleich der humanbioklimatischen Belastung an den temporären Klimamessstationen wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet (s. Tabelle 22).

Tabelle 22: Bezeichnung und Kriterien für klimatologische Kenntage

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

#### 6.1.1.1.1 HEIßE TAGE

Abbildung 49 zeigt für die vier temporären Klimamessstationen im Stadtgebiet Hanau und die DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark auf, an welchen Tagen im Zeitraum der Messkampagne die Tageshöchsttemperatur  $30 \text{ °C}$  erreicht oder überschritten hat und somit ein Heißer Tag vorliegt. Wie bereits die Beschreibung der Klimatologie Hessens für Juni 2022 vermuten (vgl. Kapitel 5.1.1.3) ließ, die einen kühlen Monatsbeginn bescheinigte, werden mit Ausnahme der urbanen Station größtenteils erst ab 11.06. Heiße Tage registriert. Insgesamt ist die Zahl Heißer Tage im untersuchten Zeitraum jedoch weit überdurchschnittlich, wobei an der urbanen Klimamessstation mit 53 Heißen Tagen die größte Zahl dieses Kenntages erreicht wurde. Die restlichen temporären Stationen liegen mit 49 (rural), 46 (Mainnähe) und 44 (Innerstädtische Ausgleichsfläche) Hitzetagen etwas unterhalb der Summe Heißer Tage der urbanen Station. Hierbei ist auffällig, dass diejenigen Stationen in der Nähe von Gewässern eine geringere Zahl heißer Tage vorweisen als die übrigen Stationen. Die DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark fällt im Vergleich zu den anderen Stationen bzgl. der Zahl Heißer Tage mit 24 deutlich ab – knapp 55 % weniger als an der urbanen Station gemessen. Hauptverantwortlich für die Unterschiede sind zum einen die ca. 8,5 km Entfernung zwischen der westlichsten der vier temporären Hanauer Stationen (rural) und der Referenz in Offenbach, die bereits verschiedenartige lokale Austauschprozesse bedingen könnten. Diese können auch durch die unterschiedlichen Stationshöhen bedingt sein, denn die Referenzstation liegt mit 113 m ü. NN ca. 10 m über den vier temporären Stationen. Zum anderen ist aber auch die Tatsache von Relevanz, dass die temporären Wetterstationen nicht nach WMO-Standards aufgebaut wurden, wie bei der DWD-Station der Fall. Der WMO-Standard für klimatologische Messungen schreibt für die Temperatur die Unterbringung



der Messgeräte in einen belüfteten Strahlungsschutz über einer kurzgeschnittenen, ebenen Wiesenfläche vor (World Meteorological Organization, 2018). Der Untergrund und das Umfeld in Hanau wurden absichtlich nicht WMO-konform gewählt, damit die Eigenschaften der realen Umgebung und damit auch die Urbane Wärmeinsel in den Messdaten wiederzufinden sind. Zusätzlich erfolgte die Belüftung der Sensorik lediglich mithilfe von Lamellen auf natürlichem Wege und nicht wie heutzutage häufig beim DWD angewandt durch elektrisch ventilierte Strahlungsschutzgehäuse, die geringere Tagesmaxima und damit weniger Heiße Tage zur Folge haben. Mit 24 Heißen Tagen an der DWD-Referenz Offenbach-Wetterpark wurden jedoch noch immer 18 Hitzetage mehr registriert als im langjährigen Mittel von 1971 bis 2000, das für die DWD-Station Kahl a. M. sieben jährliche Ereignisse dieser Art aufzeigt. Die von der Station in Mainnähe aus in ca. 6 km südöstlicher Entfernung liegende Station Kahl a. M. musste für den langjährigen Vergleich herangezogen werden, da für die DWD-Referenz Offenbach-Wetterpark erst seit 16.07.2005 Messungen zur Verfügung stehen.

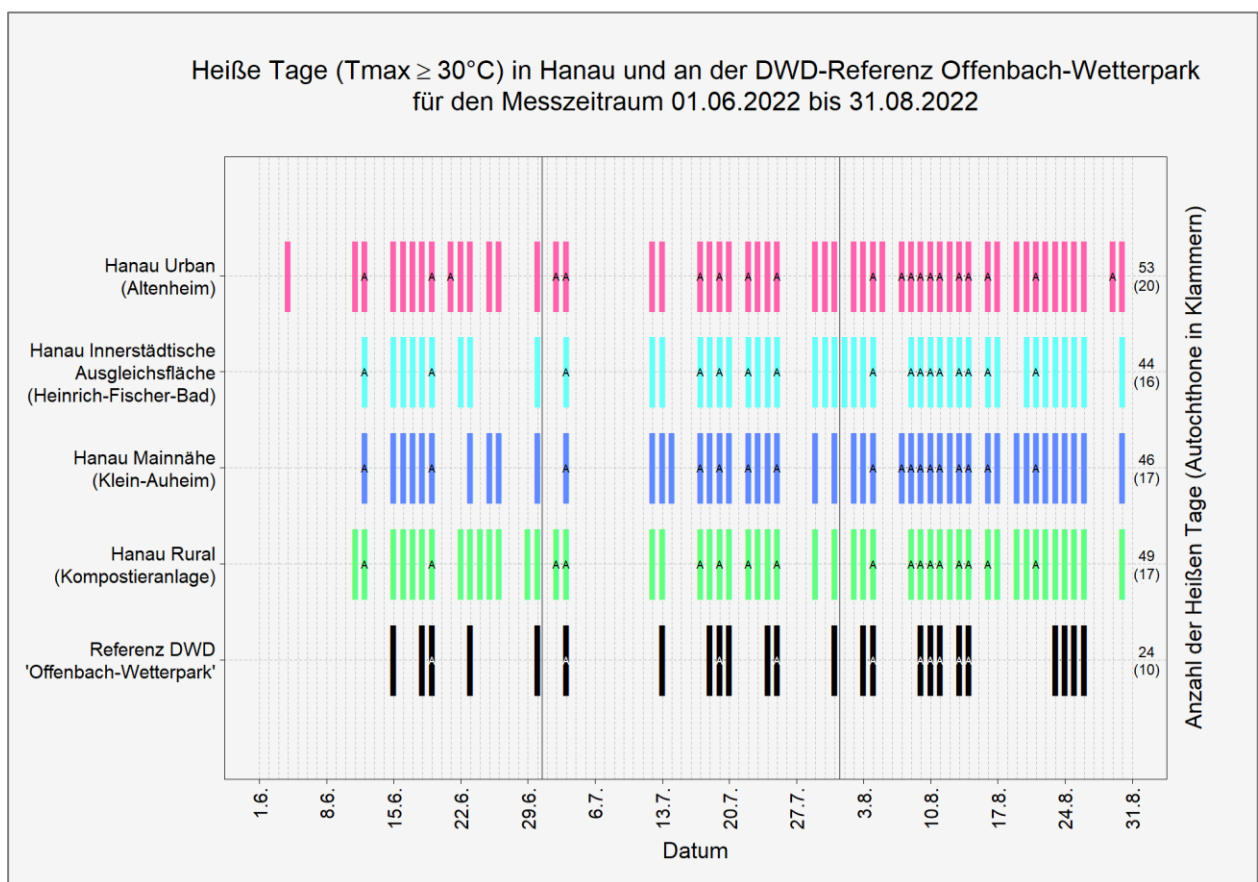


Abbildung 49: Heiße Tage bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 01.06.2022 bis 31.08.2022 an den vier temporären Messstationen Hanaus und an der Referenz-Station des DWD im Offenbach-Wetterpark.

Sobald ein Heißer Tag bei autochthonen Bedingungen nach AUGTER (1997) – bei Bedeckungsgraden  $\leq 4$  Achtel und Schwachwind bis 2,7 m/s – festgestellt wurde, erfolgte in Abbildung 49 eine Markierung durch ein „A“. Der Vergleich von Heißen Tagen bei autochthonen und nicht-autochthonen Bedingungen zeigt an den vier temporären Standorten und der DWD-Referenzstation einen jeweils ähnlichen Zusammenhang. Während an den vier über den Sommer 2022 installierten Hanauer Klimamessstation 35-38 % der aufgezählten Heißen Tage bei autochthonen Bedingungen aufgetreten sind, liegt dieser Anteil an der Referenzstation Offenbach-Wetterpark des DWD mit 42 % geringfügig darüber. In Bezug auf autochthone Wetterlagen und Heiße Tage konnte folglich ein großer Zusammenhang abgeleitet werden.



6.1.1.1.2 SOMMERTAGE

Tage, an denen im Untersuchungszeitraum 25 °C erreicht oder überschritten wurden, erhielten in Abbildung 50 einen Eintrag als Sommertag. Im Vergleich zu Heißen Tagen (vgl. Abbildung 49) fällt auf, dass Sommertage deutlich häufiger auftreten, da für diesen Kennwert ein um 5 K geringeres Tagesmaximum erreicht werden muss. Gleichzeitig ist festzustellen, dass die DWD-Referenz verglichen mit den temporären Messstationen erneut die geringste Zahl dieses Kenntages aufweist. Mit 72 registrierten Sommertagen ist diese Zahl um ca. 10 Tage niedriger als an den anderen Stationen, jedoch noch immer um 24 Tage höher als jene des langjährigen Mittels von 1971-2000 der Station Kahl a. Main. Dieses Indiz für einen extremen Sommer 2022 bestätigt auch der enorme Anteil von Sommertagen von insgesamt 78-89 % an allen untersuchten Tagen zwischen 01.06. und 31.08.2022 an den vier temporären Klimamessstationen in Hanau sowie der DWD-Referenz Offenbach-Wetterpark.

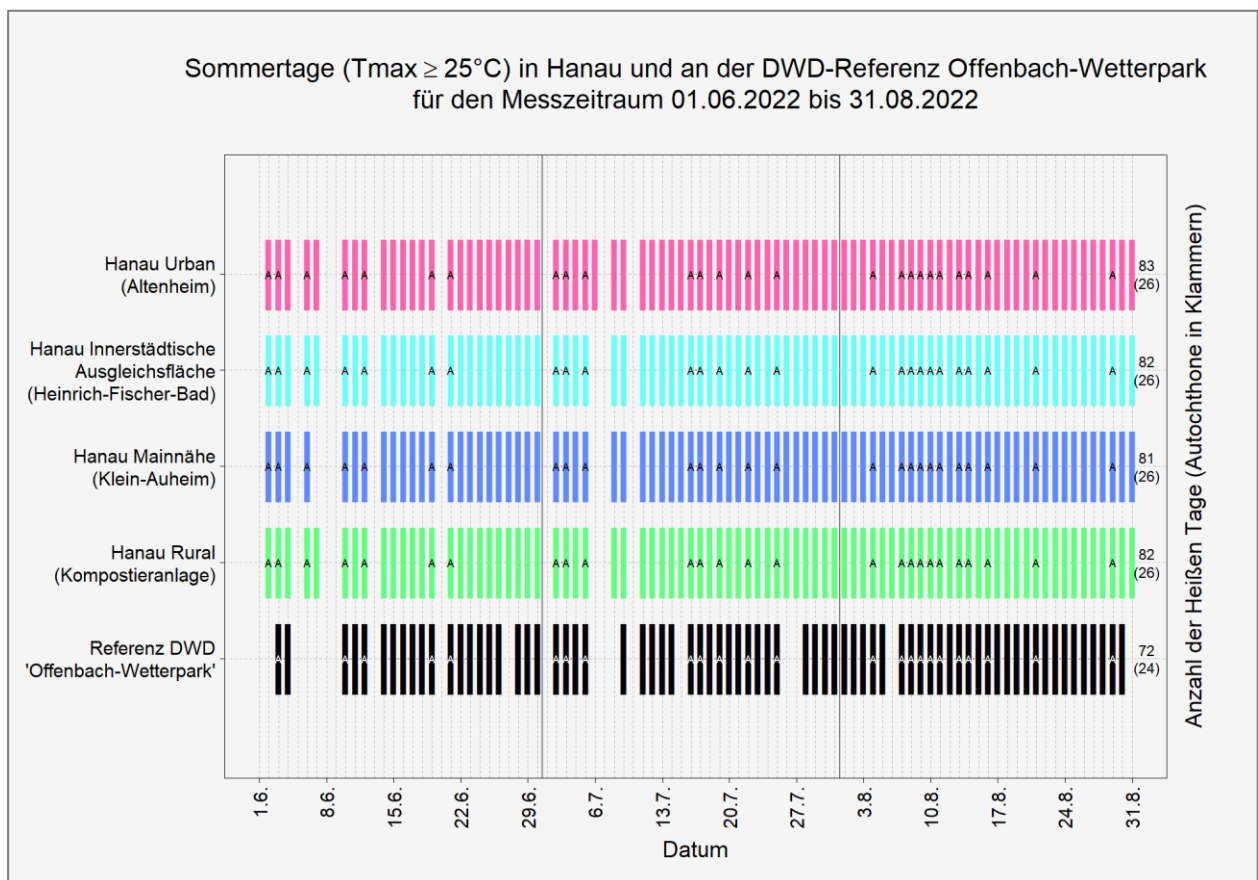


Abbildung 50: Sommertage bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 01.06.2022 bis 31.08.2022 an den vier temporären Messstationen Hanaus und an der Referenz-Station des DWD im Offenbach-Wetterpark.

Wie bereits bei autochthonen Bedingungen und Heißen Tagen vorgestellt, besteht auch zwischen Sommertagen und windschwachen Strahlungswetterlagen ein Zusammenhang. Ca. ein Drittel der registrierten Sommertage wurden an den fünf betrachteten Stationen während einer autochthonen Wetterlage aufgezeichnet.



6.1.1.1.3 TROPENNÄCHTE

Abbildung 51 zeigt für die vier temporären Klimamessstationen Hanaus und die DWD-Referenz Offenbach-Wetterpark all jene Tage im untersuchten Zeitraum, an denen die Tagesminimumtemperatur 20 °C nicht unterschritt und folglich eine Tropennacht vorlag. Auch die Zahl der Tropennächte zeigte sich im Vergleich zur langjährigen Klimareferenz weit überdurchschnittlich, die für den Zeitraum 1971-2000 in Kahl a. M. lediglich maximal eine einzige Tropennacht pro Jahr aufzeigt. Für die fünf ausgewerteten Klimamessstationen werden hingegen im Mittel 4,8 Tropennächte erreicht. Während die ländlich geprägten bzw. weniger versiegelten Stationen 2 (rurale Station), 3 (Heinrich-Fischer-Bad), 4 (DWD-Referenz Offenbach-Wetterpark) und 5 (Mainnähe) Tropennächte aufweisen, übertrifft die urbane Station die restlichen Standorte mit 10 registrierten Tropennächte bei weitem. Dies ist dadurch zu erklären, dass aufgrund des hohen Versiegelungsgrads und der dichteren und höheren Bebauung im urbanen Raum deutlich mehr Energie im Boden und den Gebäuden gespeichert werden kann. Diese wird im Verlaufe der Nacht zwar allmählich in Form von langwelliger Wärmestrahlung zurück an die Atmosphäre gegeben – bei tags zuvor auftretenden Sommer- oder gar Heißen Tagen ist die Menge der in das Material eingetragenen Energie jedoch so hoch, dass bis zum Sonnenaufgang noch immer nicht alle Oberflächen ausgekühlt sind. Dieser Umstand bedingt hohe Tagesminima der Temperatur, die sich wiederum für Tropennächte verantwortlich zeigen. Im Sommer 2022 wurden in Hanau die meisten Tropennächte im August registriert.

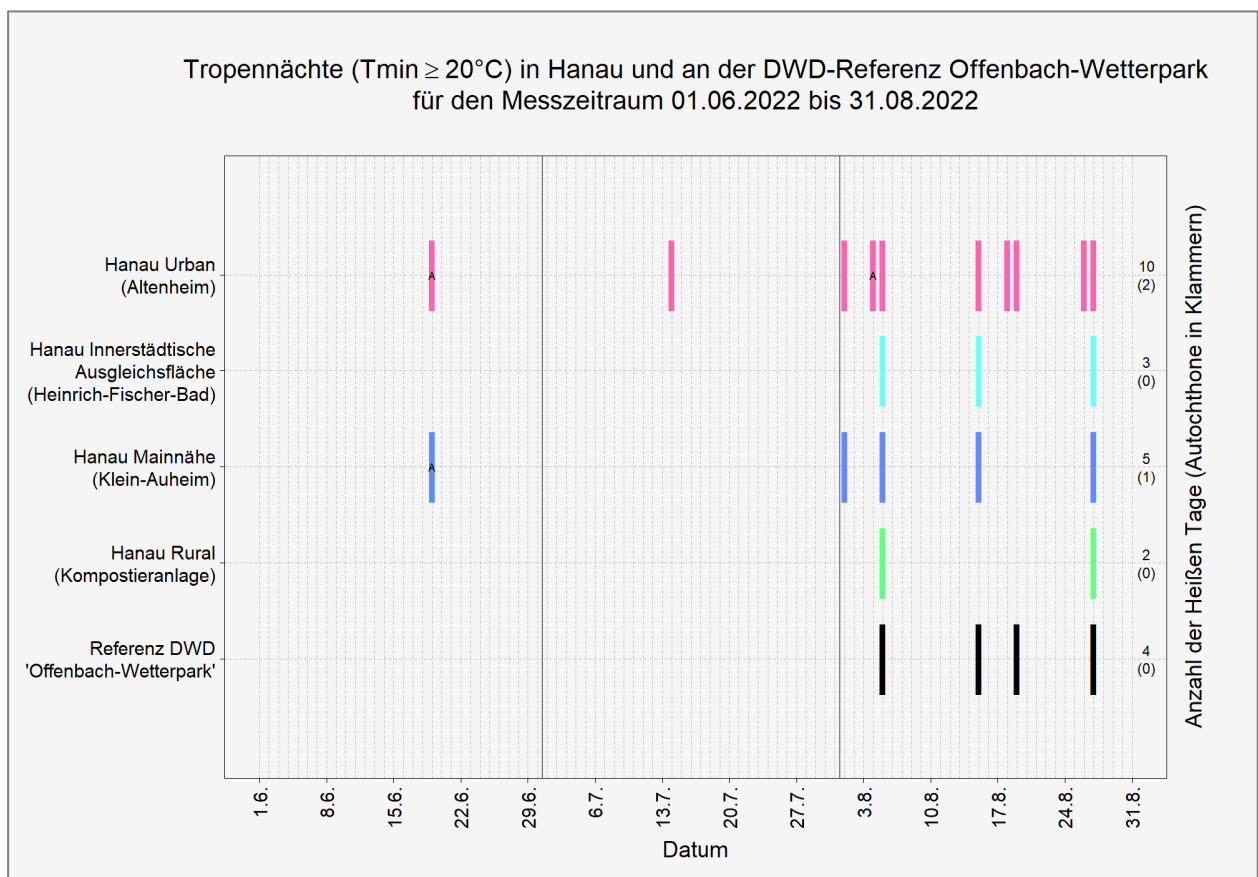


Abbildung 51: Tropennächte bei autochthonen (A) und nicht-autochthonen Wettersituationen im Messzeitraum vom 01.06.2022 bis 31.08.2022 an den vier temporären Messstationen Hanaus und an der Referenz-Station des DWD im Offenbach-Wetterpark.

Anders als bei Sommer- oder Heißen Tagen ist der Zusammenhang von Tropennächten und autochthonen Strahlungswetterlagen eher gering. Während an der urbanen Station und jener in Mainnähe noch 20 % der



Tropennächte zu autochthonen Wetterlagen stattfanden, besteht an den übrigen Standorten keinerlei Zusammenhang zwischen dem Kenntag und einer autochthonen Nacht. Die besten Voraussetzungen für eine Tropennacht sind zwar bei einer tagsüber wolkenarmen Witterung festzustellen, in der Folgenacht sollte nach Sonnenuntergang jedoch eher ein hoher Bedeckungsgrad vorliegen. Eine Wolkendecke vermindert die nächtliche Ausstrahlung und führt dazu, dass die Temperaturen im Siedlungsbereich auf einem hohen Niveau verbleiben. Tropennächte sind daher mit großem nächtlichen Hitzestress und einem geringen Schlafkomfort für die Bevölkerung verbunden.

### 6.1.1.2 AUSWERTUNG DOMINIERENDER WINDRICHTUNGEN IM UNTERSUCHTEN ZEITRAUM (01.06.2022 – 31.08.2022)

Im Rahmen dieses Kapitels wurden die während der sommerlichen Messkampagne vom 01.06.-31.08.2022 aufgezeichneten Hauptwindrichtungen an den vier im Hanauer Stadtgebiet installierten Klimamessstationen sowie an der DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark ausgewertet. Bei der Betrachtung von Abbildung 52, die eine Auswertung aller Stunden des untersuchten Zeitraumes aufzeigt, fällt auf, dass sich die Hauptwindrichtungen aller Stationen – mit Ausnahme der urbanen Station – gleichen und vorrangig Nordwind aufzeigen.

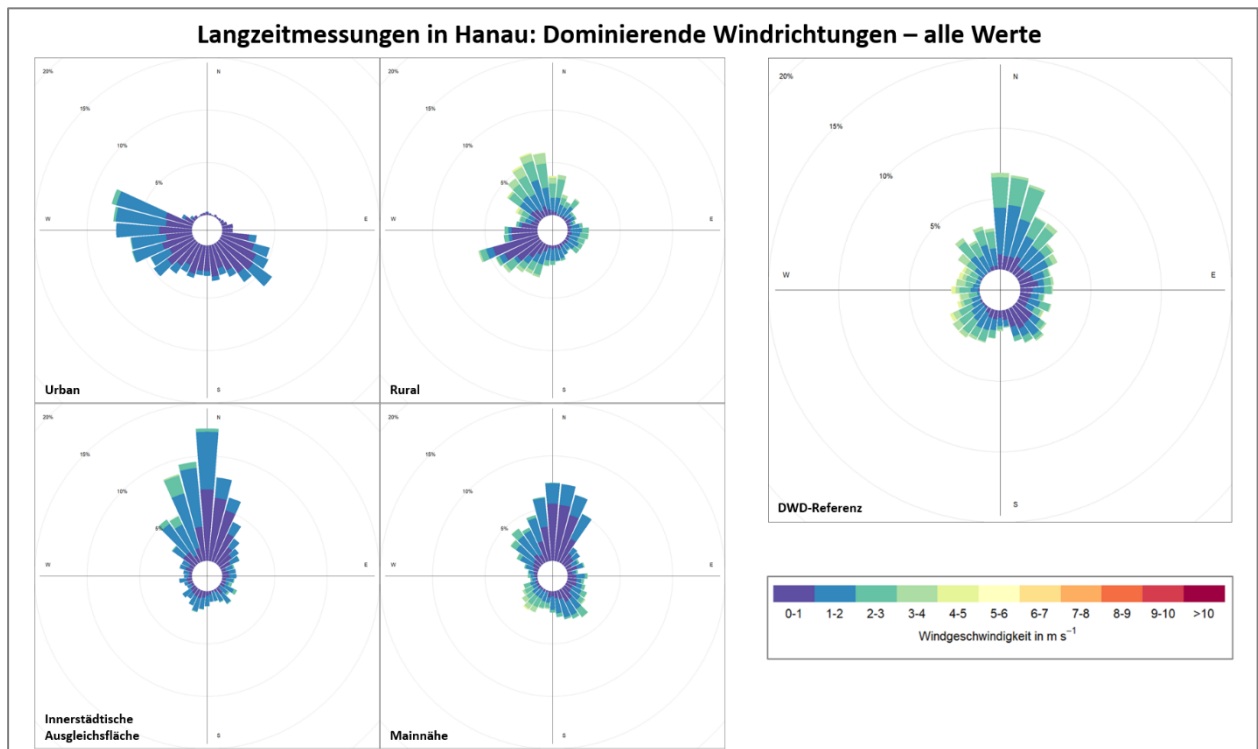


Abbildung 52: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2022 – 31.08.2022 für alle Stunden an der DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark (rechts) und an den vier temporären Klimamessstationen in Hanau (links). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.

An den Stationen der innerstädtischen Ausgleichsfläche mit 12,6 % und der in Mainnähe mit 7,4 % wird der Sektor  $0^\circ$  am häufigsten registriert; mit 6,2 % bei  $340^\circ$  ist der häufigste Sektor der ruralen Station ebenfalls ein nördlicher. Der rurale Standort weist jedoch auch überdurchschnittlich häufig Südwestwinde auf, was am dritthäufigsten Sektor von  $250^\circ$  mit 5,9 % auffällt. Die beiden Hauptwindrichtungen am ruralen Standort können auch orografisch bedingt sein, da die höchsten Erhebungen mit 116 m ü. NHN ca. 700 m südwestlich und ca. 127 m ü. NHN 1,3 km in nördlicher Richtung zu finden sind (vgl. Rurale Station auf 104 m ü.





NHN). Auch an den Stationen „Innerstädtischen Ausgleichsfläche“ und in „Mainnähe“ ist ein nicht unwesentlicher Einfluss des Reliefs zu vermuten, da nördlich von ersterer die Geländehöhe um ca. 14 Höhenmeter auf 1,6 km zunimmt und bei letzterer das Gelände gen Norden auf kleinstem Raum um 4 Höhenmeter ansteigt.

Bei der urbanen Station weht der Wind, bedingt durch die Rauigkeit des nordöstlich angrenzenden Gebäudes des Altenhilfezentrums, nur selten aus nördlichen Himmelsrichtungen. In den Sektoren von 310° bis 90° beträgt die Häufigkeit jeweils im Durchschnitt nur 0,35 %. Die häufigste Windrichtung ist in der Innenstadtstation hingegen mit 8 % eine west-nordwestliche. Auch ein südwestlicher Einfluss ist an vierter Stelle der Häufigkeiten zu 6,2 % aus 130° auszumachen. Auffällig ist zudem, dass der mittlere Wind an der urbanen Station mit einem Wert von 0,7 m/s und an der Station der innerstädtischen Ausgleichsfläche mit 1,1 m/s im Vergleich zu den anderen Standorten die schwächsten Windgeschwindigkeiten aufzeigt (vgl. Rural: 1,6 m/s; Mainnähe: 1,4 m/s; DWD-Referenz: 1,9 m/s). Dies liegt an der größeren Zahl von Gebäuden und Bäumen an den zentrumsnahen Standorten im Vergleich zu den ländlich geprägten Umgebungen, welche Strömungshindernisse darstellen. Auch im Maximum werden an den urbanen Standorten geringere Werte gemessen (urban: 2,6 m/s; innerstädtische Ausgleichsfläche: 2,9 m/s). Die Windspitzen im Umland sind mit 4,3 m/s in Mainnähe, 4,8 m/s an der ruralen Station und bis zu 5,6 m/s gleich höher.

In Abbildung 53 sind die dominierenden Windrichtungen für die Tagstunden von 07:00 Uhr MESZ bis 19:00 Uhr MESZ aufgetragen. Da am Tage infolge der solaren Einstrahlung auf die Oberflächen Turbulenzeffekte auftreten, die mit stärkeren Windböen assoziiert sind, steigen allgemein die Mittelwinde im Vergleich zur Auswertung aller Stundenwerte des Windes an – an den innerstädtischen Stationen mit Zunahmen um 0,1 m/s (Ausgleichsfläche) bzw. 0,2 m/s (urbane Station) etwas geringer als an den ländlich geprägten Stationen mit Zunahmen um 0,2 m/s (Mainnähe), 0,3 m/s (rurale Station) und 0,4 m/s (DWD-Referenz).

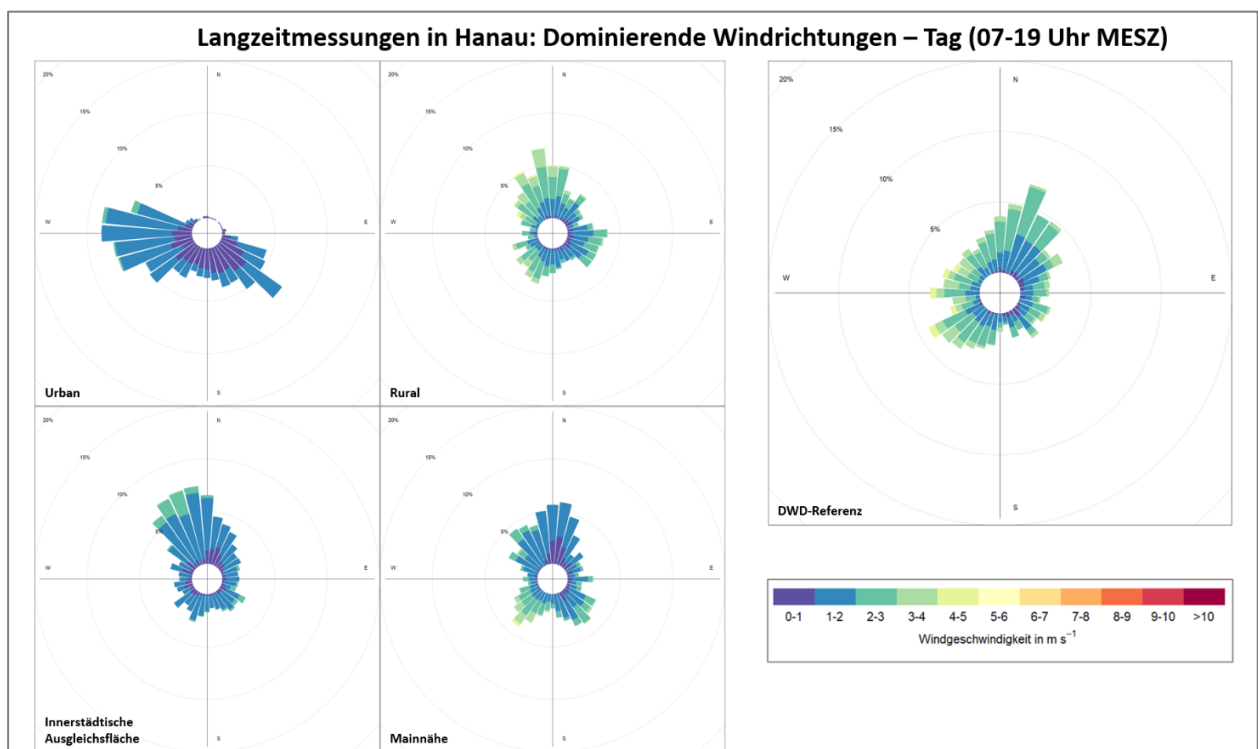


Abbildung 53: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2022 – 31.08.2022 für alle Tagstunden (07:00-19:00 Uhr MESZ) an der DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark (rechts) und an den vier temporären Klimamessstationen in Hanau (links). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.



Turbulente Windsysteme zeichnen sich durch ihre eher zufällige Windrichtung aus, was bereits optisch durch die stärkere Auffächerung in den Windrosen im Vergleich zur Betrachtung aller Stunden erkennbar wird. In der Innenstadt bleiben die Hauptwindrichtungen dagegen vergleichsweise konstant, wobei an der urbanen Station zu jeweils 8,6 % die Sektoren 270° und 280° aller Tageswerte einen Westwind beschreiben. An Station auf der innerstädtischen Ausgleichsfläche bleibt die Hauptwindrichtung zu 7,4 % aus 350° weiterhin eine Nördliche. Auch die orografisch bedingten Winde an den ländlicher geprägten Stationen aus überwiegend Nord bleiben weitgehend bestehen, weshalb diese auch am Tage als Hauptwindrichtungen hervortreten (Rural: 6,7 % aus 350°; Mainnähe: 5,9 % aus 10°; DWD-Referenz: 6,4 % aus 20°).

Abbildung 54 zeigt die vorherrschende Windrichtung innerhalb der Nachtstunden von 19:00-07:00 Uhr MESZ des Untersuchungszeitraums. Da hierdurch die am Tage auftretenden Turbulenzeffekte eliminiert werden, sinken allgemein die Windgeschwindigkeiten, wobei die DWD-Station Offenbach-Wetterpark und die rurale Station mit 1,6 m/s bzw. 1,2 m/s die höchsten mittleren Windgeschwindigkeiten aufzeigen. Dagegen wurden an den städtischen Stationen „innerstädtische Ausgleichsfläche“ mit 0,8 m/s und der Station am Altenpflegeheim mit 0,5 m/s nochmals deutlich geringere Mittelwerte des Windes registriert, während die ruhigkeitsärmere Station in Mainnähe mit im Mittel 1,0 m/s wieder etwas höhere Windwerte aufweist.

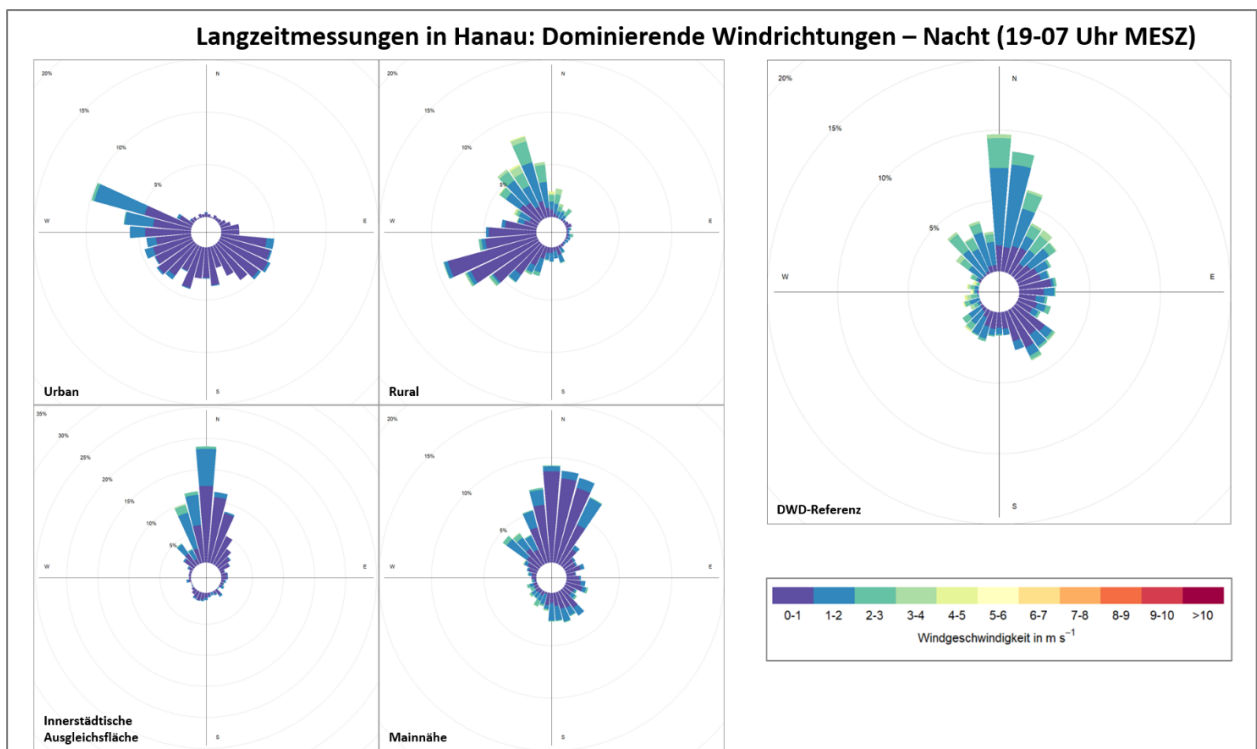


Abbildung 54: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2022 – 31.08.2022 für alle Nachtstunden (19:00-07:00 Uhr MESZ) an der DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark (rechts) und an den vier temporären Klimamessstationen in Hanau (links). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.

Durch die in der Nacht ausbleibenden turbulenten Winde treten die Hauptwindrichtungen an allen Stationen deutlicher hervor. So liegt bei der ländlich geprägten DWD-Station nun schon zu 9,6 % ein nördliches Richtungsmaximum aus 0° vor (vgl. 6,8 % für alle Stunden), an der Station in Mainnähe zu 9,2 % aus 0° (vgl. 7,4 % für alle Stunden) und zu 8,1 % aus 340° ruralen Station vor (vgl. 6,2 % für alle Stunden). An der ruralen Station hat sich in der Nacht jedoch ein weiteres, noch stärkeres Richtungsmaximum zu 9,2 % aus 250° Südwest etabliert (vgl. 5,9 % für alle Stunden). Auch an den Innenstadtstationen verstärkten sich die bereits zu allen Stunden des untersuchten Zeitraumes festgestellten Hauptwindrichtungen bei ausschließlicher Betrachtung der Nachtsituation. Während der häufigste Sektor an der urbanen Station zu 9,9 % bei 290° ein



nordwestlicher ist (vgl. 8 % für alle Stunden), wurde die prozentuale Zahl des 0°-Sektors an der Station der innerstädtischen Ausgleichsfläche auf 18,7 % gesteigert (vgl. 12,6 % für alle Stunden).

Da in der Modellsimulation eine nächtliche autochthone Wettersituation vorlag, um übergeordnete Windsysteme weitgehend auszuschließen, werden in Abbildung 55 ebenfalls nur autochthone Nachtstunden im sommerlichen Messzeitraum untersucht. Hierbei ist deutlich zu erkennen, dass die herannahenden Winde der übergeordneten Strömungen an allen drei Stationen weitgehend verschwinden und sich im Vergleich zur Abbildung der Nachtstunden nochmals klarere Hauptwindrichtungen zeigen (vgl. Abbildung 54). Zu autochthonen Wetterlagen entstehen Windsysteme weitgehend aufgrund lokaler thermischer Unterschiede zwischen Stadt und Umland, sogenannte Flurwinde, oder durch Reliefunterschiede, z.B. als Hangabwinde. An der DWD-Referenzstation dominieren zu diesen Wetterlagen in der Nacht vor allem nördliche Winde, wobei das bereits zuvor festgestellte nördliche Richtungsmaximum auf 0° nun bereits zu 10,2 % aller autochthonen Nachtstunden auftritt. In ihrer Ausprägung ähnelt die Windrose der Referenz am ehesten jener der Station in Mainnähe, die ihr Richtungsmaximum ebenfalls zu 10 % im 0°-Sektor aufweist. Zwar zeigt die rurale Station noch immer ein geringes sekundäres Richtungsmaximum aus nördlichen Richtungen an (Sektoren 320° und 340° zu 6,9 % bzw. 6,2 % der Werte), in autochthonen Nachtstunden zeigt sich jedoch viel deutlicher das primäre Richtungsmaximum aus Südwest, mit Häufigkeiten von 14,2 % aus 250°. Dies passt einerseits sehr gut zum gen Südwesten ansteigenden Gelände, andererseits zum nordöstlich gelegenen Siedlungsbereich, der durch seine im Vergleich zum Umland wärmeren Oberflächen thermische Winde induziert und eine Sogwirkung entfaltet.

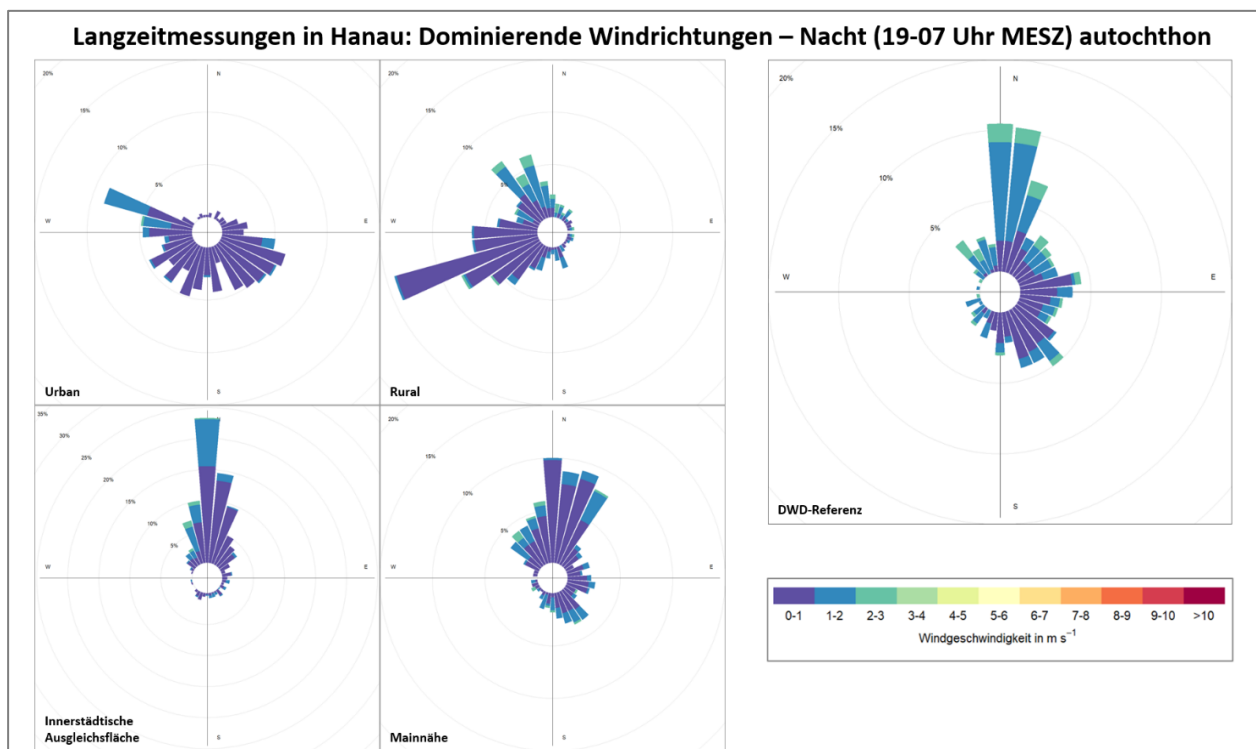


Abbildung 55: Vorherrschender Wind (Geschwindigkeit und Richtung) im Messzeitraum vom 01.06.2022 – 31.08.2022 für alle autochthonen Nachtstunden (19:00-07:00 Uhr MESZ) an der DWD-Referenzstation Offenbach-Wetterpark (rechts) und an den vier temporären Klimamessstationen in Hanau (links). Die konzentrischen Kreise zeigen von innen nach außen die Auftrittshäufigkeit in Prozentschritten an.

Die hohe Rauigkeit im Innenstadtbereich führt dazu, dass sich die Windrichtungen hier im Vergleich zu den übrigen Untersuchungen nur wenig ändern. An der urbanen Station ist die Hauptwindrichtung unvermindert eine nordwestliche, bei ca. 8,7 % auftretender Richtungen aus 290°. Es herrscht jedoch weiterhin ein recht großer Sektor an sekundären Strömungen überall dort, wo weniger Gebäude in der Nähe stehen und



eine Anströmung folglich erleichtert ist. So wehen jeweils durchschnittlich 4,2 % der Winde aus den Richtungssektoren von 100° bis 280°. An der Station der innerstädtischen Ausgleichsfläche, dem Heinrich-Fischer-Bad, stärkt sich während autochthoner Nächte die bereits zuvor dominierende Nordrichtung weiter. Im 0°-Sektor treten während nächtlicher Strahlungswetterlagen 23,3 % aller Werte auf (vgl. 18,7 % während aller Nachtstunden).

Allgemein betragen gemäß der Definition der autochthonen Wetterlage nach AUGTER (1997) die Windgeschwindigkeiten an allen Stationen  $\leq 2,7$  m/s, wobei an den ländlich geprägten Stationen Offenbach-Wetterspark mit im Mittel 1,2 m/s, der ruralen Klimamessstation Hanau mit 1,1 m/s und an der Station in Mainnähe mit 0,8 m/s die höchsten Werte erreicht werden. Im städtischen Bereich mit höheren Rauigkeiten registrierten die Station an der innerstädtischen Ausgleichsfläche mit 0,7 m/s und die urbane Station am Altenpflegezentrum mit 0,4 m/s hingegen geringere mittlere Windgeschwindigkeiten. Eine Übersicht aller Windgeschwindigkeiten und Windrichtungen für alle fünf Stationen zu den verschiedenen Auswertezit-räumen liefern abschließend noch einmal die Tabellen A 1 bis A 5 im Anhang.

In Abbildung 56 ist die modellierte nächtliche Windrichtung und -geschwindigkeit auf 10 m ü. Gr. im Umfeld der vier temporären Klimamessstationen im Hanauer Stadtgebiet für 04:00 Uhr nachts dargestellt. Diese Abbildung bietet die Möglichkeit eines Vergleichs mit den Messungen der Sommerkampagne in Hanau während autochthoner Nachtstunden, wenngleich dieser aufgrund der idealisierten Wettersituation im Modell nur in guter Näherung erfolgen kann. Analog zur Messung zeigen sich aufgrund von Rauigkeitsunterschieden auch in der Modellierung die Windgeschwindigkeiten an den Innenstadtstationen „Urban“ und „Innerstädtische Ausgleichsfläche“ geringer (bis 0,1 m/s) als an den beiden ländlich geprägten Stationen „Rural“ und „Mainnähe“ (ca. 0,6 m/s bzw. ca. 0,4 m/s).

Auch bei der modellierten Windrichtung sind große Übereinstimmungen zur Messung festzustellen. Die rurale Station, an deren Standort 232° modelliert wurden, passt sehr gut zu den vermessenen Sektoren 220° bis 270°, in denen zusammen 39,1 % aller aufgezeichneten Windrichtungen während autochthoner Nachtstunden registriert wurden (Maximum bei 250° mit 14,2 %). Auch die nördliche Windrichtung an der innerstädtischen Ausgleichsfläche wurde gut getroffen. Auch wenn diese in der Abbildung aufgrund zu geringer Windgeschwindigkeiten nicht durch eine Pfeilsignatur hinterlegt wurde, passt sie mit einer vom Modell ermittelten Nordrichtung bei 26° sehr gut zu Messung, welche in den nördlichen Sektoren von 340° bis 30° bereits 69,7 % aller gemessenen Windrichtungen am Standort abdeckt (Maximum bei 0° mit 23,3 %). Auf der rasterbasierten Abbildung des Modells ist bereits der von Norden herannahende und südlich der Station gen Süden ausströmende Wind erkennbar, der jedoch im direkten Umfeld der Klimamessstation an Geschwindigkeit verliert. Dies ist durch die nördlich der Station gelegenen Baumreihe zu erklären, die überströmt wird und nachfolgend ein Absinken des Windes nach dem Hindernis bedingt.

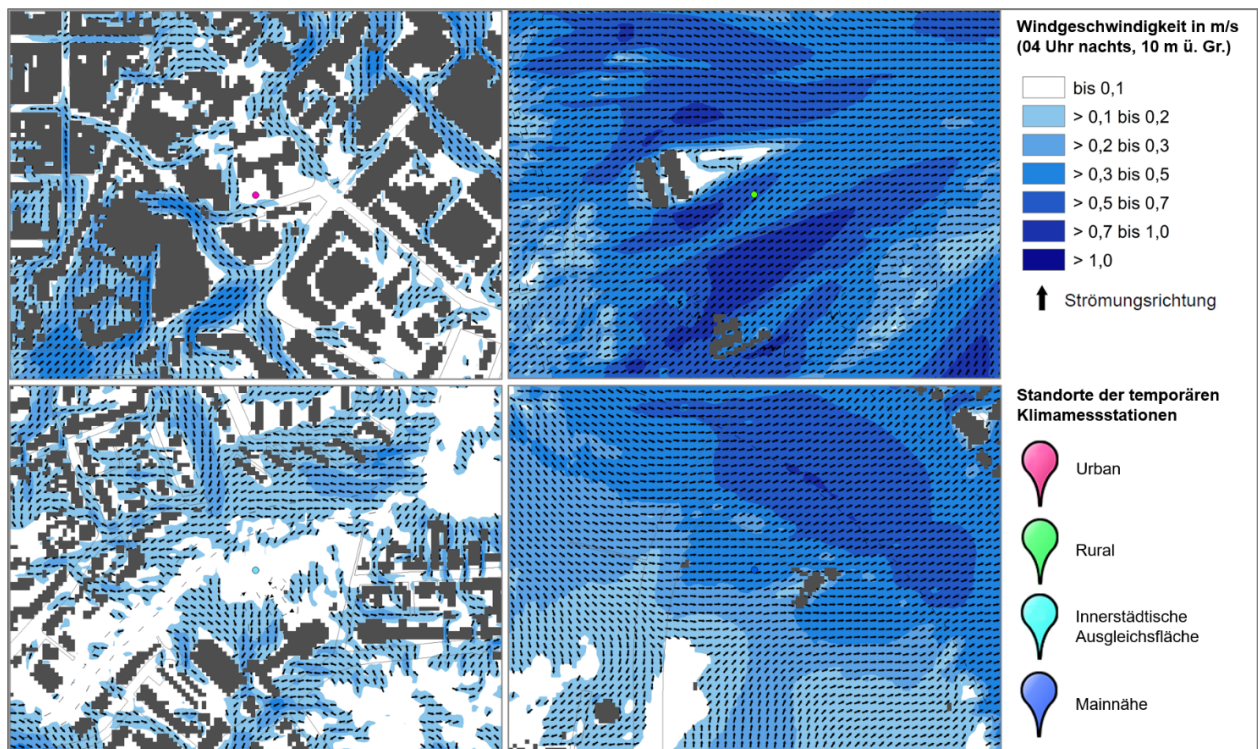


Abbildung 56: Modellierte nächtliche Windrichtung und -geschwindigkeit um 04:00 Uhr im Umfeld der urbanen und ruralen Messstandort (oben links und rechts) sowie an den Standorten der innerstädtischen Ausgleichsfläche und in Mainnähe (unten links und rechts) zu einer autochthonen Wettersituation. Die Strömungspfeile wurden auf 10 m horizontale Auflösung aggregiert und in einheitlicher Größe dargestellt.

Noch immer gut sind die Übereinstimmungen zwischen Modell und Messung an der urbanen Station. Zwar ist im Modell mit 71° ein eher östlicher Wind angezeigt, der im 70°-Sektor der Messung nur zu 1,6 % angetroffen wurde, die modellbasierte Vorhersage ist bei raugkeitsbedingten Schwachwinden jedoch auf wenige Meter genau sehr schwierig. Zieht man den Vergleichsradius um die Klimamessstation etwas größer auf, sind ca. 10 m gen Südosten bereits Winde aus 110° ost-südöstlicher Richtung festzustellen, die mit 6,3 % immerhin den zweithäufigsten gemessenen Windsektor darstellen.

Weniger gut stimmen Modell und Messung am Standort in Mainnähe überein, wo im Modell ein konstanter Westwind aus 257° simuliert wurde. Aus den umliegenden (süd-)westlichen Sektoren zwischen 240° und 280° wehte der Wind in den Messungen jedoch nur zu 3,5 %, vielmehr war hier Nordwind zu 9,2 % aus 20° vorherrschend. In der Modellierung ist der Einfluss der Gewässer auf die Strömung erheblich, was einen Erklärungsansatz für die Unterschiede zwischen Simulation und Messung liefert. Es könnte sein, dass sich während des Extremsommers 2022 mit der Vielzahl an Sommer- und heißen Tagen, verglichen mit der mittleren Sommersituation im Modell das Land gegenüber dem Gewässer in der Nacht zu warm zeigte. Infolgedessen würde eine thermische Ausgleichsströmung vom kühleren Gewässer hin zu den wärmeren Ackerflächen Klein-Auheims entstehen, wie in den Messungen aufgezeichnet. Ein im Modell wärmeres Gewässer erzeugt hingegen thermische Winde in umgekehrter Richtung, die durch die Sogwirkung des warmen Industriegebietes an der Josef-Bautz-Straße am gegenüberliegenden Mainufer noch verstärkt werden würden und die modellierte Situation erklärt.

### 6.1.1.3 AUSWERTUNG EINER EXEMPLARISCHEN HITZEPERIODE VOM 17.07.2022 BIS 20.07.2022

Die Auswertung einer exemplarischen Hitzeperiode ermöglicht die Analyse von Unterschieden im Tagesgang der Messgrößen an den verschiedenen Messstandorten Hanaus. Im ohnehin extrem warmen Monat Juli 2022 wurde die besonders heiße und niederschlagsfreie Phase vom 17. bis 20.07. gewählt, die sich wie an der ca. 8,5 km entfernten DWD-Station Offenbach-Wetterpark gemessen zusätzlich durch überwiegend





hohe Sonnenscheindauern zwischen 14,4 und 14,7 Sonnenstunden vom 17.-19.07. und immerhin 12,4 Sonnenstunden am 20.07. auszeichnete (Abbildung 57). Das tagsüber teils wolkige Erscheinungsbild mit oftmals mehr als 6 Achtern Bedeckungsgrad relativiert sich jedoch durch die beobachteten Wolkenarten<sup>10</sup>, welche überwiegend aus strahlungsdurchlässiger Cirrusbewölkung (Schleierwolken) und nur geringem Anteil aus mittelhohem Altocumulus und Altostratus (mittelhohe Schichtwolken) und am 20.07. auch zum Teil aus tiefem Cumulus (Schönwetterwolken) bestand. In der Nacht herrschten ebenfalls vornehmlich geringe Bedeckungsgrade vor, die die nächtliche Ausstrahlung im Untersuchungszeitraum begünstigten.

Die Windgeschwindigkeiten verblieben an den vier Stationen und der DWD-Referenz Offenbach-Wetterpark auf einem schwachen bis mäßigen Niveau zwischen weniger als 1 bis maximal ca. 4,5 m/s am Tage und nochmals geringeren Werten in der Nacht (Abbildung 58). Dabei zeigten sich die Windgeschwindigkeiten im rauigkeitsarmen Umland (DWD, rural, Mainnähe) allgemein wieder höher als in der Stadt, teils um bis zu 3 m/s (z.B. 20.07. um 22:00 Uhr im Vergleich der DWD-Referenz und der innerstädtischen Ausgleichsfläche). Der Wind wehte an den betrachteten Stationen während der ausgewerteten Hitzeperiode aus unterschiedlichen Richtungen am Tage und in der Nacht, was ein Indiz für die Ausbildung thermisch induzierter Winde in der Nacht ist. Auffällig ist erneut, dass an der urbanen Station nahezu keine Nordwinde registriert wurden, was wiederum eng mit den vorherrschenden, nördlich gelegenen Gebäudestrukturen des Altenpflegeheims Bernhard Eberhard zusammenhängt.

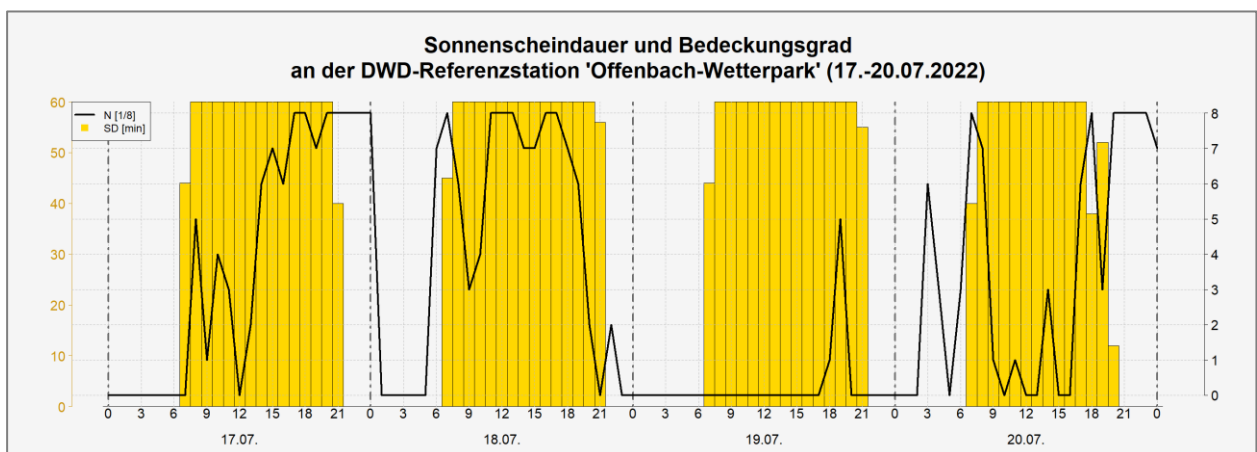


Abbildung 57: Sonnenscheindauer (SD) und Bedeckungsgrad (N) zur betrachteten Hitzeperiode vom 17.-20.07.2022, ermittelt an der DWD-Station Offenbach-Wetterpark.

<sup>10</sup> Da Augenbeobachtungen beim DWD fast nur noch an den Flughafenstationen durchgeführt werden, wurden die Wolkenbeobachtungsdaten der DWD-Station Frankfurt/Main hinzugezogen.



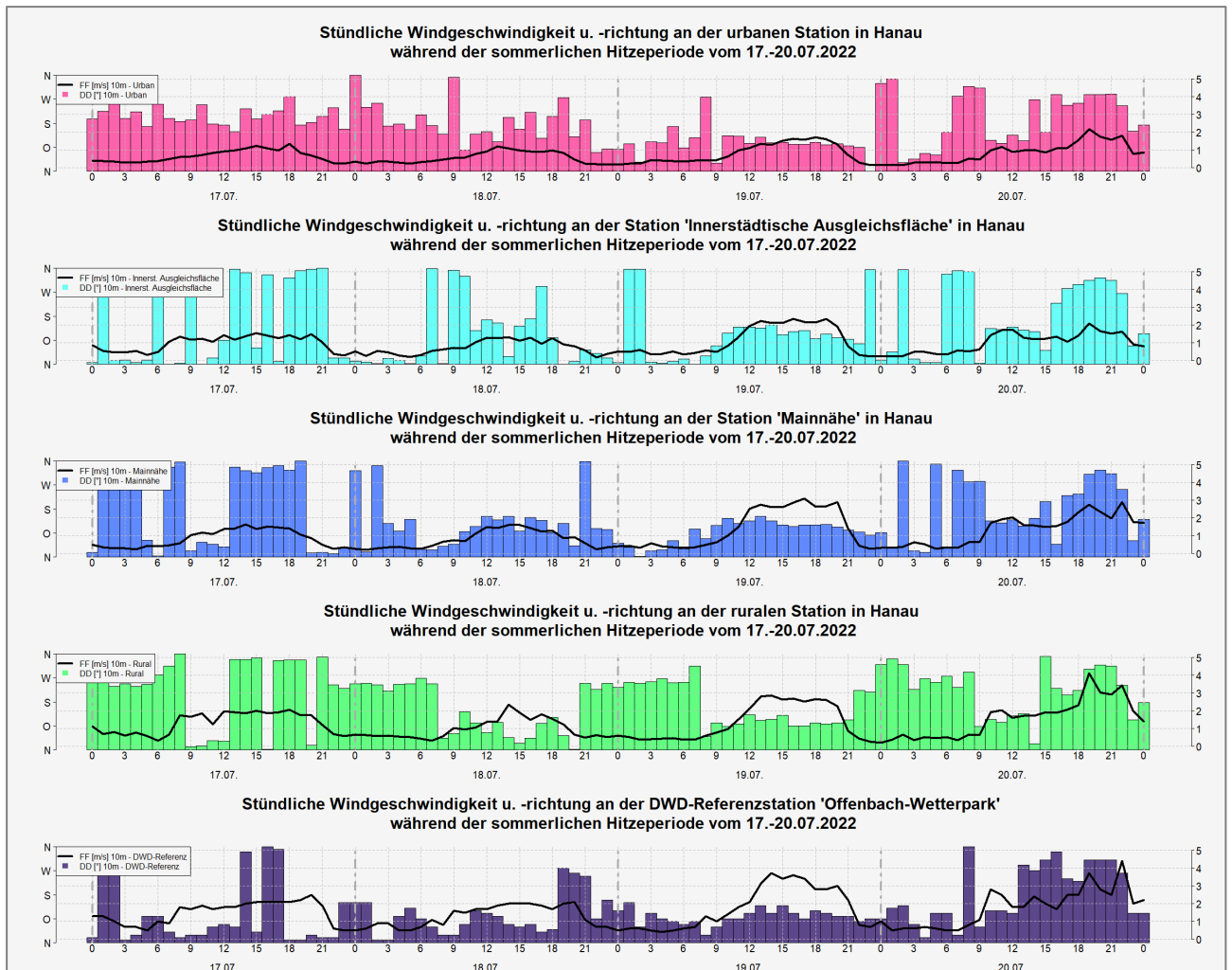


Abbildung 58: Gemessene stündliche Windgeschwindigkeiten (FF) und -richtungen (DD) auf 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode vom 17.-20.07.2022, ermittelt an den vier temporären Messstationen Hanaus und an der Referenz-Station des DWD Offenbach-Wetterpark.

Abbildung 59 zeigt den Tagesgang der mittleren Temperatur für die vier temporären Messstandorte Hanau und den DWD-Referenzstandort während der gewählten heißen Wetterperiode. Dadurch, dass tagsüber jeden Tag mehr Wärme in die Böden und Fassaden eingetragen wird als nachts infolge der nächtlichen Ausstrahlung wieder abgeführt werden kann, wachsen die Temperaturamplituden vom 17.-20.07. an allen Standorten täglich an. Weiterhin wird ersichtlich, dass die Innenstadttemperaturen nahezu jederzeit höher sind als jene im Umland, wobei dieser Effekt am Tage mit einer Temperaturdifferenz von unter 1 K weniger stark zur Geltung kommt als in der Nacht, wo zu manchen Zeiten Unterschiede von bis zu 5,5 K zwischen urbaner und ruraler Station registriert werden (z.B. 18.07. um 06:00 Uhr). Dieser nächtliche Temperaturunterschied zwischen Stadt und Umland beschreibt den Wärmeinseleffekt. Die Referenzkurve des DWD Offenbach-Wetterpark ist im gesamten Messzeitraum tagsüber kühler als die Temperaturmessungen in Hanau, pendelt sich nachts dagegen ungefähr zwischen den beiden urban gelegenen Stationen und den beiden ländlich geprägten Stationen ein.

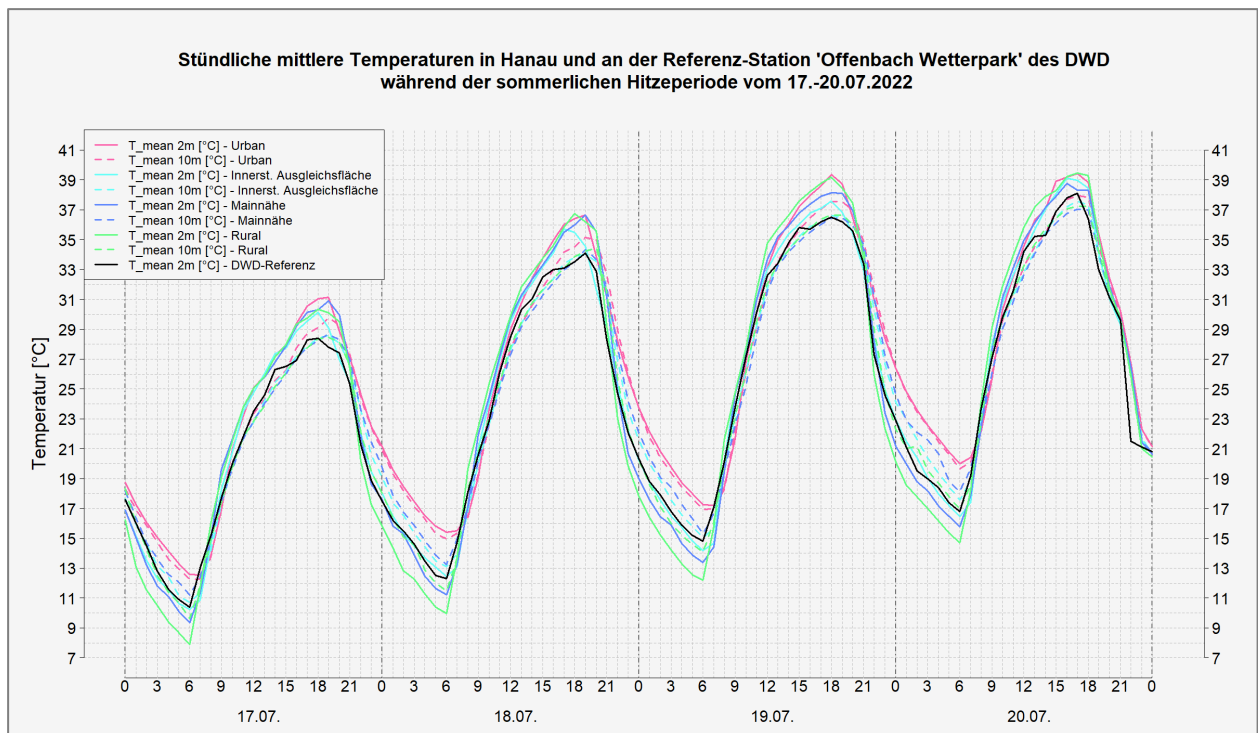


Abbildung 59: Gemessene stündliche Temperaturen auf 2 m und 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode vom 17.-20.07.2022, ermittelt an den vier temporären Messstationen Hanau und an der Referenz-Station des DWD Offenbach-Wetterpark.

Zum Sonnenaufgang gegen 06:00 Uhr MESZ erwärmen sich die Oberflächen in der Stadt und im Umland gleichermaßen stark, jedoch speichert die Vielzahl an dunklen asphaltierten oder betonierten Oberflächen in der Stadt die Energie der Sonne im Tagesverlauf deutlich besser im Material und gibt diese zusätzlich kontinuierlich an die Umgebung ab. Durch die vertikale städtische Bauweise ist die Zahl der Wärme emittierenden Flächen in der Innenstadt größer als im ländlichen Raum, wo wie beispielsweise an der Station an der Kompostieranlage oder an jener in Mainnähe lediglich vom Boden aus Wärme abgestrahlt wird. Neben dem Material ist auch die Farbe der Oberflächen von Belang: Helle Flächen reflektieren einfallende solare Strahlung und geben direkt einen großen Teil zurück an die Atmosphäre, während dunkle Flächen die kurzwellige Sonnenstrahlung absorbieren und so eine Speicherung im Material erleichtern. Die Gunstwirkung schattenspendender Bäume ist an der Station des Heinrich-Fischer-Bades zu beobachten, wo ab den frühen Abendstunden ab jeweils ca. 17:00 Uhr der Schatten der westlich an die Station angrenzenden Bäume den Messstandort zu verschatten scheinen. Dies ist an den im Vergleich zu den anderen Standorten zügiger abfallenden Temperaturkurve festzustellen. Zudem scheinen die nahegelegenen Wasserflächen eine Kühlwirkung aufzuweisen, da die Temperaturmaxima am Tage zumeist unterhalb der Maxima der übrigen Stationen liegen. Auch an der Station in Mainnähe scheint das Fließgewässer eine Kühlwirkung am Tage zu entfalten. Diese ist im Vergleich zur urbanen und ruralen Station jedoch nur am 19. und 20.07. auszumachen, wo die Station ca. 0,5-1 K geringere Temperaturmaxima aufweist. Zudem ist die Station tagsüber fast immer wärmer als jene am Freibad, was für die deutlichere Wirkung der Bäume und des nahen, direkt angrenzenden Schwimmbeckens, verglichen mit dem gut 100 m entfernten Mainufer, spricht. Die extreme Hitzeperiode wird auch durch die Temperaturmaxima aller Stationen unterstrichen. Während die vier Klimamessstationen jeweils an allen Tagen des Zeitraums Temperaturen jenseits der 30 °C – und damit Heiße Tage – erreichen, gilt dies bei der DWD-Referenzstation immerhin im Zeitraum vom 18.-20.07.2020. Am 17.07. wird hier bei einem Tagesmaximum von 28,3 °C lediglich ein Sommertag registriert.

Ab den Abendstunden (Sonnenuntergang gegen 21:30 Uhr) und in der ersten Nachthälfte fallen die Temperaturen der Stationen im ländlichen Raum und an der innerstädtischen Ausgleichsfläche rascher ab als



in der Stadt, was an den deutlich steileren Kurven zu erkennen, und auf die höheren Wärmekapazitäten im urbanen Raum bzw. an der urbanen Station zurückzuführen ist. Die Temperaturen verbleiben in der Folge im Innenstadtbereich am Altenpflegeheim auf dem höchsten Niveau aller Stationen. Die Ackerflächen der Stationen an der Kompostieranlage und in Mainnähe kühlen dagegen im Verlauf der Nacht am stärksten ab und zeigen die geringsten Minima. Tropennächte bei Temperaturminima  $\geq 20^\circ\text{C}$  werden im untersuchten Zeitraum an keiner Station festgestellt.

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

Während der sommerlichen Messkampagne wurde an den vier Standorten neben der Temperatur in  $^\circ\text{C}$  auch die relative Luftfeuchtigkeit (rH) in % aufgezeichnet. Diese Größe bringt eine Temperaturabhängigkeit mit sich und liefert infolgedessen keinen großen Mehrwert gegenüber den gezeigten Temperaturabbildungen. Dennoch zeigt Abbildung 60 exemplarisch die relative Feuchte während der Hitzeperiode vom 17.-20.07.2022. Wie bereits bei der Temperatur gesehen, liegen auch die Werte der Feuchte am Tage an allen Standorten etwas näher beieinander und fächern nachts weiter auf. Nahezu überall, wo zuvor Temperaturmaxima registriert wurden, zeigt die Feuchte Minima auf und umgekehrt. Am besten ist dies exemplarisch an der urbanen Klimamessstation zu beobachten, die zuvor stets das höchste Wertemilieu offenbarte, nun jedoch die geringsten Feuchteminima und den insgesamt niedrigsten Verlauf dieser Größe besitzt.

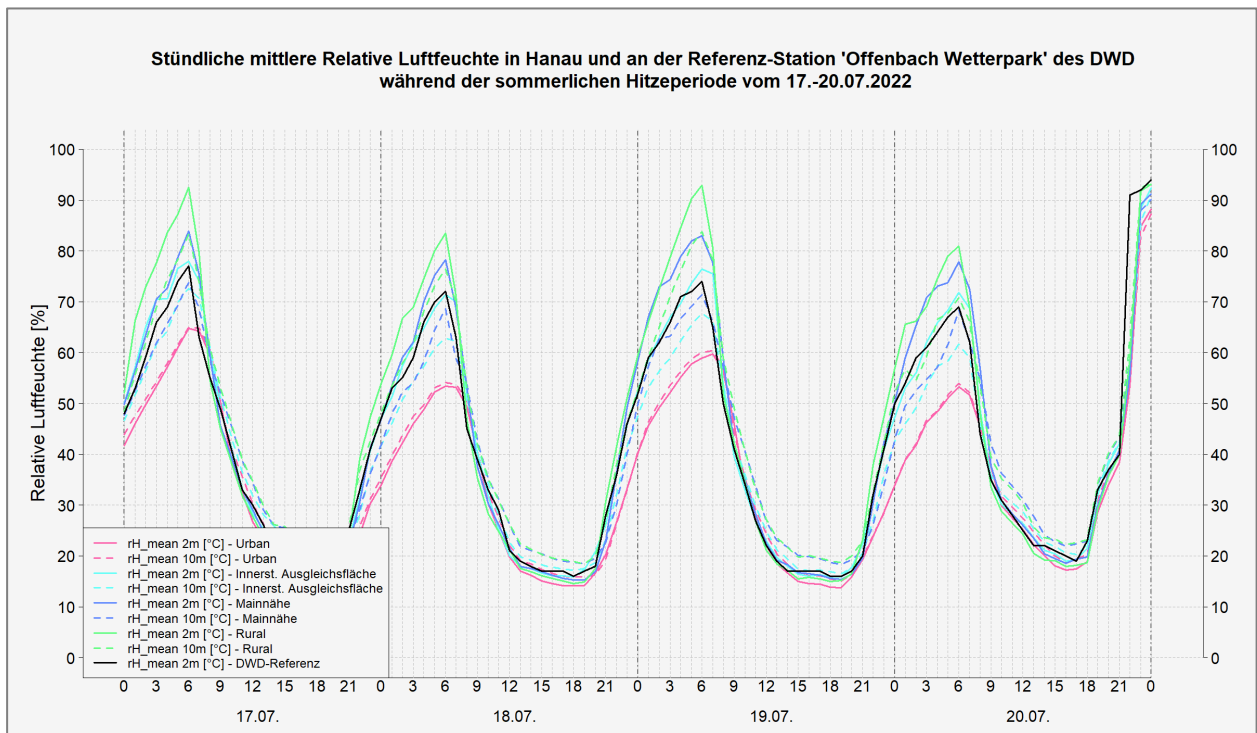


Abbildung 60: Gemessene stündliche relative Luftfeuchtigkeit (rH) auf 2 m und 10 m ü. Gr. zur betrachteten Hitzeperiode vom 17.-20.07.2022, ermittelt an den vier temporären Messstationen Hanaus und an der Referenz-Station des DWD Offenbach-Wetterpark.



## 6.1.2 PROFILMESSFAHRT: INTENSIVMESSKAMPAGNE: MESSFAHRTEN (19./20.07.2022)

Wie bereits in Kapitel 5.1.2.3 geschildert, lag bei der Durchführung der Messfahrten am 19./20.07.2022 eine tagsüber sonnenscheinreiche und heiße und in der Nacht vornehmlich wolkenarme und windschwache (autochthone) Wettersituation vor. Die vermessene Extremwetterlage übertraf das mittlere Temperaturniveau der im Modell angenommenen durchschnittlichen sommerlichen Wetterlage, weshalb zur Darstellung in einer gemeinsamen Karte eine Angleichung der Messwerte an den Mittelwert der Modellierung stattfand (s. Kapitel 5.1.2.2).

### 6.1.2.1 ERSTE NACHTHÄLFTE – AUSWERTEZEITPUNKT 23 UHR

Die Ergebnisse der Messfahrt der ersten Nachthälfte vom 19.07.2022 22:00 Uhr MESZ bis 20.07.2022 00:12 Uhr MESZ, interpoliert auf 23:00 Uhr, sind in Abbildung 61 aufgetragen. Im Hintergrund der Karte befindet sich das flächenhaft modellierte Temperaturfeld in einer horizontalen Auflösung von 5 m für 23:00 Uhr.

Insgesamt ähneln sich die Positionen der Temperaturextrema zwischen Modell und Messung im Stadtgebiet Hanaus stark. Sowohl bei der Messfahrt als auch im Modell treten die niedrigsten Temperaturen auf den umliegenden Ackerflächen am Stadtrand auf, wobei das Minimum der Messung mit 16,3 °C auf den Agrarflächen südlich von Klein-Auheim im Bereich der Wege „Vor der Lache“ und „Speckweg“ registriert wurde. Auch der Bereich der temporären Klimamessstation an der Kompostieranlage zeigt sich in Messung (17,9 °C) und Modell (18,1 °C) vergleichsweise kühl, was die Güte des gewählten Standorts als rurale Messstation noch einmal bestätigt. Die ebenfalls ländlich geprägte Messstation „Mainnähe“ weist im Modell 17,7 °C auf und liegt damit ebenfalls im Bereich des Werts der normierten Messfahrt, bei einem Temperaturwert von ca. 18,3 °C.



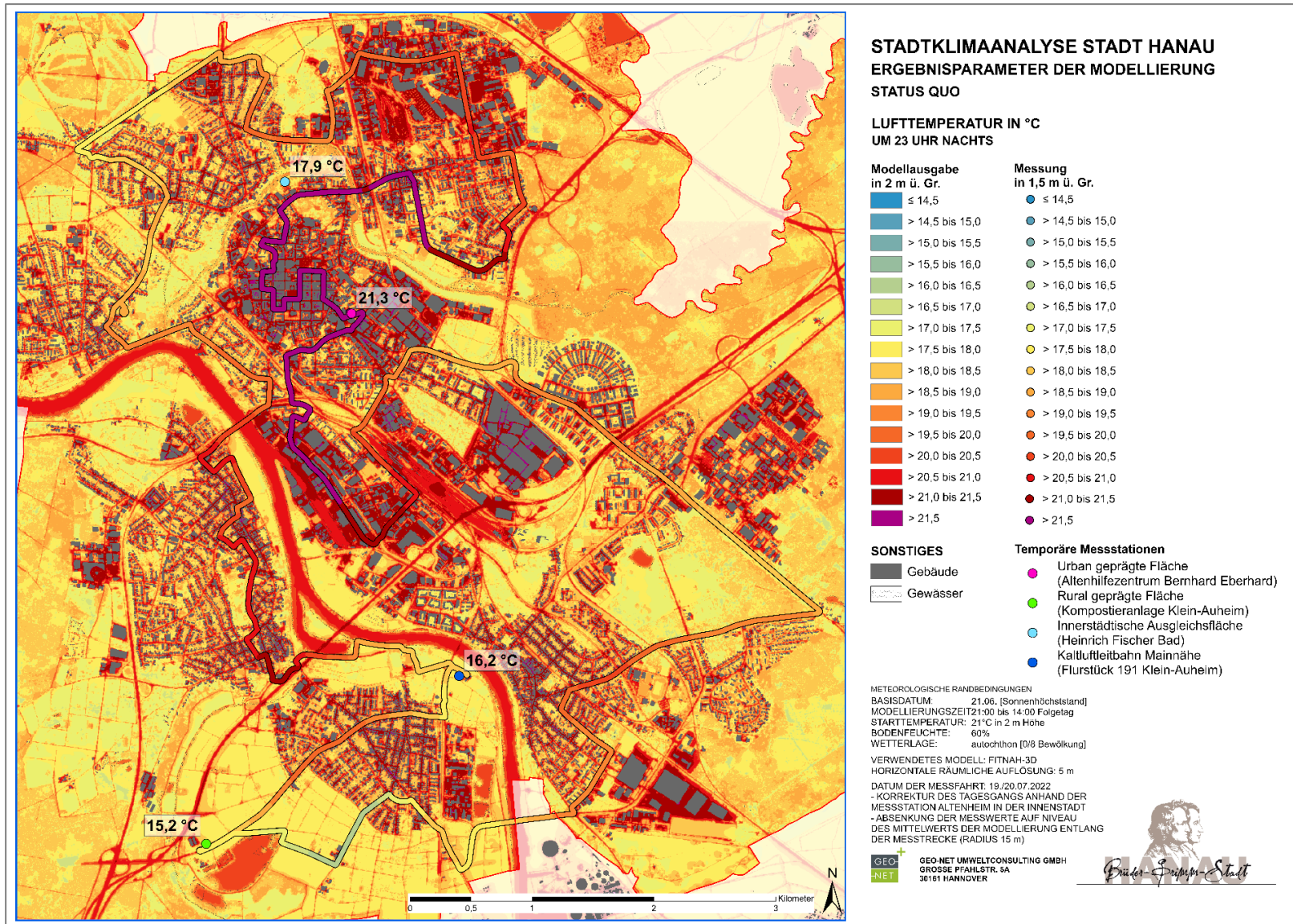


Abbildung 61: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt vom 19./20.07.2022 der ersten Nachhälfte (auf 23:00 Uhr normiert) und dem FITNAH-Modellauf von 23 Uhr. An den Klimamessstationen wird der ebenfalls auf das Modellmittel normierte Temperaturwert der jeweiligen Station angezeigt.



Am wärmsten treten um 23:00 Uhr in Modell und Messung die Innenstadtbereiche hervor, wobei das Temperaturmaximum der Messfahrt mit 22,7 °C im Bereich der Straße Am Frankfurter Tor erreicht wird (Modell: ca. 21,5 °C). Auch am Altenpflegeheim Bernhard Eberhard, wo die Messfahrt begann und endete, wurden hohe Temperaturen von 21,7 °C gemessen. Der Gitterpunkt der Klimamessstation ist durch seine Position über einer Rasenfläche mit 18,8 °C knapp 3 K kühler – in Gebäudenähe werden jedoch auch Temperaturen bis 21,1 °C modelliert, was eher zu den gemessenen Werten passt. Die teils geringfügig höheren Messwerte könnten auch aus dem im Vergleich zum Modelloutput um 0,5 m niedrigeren Messniveau resultieren. Gleiches könnte für die Messung im Bereich der Eugen-Kaiser-Straße, nahe der innerstädtischen Ausgleichfläche gelten, mit Messwerten um 22,1 °C und modellierten Werten um 20,6 °C. Wie im Modell hat die 100-150 m nach Nordwesten entfernte Fläche des Heinrich-Fischer-Bades mit Schwimmbecken und Liegewiesen durch die abschirmende Wirkung des Funktionsgebäudes keine sichtbare positive Auswirkung auf den betrachteten Straßenraum. Das Modell zeigt am Gitterpunkt der temporären Klimamessstation einen im Vergleich zur Messung um 4,4 K kühleren Wert von 17,7 °C und nähert sich damit vom Temperaturniveau eher dem ländlichen Raum an.

Etwas kühler, aber noch immer überdurchschnittlich warm zeigen sich in Modell und Messung Industrie- und Gewerbegebiete im Stadtgebiet. Exemplarisch ist hierbei der Hafbereich zu nennen, wo mit durchschnittlich 21,7 °C im nordwestlichen Bereich der Hafenstraße gute Übereinstimmungen mit dem Modell bei Werten von ebenfalls zumeist über 21 °C erreicht wurden. Auch im Gewerbegebiet in Lamboy wurden mit durchschnittlich 20,1 °C nahezu gleichermaßen hohe Temperaturwerte gemessen. Das Modell liegt hier mit vornehmlich über 21 °C gar noch etwas oberhalb der Messung. Mögliche Ursachen könnten hierbei in Ungenauigkeiten in den Eingangsdaten liegen. Selbst bei einer hohen Modellauflösung von 5 m findet mancherorts nicht jeder Baum seine volle Berücksichtigung. Bäume haben durch ihre Schattenwirkung die Fähigkeit, die solare Einstrahlung am Tage auf die Oberflächen des Gewerbegebietes abzuschwächen, sodass auch in der Nacht weniger Wärme an die Umgebung abgegeben werden kann.

Weitere gute Übereinstimmungen zwischen Modell und Messung finden sich derweil in Übergangsbereichen zwischen urbanen und ländlich geprägten Strukturen bzw. innerstädtischen Ausgleichsräumen wieder. Bei der Ausfahrt aus dem Siedlungsraum Steinheims in Richtung der Ackerflächen zwischen Main und Klein-Auheim sind beispielsweise sowohl in der Messung als auch im Modell Temperaturabnahmen von ca. 21,2 °C auf ca. 18,0 °C sichtbar.

#### 6.1.2.2 ZWEITE NACHTHÄLFTE – AUSWERTEZEITPUNKT 04 UHR

Analog zur Abbildung von 23:00 Uhr zeigt die Abbildung 62 die auf das modellierte 04:00 Uhr-Temperaturraster aufgetragene und auf denselben Zeitpunkt interpolierte Temperaturmessung der Messfahrt für die zweite Nachthälfte vom 20.07.2022 von 02:52 bis 04:57 MESZ. Im Vergleich zu Abbildung 61 wird die strahlungsbedingte Abkühlung von der ersten zur zweiten Nachthälfte sowohl im Modell als auch in der Messung durch ein insgesamt abgesenktes Temperaturniveau sichtbar. Im Gegensatz zum Analysezeitpunkt 23:00 Uhr ist das Kaltluftprozessgeschehen um 04:00 Uhr infolge der während der zweiten Nachthälfte vollständig ausgeprägten Flur- und Hangabwindssysteme maximiert.



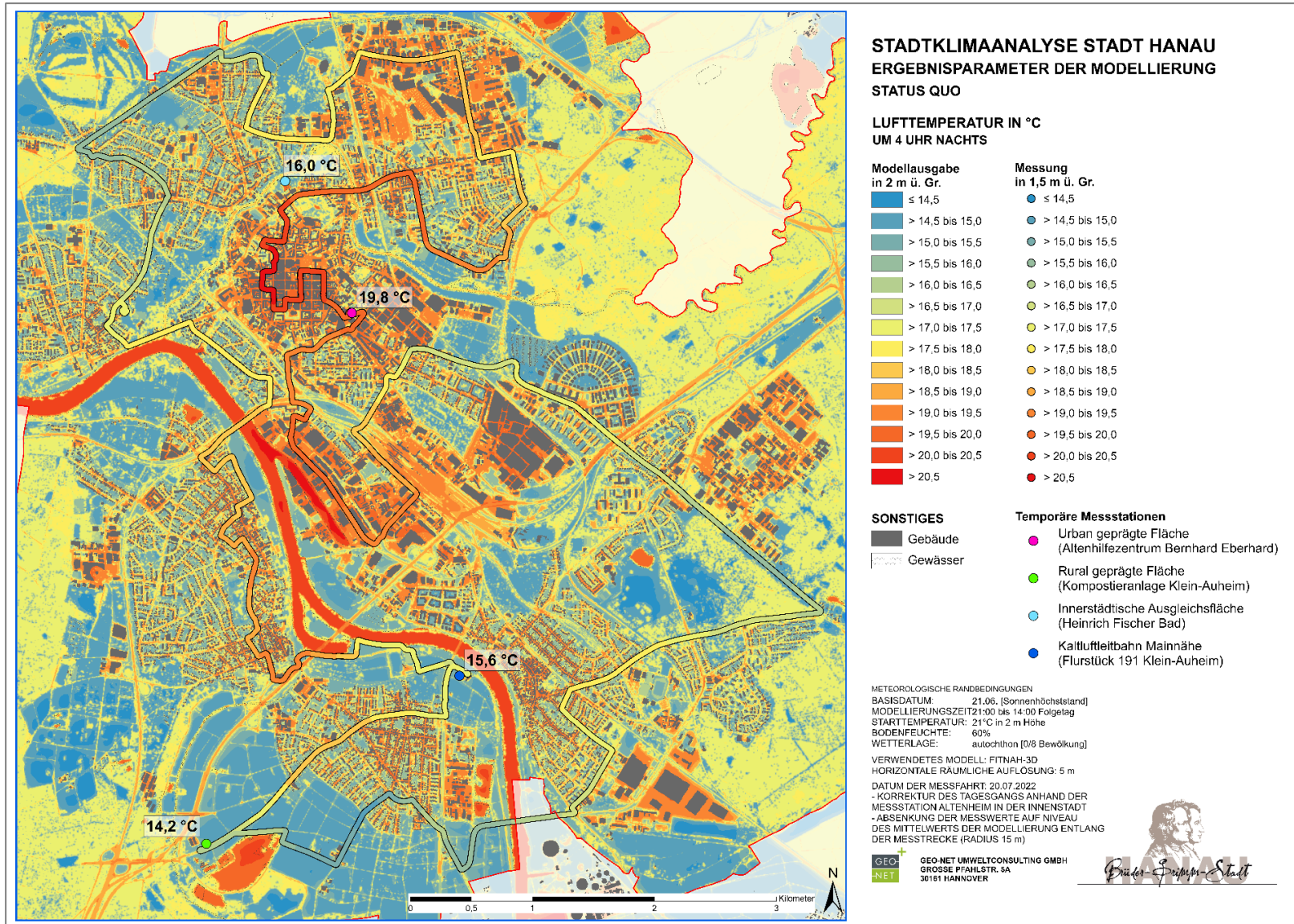


Abbildung 62: Vergleich der Temperaturen zwischen der Messfahrt vom 19./20.07.2022 der zweiten Nachhälfte (auf 04 Uhr normiert) und dem FITNAH-Modelllauf von 04 Uhr. An den Klimamessstationen wird der ebenfalls auf das Modellmittel normierte Temperaturwert der jeweiligen Station angezeigt.



Auch um 4:00 Uhr stimmen die modellierten und gemessenen Temperaturextrema im Hanauer Stadtgebiet gut überein. Die kühlestn Bereiche finden sich wiederum auf den Ackerflächen südlich Klein-Auheims mit ca. 15,1 °C wieder (Modell: ca. 14,7 °C). Bei einer Differenz von nur noch 0,4 K passen Modell und Messung um 4:00 Uhr nachts im Bereich der ländlichen Wege „Vor der Lache“ und „Speckweg“ deutlich besser zusammen als noch um 23:00 Uhr. Die Messung zeigte in der ersten Nachthälfte auf den Ackerflächen rund um die beiden Wege noch Werte von ca. 17,7 °C an. Diese im Vergleich zum Modell um 1,4 K geringeren Temperaturwerte könnten statistischen Ursprungs sein. Da der befahrene Anteil des Siedlungsraumes deutlich höher war als jener im ländlichen Bereich, ist der Mittelwert der Messfahrt an diesem extremen Messtag gegen 23:00 Uhr noch sehr hoch, weshalb zur Angleichung an das Modell eine viel höhere Differenz ermittelt wurde (6,04 K) als in der zweiten Nachthälfte, wo die nächtliche Abkühlung bereits weiter vorangeschritten war (1,65 K; s. Kapitel 5.1.2.2). Die wärmsten gemessenen Bereiche zeigen sich wie bereits um 23:00 Uhr in der Innenstadt an der Straße „Am Frankfurter Tor“ bei Temperaturen von 20,6 °C (Modell: bis ca. 19,6 °C).

Wie bereits in Nachthälfte 1, waren Gewerbegebiete nach dem Innenstadtbereich auch in der zweiten Nachthälfte wieder stark überwärmt. So wurde in der Messung im Bereich des Hafens ein mittlerer Wert von 19,6 °C ermittelt, während das Modell hier sehr ähnliche Wertebereiche um 19,5 °C simulierte. Das etwas weniger versiegelte Gewerbegebiet im Stadtteil Lamboy zeigt sich im Modell bei Werten von überwiegend 18,5 °C bis 19,5 °C etwas kühler als das Hafensareal – auch in der Messung waren die Temperaturen bei Werten um 18,0 °C niedriger. Der Vergleich zwischen Modell und Messung bei einer Differenz von ca. 1 K im Gewerbegebiet Lamboy deckt sich dabei exakt mit dem Temperaturunterschied des 23:00 Uhr -Zeitschritts. Andere besiedelte Bereiche sind je nach Versiegelungsgrad und Grünausstattung überwärmt oder weniger überwärmt. So sind etwa die befahrenen Bereiche der eher durchgrünteren Areale Hanau Nordwest (ca. 16,7 °C), von Kesselstadt (ca. 17,1 °C) oder der Waldsiedlung (ca. 17,6 °C) deutlich weniger überwärmt als das versiegelte Steinheim (ca. 18,7 °C). Waldartige Räume außerhalb von Siedlungen wie der Bereich an der Aschaffener Str. sind demnach deutlich kühler als der Siedlungsraum, mit Temperaturen um 16,3 °C, aber wärmer als die befahrenen Ackerflächen im Untersuchungsgebiet. Letzteres ist durch die verminderte nächtliche Ausstrahlung durch die Kronendächer der Bäume zu erklären.

Ähnlich dem 23:00 Uhr-Zeitschritt sind Abkühlungseffekte bei der Fahrt vom Außen- in den Siedlungsraum Hanau oder umgekehrt auch bei der zweiten Messfahrt gegen 04:00 Uhr zu beobachten. So nimmt die Temperatur vom Westen Steinheims bis auf die Ackerflächen nördlich von Klein-Auheim von 19,4 °C bis 17,0 °C ab, während beispielsweise vom Kleingartenverein KGV-Bulau eV bis zur Einfahrt in die Hafenstraße im Hafenviertel eine stetige Temperaturzunahme von 17,0 °C bis ca. 19,4 °C zu beobachten ist.



## 6.2 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN KLIMAÖKOLOGIE

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

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt sowie Luftqualität und Sensitivitätsanalyse wurden in gelayouteten Karten als ArcGISPro- Kartenpaket visualisiert und inkl. Legenden sowie als hochauflösende .pdf Dokumente übergeben. Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben.

### 6.2.1 NACHTSITUATION

#### 6.2.1.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

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

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Status quo von ca. 14 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis über 20 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Hanau damit eine Spannweite von mehr als 6 °C (Abbildung 63). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 16,4 °C.





Abbildung 63: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur (T04) im Status quo in der Hanauer Kernstadt (verkürzte Legende)

Die höchsten nächtlichen Belastungen (über 18 °C) treten vorwiegend in der Hanauer Innenstadt und den hoch versiegelten Gewerbegebieten auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum mit Werten zwischen 14 – 16 °C finden sich in den aufgelockerten Wohnbebauungen (z.B. Pioneer Park, Bautz-Gelände) und in vielen Bereichen der Außenstadtteile (Großauheim, Steinheim, Klein-Auheim, Kesselstadt) aufgrund der geringen Bebauungsdichte.

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 14 - 15 °C auf (z.B. landwirtschaftliche Flächen um Mittelbuchen und Klein-Auheim). In Wäldern bzw. dicht mit Bäumen bestandenen Flächen mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und damit die Auskühlung der Oberfläche, sodass im (hier betrachteten) bodennahen Bereich Werte um 16 – 17,5 °C erreicht werden (z.B. Bulau, Fasanerie). Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrüntem Siedlungsraum bedeutet, nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden.

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, was bei der Kinzig und dem Main stellenweise der Fall ist (teilweise Lufttemperaturen über 20 °C über dem Main).

In den beiden Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine flächendeckende Erwärmung des Hanauer Stadtgebiets (Abbildung 64). Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben bestehen und damit bleibt auch der Wärmeinseleffekt auf einem vergleichbaren Niveau erhalten. Der Stadtkern ist nach wie



vor der am stärksten überwärmte Bereich und im Szenario Starker Klimawandel werden nächtliche Temperaturen über 20 °C erreicht. Begrünte Innenhöfe sowie die aufgelockert bebauten Hanglagen stellen dagegen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren) und siedlungsferne Freiflächen kühlen am stärksten aus.

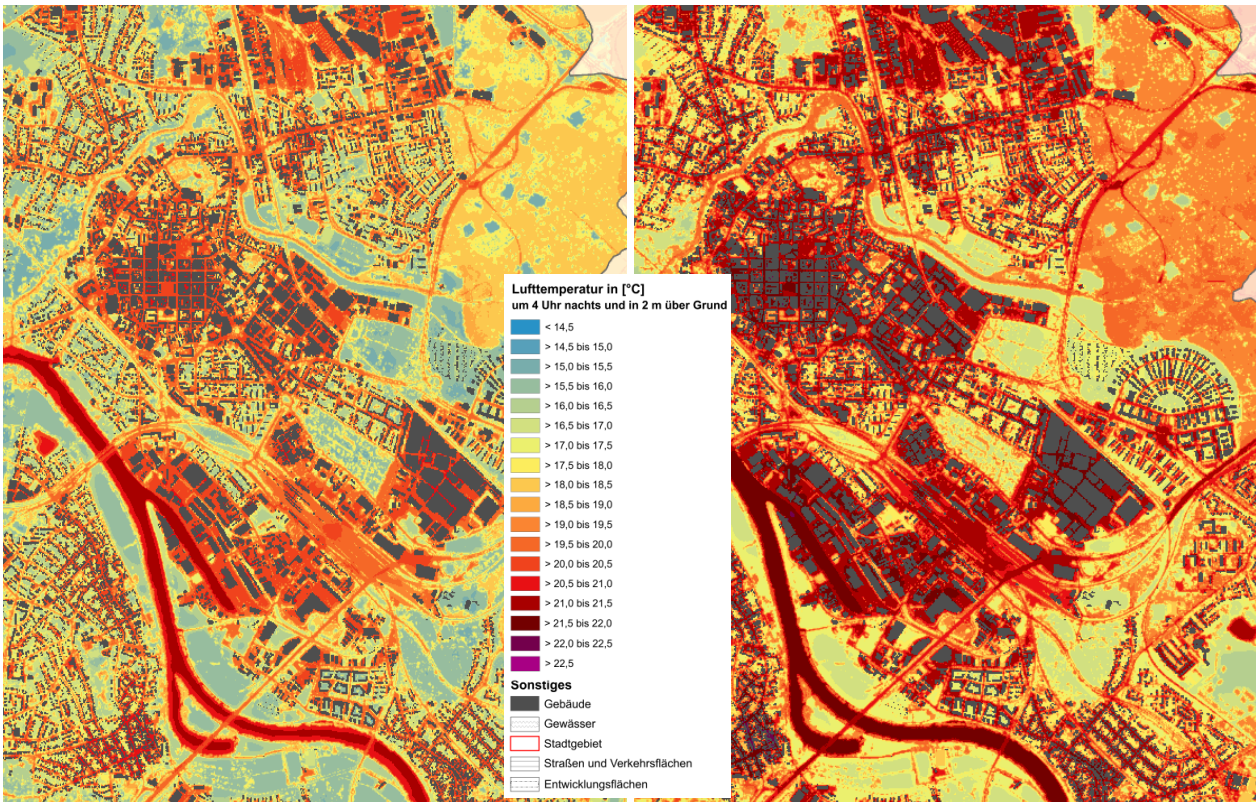


Abbildung 64: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in den Szenarien Schwacher Klimawandel (links) und Starker Klimawandel (rechts) in einem Ausschnitt des Hanauer Stadtgebiets (verkürzte Legende).





### 6.2.1.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird im Hanauer Stadtgebiet wesentlich durch das Relief bestimmt, zeigt im hügeligen Gebiet eine große Variabilität und reicht von sehr geringen bis zu maximalen Werten über  $50 \text{ m}^3/(\text{s m})$ .

Die gesamthafte Betrachtung des Stadtgebietes, wie in Abbildung 65 dargestellt, zeigt, dass es Bereiche mit erhöhtem Kaltluftvolumenstrom im Stadtgebiet gibt. Dazu zählen die nachfolgenden Bereiche: Mittelbuchen, aufgrund der vorhandenen Reliefunterschiede und der umliegenden Kaltluftliefergebiete (vorrangig Ackerflächen); der Bereich südlich bis westlich von Klein-Auheim und der Bereich der Auheimer Straße zwischen der Schnittstelle B 43a und der Straße „In den Tannen“.

Durch die verhältnismäßig nur moderaten Reliefunterschiede innerhalb des Hanauer Stadtgebietes (s. Abbildung 40) weisen die Kaltluftströme vergleichsweise geringe Werte auf, wie insbesondere die reliefarme Kernstadt zeigt (Abbildung 66).

Die für den Hanauer Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte in Form von Kaltluftleitbahnen, etc. hervorgehoben (Kap. 7).

Die Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht auf, sodass in vielen Hangbereichen auch bodennah eine Durchströmung mit Kaltluft stattfindet. In Abbildung 67 ist die Strömungsrichtung der bodennahen Kaltluftströmung über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 200 m aggregiert wurden. Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert (z.B. Gebäude umströmt) und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können (bspw. aus dem Hauptfriedhof).

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



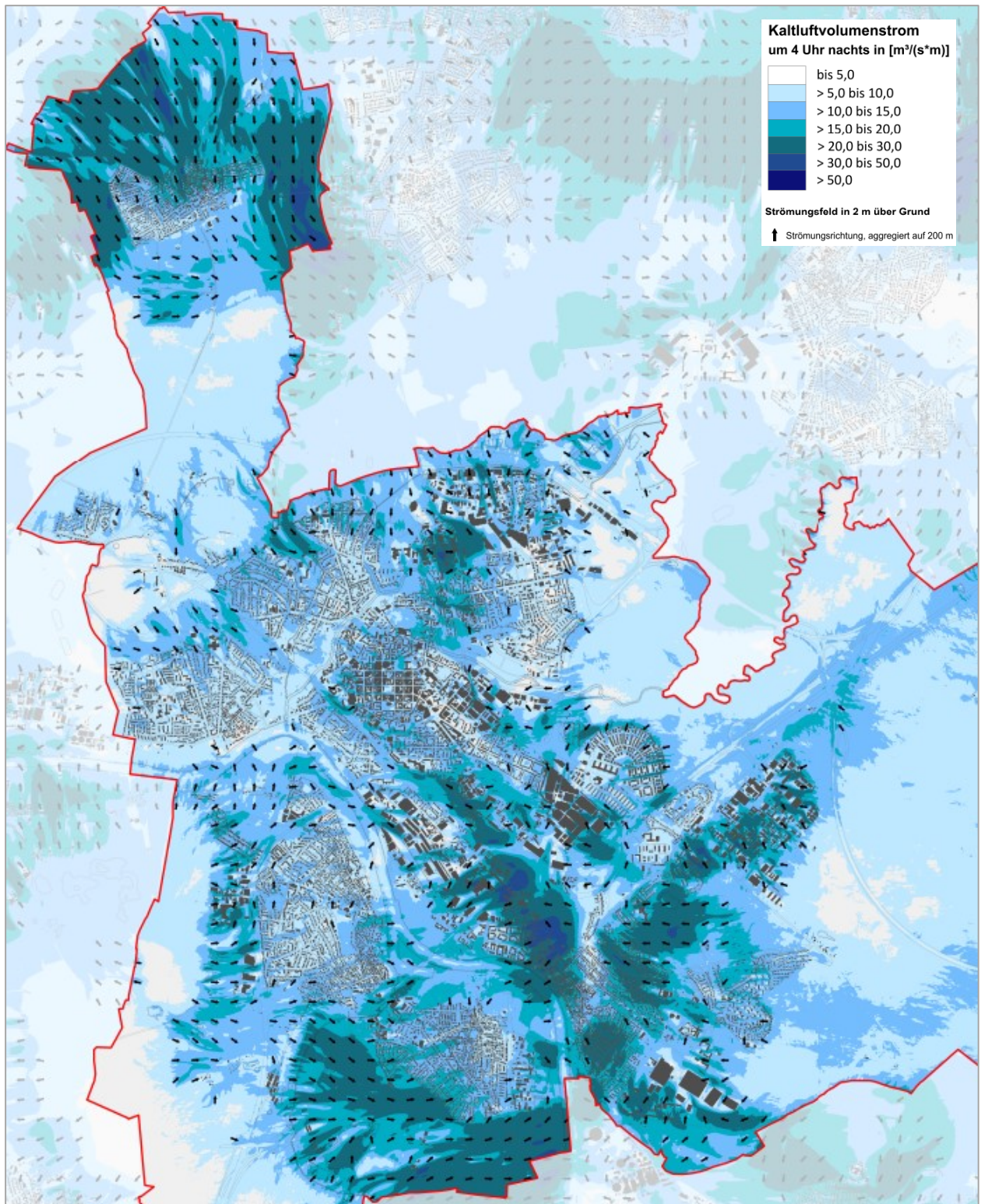


Abbildung 65: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo im Hanauer Stadtgebiet (verkürzte Legende).



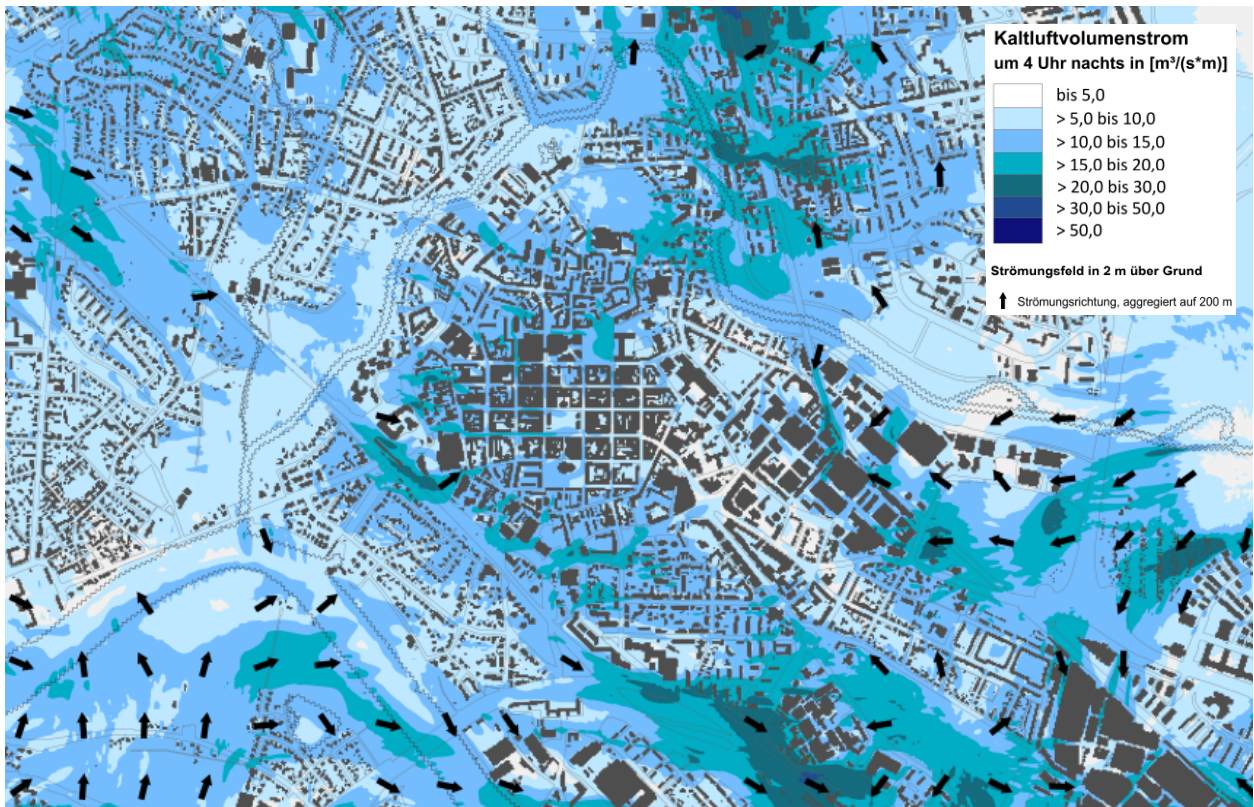


Abbildung 66: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo in der Hanauer Kernstadt (verkürzte Legende).

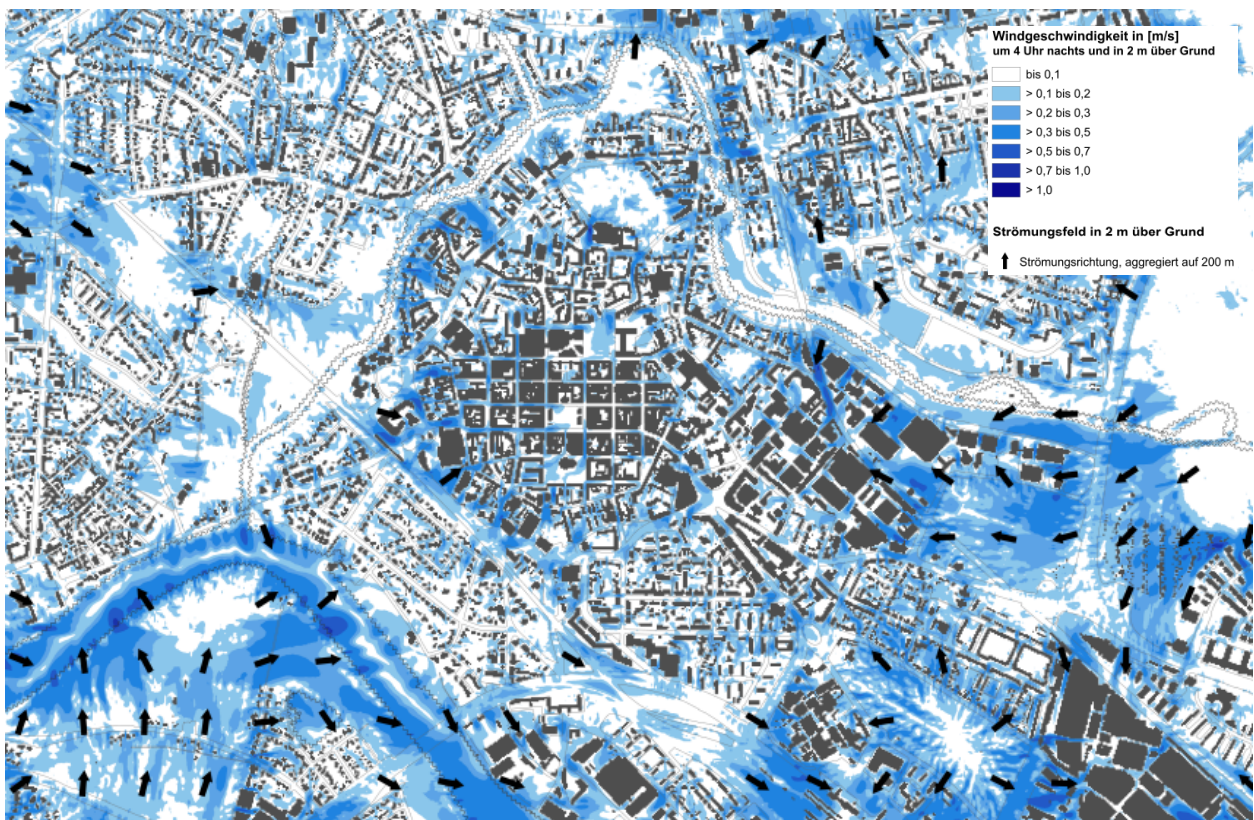


Abbildung 67: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status quo in der Hanauer Kernstadt (verkürzte Legende).



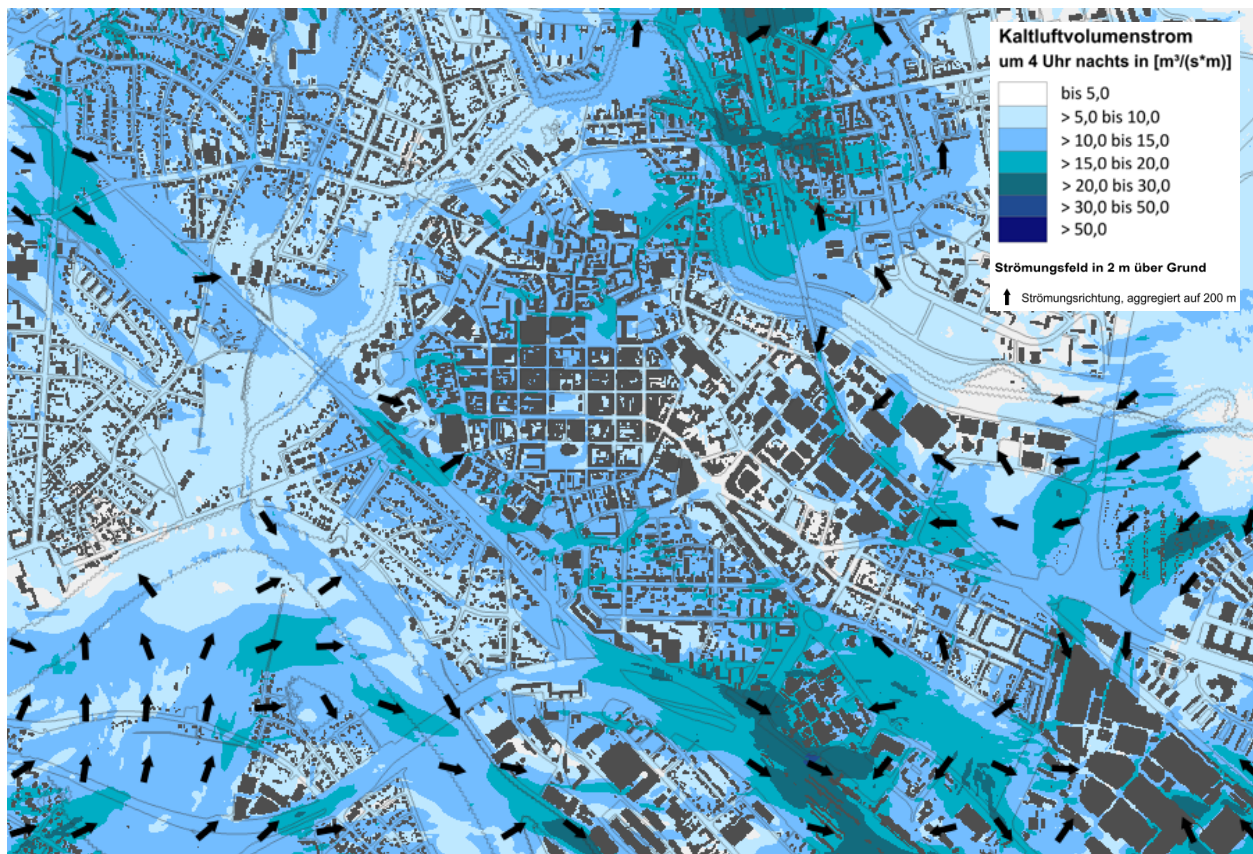


Abbildung 68: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Szenario Starker Klimawandel in der Hanauer Kernstadt (verkürzte Legende).

Infolge des Klimawandels ergeben sich keine nennenswerten Änderungen des Kaltluftprozessgeschehens, da das Relief als wesentlicher Antrieb unverändert ist und die nächtliche Temperatur flächendeckend in einem ähnlichen Ausmaß steigt, sodass sich keine neuen temperaturinduzierten Flurwinde ausbilden (Abbildung 68). Eine potentielle Bebauung kann sich dagegen auf das Kaltluftströmungsfeld auswirken. Bestehende Kaltluftströmungen würden durch eine Überbauung der Flächen in der Regel gemindert.



## 6.2.2 TAGSITUATION

### 6.2.2.1 WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET)

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET eine höhere Spannweite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von unter 25 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Tabelle A 1 im Anhang). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (z.B. im Schlossgarten, Bulau; Abbildung 69). Auch Gewässer wirken am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die Grünflächen entlang des Mains und der Kinzig überwiegend eine schwache Wärmebelastung aufweisen.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt (Marktplatz) und vielen Gewerbegebieten zu finden sind. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Außenstadtteilen wie Mittelbuchen, Steinheim oder Klein-Auheim (ohne Abbildung hier im Bericht; siehe Detailkarten im A0-Format zu den Modellergebnissen). Die Wohngebiete bieten zwar einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume als in vielen Teilen der Kernstadt, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt (bspw. Friedrichstraße oder westlicher Teil des Südost-Bezirks in Mainnähe). Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 5 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Innerhalb des Stadtgebiets stellen mit Bäumen bestandene Grünflächen wie Parks, Friedhöfe oder Grünzüge, sowie begrünte Innenhöfe aufgrund ihrer geringen Wärmebelastung wichtige Rückzugsorte für die Bevölkerung dar (z.B. Schlossgarten, Hauptfriedhof).

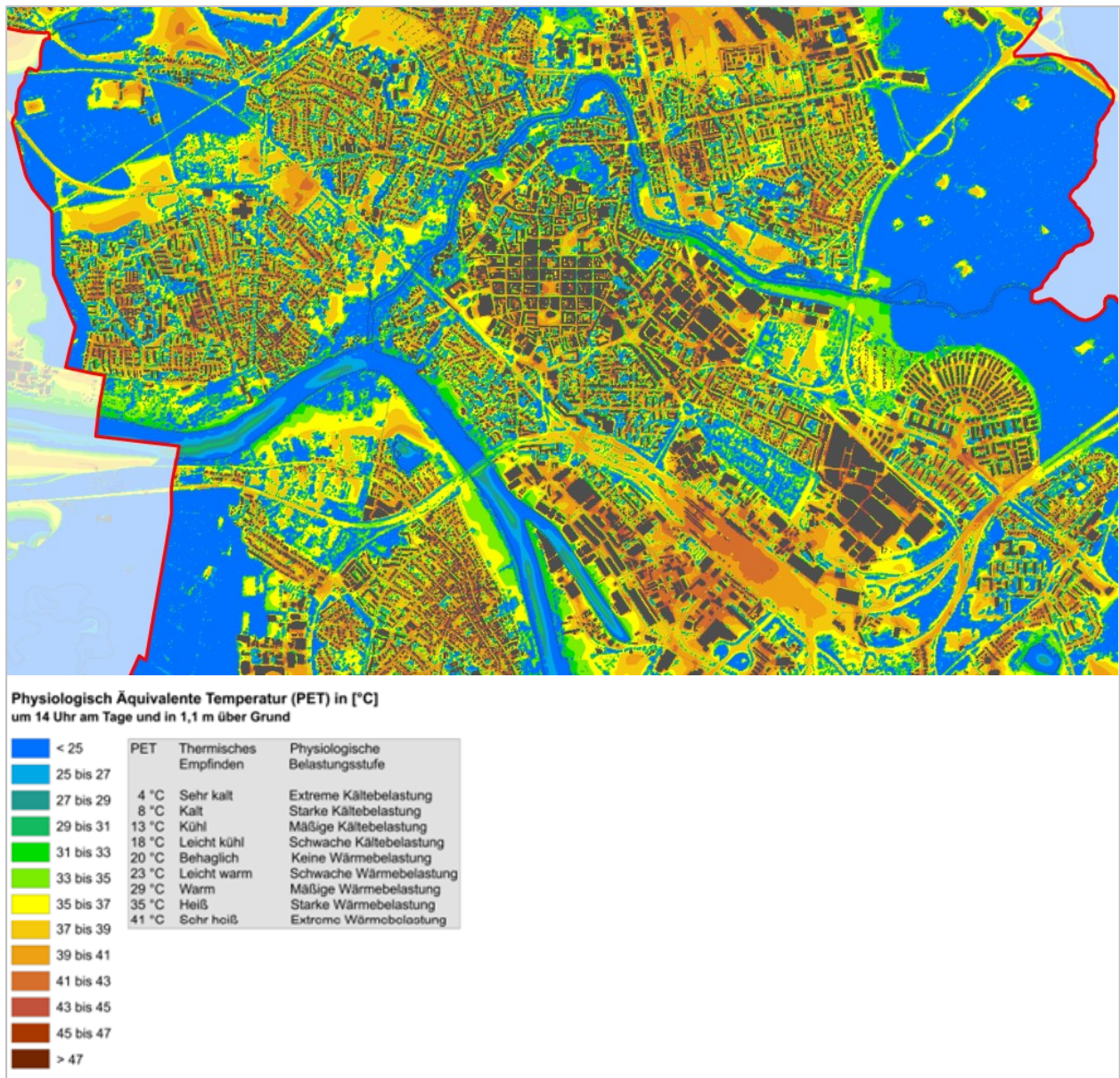
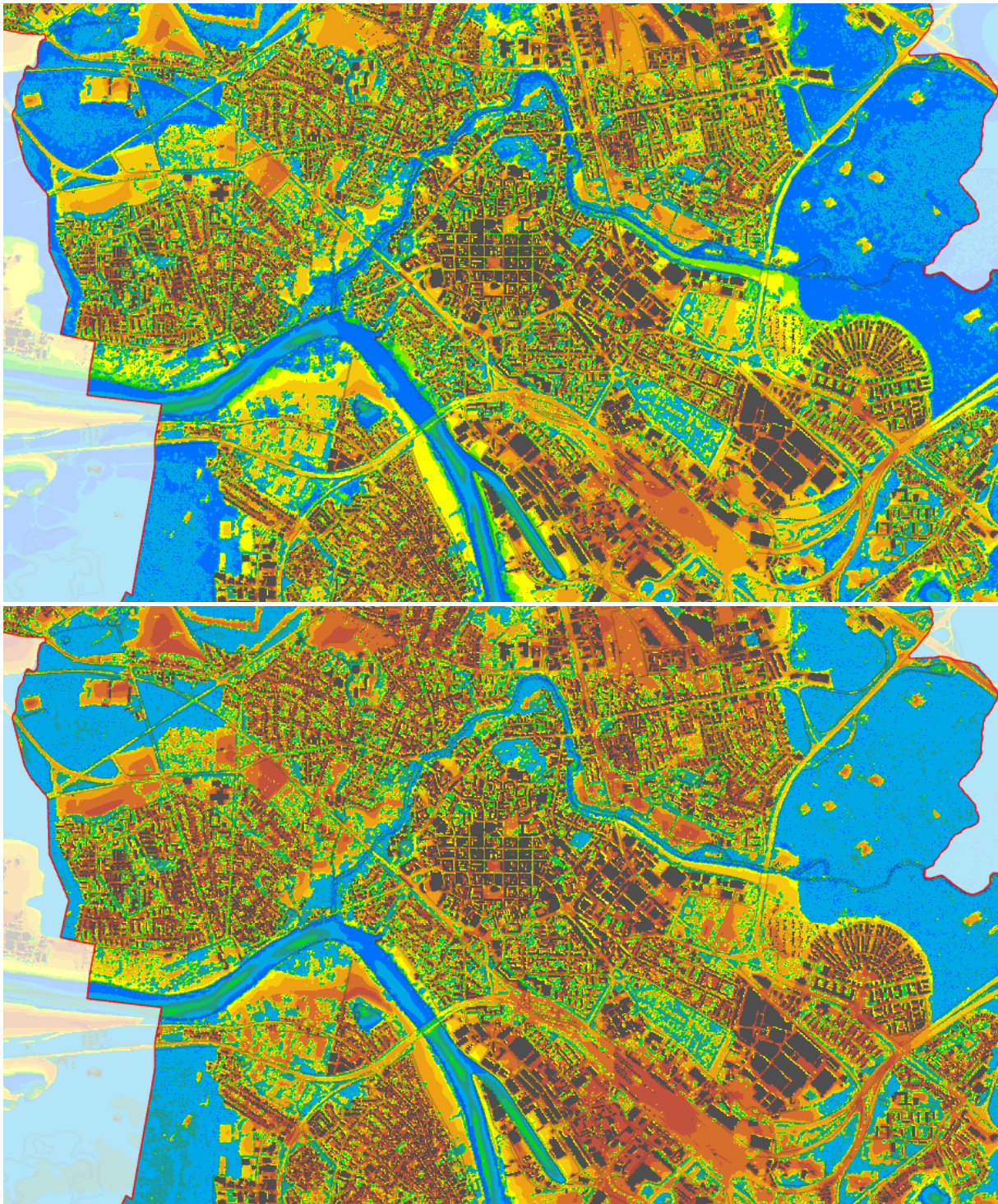


Abbildung 69: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Status quo in der Hanauer Kernstadt.

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend in Hanau, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann. Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst im Szenario Starker Klimawandel gibt es noch viele Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen (Abbildung 70).





Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) in [°C]  
um 14 Uhr am Tage und in 1,1 m über Grund

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
< 25		
25 bis 27		
27 bis 29	4 °C Sehr kalt	Extreme Kältebelastung
	8 °C Kalt	Starke Kältebelastung
29 bis 31	13 °C Kühl	Mäßige Kältebelastung
	18 °C Leicht kühl	Schwache Kältebelastung
31 bis 33	20 °C Behaglich	Keine Wärmebelastung
	23 °C Leicht warm	Schwache Wärmebelastung
33 bis 35	29 °C Warm	Mäßige Wärmebelastung
	35 °C Heiß	Starke Wärmebelastung
35 bis 37	41 °C Sehr heiß	Extreme Wärmebelastung
37 bis 39		
39 bis 41		
41 bis 43		
43 bis 45		
45 bis 47		
> 47		

Abbildung 70: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) in den Szenarien Schwacher Klimawandel (oben) und Starker Klimawandel (unten); (verkürzte Legende).



## 6.3 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN LUFTHYGIENE

### 6.3.1 ALLGEMEINES

Als Indikator für die Schadstoffbelastung der Luft wird die Ausbreitung der Luftschadstoff-Emissionen im Strömungsfeld (5m-Auflösung) bzw. die sich daraus ergebende jahresmittlere Immissionskonzentration ihrer Komponenten verwendet. Die Ausgangswerte hierfür liefern einerseits die Berechnungen der Emissionsmengen von Stickstoffoxiden ( $\text{NO}_x$ ) und Feinstaubkomponenten ( $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ ) auf der Basis des Verkehrsaufkommens sowie andererseits die meteorologischen und strukturellen Strömungs- und Ausbreitungsbedingungen ihrer Verdriftung und Verdünnung im Raum. Hierzu müssen zunächst die Emissionsdichten der jeweiligen Schadstoffe lokalisiert und quantifiziert werden. Aus den Emissionen, den Angaben zur Hintergrundbelastung und den meteorologischen Rahmenbedingungen werden anschließend mit FITNAH-3D die jahresdurchschnittlichen Gesamtbelastungen im Untersuchungsgebiet abgeschätzt.

Für die Darstellung der lufthygienischen Situation im Stadtgebiet Hanau wird im Folgenden die Ausprägung des jahresmittleren Konzentrationsfeldes der Luftschadstoffkomponente Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) verwendet. Auf eine Beschreibung der Feinstaubfraktionen wird weitgehend verzichtet. Dies hat mehrere Gründe: Wie bereits beschrieben, wird in der vorliegenden Untersuchung lediglich die Ausbreitung der straßenverkehrsbedingten Emissionen bestimmt, während die Belastungen durch andere Quellgruppen im räumlich konstanten Hintergrund subsummiert sind. Daher ist es sinnvoll, eine Luftschadstoffkomponente zu betrachten, die eng an den Straßenverkehr geknüpft ist. Der Verursacheranteil des lokalen Straßenverkehrs an der  $\text{NO}_2$ -Belastung liegt in verkehrsnahen Bereichen deutlich höher als dies bei der  $\text{PM}_{10}$ -Belastung der Fall ist (vgl. z.B. IVU 2017). Die Feinstaub-Konzentration ist demgegenüber stärker abhängig von verschiedenen, nicht straßenverkehrsbedingten Gegebenheiten. Hierzu zählen z.B. der kleinräumig wechselnde Anteil an Feststoffheizungen, die Verteilung industrieller und landwirtschaftlicher Produktionsanlagen, die großräumigen Witterungsverhältnisse, sowie die veränderlichen Ferntransporte aus Quellen außerhalb des Untersuchungsraumes. Zudem ist die Luftschadstoffkomponente Feinstaub verglichen mit dem  $\text{NO}_2$  im Hinblick auf die Einhaltung der momentan gültigen Grenzwerte als weniger kritisch einzustufen (siehe hierzu beispielsweise HLNUG [Hrsg.] 2022a). Die Emissionsverteilung der beiden Luftschadstoffkomponenten im Rahmen der Quellgruppe Straßenverkehr weist ähnliche Schwerpunkte auf, kann aber aufgrund unterschiedlicher Einflüsse des Schwerlastverkehrs in Einzelfällen signifikant voneinander abweichen.

Eine Hauptquelle für Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) in der Atmosphäre sind Abgase aus Verbrennungsmotoren und Feuerungsanlagen für Produkte fossiler Brennstoffe. In Städten und Ballungsgebieten ist der Straßenverkehr die mit Abstand bedeutendste  $\text{NO}_x$ -Quelle. Die Freisetzung erfolgt zu einem wesentlichen Teil als Stickstoffmonoxid ( $\text{NO}$ ), welches erst nachträglich zu Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) oxidiert wird, weshalb diese beiden Komponenten bei der Emission gemeinsam als  $\text{NO}_x$  betrachtet werden. Da  $\text{NO}_2$  als Reizgas in Bezug auf die Gesundheit von größerer Bedeutung ist und zudem als Vorläufersubstanz für die Bildung von Feinstaub wirkt, steht bei der Immission die Konzentration von  $\text{NO}_2$  im Vordergrund.  $\text{NO}_2$  gilt in der Luftreinhaltung als wichtiger Indikator für den Gesamtmix aus Luftschadstoffen, dem der Mensch in der Stadt ausgesetzt ist und dient somit als Maßstab für die Luftqualität in den repräsentierten Gebieten.

Die Einordnung der Immissionen stützt sich auf die in der 39. BImSchV festgelegten Luftqualitätsstandards und deren Rahmenbedingungen (siehe Tabelle 3 auf S. 11). Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass



die Grenzwerte sich jeweils auf die Gehsteige am Fahrbahnrand beziehen, nicht auf die zentralen Fahrspurbereiche der Straßen. Als Indikator für die Luftqualität werden im Folgenden die Konzentrationen des  $\text{NO}_2$  und des Feinstaubes verwendet.

### 6.3.2 RÄUMLICHE AUSPRÄGUNG DER STICKSTOFFDIOXIDBELASTUNG

Da die Messstation Hanau DEHE011 (HLUNG 2022b) im Luftmessnetz Hessen des Landesamtes als Station im städtischen Hintergrund eingestuft wird (siehe S. 88), bildet sie eine Immissionssituation ab, die in Abbildung 71 der Summe aus „großräumigem Hintergrund“ und „städtischem Beitrag“ entspricht. Die Höhe der „lokalen Zusatzbelastung“ ergibt sich aufgrund der räumlichen Verteilung der Verkehrsmengen sowie in Abhängigkeit von der Bebauungsdichte und den damit korrespondierenden Strömungsverhältnissen.

Auf diese Weise lassen sich im Stadtgebiet von Hanau mehrere lufthygienische Belastungsschwerpunkte ausmachen (Abbildung 72).

Insgesamt zeichnen sich diejenigen Fahrbahnbereiche mit einem erhöhten Schadstoffniveau ab, in denen ein überdurchschnittliches Verkehrsaufkommen auf baulich bedingte Einschränkungen der Ausbreitungsbedingungen für Luftschadstoffe trifft. Dies gilt in der Innenstadt beispielsweise für Fahrbahnabschnitte der Nussallee und der Straße Am Steinheimer Tor, die jeweils Teilbereiche der Bundesstraße B45 darstellen und mit knapp 25 000 Überfahrten pro Tag ein hohes Verkehrsaufkommen aufweisen. Auch die Leipziger Straße und die Willy-Brandt-Straße treten mit überdurchschnittlichen Konzentrationswerten hervor, wo sich Zusatzimmissionen aufgrund herabgesetzter Schadstoffausbreitungsmöglichkeiten in der dichten Bebauung anreichern. Straßenabschnitte mit noch engerem Bebauungsabstand unterhalb von 25 m (5 Rasterzellen) oder straßenschluchtartigem Charakter sind nicht belastbar zu beurteilen, da die Strömungs- und Ausbreitungsbedingungen hier nicht hinreichend repräsentiert werden können (vgl. die auf S. 88 beschriebenen Einschränkungen der Modellierung). Hohe Immissionskonzentrationen deuten hier zumindest auf eine potenziell (zu) hohe Schadstoffemission hin.

Auffällige lokale Maxima werden auch in Straßenbereichen mit autobahnartigem Ausbau sichtbar. Die B43a, die das Stadtgebiet in südwest-nordöstlicher Richtung quert, zählt mit täglichen Verkehrsmengen von bis zu 70 000 Kfz zu den vielbefahrensten Straßen in Hanau. Ein ähnliches Bild zeigt auch die A66 im Norden der Stadt. Die mit „hohen Belastungen“ über  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  orangefarben gekennzeichneten Flächen treten auch hier im Wesentlichen über den zentralen Fahrspurbereichen auf. Da über das gesamte Untersuchungsgebiet eine konstante städtische Hintergrundbelastung angenommen wurde, dürften sich die Werte hier etwas niedriger darstellen. Der überörtliche Charakter und die damit verbundene, häufig recht siedlungsferne Lage dieser Emissionsquellen, sorgt zudem dafür, dass die Schadstoffkonzentrationen im Jahresmittel aufgrund der Verdünnung bereits ausreichend reduziert sind, so dass die Immissionsgrenzwerte weiträumig eingehalten werden. Bei autochthonen Wetterlagen allerdings besteht insbesondere in zwei Bereichen die Gefahr, dass die Luftschadstoffe mit der über die Emissionsquellen hinwegführenden Kaltluft in eigentlich recht quellferne Siedlungsräume transportiert werden, wo dann signifikant erhöhte Luftschadstoffbelastungen auftreten. Ein Beispiel dafür ist in den Freiflächen westlich von Klein-Auheim zu



Abbildung 71: Schema der Belastungssituation in städtischen Gebieten und Ballungsräumen (VDI 2019)



sehen, die in der Klimaanalysekarte als Kaltluftabflussgebiete ausgewiesen werden: Die Frischluftströmungen von den Flächen im Umfeld des Hellenbachs führen bei austauscharem Wetter über die B43a hinweg und nehmen dabei Luftschadstoffe auf. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Verkehrsmengen erst Maximalwerte erreichen, wenn das Kaltluftprozessgeschehen nach Sonnenaufgang allmählich von einem konvektionsgeprägtem, relativ turbulenten Strömungsgeschehen abgelöst wird. Eine ähnliche Situation ist auch am Nordrand des Stadtteils Lamboy zu beobachten. Im Bereich der Oder- und Donaustraße passieren südwärts gerichtete Kaltluftströme, welche zuvor die A66 überquert haben und potentiell Luftverunreinigungen in den Siedlungsbereich eintragen können. Die Bereiche sind in der Planungshinweiskarte mit entsprechender Symbolik ausgewiesen („Kaltluftabfluss: Potentiell lufthygienisch belastet“).

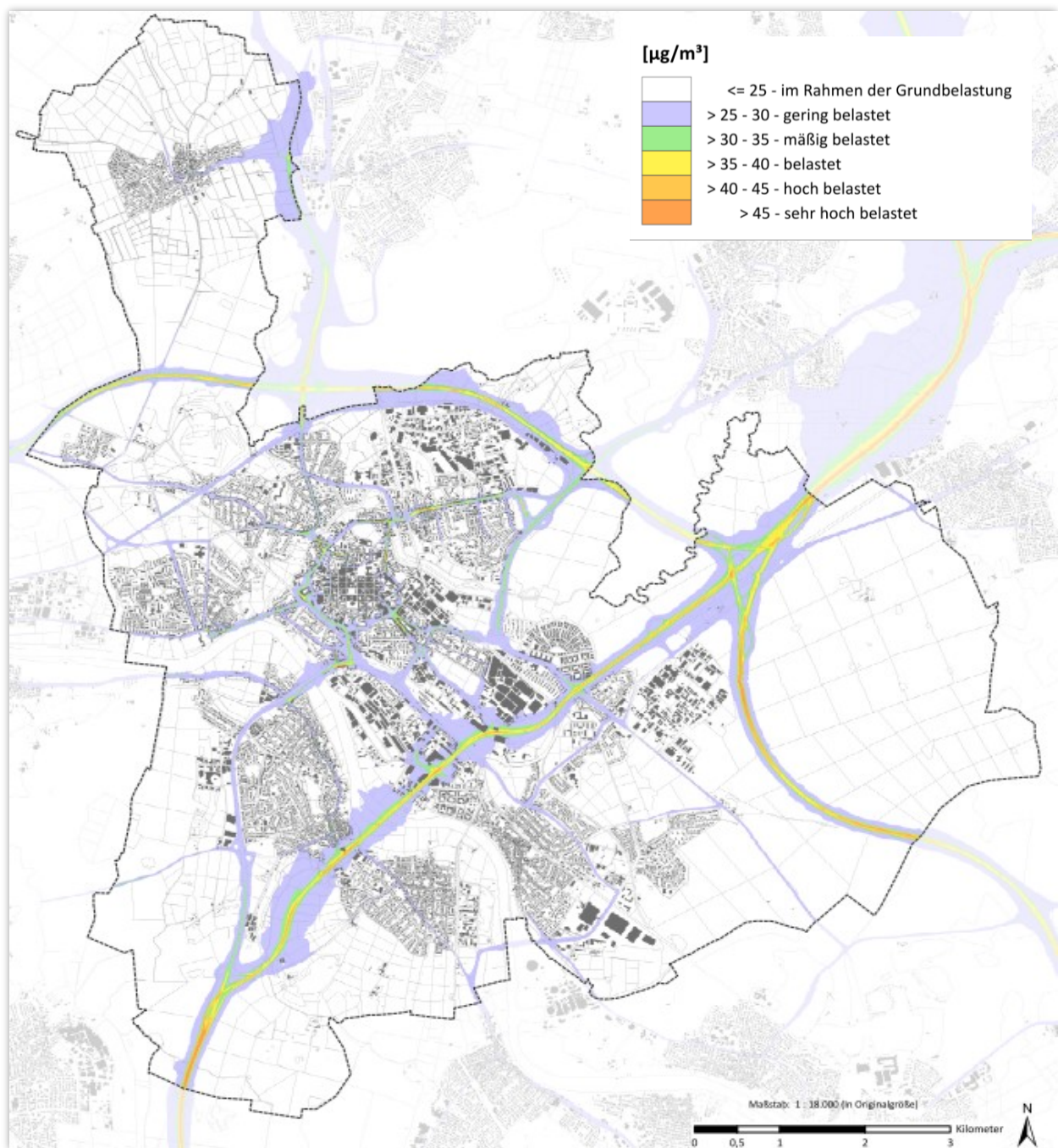


Abbildung 72: Jahresmittelwerte der NO<sub>2</sub>-Konzentration im Stadtgebiet von Hanau



# 7. Zwischenprodukte

## 7.1 KLIMATOPKARTE

### 7.1.1 GRUNDLAGEN

Die Klimatopausweisung, das heißt die Einordnung und Abgrenzung von Gebieten mit ähnlichen mikroklimatischen Bedingungen auf Grundlage von Landnutzungsfachdaten, wird im Folgenden genauer erläutert.

Nutzungsbedingte Veränderungen des örtlichen Windfeldes und des Wärmehaushaltes sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Ausbildung eines gegenüber dem Umland veränderten Stadtklimas. Zahlreiche der vielen stadtklimatologisch relevanten Parameter lassen sich daher über die Strukturhöhe, die Bebauungsdichte und den Grad der Oberflächenversiegelung einer Fläche abschätzen. Die Ausprägung dieser Einflussgrößen ist nutzungsabhängig und nimmt bei gleichen Nutzungstypen ähnliche Werte an. Somit ermöglicht die Analyse der Nutzungen im Untersuchungsgebiet eine Abgrenzung von Gebieten ähnlicher stadtstruktureller Ausstattung und damit einhergehender stadtklimatischer Charakteristika. Es kann zwar auf (amtliche) Datenquellen, wie das ATKIS Basis-DLM und ALK-Daten zurückgegriffen werden, die entsprechenden Raumeinheiten beinhalten aber nicht alle Informationen, die für klimaökologische Analysen benötigt werden.

### 7.1.2 EINGANGSDATEN

Zur Ableitung der Klimatope wird auf folgende Daten (s. auch Kap. 5.2.2) zurückgegriffen:

Tabelle 23: Übersicht der für die Klimatopkarte verwendeten Geodaten

Name	Verwendung	Quelle (vorliegend)
ATKIS Basis-DLM / ALKIS	Basisdatensatz (Geometrie, Nutzung)	HLBG
Gebäude: (ALKIS-Gebäudeumrisse mit Höhen aus DOM, Stand 2021; Umland: Open Street Map (OSM))	Modifikation Bebauungsdichte	HLBG; OSM
Digitales Geländemodell (1 m)	Modifikation Relief	HLBG
Versiegelungskartierung (2021) CIR-Luftbilder (2019)	Modifikation Gesamtversiegelung	Stadt Hanau, HLBGH

Ein spezifisches Problem bei der Ableitung von klimaökologischen Zusammenhängen aus dem Basis-DLM des ATKIS beruht auf der ungenügenden Differenzierung der für klimaökologische Fragestellungen wesentlichen Einflussfaktoren Bebauungsdichte und Versiegelungsgrad. Um diese Parameter hinreichend berücksichtigen zu können, werden die in Tabelle 23 genannten Daten zum Gebäudebestand und zur ebenerdigen Versiegelung mit den ATKIS-Flächenobjekten verschnitten.

### 7.1.3 KONZEPT ZUR ABLEITUNG DER KLIMATOPE

Das grundsätzliche Konzept zur Ableitung der Klimatope (siehe *Abbildung 73*) sieht zunächst vor, die im Basis-DLM auftretenden Objektarten einem ihrer Nutzungsbeschreibung entsprechenden Klimatoptyp zuzuordnen. Diese Klimatoptypen bilden die Grundlage für eine weitere Differenzierung über die zusätzlich zur Verfügung stehenden Flächeninformationen.





Tabelle 24 Primäre Zuordnung der Objektarten zu Klimatotypen

ObjArt	ObjArt_Text	BEB	Klimatop	Treffsicherheit
55001	Gewaesmermerkmal	0	1	eindeutig
44001	Fliessgewaesser	0	1	eindeutig
44001	Kanal	0	1	eindeutig
44006	StehendesGewaesser	0	1	eindeutig
44005	Hafenbecken	0	1	eindeutig
52003	Schleuse	0	1	mehrdeutig
43006	Sumpf	0	2	eindeutig
54001	Vegetationsmerkmal	0	2	mehrdeutig (Lage)
41005	TagebauGrubeSteinbruch	0	2	mehrdeutig (Struktur)
43008	FlaecheZurZeitUnbestimmbar	0	2	mehrdeutig (Lage, Struktur)
43001	Landwirtschaft	0	2	eindeutig
43007	UnlandVegetationsloseFlaeche	0	2	mehrdeutig (Lage)
43005	Moor	0	2	eindeutig
43004	Heide	0	2	eindeutig
41003	Halde	0	2	mehrdeutig (Struktur)
43002	Laubwald	0	3	eindeutig
43002	Mischwald	0	3	eindeutig
43002	Nadelwald	0	3	eindeutig
41008	SportFreizeitUndErholungsflaeche	0	4	mehrdeutig (Lage, Struktur)
41009	Friedhof	0	4	mehrdeutig (Lage, Struktur)
43003	Gehoelz	0	4	mehrdeutig (Lage)
41001	Wohnbauflaeche	1000	5	mehrdeutig (Struktur)
41007	FlaecheBesondererFunktionalerPraegung	1000	5	mehrdeutig (Lage, Struktur)
41004	Bergbaubetrieb	0	5	mehrdeutig (Struktur)
41006	FlaecheGemischterNutzung	1000	5	mehrdeutig (Lage, Struktur)
	FlaecheBesondererFunktionalerPraegung	2000	6	mehrdeutig (Lage, Struktur)
51003	FlaecheGemischterNutzung	2000	6	mehrdeutig (Lage, Struktur)
	Wohnbauflaeche	2000	6	mehrdeutig (Struktur)
42016	Schiffsverkehr	0	9	eindeutig
51009	Bauwerk	0	9	eindeutig
41002	IndustrieUndGewerbeflaeche	0	9	mehrdeutig (Struktur)
51007	Bauwerk	0	9	eindeutig
51002	Bauwerk	0	9	eindeutig
42015	Flugverkehr	0	9	mehrdeutig (Struktur)
42009	Platz	0	9	mehrdeutig (Lage, Struktur)
42001	Strassenverkehr	0	-999	keine Zuordnung
42010	Bahnverkehr	0	-99	keine Zuordnung
	Keine Angabe	0	-9	

<span style="color:blue">■</span> 1 Gewässer-, Seenklima	<span style="color:yellow">■</span> 6 Stadtrandklima
<span style="color:lightblue">■</span> 2 Freilandklima	<span style="color:orange">■</span> 7 Stadtklima
<span style="color:green">■</span> 3 Waldklima	<span style="color:red">■</span> 8 Innenstadtklima
<span style="color:lightgreen">■</span> 4 Klima innerstädt. Grünflächen	<span style="color:gray">■</span> 9 Gewerbe-, Industrieklima (offen)
<span style="color:yellow">■</span> 5 Vorstadtklima	<span style="color:gray">■</span> 10 Gewerbe-, Industrieklima (dicht)

In Bezug auf ihre strukturellen und lagebezogenen Charakteristika decken die Objektarten zum Teil weite Spektren ab (s. rechte Spalte der Tabelle 24)

Weil keine explizite Unterscheidung zwischen innerstädtischen und Freilandmerkmalen existiert, sind Schwierigkeiten bei der Zuordnung des Objektbereiches „Vegetation“ vor allem lagebezogener Natur. Die mehrdeutigen Objektarten wie beispielsweise „Gehölz“, müssen im folgenden Verfahren über die Ermittlung von Nachbarschaftsbeziehungen differenziert werden.



Die häufig auftretende strukturelle Mehrdeutigkeit der Objektarten im Bereich „Siedlung“ wird bereits bei Betrachtung ihrer Definition deutlich<sup>11</sup>. Allerdings lässt sich über das Objektattribut „BEB“ („Art der Bebauung“ differenziert nach offener und geschlossener Bauweise) eine vorläufige Zuordnung zu den Klimatoptypen 5 und 6 (Vorstadtklima und Stadtrandklima) vornehmen. Über die Bewertung der Daten zum Überbauungs- und Versiegelungsgrad lässt sich anschließend eine weitere Separierung in Klimatoptypen mit höherem bioklimatischem Belastungspotenzial (Stadt- und Innenstadtklimatope) vornehmen.

Abbildung 73 skizziert den Verfahrensablauf zur weiteren Differenzierung der Klimatoptypen (oben) und die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführte Methodenprüfung (unten). Folgende Vorgehensweise wird zunächst empfohlen:

1. Primäre Klimatoptypen-Zuordnung der Objektarten aus dem Basis-DLM über Anbindung der „Lookup“-Tabelle (Tabelle 24) an den ATKIS-Datensatz. Zusätzliche Objektarten müssen bei Bedarf ergänzt werden.
2. Berechnung des überbauten Flächenanteils<sup>12</sup> ( $VS_{\text{Bau}}$ ) sowie des gesamtversiegelten Flächenanteils ( $VS_{\text{Ges}}$ ) der einzelnen ATKIS-Objekte und Kennzeichnung folgender Eigenschaften:
  - Primärer Klimatoptyp 5 oder 6  $\rightarrow VS_{\text{Bau}} > 0,2$  und  $\leq 0,4$  = Klimatoptyp 7
  - Primärer Klimatoptyp 5 oder 6  $\rightarrow VS_{\text{Bau}} > 0,4$  = Klimatoptyp 8
  - Primärer Klimatoptyp 9  $\rightarrow VS_{\text{Bau}} > 0,4$  = Klimatoptyp 10
  - Primärer Klimatoptyp 9  $\rightarrow VS_{\text{Bau}} > 0,2$  und  $VS_{\text{Ges}} > 0,7$  = Klimatoptyp 10

Die finale Klimatopkarte für das Hanauer Stadtgebiet ist in der Abbildung 74 dargestellt.

<sup>11</sup> Beispielsweise ist die Objektart „Fläche gemischter Nutzung“ definiert als „bebaute Fläche einschließlich der mit ihr im Zusammenhang stehenden Freifläche (Hofraumfläche, Hausgarten), auf der keine Art der baulichen Nutzung vorherrscht. Solche Flächen sind insbesondere ländlich-dörflich geprägte Flächen mit land- und forstwirtschaftlichen Betrieben, Wohngebäuden u.a. sowie städtisch geprägte Kerngebiete mit Handelsbetrieben und zentralen Einrichtungen für die Wirtschaft und die Verwaltung.“ (AdV 2008)

<sup>12</sup> Eine Berücksichtigung der mittleren Gebäudehöhe je Flächeneinheit wird wegen der uneinheitlichen Flächenabgrenzung nicht als sinnvoll erachtet.

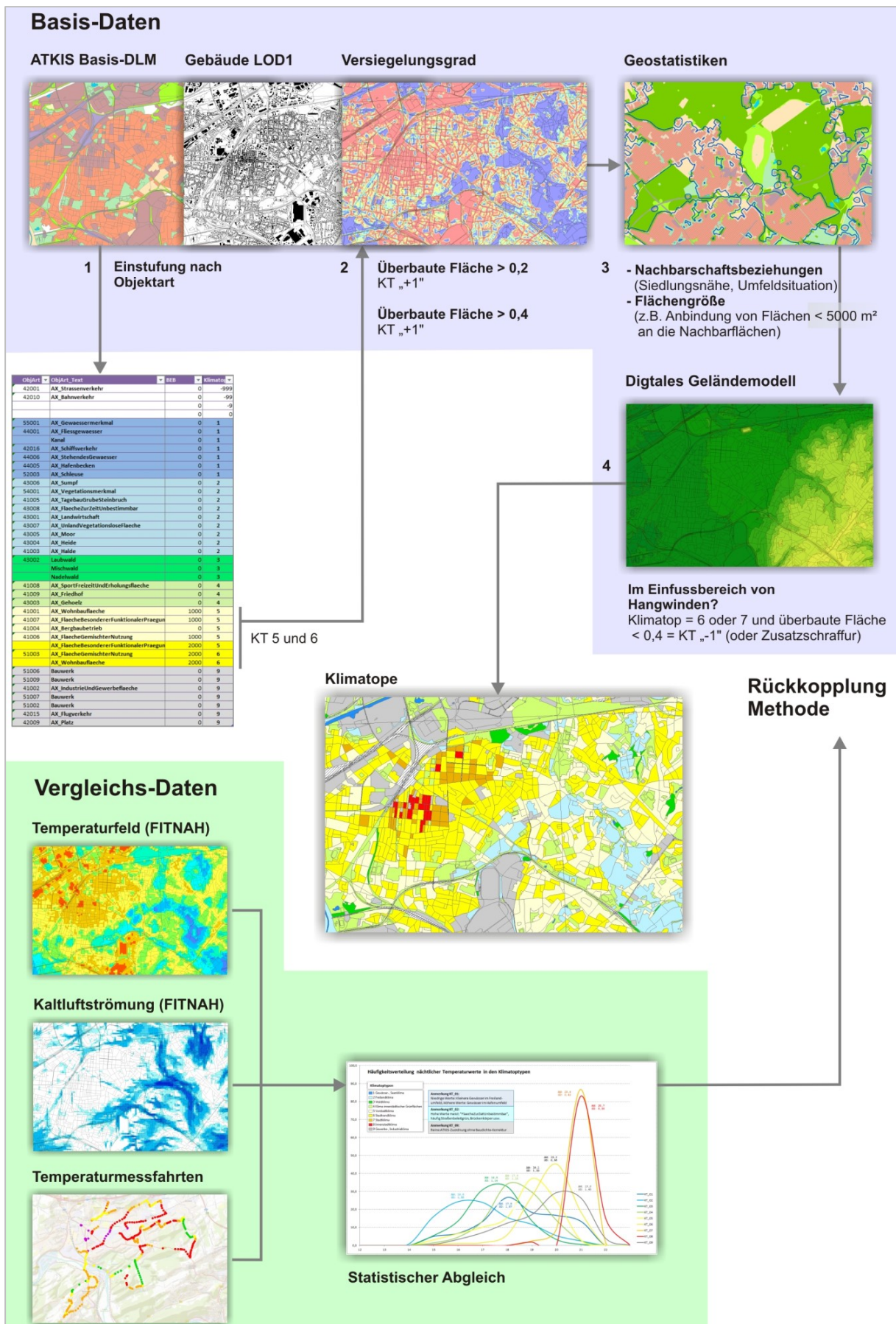


Abbildung 73: Skizze des beispielhaften Verfahrensablaufs zur automatisierten Ableitung von Klimatopen (KT = Klimatoptyp, siehe Legende)



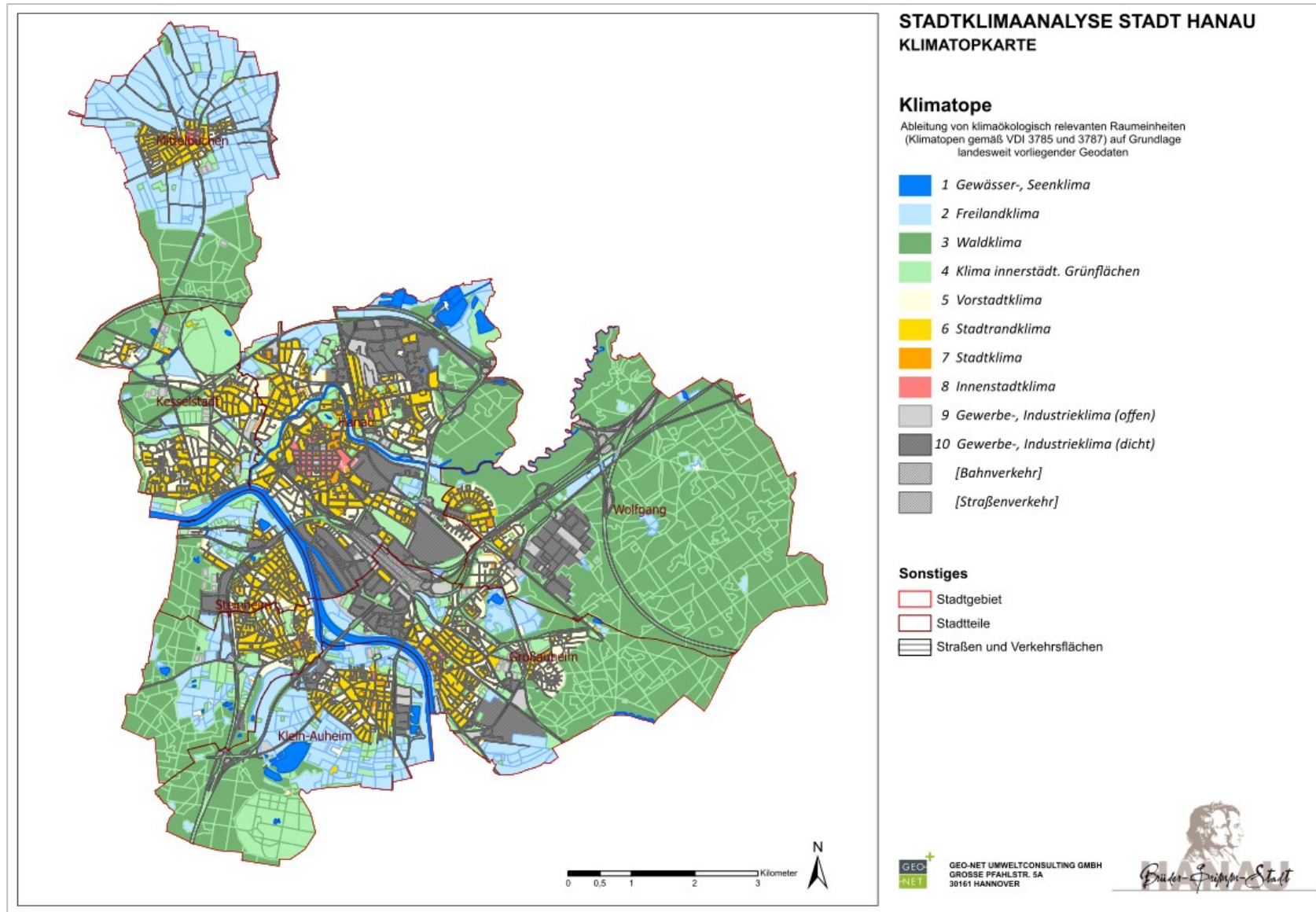


Abbildung 74: Klimatopkarte für das Hanauer Stadtgebiet



## 7.2 KLIMAANALYSEKARTE

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und Handlungsempfehlungen in einer Stadt [oder Region, Anm. der Redaktion]“ (VDI 2015). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine ganz wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (GAEDE UND HÄRTLING 2010). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (MOORE 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte. Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt eine Klimaanalysekarte erstellt.

Um den Komplexitätsgrad zu verringern und die Klimaanalysekarte thematisch-inhaltlich nicht zu überfrachten, ist das Themenfeld „Luftqualität“ aus dem Kartenwerk herausgelöst und in eigene Zwischenprodukte überführt worden. Damit wurde in Teilen von den in der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 (VDI 2015) definierten Vorschlägen für die Inhalte der Klimaanalysekarte abgewichen. Die dort beschriebenen Inhalte finden sich in der Gesamtheit der Zwischenprodukte aber umfänglich wieder. Eine Zusammenführung und planerische Inwertsetzung erfolgt im Rahmen der Planungshinweiskarte.

Die Legende (Abbildung 75) gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 5 m der Modellausgabe. Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier nahegelegensten Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte. Im Wirkraum ist die Differenz der absoluten Lufttemperatur zwischen unbebautem Umland und dem bebauten Stadtgebiet für das 2 m Niveau flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.



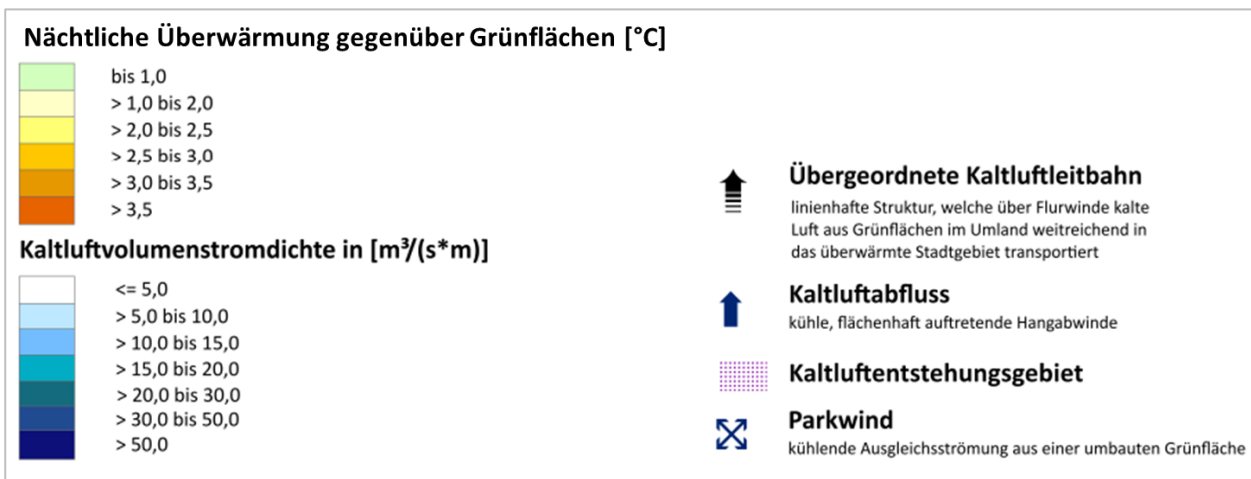


Abbildung 75: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarte (verkürzte Darstellung)

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 25). 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 Ausgleichs- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden.

Die als Kaltluftentstehungsgebiet gekennzeichneten Räume sind Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 25,4 m³/m²h. Dieser Schwellenwert bezeichnet die Summe des Mittelwertes der Kaltluftproduktionsrate und deren einfachen Standardabweichung.

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

Flächenhafte Kaltluftabflussbereiche sind nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Hangfolgende Kaltluftabflüsse reagieren aufgrund der zumeist gegebenen Ausweichmöglichkeiten der Luft deutlich robuster auf ein moderates Maß an baulichen Entwicklungen. Eine Einschränkung der klimaökologischen Funktionen ist aber bei besonders intensiven Flächenentwicklungen oder unter besonderen Nutzungsbedingungen (z.B. Bebauung einer ansonsten von Wald umschlossenen Freilandfläche an einem Hang) auch hier durchaus möglich und zu vermeiden. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen immer auch ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. noch einmal intensiver zu prüfen ist.



Tabelle 25: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in der Klimaanalysekarte

Legendenelement	Ableitungsmethode
Strömungsrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiet	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 25,4 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h
Kaltluftleitbahn (übergeordnet)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Kaltluftabfluss	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Parkwind	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, der Kaltluftentstehungsgebiete, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Leitbahnen und Kaltluftabflussbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abbildung 76 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für den südlichen Übergangsbereich zwischen Klein-Auheim und Großauheim einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

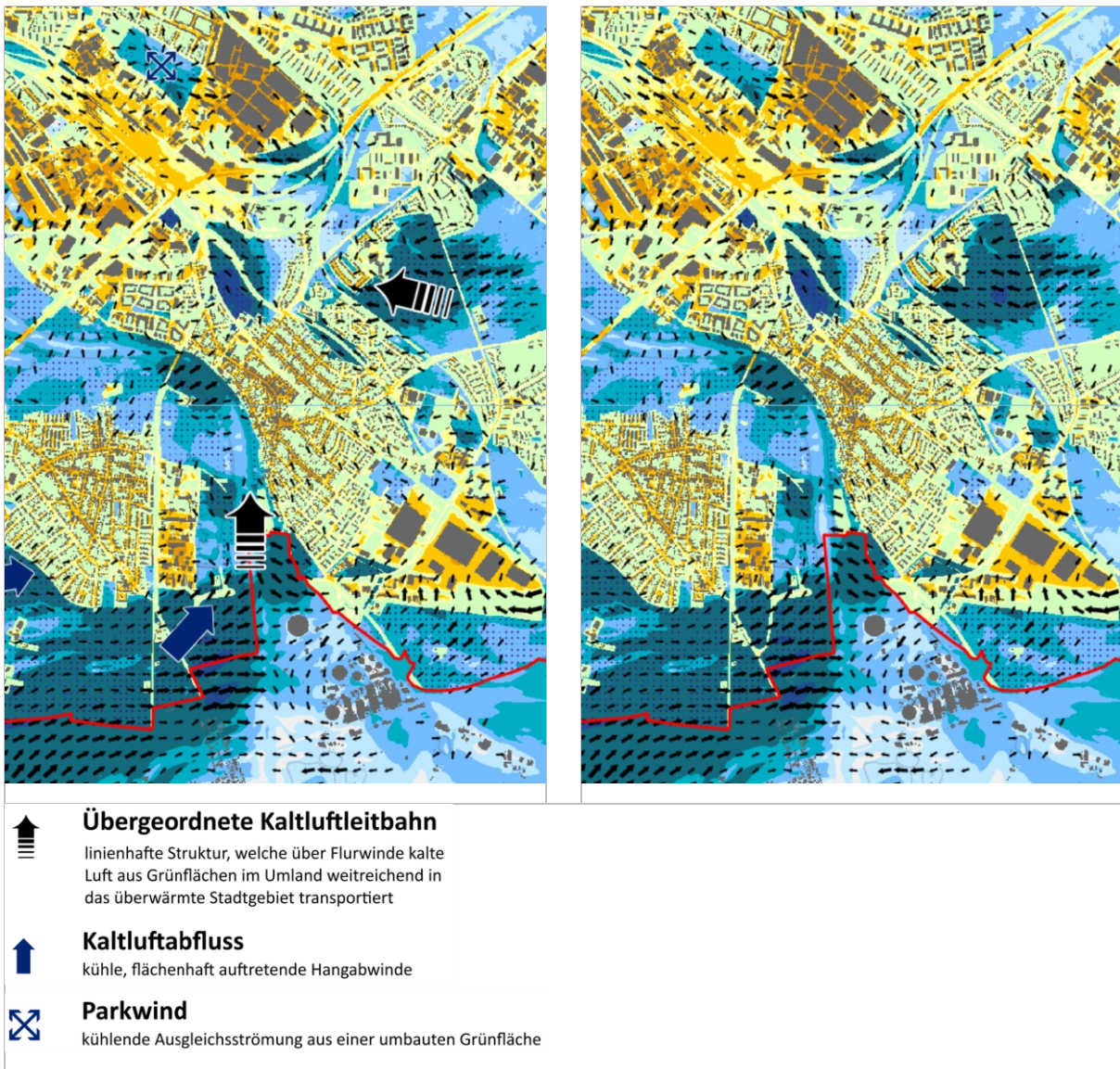


Abbildung 76: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links mit und rechts ohne entsprechende Ausweisung)

Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im 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 beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte. In *Abbildung 77* ist die Klimaanalysekarte dargestellt.



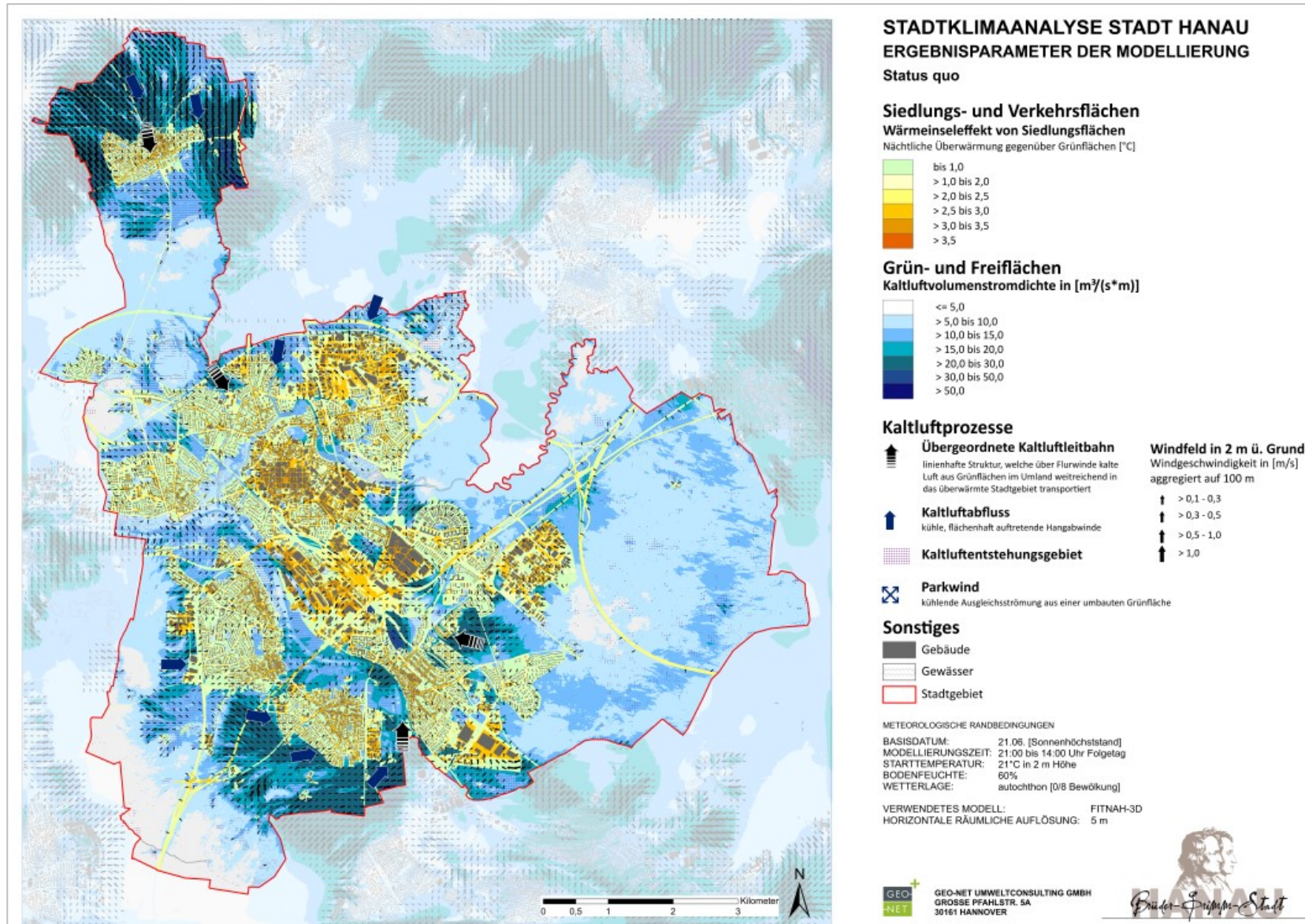


Abbildung 77: Klimaanalysekarte für das Hanauer Stadtgebiet.

## 8. Kartenprodukte für Bewertung und Planung

### 8.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich bei der Planungshinweiskarte um eine „Informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält“ (VDI 2015,5). Der Begriff der Planungsrelevanz wird in der Richtlinie noch weiter konkretisiert als: „Bewertung von (Einzel-)Flächen hinsichtlich ihrer Klimafunktionen, aus der Maßnahmen zum Schutz oder zur Verbesserung des Klimas abgeleitet werden. Planungsrelevant sind dabei alle thermischen und lufthygienischen Phänomene, die als teil- oder kleinräumige Besonderheiten oder Ausprägungen signifikant abweichen [...] und die Auswirkungen auf Gesundheit und Wohlbefinden von Menschen haben“ (VDI 2015,5-6).

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

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt auch keiner Planzeichenverordnung. Daraus folgt zum einen, dass begründet auch von den Vorschlägen in der Richtlinie abgewichen werden kann, solange der Grundgedanke erhalten bleibt. Zum anderen bedeutet dies, dass Inhalte und Hinweise vollumfänglich der Abwägung zugänglich sind, sofern Inhalte nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan) übernommen werden. Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zur Bestandssituation in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, gemäß der Produktpyramide (Abbildung 10) vorgelagert sog. Bewertungskarten auszugeben. Die zwei Bewertungskarten („Nacht“ und „Tag“; Vgl. hierzu Kap. 8.3) bauen auf den zugehörigen nächtlichen Klimaanalysekarten bzw. PET-Karten des Tages auf und sind der Planungshinweiskarte hierarchisch untergeordnet. Der Erstellung dieses Kartenwerks liegt ein mit vielen beteiligten Akteuren abgestimmter Aushandlungsprozess zugrunde (s. Kapitel 3).





## 8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap.6.2) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die hum-anbioklimatische 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 möglichst standardisierten Fortschreibung unterliegen
- eine eindeutige Einteilung zwischen klimaökologischen Ausgleichs- und Wirkräumen erlauben
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyse-ansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen

Ein entsprechender Datensatz existiert nicht per se auf kommunaler Ebene. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine gute Grundlage, die durch eine gutachterliche Tätigkeit entsprechend weiterqualifiziert wurde. Die Modifikation betrifft dabei sowohl die Zusammenfassung von sehr kleinräumigen Strukturen (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch die Aufteilung größerer zusammenhängender Flächen in kleinere Funktionseinheiten (vorrangig im Wirkraum). Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen) sowie der Bewertungskarten und der Planungshinweis-karte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m<sup>2</sup> (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 78).

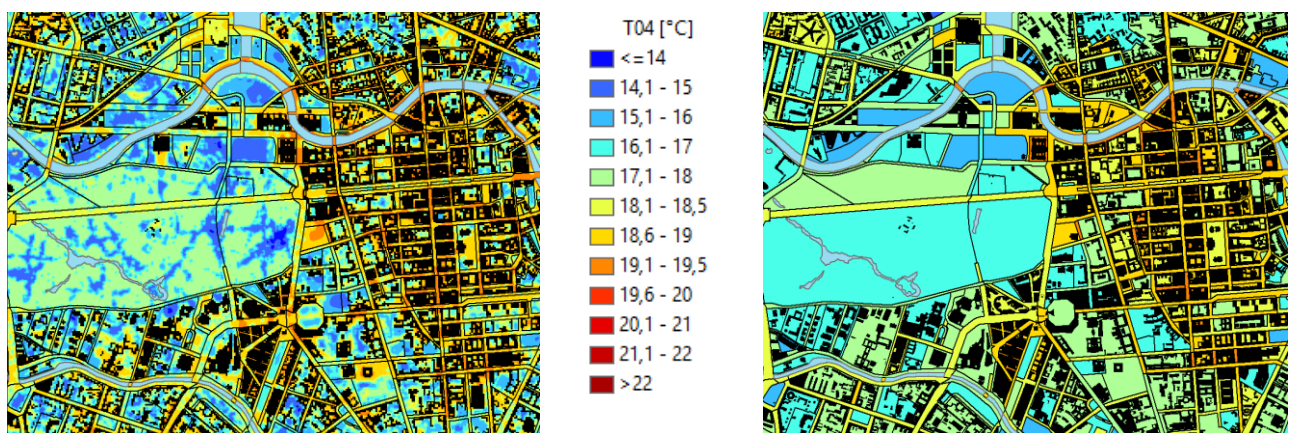


Abbildung 78: links das Ausgangsraster (Beispiel) und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie, beispielhaft für die nächtliche Lufttemperatur.



### 8.3 BEWERTUNGSKARTEN

Die Modellergebnisse und die Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Beurteilung in den Bewertungskarten (und später auch der Planungshinweiskarte „PHK“) fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter (dargestellt in Kap.6.2) zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

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

#### 8.3.1 WIRKRAUM

Wertgebend sind dabei die PET um 14:00 Uhr für die Tagsituation sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 Uhr als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.2.5). Bei den der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie mithilfe der oben beschriebenen Methode aufgeprägten Temperaturen handelt es sich zunächst um absolute Werte, die ausschließlich für den gewählten meteorologischen Antrieb Temperaturniveau gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – fachlich verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive sowie negative Standardabweichungen davon als obere und untere S<sub>1</sub>-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 79).

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

Dabei ist

- $z$  standardisierter Wert der Variablen  $x$
- $x$  Ausgangswert der Variablen  $x$
- $\mu$  arithmetisches Mittel
- $\sigma$  Standardabweichung

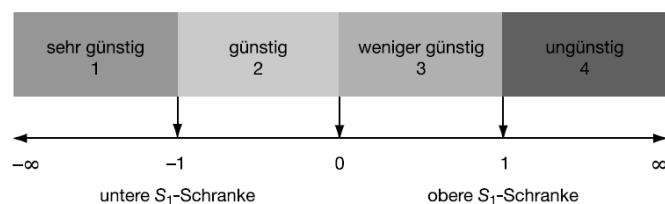


Abbildung 79: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)



Dem Bewertungsverfahren liegt also ein relativer Ansatz zugrunde, bei dem nicht nach universell gültigen (ggf. rechtlich normierten) Grenzwerten gefragt wird, sondern bei dem das auftretende Wertespektrum konkret für den analysierten Raum den Bewertungsmaßstab bildet. Das vorliegend von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein (vgl. hierzu Kap. 8.4). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten oder in kalten Klimaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Es wurden Statistiken jeweils für die Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes berechnet, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für zwei verschiedene Bewertungskarten ergaben. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für die beiden Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Hanau wurde aus Gründen der Darstellung die ursprünglich 4-stufige in eine 5-stufige Skala von „sehr günstig“ bis „sehr ungünstig“ überführt, ohne dabei die grundsätzliche Systematik aufzulösen (Tabelle 26). Für die Tagsituation wurde eine Unterscheidung in Wirkraum 1 (Wohnen/Arbeiten) mit vorrangig stationärem Aufenthalt und Wirkraum 2 (Straßenraum) mit vornehmlich mobilem Aufenthalt des Langsamverkehrs wie Fußgängern und Radfahrern getroffen. Nachts steht der Schlafkomfort im Fokus, weshalb hier ausschließlich Wohn- und Gewerbeflächen bewertungsrelevant waren. Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.

Tabelle 26: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Tageszeit und Strukturtyp

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



### 8.3.2 AUSGLEICHSRaum

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

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

Die folgende Abbildung 80 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Klimafunktion:
  - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom  $\geq 17 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  *oder*
  - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von  $\geq 0,34 \text{ m/s}$  *oder*
  - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate von  $\geq 25,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen<sup>13</sup>

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

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

<sup>13</sup> Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).

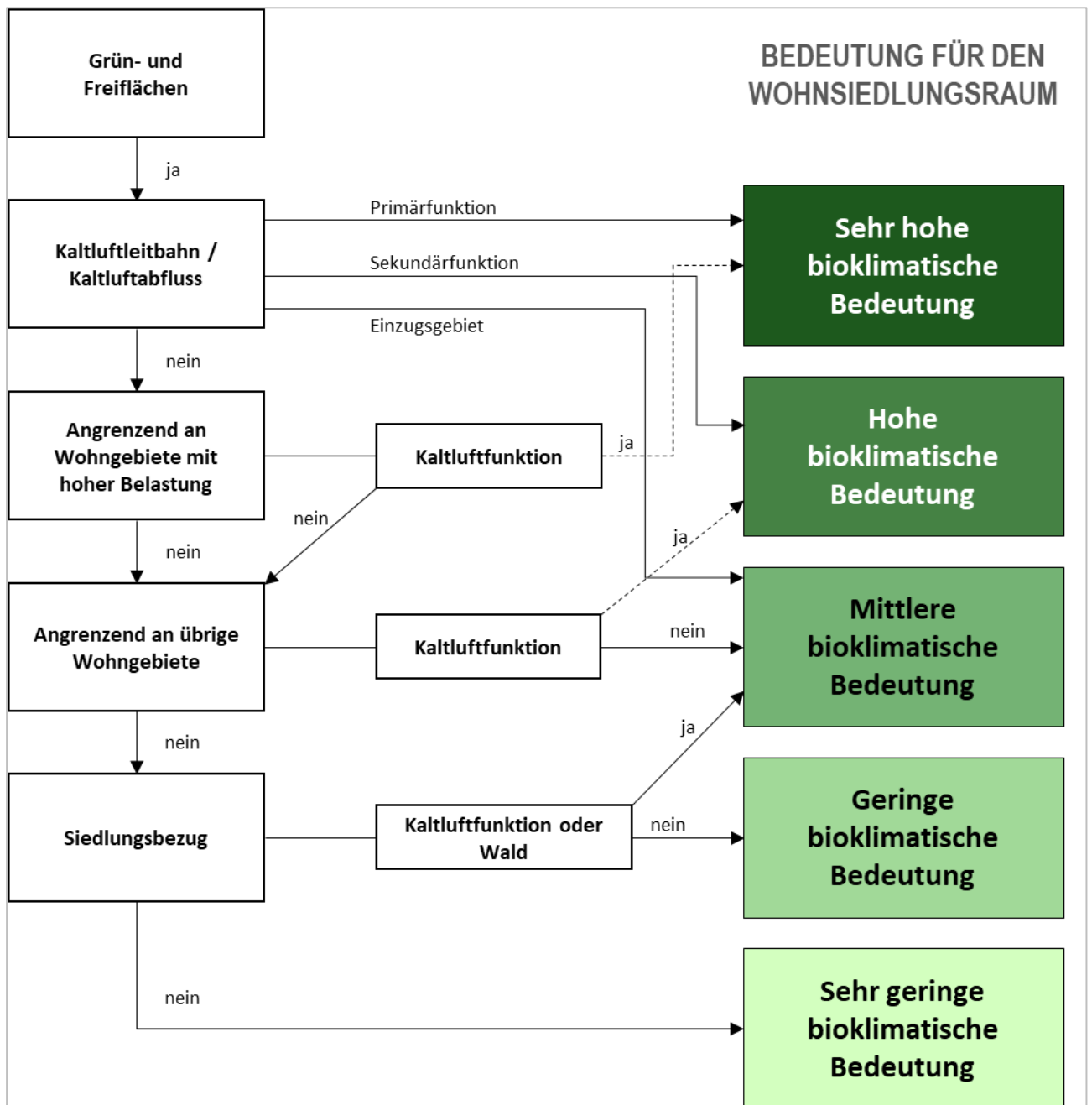


Abbildung 80: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.

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

Tabelle 27 listet die festgelegten z-Werte und die zugehörigen PET-Bereiche für den Ist-Zustand für alle Ausgleichsflächen im Hanauer Stadtgebiet auf und stellt die in Anlehnung an VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) erarbeiteten Bewertungsstufen gegenüber.





Tabelle 27: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Betrachteter Parameter	Strukturtyp
<b>Tagsituation</b> Ausgleichsraum	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i>  5= sehr hoch 4= hoch 3= mittel 2= gering 1= sehr gering	<i>PET 14:00 Uhr</i>  bis -0,8 > -0,8 bis ≤ -0,2 > -0,2 bis ≤ 0,4 > 0,4 bis ≤ 1 > 1	<i>PET 14:00 Uhr [°C]</i>  > 41,58 > 38,73 bis ≤ 41,57 > 35,90 bis ≤ 38,72 > 29,90 bis ≤ 33,0 < 33,1	Grün-/Freiflächen, Wald

### 8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in der Klimaanalysekarte (Abbildung 77) ist auch in der nächtlichen Bewertungskarte das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (s. Kapitel 7.2).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in der nächtlichen Bewertungskarte auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Zum einen zeigt der Kaltlufteinwirkungsbereich in hellblauer, rasterbasierter Schraffur an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerbebereiche eindringen kann, zum anderen sind Wohnraumsiedlungsbereiche mit Klimafunktion (vgl. folgender Abschnitt) durch eine blaue Umrandung hervorgehoben (s. Abbildung 81).



Abbildung 81: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von  $12,7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$  oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von  $0,12 \text{ m/s}$  erreichen oder überschreiten. Sollten mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufteinwirkungsbereiche ausgewiesen worden sein, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Klimafunktion“ gekennzeichnet. Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.

Es sei bereits an dieser Stelle angemerkt, dass insbesondere das Kernstadtgebiet deutliche und großflächige Kaltlufteinwirkungsbereiche aufweist. Diese sorgen für eine gute Durchlüftung des Stadtgebietes in der Nacht. Zurückzuführen ist das auf die Windgeschwindigkeiten und Kaltluftvolumina, welche zum großen Teil in diesen Bereich überdurchschnittlich sind, was an thermischen Unterschieden wie auch an der orographischen Situation liegt.



## 8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN

### 8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 82 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Hanau, in welcher u.a. die *Wirkräume* hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden.

Etwa 40 % aller Wirkräume der Stadt sind durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen am Stadtrand zu dieser Kategorie. Darunter insbesondere jene in den Stadtteilen bzw. Bereichen Pioneer Park, Großauheim, Steinheim und Kesselstadt. Im Allgemeinen weisen diese Bereiche einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringere Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte am Tage bereits dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann.

Große Bereiche der weiter außen gelegenen Stadtteile Klein-Auheim sowie die Bezirke Auwanneweg, Hainbachstraße, Vogelsangstraße, Friedrichstraße, Wilhelminenstraße zählen zu etwa der Hälfte (44 %) zu den Wirkungsräumen mit einer günstigen thermischen Situation. Hierbei handelt es sich vor allem um locker bebaute, rauigkeitsärmere Gebiete, welche die Kaltluftströmung gut passieren kann und die dennoch über einen hohen Grünanteil verfügen.

14 % der Wirkraumflächen weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren bis hohen Versiegelungsgrad im näheren Innenstadtbereich. Dazu kommen große Teile der Gewerbe- und Industriegebiete, wie Dunlop, Lindenau, östlich der Dieselstraße, der Hafbereich, Heraeus-Areal, Otto-Hahn-Straße und das Industriegebiet Nord, welche ebenfalls in diese Kategorie fallen.

Lediglich 2 % der Wohn- und Gewerbeflächen Hanaus gehören der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Darunter fallen neben dem zentralen Marktplatz-Bezirk, einige einzelne Gewerbeflächen wie bspw. entlang der Leipziger Straße und im Hafbereich. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt und verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Darüber hinaus stehen in unmittelbarer Umgebung oftmals nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

Keine der Wohn- und Gewerbeflächen sind mit der sehr ungünstigen thermischen Situation charakterisiert.



Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand eine Ausweisung von 5 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen, der Kaltluftabflüsse und des Parkwinds. Zudem befinden sich in dieser Klasse ausgewiesene Bereiche innerhalb der Hanauer Stadtgrenzen wieder und sind vorrangig in der nahen Peripherie o.g. Kaltluftprozesse gelegen. Hierzu zählen beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Kleingartenanlagen (Steinheim), Grünflächen wie der Hauptfriedhof oder an den Siedlungsraum anschließende Agrar- und Waldflächen.

38 % der Ausgleichflächen entfallen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befinden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrar- und vor allem Waldflächen, welche einen direkten Siedlungsbezug zur Stadt oder der umliegenden Ortschaften haben, in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen.

Die Klasse der Ausgleichsflächen mit geringer humanbioklimatischer Bedeutung nimmt mit 49 % den größten Teil aller Ausgleichsräume ein. Hierzu zählen die siedlungsferneren Wald- und Ackerflächen fernab des Stadtzentrums sowie Waldbereiche, die zwar einen Teil zum überörtlichen Kaltluftprozessgeschehen beitragen, aber oftmals über keinen direkten Bezug zum bewohnten Wirkraum verfügen.

In die Klasse mit der „sehr geringen“ bioklimatischen Bedeutung entfallen 8 % der Flächen. Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um Freiflächen oder Waldareale mit keinem direkten Bezug zu Siedlungsflächen.

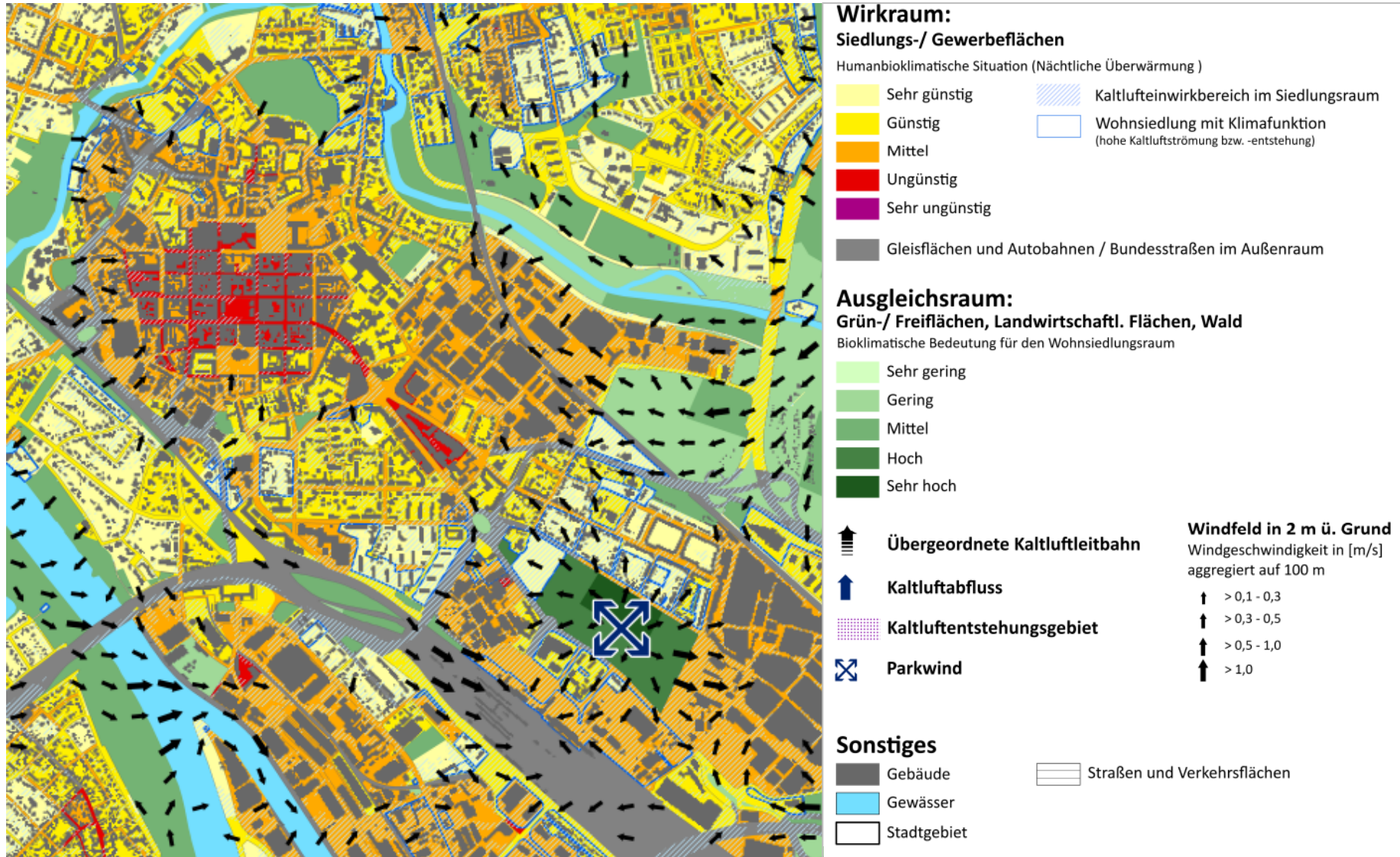


Abbildung 82: Bewertungskarte der Nachtsituation für einen Ausschnitt des Hanauer Stadtgebiets.



Tabelle 28 zeigt zusammengefasst die prozentualen Flächenanteile der Bewertungsstufen in Wirk- und Ausgleichsraumflächen.

Tabelle 28: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Ist-Zustand.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen <i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i>	Flächenanteile [%] Ist-Zustand
Nacht	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	40
		2= günstig	44
		3= mittel	14
		4= ungünstig	2
		5= sehr ungünstig	0
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	4= hoch	5
		3= mittel	38
		2= gering	49
Tag	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	18
		2= günstig	23
		3= mittel	37
		4= ungünstig	22
		5= sehr ungünstig	<1
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	23
		2= günstig	18
		3= mittel	29
		4= ungünstig	26
		5= sehr ungünstig	4
		5= sehr hoch	31
		4= hoch	13
		3= mittel	18
		2= gering	18
		1= sehr gering	20

### 8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Hanau werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und Ausgleichsräume im Hinblick auf die humanbioklimatische Bedeutung bewertet. Anders als in der Nacht ist am Tage nicht das Kaltluftprozessgeschehen die bewertungssteuernde Größe, sondern die PET, die vornehmlich durch Verschattung modifiziert wird (Abbildung 83).



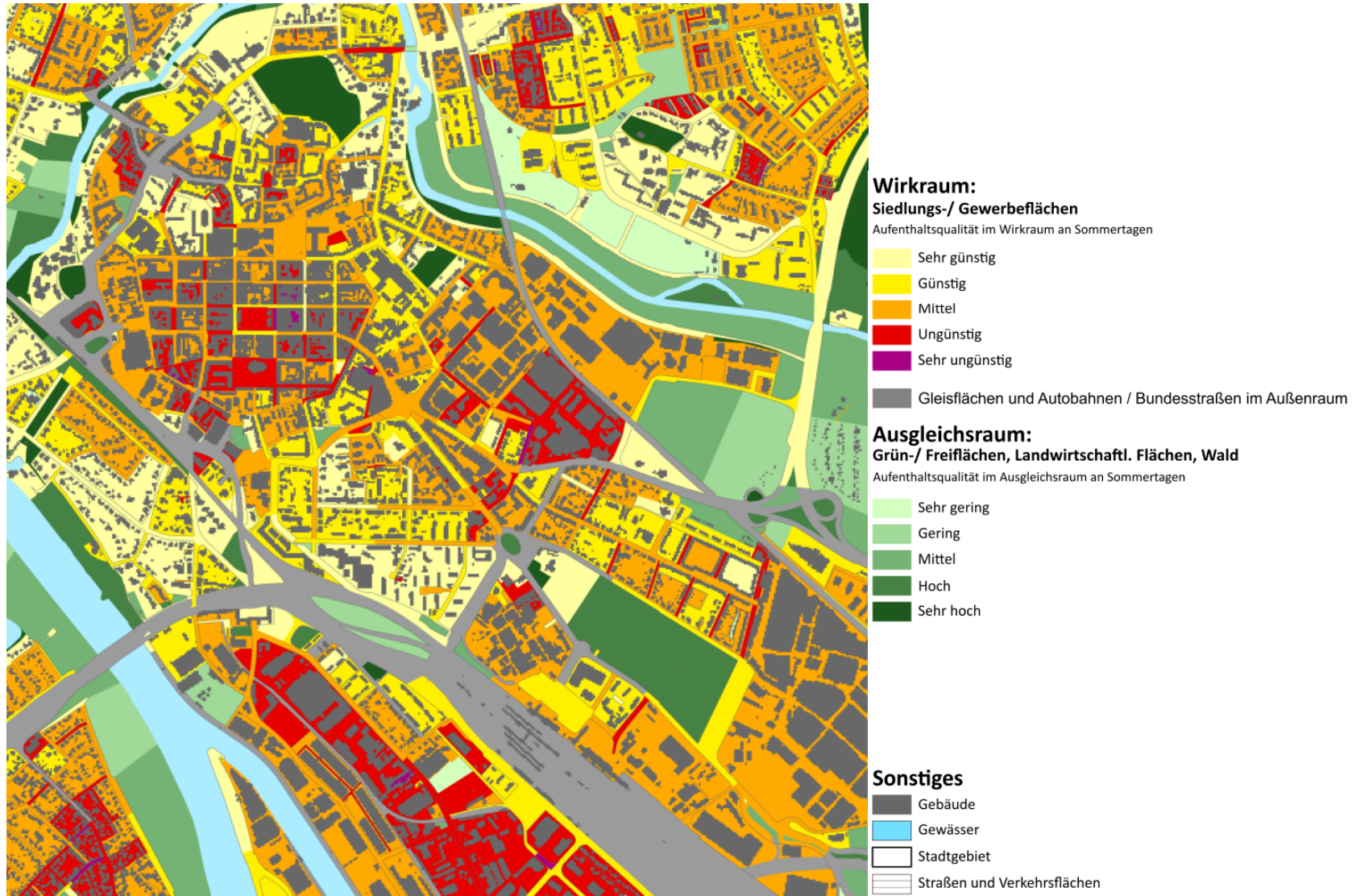


Abbildung 83: Bewertungskarte der Tagsituation im Ist-Zustand (2022) für einen Ausschnitt des Hanauer Stadtgebiets.



In Hanau sind 18 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 23 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Vor allem die durchgrünteren, zumeist waldnahen oder flusssnahen Siedlungsteile / Bezirke mit Einzel- und Reihenhausbauung (z.B. Waldsiedlung, Weststadt, Kinzdorf, Tümpelgarten, Teile vom Pioneer Park) gehören dieser Kategorie an. Am Tage sorgt der hohe Grün- (insbesondere Baum-) anteil durch Schattenwirkung, aber auch die an den Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse für thermisches Wohlbefinden im Außenraum. Beispiele für den Verkehrsraum mit günstiger thermischer Situation sind die zu großen Teilen mit Bäumen bestandenen Straßen der Philippsruher Allee, Kastanienallee, Burgallee und einige der Straßen am Rand des Stadtgebietes, welche durch den Wald führen oder baumbestanden sind.

23 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Hanau wurden der Kategorie der günstigen humanbioklimatischen Situation zugeordnet. Diese locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Beispielflächen hierfür sind über das gesamte Stadtgebiet verteilt. So befinden sich Flächen dieser Kategorie im geplanten Bautz-Areal, Rosenau, Friedrichstraße, Paul-Ehrlich-Straße oder der Pioneer Park sowie im westlich gelegenen Industriegebiet Wolfgang. Bei den Verkehrsflächen weisen 18 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf, wie Teile der Straßen Am Markt, Hirschstraße oder Sandeldamm.

Mit 37 % ist der größte Anteil der Wohn- und Gewerbeflächen heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Bei den Verkehrsflächen und öffentlichen Flächen sind es 29 %. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Obwohl die Grünausstattung hier oftmals gering ausfällt, erzeugt die enge Gassenbauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen. Es finden sich diese Bereiche in Klein-Auheim, Großauheim, Steinheim, Kesselstadt und in Teilen der Innenstadt, die viele Wirkraumflächen mit mittlerer Belastung aufzeigen. Einige der Gewerbeareale wie Dunlop-Areal, Heraeus und der Hafengebiete fallen mit dem Großteil ihrer Flächen in diese mittlere Klassifizierung. Dies rührt auch daher, dass es zwischen den großen und flächigen Gebäuden zu Verschattungen kommt.

22 % der Hanauer Wohn- und Gewerbeflächen und 26 % der Verkehrsflächen sind am Tage durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Die Großzahl an Flächen in der Innenstadt sind mit dieser Klassifizierung belegt. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die zumeist mit flacher Einzelhausbauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen etwas weiter außerhalb gelegenen Stadtteile (z.B. Großauheim, Klein-Auheim, Steinheim, Mittelbuchen). Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 5 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei Teilen der großen Industrie- und Gewerbeareale (bspw. Grüner Weg, Hafen, Moselstraße) ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen - ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören innerstädtische Straßengebiete, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr mit sich bringen sowie große Straßengebiete der umliegenden Stadtteile wie Großauheim, Klein-Auheim, Steinheim oder Mittelbuchen. Mittelbuchen zeigt auch bei der Wohnbauung einen sehr hohen Anteil an dieser ungünstigen Klasse. Dies ist auf die umliegenden großflächigen



Ackerflächen zurückzuführen, welche sich tagsüber, ebenfalls wie die Gebäudekörper und versiegelten Bereiche, stark aufheizen und zu einer Überwärmung beitragen. Es fehlen kühlende, beschattete Ausgleichsflächen am Tag, welche geringere Lufttemperaturen aufweisen, um der Überwärmung entgegenzuwirken.

Es entfallen im Hanauer Stadtgebiet nur sehr wenige Flächen (< 1 % der Siedlungs-/Gewerbebereiche und 4 % der Verkehrsflächen) auf die Kategorie „sehr ungünstige“ thermischen Situation. Hierbei handelt es sich meist um eher kleine und weniger zusammenhängende Flächen, die mit einer sehr hohen Bebauungsdichte bzw. Versiegelung versehen sind und sich daher stark aufheizen. Bei den Straßen handelt es sich meist um kurze Abschnitte, welche über das gesamte Stadtgebiet verteilt sind. Zusammenhängende Bereiche gibt es in Klein-Auheim oder Steinheim.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher Aufenthaltsqualität (31 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In die höchste Bewertungsklasse fallen die weitläufigen Waldareale des Stadtgebietes (Bulau, Fasanerie, Waldbereiche bei Otto-Hahn-Straße). Innenstadtnah gibt es bspw. im Bereich des Schlossgartens, des jüdischen Friedhofs sowie im Uferbereich der Kinzig sehr hoch bewertete Ausgleichsflächen. Alle diese Flächen stellen einen idealen Rückzugsort für die Bewohner der belasteten Stadt (-Zentrums) -bereiche dar.

13 % der Ausgleichsflächen sind einer hohen Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den umliegenden Waldbereichen zu finden, verfügen aber ggf. über einen lichtereren Baumbestand, sodass in diesen Arealen etwas höhere PET-Werte und damit eine geringere Klasseneinstufung erfolgte. Zudem sind die Bereiche sehr viel kleinteiliger als diese in der höchsten Kategorie. Auch im Siedlungsraum sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. Hauptfriedhof, Bereiche des Main- und Kinzigufers), die ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume wirken.

Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (18 % der Grünflächen) sind überall über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit mäßiger Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wegebeziehungen, die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit geringer (18 %) oder sehr geringer (20 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen, wie bspw. um Mittelbuchen und Klein-Auheim ausmachen.



## 8.4 SENSITIVITÄTSANALYSE

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

### 8.4.1 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:

**Hochaltrige:** Personen im Alter ab 85 Jahren wurden in dieser Untersuchung als „Hochaltrige“ bezeichnet und gehören zu einer gegenüber Hitze vulnerablen Gruppe. Bei Menschen in dieser Altersklasse besteht ein erhöhtes Risiko von Übersterblichkeit. Die erhöhte Mortalität begründet sich durch größere hitzeabhängige Gesundheitsrisiken infolge chronischer Erkrankungen, kognitiver und körperlicher Einschränkungen, Multimorbidität sowie Multimedikation und eine herabgesetzte Fähigkeit zur physiologischen Anpassung an Hitze (HLNUG 2019).

**Senioren:** Personen im Alter von 65 bis 84 Jahren wurden aufgrund ihrer Einstufung als „ältere“ Bevölkerung ebenfalls als potenziell vulnerabel betrachtet und als „Senioren“ bezeichnet. Ältere Menschen sind unter Umständen weniger mobil und besitzen eine geringere physiologische Anpassungsfähigkeit gegenüber Hitze (geringere Abgabe der Körperwärme, fehlende Wahrnehmung der Hitze, schnellere Dehydratation) (BMG 2021).

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

Die Sensitivitätsanalyse zeigt die räumliche Verteilung der vulnerablen Bevölkerung Hanaus in einer Karte (Abbildung 85). Die demographischen Daten lagen mit hoher Genauigkeit vor und wurden auf die Ebene von „Baublöcken“, die aus zumeist mehreren Wohngebäuden bestehen, zusammengefasst. Des Weiteren wurden Angaben zu sensiblen Orten bzw. Einrichtungen sowie die Einwohnerdichte und -anzahl pro Baublock im Zuge der Sensitivitätsanalyse ausgewertet.



### *Analyse sensibler Orte / Einrichtungen*

Hierzu zählen Orte, Einrichtungen oder Nutzungen an denen sich vulnerable Gruppen (alte oder kranke Menschen, Kinder) aufhalten. In Hanau wurden Kliniken, Pflegeeinrichtungen, Schulen, Grundschulen, Kindertagesstätten, Flüchtlingsunterkünfte und Behinderteneinrichtungen 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*

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

#### **8.4.2 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 (Hochalt-rige, Senioren, Kleinkinder) berechnet und in Dezile eingeteilt. Der erste Schritt bestand aus der Berechnung der Dichte der jeweiligen vulnerablen Bevölkerungsgruppe in Einwohner pro Hektar pro Baublock. Als nächstes wurden die einzelnen Einwohnerdichten in je zehn Dezile eingeteilt<sup>14</sup>, wodurch sich jeweils 10 Prozent der betrachteten Raumeinheit miteinander vergleichen lassen.

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

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

Die räumliche Verteilung der zuvor vorgestellten Basisindikatoren und deren Einteilung in Dezile ist in Abbildung 84 für jede vulnerable Bevölkerungsgruppe innerhalb eines Ausschnittes des Hanauer Stadtgebiets dargestellt.

---

<sup>14</sup> Dezil-Bildung: Die Einzelwerte eines Indikators werden der Größe nach sortiert und in zehn gleichstark besetzt Gruppen eingeteilt.



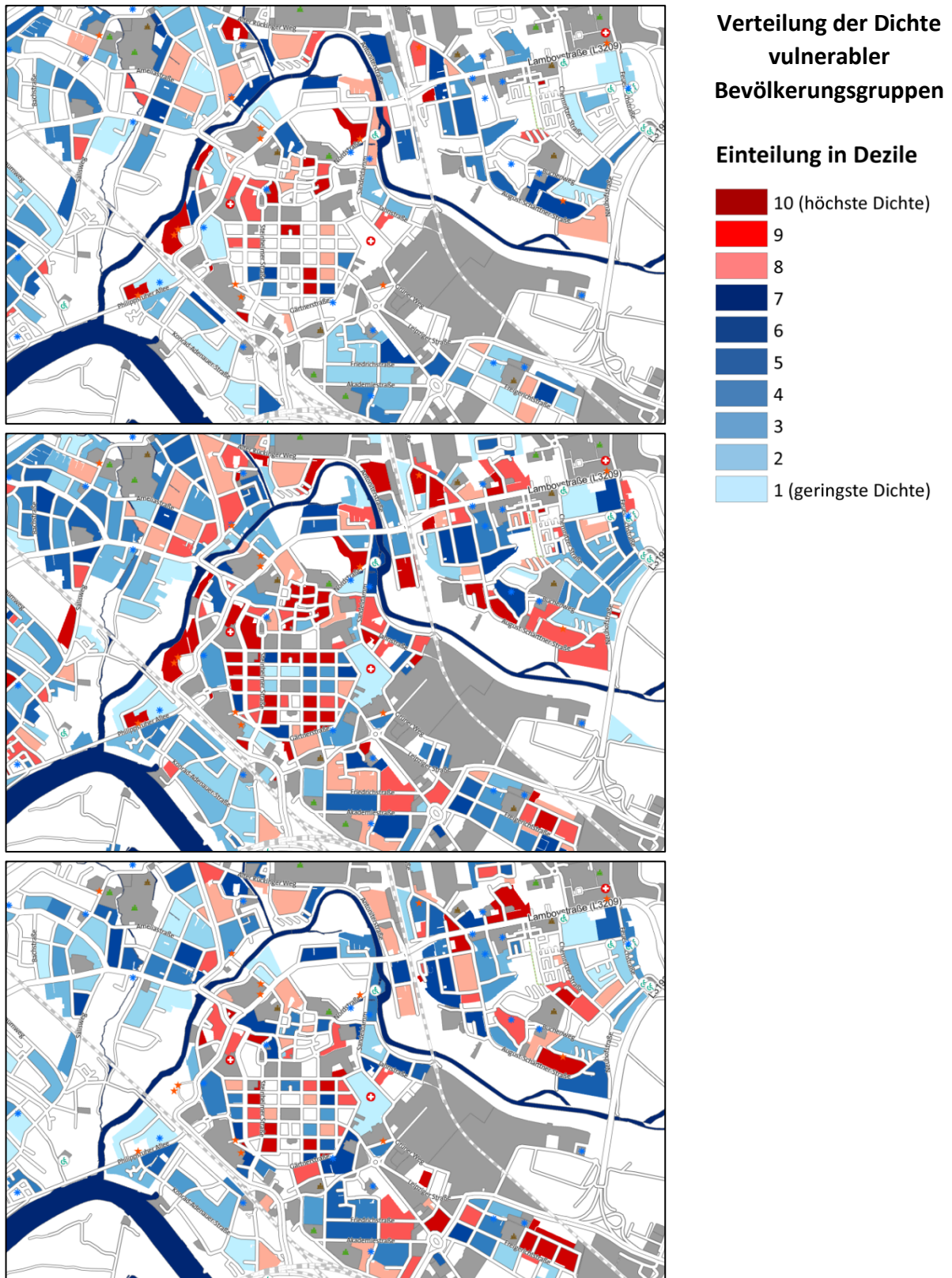


Abbildung 84: Konzentration der Sensitivität von Hochaltrigen (oben), Senioren (Mitte) und Kleinkindern (unten) in einem Ausschnitt des Hanauer Stadtgebiets.



### 8.4.3 SENSITIVITÄTSANALYSEKARTE

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

Zur Identifizierung sensitiver Gebiete wurde eine Überlagerung der Einzelindikatoren vorgenommen, was der Tabelle 29 zu entnehmen ist.

Tabelle 29: Klassifizierung der Sensitivität der Bevölkerung.

Klasse	Indikatoren
Extrem sensitives Gebiet	Hochaltrigendichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 9 bis 10
Sehr hoch sensitives Gebiet	Hochaltrigen- oder Seniorendichte Dezile 8 bis 10 und Kinderdichte Dezil 9 bis 10
Hoch sensitives Gebiet	Hochaltrigen- oder Seniorendichte Dezile 8 bis 10 oder Kinderdichte Dezil 9 bis 10
Sensitives Gebiet	bisheriges nichtzutreffend, aber hohe Einwohneranzahl /-dichte* oder 1 sensibler Ort
wenig sensitives Gebiet	bisheriges nichtzutreffend

\* hohe Einwohneranzahl = ab 100 Einwohner pro Wohnblock; hohe Einwohnerdichte = ab 200 EW / Hektar und mind. 25 Einwohner

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

Die Sensitivitätsanalysekarte (Abbildung 85) zeigt die räumliche Verteilung hitzesensibler Bevölkerungsgruppen auf Wohnblockebene. Unter Sensitivität wird hier die Empfindlichkeit bzw. Anfälligkeit der Hanauer Bevölkerung gegenüber Hitze verstanden.

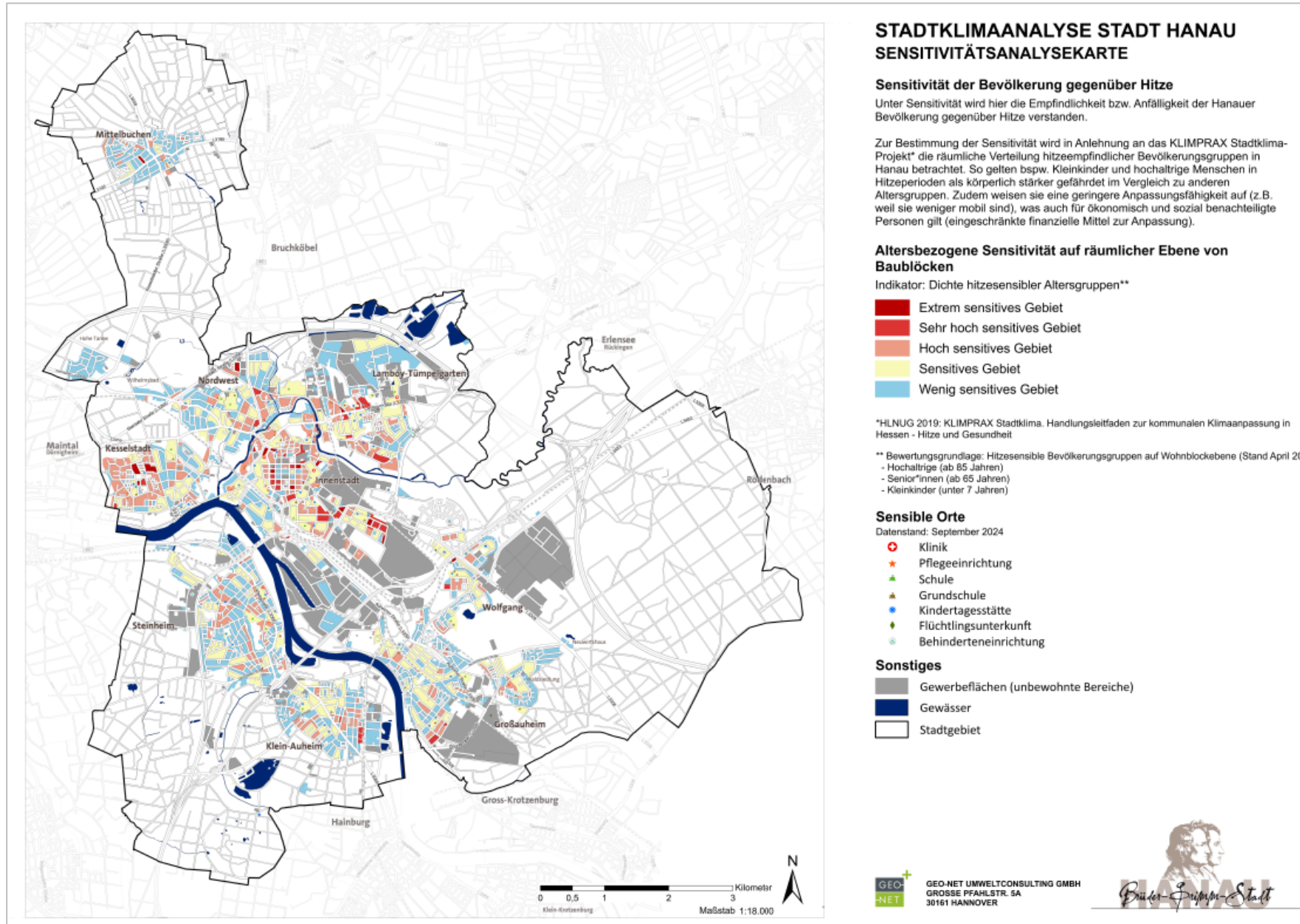


Abbildung 85: Sensitivitätsanalysekarte des Hanauer Stadtgebiets.



#### 8.4.4 EMPFEHLUNGEN UND MAßNAHMEN

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

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

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



## 8.5 PLANUNGSHINWEISKARTE

In der *Planungshinweiskarte Stadtklima* wurden die Ergebnisse der zwei Bewertungskarten zusammengefasst (s. folgende Unterkapitel). Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind nicht unmittelbar in die Kartenerstellung eingeflossen. Die Karte macht auf den ersten Blick ersichtlich, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Hanau Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden müssen (Abbildung 86). Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für weitere Planungsverfahren dar.





**AUSGLEICHSRaum: GRÜN- / FREIFLÄCHEN, LANDW. FLÄCHEN, WALD**

**Stadtklimatischer Schutzbedarf**

**Hoher Schutzbedarf** (15,4 % Flächenanteil)  
 Diese Bereiche weisen mittlere bis hohe Kaltluftvolumenströme und Windgeschwindigkeiten auf. Die Flächen sind mit Empfindlichkeit gegenüber nutzungsändernder Eingriffe bewertet. Auf die Erhaltung der klimatischen Funktion ist zu achten. Je nach Vorhabengröße kann dies über eine qualitative Stellungnahme oder ein mikroklimatisches Detailgutachten erfolgen.

**Erhöhter Schutzbedarf** (50,6 % Flächenanteil)  
 Diese Bereiche transportieren nur geringe Mengen an Kaltluft zum Siedlungsraum und/ oder besitzen keinen Siedlungsbezug. Auf die Erhaltung der grundsätzlichen klimatischen Funktion ist zu achten. Für größere Vorhaben (z.B. Gewerbebau, Hochhaus) sollte eine qualitative Stellungnahme zur Optimierung der Planung erfolgen.

**Kein erhöhter Schutzbedarf** (34,0 % Flächenanteil)

**RAUMSTRUKTUR**

- Stadtgrenze
- Sonstiger Verkehrsraum
- Gebäude
- Gewässer

**WIRKRAUM: SIEDLUNGSFLÄCHEN UND ÖFFENTLICHER RAUM**

**Stadtklimatische Handlungspriorität**

- Hoch
- Handlungspriorität 1**  
(13,1 % Flächenanteil)
  - Handlungspriorität 2**  
(27,7 % Flächenanteil)
  - Handlungspriorität 3**  
(3,7 % Flächenanteil)
  - Handlungspriorität 4**  
(26,0 % Flächenanteil)
- Niedrig
- keine vorrangige Handlungspriorität**  
(29,6 % Flächenanteil)

**KALTLUFTPROZESSE**

- Übergeordnete Kaltluftleitbahn**  
Linienhafte Struktur, welche über Flurwinde kalte Luft aus Grünflächen im Umland weitreichend in das überwärmte Stadtgebiet transportiert
- Kaltluftabfluss**  
Kühle, flächenhaft auftretende Hangabwinde
- Kaltluftabfluss: Potentiell lufthygienisch belastet**  
Eine potentielle lufthygienische Belastung des Prozessgeschehens ergibt sich daraus, dass die Kaltluft über eine siedlungsnähe größere Emissionsquelle strömt, und so bei autochthonen Wetterlagen Luftschadstoffe in die angrenzenden Wirkräume transportiert.
- Parkwind**  
Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche
- Kaltlufteinwirkbereich im Siedlungsraum**

Abbildung 86: Planungshinweiskarte Stadtklima in einem Ausschnitt der Stadt Hanau (verkürzte Legende)








### 8.5.1 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSPRIORITÄT IM WIRKRAUM

Im Wirkraum wird die *stadtklimatische Handlungspriorität* dargestellt. Für die Einteilung der Handlungsprioritäten wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität), in unbewohnten Gebieten (Gewerbe-/Industriegebiete) und im Straßenraum sowie auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum).

Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, welche die höchste bioklimatische Belastung und keine Klimafunktion aufweisen oder die zweithöchste Belastung und/oder eine Klimafunktion aufweisen. Die Bereiche mit der dritt-höchsten Belastungsstufe fallen in Handlungspriorität 2. Übernehmen die am dritt-höchsten belasteten Flächen dagegen eine Klimafunktion, fallen sie in die dritte Handlungspriorität. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 30 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist.

Tabelle 30: 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	IST = Höchste Belastung oder IST = sehr hohe Belastung & KLF oder IST = sehr hohe Belastung	13,1 %
 Handlungspriorität 2	IST = Hohe Belastung	27,7 %
 Handlungspriorität 3	IST = Hohe Belastung & KLF	3,7 %
 Handlungspriorität 4	IST = Mittlere Belastung & KLF	26,0 %
 Keine vorrangige Handlungspriorität	Übrige Flächen	29,6 %

IST = Status quo, KLF = Klimafunktion, Belastungsstufen beziehen sich auf die kombinierte Bewertung

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 wird. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 31 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen.



Tabelle 31: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zu den Handlungsprioritäten im Wirkraum

Bewertung im Wirkraum	Stadtklimatische Planungshinweise
Handlungspriorität 1 – 2	Bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen sind Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation umzusetzen. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen sowie einer klimagerechten Gebäudekühlung zu prüfen.
Handlungspriorität 3 – 4	Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard hinausgehende optimierende Maßnahmen umzusetzen (bspw. Entsiegelung, Fassadenbegrünung, Flächen mit hoher Aufenthaltsqualität schaffen).
keine vorrangige Handlungspriorität	Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.).

In Flächen der vier höchsten Handlungsprioritäten, die in Hanau ca. 70 % des Siedlungsraums ausmachen, sind bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen über den klimaökologischen Standard hinausgehende optimierende stadtklimatische Maßnahmen umzusetzen. Darunter sind in den Flächen der beiden höchsten Handlungsprioritäten (ca. 40 % Flächenanteil) bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation umzusetzen und ist zu prüfen, ob im Bestand die Möglichkeiten zur, bevorzugt klimagerechten, Gebäudekühlung bestehen, um das Innenraumklima in den Belastungsreichen zu verbessern. In ca. 30 % des Hanauer Siedlungsraums besteht keine vorrangige stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung gewisser klimaökologischer Standards bei Entwicklungen empfohlen wird.

Mit „*klimaökologischen Standards*“ sind u.a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung gemeint. Zu den darüberhinausgehenden „*optimierenden Maßnahmen*“ zählen je nach Vorhaben bspw. die Schaffung öffentlicher kühler Orte, das Freihalten von Durchlüftungssachsen, eine Fassadenbegrünung oder die stadtklimatische Aufwertung öffentlicher Räume durch Sonnensegel und Fontänen bzw. Brunnen. Zudem hebt die Karte Kaltlufteinwirkungsbereiche im Siedlungsraum hervor, also Bereiche mit einer hohen Kaltluftströmung bzw. -entstehung, die potentiell auch auf angrenzende Räume günstig wirken, sodass bei Vorhaben in diesen Bereichen die Kaltluft-Funktion der Flächen zu beachten ist (Grünflächen erhalten, Gebäudestellung beachten, etc.).



### 8.5.2 STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRaum

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftlichen Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert. Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass die Bewertung in der Nacht mit 60 % (Fokus auf den Kaltlufthaushalt) und die am Tag mit 40 % (Aufenthaltsräume/Rückzugsorte am Tag) berücksichtigt wurde.

Flächen im Ausgleichsraum, welche die höchste stadtklimatische Bedeutung aufweisen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen (Tabelle 32). Die Abstufung des Schutzbedarfs ist auf den Siedlungsraum bezogen, sodass auf siedlungsfernen Flächen, die keine relevanten stadtklimatischen Funktionen aufweisen kein erhöhter stadtklimatischer Schutzbedarf gesehen wird (34,0 % der Flächen im Ausgleichsraum in Hanau). Es gilt auch diese Flächen im besten Fall zu erhalten. Stadtklimatische Hinweise zu den Bewertungsklassen sind in Tabelle 33 enthalten.

Tabelle 32: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Ausgleichsraum
Hoher Schutzbedarf	IST = Höchste Bedeutung oder IST = Sehr hohe Bedeutung	15,4 %
Erhöhter Schutzbedarf	IST = Hohe Bedeutung	50,6 %
Kein erhöhter Schutzbedarf	Übrige Flächen	34,0 %

IST = Status quo



Tabelle 33: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zum Schutzbedarf im Ausgleichsraum

Bewertung im Ausgleichsraum	Stadtklimatische Planungshinweise
<b>Hoher Schutzbedarf</b>	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion nachzuweisen (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bauliche Entwicklungen sind klimafachlich zu begleiten. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens sollte dies über eine qualitative Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
<b>Erhöhter Schutzbedarf</b>	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben sollte eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
<b>Kein erhöhter Schutzbedarf</b>	Die Flächen übernehmen für den derzeitigen Siedlungsraum eine geringe stadtklimatische Funktion (etwa als Park oder Kaltluftproduktionsfläche). Dennoch können bspw. Waldflächen als Rückzugsorte an heißen Tagen fungieren.

Im Ergebnis dient die Planungshinweiskarte Stadtklima (s. Abbildung 87) als zentrales Produkt der Klimaanalyse, um das Stadtklima beurteilen zu können. Auf Grundlage der Karte können klimatische belastete Bereiche sowie wertvolle Grünräume auf einen Blick identifiziert werden. Je nach Fragestellung und Fläche können daraus erste, allgemeine planerische Konsequenzen abgeleitet werden (Wo sind Maßnahmen zur Anpassung nötig? Wo sind bei geplanten Vorhaben stadtklimatische Belange besonders zu berücksichtigen?). Die weiteren Kartenwerke (Klimafunktionskarten und Bewertungskarten) sind ergänzend zur Planungshinweiskarte zu Rate zu ziehen – je nach Projektanlass enthalten sie wichtige Zusatzinformationen (Ist eine Fläche am Tag und/oder in der Nacht belastet? Sind Grünflächen für den Kaltlufthaushalt und/oder als Rückzugsorte an heißen Tagen von Bedeutung?). Kaltluftprozesse mit ihren Funktionen (Kaltluftabfluss, Kaltluftleitbahn etc.) gibt es mit besonderer Priorität zu bewerten und die Funktionen zu erhalten.



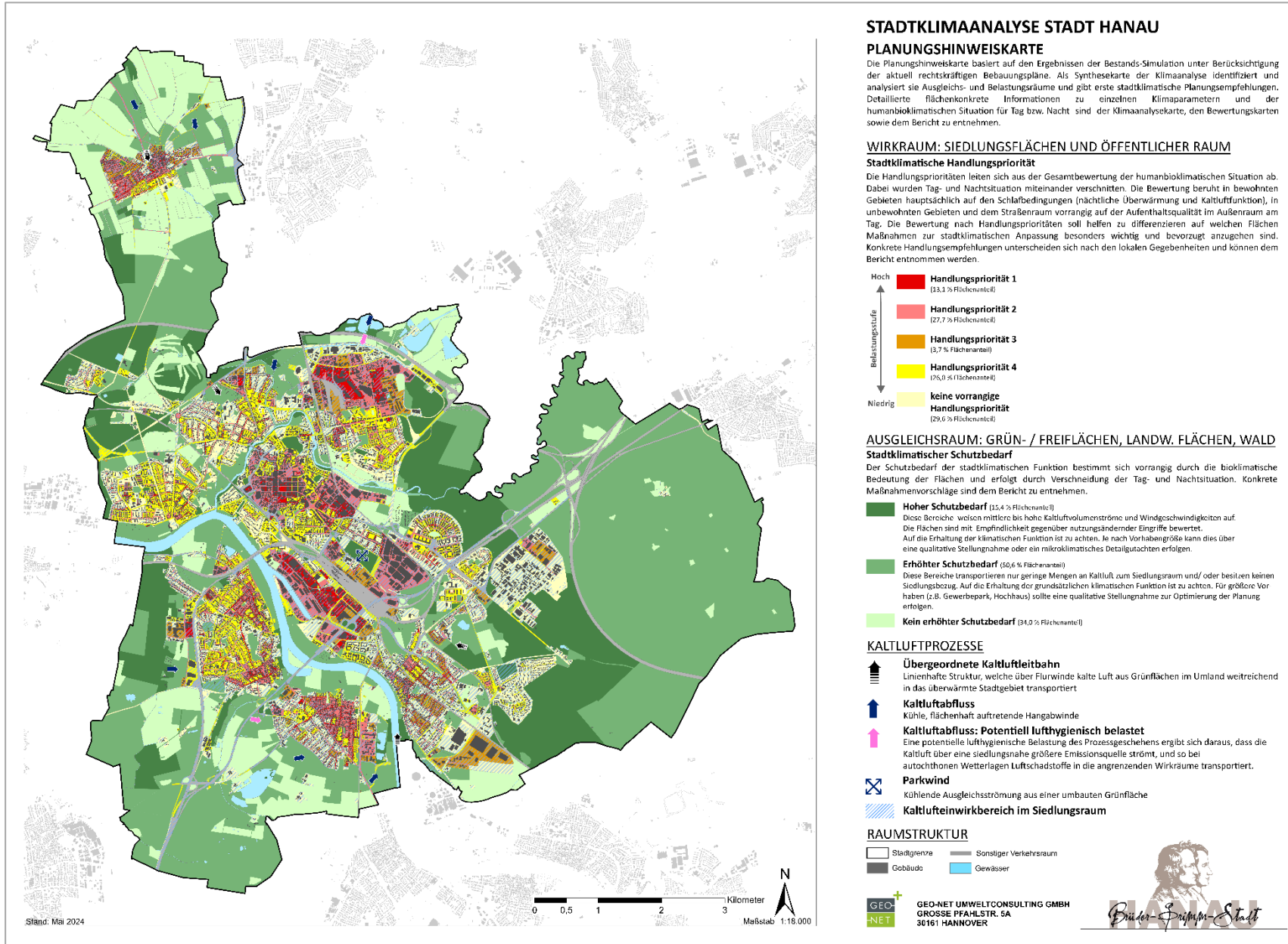


Abbildung 87: Planungshinweiskarte des Hanauer Stadtgebiets.



### 8.6 VERGLEICH MIT DER STADTKLIMAANALYSE 1992

Der vorliegenden Untersuchung ist thematisch die Stadtklimaanalyse 1992 (DWD & ifp 1992) vorausgegangen. Innerhalb der vergangenen 30 Jahre, welche zwischen der letzten Stadtklimaanalyse (1992) und der vorliegenden Klimaanalyse liegen, hat sich nicht nur die Stadtstruktur entwickelt, sondern auch grundlegend die Methodik sowie die Herangehensweise an eine derartige Untersuchung. Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend kurz auf die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Klimaanalysen eingegangen. Bei der vorangegangenen Stadtklimaanalyse bestand die Datengrundlage größtenteils aus Meteorologischen Messdaten, Bodenanalysen und Thermalbefliegungs-Daten sowie bereits vorhandenen Studien. Die Bewertung und Ableitung von Planungsempfehlungen innerhalb der Planungshinweiskarte (s. Abbildung 88) waren überwiegend grobskalig und nach menschlichem Ermessen festgelegt.

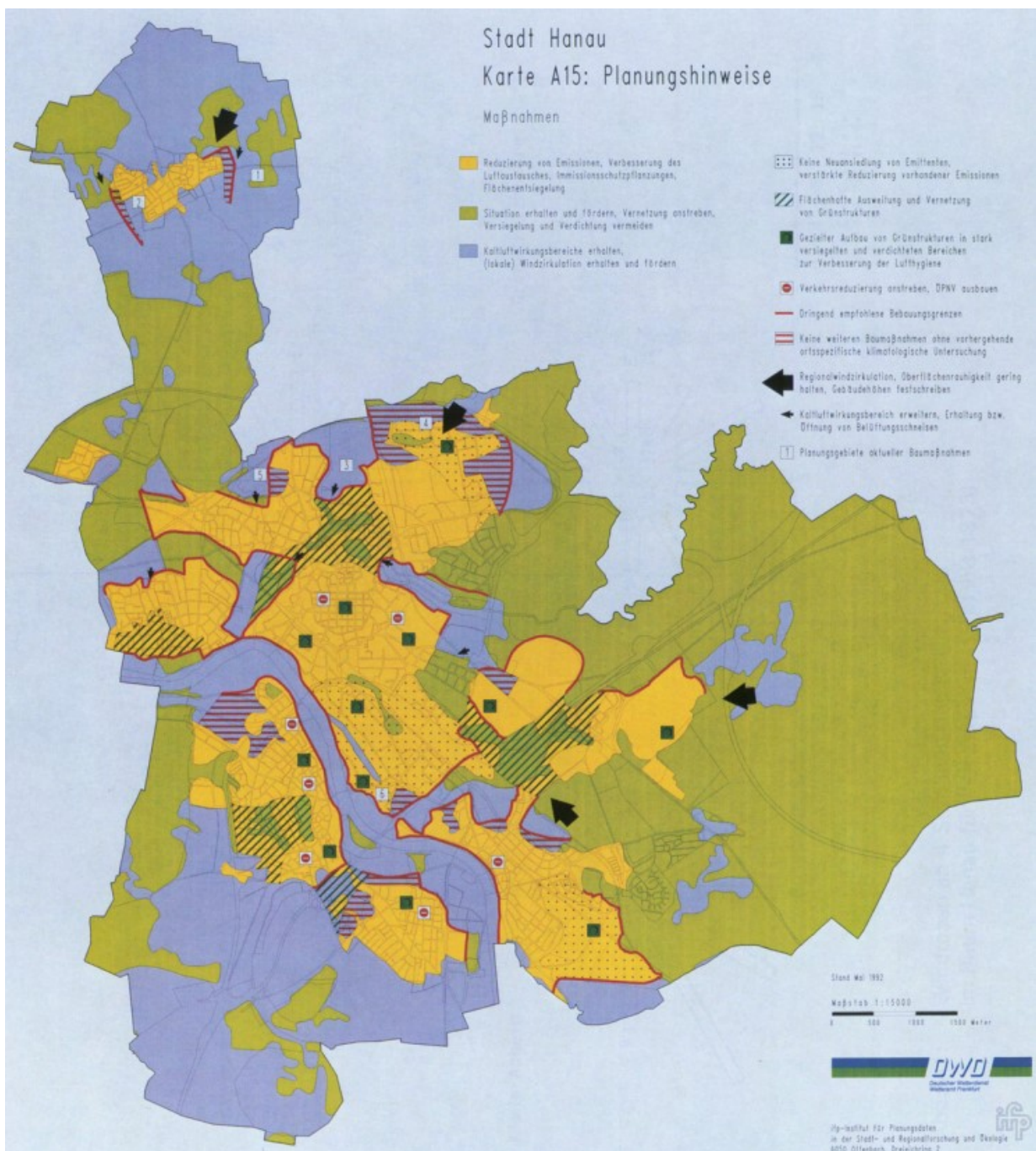


Abbildung 88: Planungshinweiskarte des Hanauer Stadtgebiets aus dem Jahr 1992 (DWD & ifp 1992).



In der aktuellen Studie bilden Geodaten, welche in das verwendete Simulationsmodell eingebunden wurden, die Hauptgrundlage für die Untersuchung. Zudem wurde, ähnlich wie bei der vorangegangenen Analyse, an vier Messstationen temporär meteorologische Daten im Stadtgebiet erhoben, welche zusätzlich von Messfahrten unterstützt wurden. Aufgrund der mittlerweile sehr hohen räumlichen Auflösung der Geodaten und des Modells, konnte das gesamte Stadtgebiet mit einer räumlichen Auflösung von 5 m x 5 m erfasst werden. In den Modellergebnissen lassen sich somit sehr detaillierte Aussagen zu dem Strömungsgeschehen sowie den klimatischen Einzelparametern tätigen. Die Modellsimulationen konnten anhand der Messdaten validiert werden.

Anstatt der Klimafunktionskarte wurde unter Berücksichtigung der VDI 3787 Bl. 1 (2015) eine Klimaanalysekarte (s. Kap. 7) erstellt. Diese ähnelt in Aufbau und Inhalt der Klimafunktionskarte aus den vorangegangenen Analysen und gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Diese Räume können in der bereits angesprochenen hohen räumlichen Auflösung dargestellt werden. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt.

Die Planungshinweiskarte aus 1992 beinhaltet Maßnahmen zu Verkehr, Emissionen und Luftaustausch. In der vorliegenden Analyse wurde die Planungshinweiskarte aus den zwei Bewertungskarten (s. Kap. 8.3) zusammengestellt und zeigt ein deutlich detaillierteres Bild des Stadtgebietes als die vorangegangene Analyse (Vgl. Abbildung 87 und Abbildung 88). Die aktuelle Planungshinweiskarte hat zum Ziel, abzubilden, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Hanau Maßnahmen (s. Maßnahmenkatalog in Kap. 8.7) zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden. Sie dient als zentrales Planungselement und als Grundlage eines städtischen Klimaanpassungskonzept. Erweitert wurden die Daten der Planungshinweiskarte mit den zur Verfügung gestellten demographischen Daten, auf deren Basis eine Sensitivitätsanalyse (s. Kap. 8.4) erstellt werden konnte.

Darüber hinaus wurde noch eine weitere Simulation zur lufthygienischen Belastung durchgeführt, welche ebenfalls mit der Planungshinweiskarte verschnitten werden konnte, was in der vorangegangenen Analyse in der Form nicht enthalten war.





## 8.7 MAßNAHMENKATALOG

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

Die Zuordnung bestimmter Maßnahmensets aus dem Portfolio der 21 Einzelmaßnahmen hängt vom Flächentyp und den Bewertungen in der Planungshinweiskarte bzw. den Bewertungskarten ab (z.B. bioklimatische Belastung in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltlufthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stichpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 34 beschrieben und in verschiedene Cluster aufgeteilt:

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

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

Der hohe Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Die großflächigen Waldgebiete Hanaus 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. Stadt Jena 2016).

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

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur umgebenden Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes 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 allochthonen<sup>15</sup> 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 stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

Klimaangepasstes Bauen enthält viele der bisher genannten Maßnahmen und ist am einfachsten bei Neubauten umzusetzen, doch auch im Bestand und bei Nachverdichtung sind Maßnahmen zur Verbesserung bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B.

---

<sup>15</sup> "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)






Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ M21: Anpassung des Raumnutzungskonzeptes). Umso mehr gilt dies für sensible Gebäudenutzungen wie z.B. Alten- und Pflegeheime. Durch geeignete Gebäudeausrichtung kann darüber hinaus eine gute Durchlüftung mit kühlender Wirkung beibehalten bzw. erreicht werden (Ausrichtung parallel zur Kaltluftströmung, Vermeidung von Querriegeln zur Strömungsrichtung, ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen den Gebäuden; → M13: Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch). Auch die Verwendung geeigneter Baumaterialien lässt sich im Wesentlichen nur bei Neubauten realisieren. Dabei ist auf deren thermische Eigenschaften zu achten – natürliche Baumaterialien wie Holz haben einen geringeren Wärmeumsatz und geben entsprechend nachts weniger Energie an die Umgebungsluft ab als z.B. Stahl oder Glas. Auch die Albedo kann über die Wahl entsprechender Baumaterialien beeinflusst werden, so ist die Reflexion der solaren Einstrahlung auf hellen Oberflächen größer, sodass sich diese weniger stark aufheizen (→ M03: Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten). Bautechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Innenraumklimas wie Dach- und Fassadenbegrünung, energetische Sanierung oder technische Gebäudekühlung sind dagegen auch im Bestand umsetzbar und bieten vielfach Synergieeffekte zum Energieverbrauch der Gebäude (→ M16, M17, M19, M20).

Bei Nachverdichtung im Stadtgebiet sollten die Belange klimaangepassten Bauens berücksichtigt werden (insbesondere die Gewährleistung einer guten Durchlüftung). In der Regel stellt die vertikale Nachverdichtung dabei die aus stadtklimatischer Sicht weniger belastende Lösung dar, wobei die genaue Ausgestaltung jeweils im Einzelfall geprüft werden muss. Um Nachverdichtung möglichst klimaverträglich zu gestalten, ist die sogenannte doppelte Innenentwicklung in den Blickpunkt geraten (BfN 2016). Dabei geht es darum, Flächenreserven im Siedlungsraum nicht nur baulich, sondern auch mit Blick auf urbanes Grün zu entwickeln. Damit bildet diese auch Schnittstellen zum Städtebau, der Freiraumplanung und dem Naturschutz. Neben der aus Wohnungsknappheit ggf. notwendigen Nachverdichtung sollte der Aspekt einer möglichen Entdichtung im Stadtgebiet jedoch weiterhin im Blickpunkt verbleiben (→ M14). Die Verringerung von Bebauungsdichte und Bauvolumen ist insbesondere in heutigen Industrie- und Gewerbebrachen oder Bahnanlagen vorzunehmen und muss klimaangepassten Nachverdichtungsprojekten nicht zwangsläufig entgegenstehen. Zusätzlich kann die Verlegung von Parkraum (z.B. in Quartierstiefgaragen bzw. -parkhäuser) dazu genutzt werden, von Garagen bestandene Innenhofbereiche oder den Straßenraum weiter zu entsiegeln und grün auszugestalten.

Auf Brachflächen oder hochversiegelten Stadtplätzen, die perspektivisch entwickelt oder klimaangepasst ausgestaltet werden sollen, die sich jedoch aktuell noch in der Planung befinden, bieten sich temporäre Maßnahmen der klimaangepassten Ausgestaltung während der Sommermonate an (→ M11). Schattenspendende Kübelbäume und Rollrasen gepaart mit Sitzgelegenheiten tragen zur Belebung des öffentlichen Raums durch größeren Aufenthaltskomfort bei und bringen den Themenkomplex „Stadtklima“ ins Gespräch. Der Dialog mit Anwohnern kann dabei helfen, die Handlungsbedarfe im Wirkraum und Schutzprioritäten im Ausgleichsraum aus der PHK weiter zu priorisieren.



Tabelle 34: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Hanau.

<b>MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM</b>		
<b>01 Innen-/Hinterhofbegrünung</b>	<b>Kurzerläuterung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Erhöhung des Vegetationsanteils und der Versickerungsfähigkeit des Bodens</li> </ul>	
<b>Wirkung</b>	<b>Räumliche Umsetzung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Innen- und Hinterhöfe</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>Erhöhung der Aufenthaltsqualität</li> <li>Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität</li> </ul>		<p>Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: © Jan Weber-Ebnet)</p>



<p><b>02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>▪ Vernetzung von Grünflächen und damit Synergien zum Mobilitäts-/Radwegenetz</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten)</li> </ul>	

Bild: Francois-Gärten in Hanau-Lamboy (Quelle: © Stadt Hanau)

**THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

<p><b>03 Oberflächen im Außenraum klimaoptimiert gestalten</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Helle Farben (insbesondere von Dächern) zur Erhöhung der Reflexstrahlung/ Verminderung der Absorption und Baumaterialien, die wenig Wärme speichern</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Dächer, Fassaden (Neubau und Bestand)</li> <li>▪ ggf. Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>	

Bild: Heller Straßenbelag im Bereich der Wallonisch-Niederländischen Kirche (Quelle: ©Stadt Hanau)





<p><b>04</b> Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren</p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Rasenflächen oder Teilversiegelung (Rasengittersteine, etc.)</li> <li>▪ niedrige Anzahl oberirdischer Stellplätze zugunsten von Grünflächen oder begrünte Gebäudeflächen</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und insb. nachts</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und dadurch Synergien zum Niederschlagswassersmanagement</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude, Innen- und Hinterhöfe, Vorgärten, Betriebshöfe</li> </ul>	

Bild: oben: ehemaliges Kasernengelände 1991, unten Park „Francois-Gärten“ 2023. Großflächige Entsiegelung und Begrünung anlässlich der Landesgartenschau in Hanau 2002. (Quelle: © Stadt Hanau)



**THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

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

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



Bild: Begrünter Mittelstreifen in Hanau-Wolfgang (Quelle: Stadt Hanau)

<p><b>06</b></p> <p><b>Verschattung von Aufenthaltsbereichen im Freien</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bäume oder bautechnische Maßnahmen (Markisen, Überdachung, Sonnensegel, auch Gebäude selbst können durch kluge Positionierung verschatten)</li> <li>▪ Möblierungsangebote im Schatten schaffen</li> </ul>
--	--

<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei Einsatz von Vegetation) insb. tagsüber und nachts</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze, Gebäude im Wohn- und Arbeitsumfeld</li> </ul>
--	---



Bild: Eine große Baumreihe sorgt für Schatten in Hanaus Innenstadt (Quelle: © Stadt Hanau)





THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM			
07	<b>Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren</b>	<b>Kurzerläuterung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)</li> </ul>	
<b>Wirkung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität</li> </ul>		<b>Räumliche Umsetzung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze</li> </ul>	
08	<b>Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen</b>	<b>Kurzerläuterung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)</li> </ul>	
<b>Wirkung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement</li> </ul>		<b>Räumliche Umsetzung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)</li> </ul>	





**THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM**

<p><b>09 Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stadtklimafunktion größerer Fließ- und Stillgewässer und sonstiger Wasserflächen</li> <li>▪ Rauigkeitsarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen Wetterlagen Kalt- und Frischluft transportiert wird</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Während der Sommermonate und speziell Hitzeperioden wirken Gewässer auf ihr nahes Umfeld tagsüber kühlend (auch kleinere Gewässer, Wasserspielplätze oder Brunnen in Parks) -&gt; Hohe Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Oberflächennahe Temperatur kann nachts oberhalb der umgebenden Lufttemperatur liegen und eine Wärmeabgabe bewirken</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gewässer</li> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> </ul>	<p>Bild: Kinzig im Bereich der nördlichen Innenstadt (Quelle: © Stadt Hanau)</p>
<p><b>10 Regenwasserspeicherung und Bewässerungssysteme</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schaffung wasserdurchlässiger Beläge durch (Teil-)Entsiegelung in Kombination mit der Etablierung von Regenwasserteichen, Versickerungsmulden und Rigolensystemen</li> </ul>	
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber durch Verdunstung</li> <li>▪ Niederschlagsrückhalt und damit Synergien zur gezielten Wasserspeicherung und Bewässerung von Stadtgrün</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grün- und Freiflächen</li> <li>▪ Straßen, Wege, Plätze</li> </ul>	<p>Bild: nach Starkregen wassergefüllte Versickerungsmulde am Kinzigbogen (Quelle: © Stadt Hanau)</p>



## THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

### 11 (Temporäre) Saisonale klima-angepasste Umgestaltung öffentlicher Räume

#### Kurzerläuterung

- Umwandlung hochgradig versiegelter Innenstadtplätze im Sommer durch Etablierung von Rollrasen, Strauchgewächsen und Kübelbäumen zu städtischen Klimaoasen
- Gesellschaftlicher Dialog zum Stadtklima-Thema; Sichtbar- und Erlebarmachung nachhaltiger Ideen und Projekte (s. auch Projekt „Pop-Up-Innenstadt“ in Ludwigsburg)

#### Wirkung

- Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung
- Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern

#### Räumliche Umsetzung

- Plätze, Brachflächen  
(auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)



Bild: Mobiles, grünes Zimmer am Forum Hanau (Quelle: © Stadt Hanau)



**MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG**

<p><b>12 Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäudeanordnung parallel zur Kaltluftströmung und/oder ausreichend (grüne) Freiflächen zwischen der Bebauung (aufgelockerte Bebauung)</li> <li>Quer zur Fließrichtung verlaufende bauliche (Dämme, Gebäude) oder natürliche Hindernisse (Baumgruppen, jedoch Beibehaltung bestehender Gehölze!) im Einflussbereich von Kaltluftflüssen vermeiden bzw. Gebäudeausrichtung und Bauungsdichte auf klimaökologische Belange anpassen</li> </ul>
	<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Verbesserung der Kaltluftströmung / Durchlüftung</li> <li>Reduktion des Wärmestaus</li> </ul>

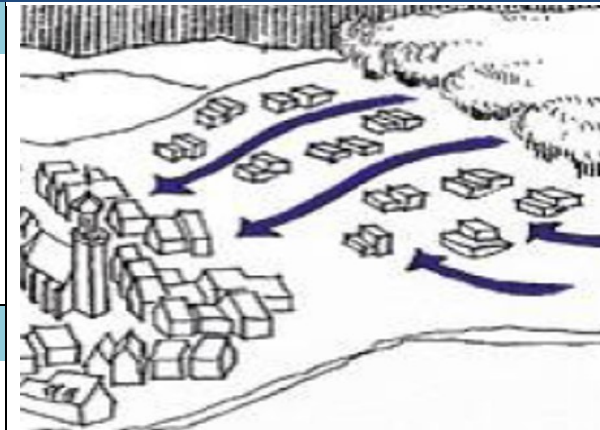


Bild: Symbolbild Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)

**VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG**

<p><b>13 Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen</li> <li>Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsgeschehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht</li> </ul>
	<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaustauschsysteme</li> <li>Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung</li> </ul>

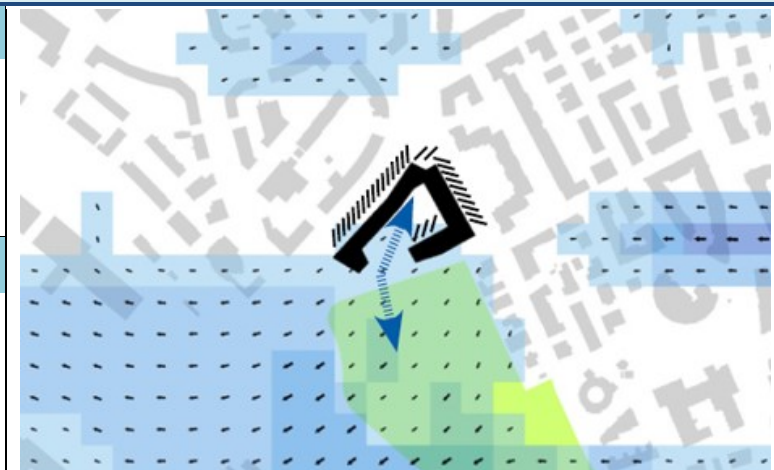


Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung, Stadt Zürich, Zürich, 2020.)






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

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

**VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG**


<b>15 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</b>	<b>Kurzerläuterung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 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</li> <li>▪ Kleine Parks als Trittsteine für Kaltluft</li> </ul>	
	<b>Wirkung</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Schutz vor stärkerer Überwärmung</li> <li>▪ Erhalt und Ausbau von Kaltluftentstehungsgebieten und Durchlüftung</li> <li>▪ Synergien zur Biodiversität und damit zur Aufenthaltsqualität am Tage</li> </ul>	

Bild: als Kaltluftschneise dienendes Grünland im Bereich „Venussee“ (Quelle: © Stadt Hanau)





**MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

<p><b>16 Dachbegrünung</b></p>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Extensive oder intensive Dachbegrünung (bis hin zu Gärten und urbaner Landwirtschaft auf Dächern; unter Bevorzugung heimischer Pflanzen), blaugrüne Dächer (im Wasser stehende Pflanzen)</li> </ul>
<p><b>Wirkung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und damit Synergien zum Klimaschutz</li> <li>▪ Bei großflächiger Umsetzung und geringer Dachhöhe Verbesserung des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas möglich</li> <li>▪ Erhalt oder Schaffung von Naturraum und damit Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität</li> </ul>	<p><b>Räumliche Umsetzung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Flachdächer,</li> <li>▪ ggf. flach geneigte Dächer</li> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)</li> </ul>



Bild: Extensive Dachbegrünung auf dem Umweltzentrum (Quelle: © Stadt Hanau)



**REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

	<b>17 Fassadenbegrünung</b>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)</li> </ul>
<b>Wirkung</b>		<b>Räumliche Umsetzung</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -&gt; Steigerung der Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)</li> </ul>



Bild: Fassadenbegrünung am Parkhaus Congress Park/Am Schwimmbad (Quelle: © Stadt Hanau)

	<b>18 Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen</b>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie</li> </ul>
<b>Wirkung</b>		<b>Räumliche Umsetzung</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts -&gt; Erhöhung der Aufenthaltsqualität</li> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas</li> <li>▪ Synergien zum Klimaschutz</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude (Neubau und Bestand)</li> </ul>



Bild: Technisches Rathaus in Hanau (Quelle: © Stadt Hanau)



**REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

**19 Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen**

**Kurzerläuterung**

- Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme

**Wirkung**

- in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs
- Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber

**Räumliche Umsetzung**

- Gebäude (Bestand)



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

**20 Technische Gebäudekühlung**

**Kurzerläuterung**

- Möglichst ressourcenschonende Lösung (bspw.. Wärmepumpe mit Kühloption)
- Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird
- Erdkältenutzung
- Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden

**Wirkung**

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung

**Räumliche Umsetzung**

- Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können

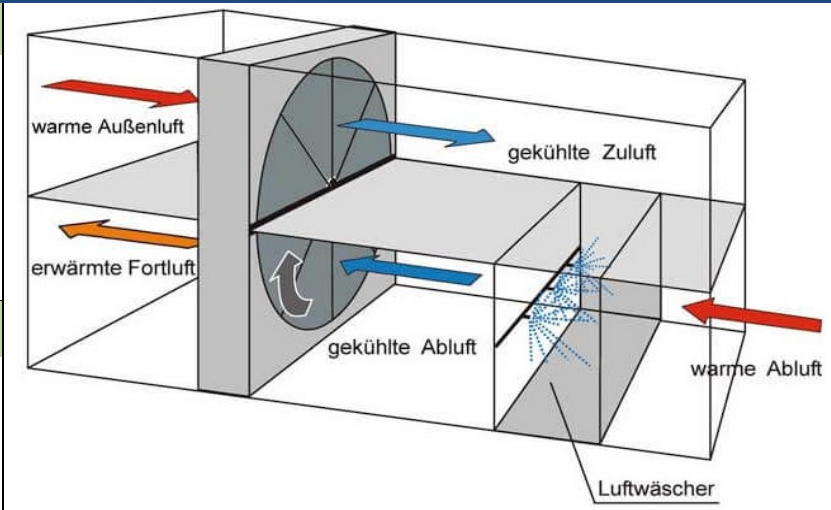


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)





**REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM**

<b>21</b>	<b>Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</b>	<p><b>Kurzerläuterung</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 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)</li> </ul>
-----------	--	--

<b>Wirkung</b>	<b>Räumliche Umsetzung</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gebäude, insb. klimasensible Gebäudenutzungen (z.B. bei Erziehungseinrichtungen, Betreutem Wohnen oder in der Altenpflege)</li> <li>▪ vorwiegend im Neubau umsetzbar</li> </ul>



Bild: Aufnahme eines nach Nord ausgerichteten Büro (Quelle: © Stadt Hanau)



## 8.8 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

Das Stadtklimamanagementsystem ist die digitale Version der Stadtklimaanalyse. Es beinhaltet sämtliche Produkte inkl. deren (Meta)Daten und steht der Verwaltung in Form von gelayouteten GIS-Projekten (esri ArcGIS Pro) zur Verfügung und kann in das städtische GIS übernommen werden. Neben den ArcGIS Pro-Projekt Files (.aprx), gliedern sich die Daten in Raster- und Vektordaten.

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

Die komplexen flächenbezogenen Informationen können über einige Mausclicks direkt abgerufen werden

Die Informationen können mit weiteren Daten (z.B. neuen Entwicklungsvorhaben) überlagert und über Geodatenverarbeitungsprozesse miteinander verknüpft werden

Einige Informationen können bei Verfügbarkeit von Aktualisierungen direkt ersetzt werden (z.B. sozio-demographischen Daten)

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der über 5.000 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-shape mehr als 50 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen (u.a. Nutzung, Versiegelungsgrade, Strukturhöhe), Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige (insbesondere sozio-ökonomische) Sachdaten (Abbildung 89).







# Zusammenfassung

Die vorliegenden „Stadtklimaanalyse Hanau 2024“ stellt die Fortschreibung und schwerpunktmäßige Neuausrichtung der vorangegangenen gesamtstädtischen Klimaanalyse vom Deutschen Wetterdienst (DWD & ifp 1992) dar.

Die modellgestützte Analyse des Hanauer Stadtklimas wurde entsprechend dem Stand der Technik mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die horizontale Auflösung der Modellierung beträgt 5 m, d.h. Hanau 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.

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels Modellrechnungen auch das zukünftige Hanauer Stadtklima im Jahr 2055 in zwei verschiedenen Szenarien simuliert. Die Stellschrauben zur Bestimmung des zukünftigen Stadtklimas bestehen in klimatischen Änderungen (Temperaturzunahmen und Trockenheit) infolge des Klimawandels (Rahmenbedingungen des Modells).

## **Zentrale Ergebnisse**

Das Stadtklimamodell liefert für jede Rasterzelle Ergebnisse zur nächtlichen Lufttemperatur, der Kaltluftproduktion und dem Kaltluftströmungsfeld sowie zur Wärmebelastung am Tag.

Die Ermittlung der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur ermöglicht es, überwärmte städtische Bereiche zu identifizieren (sogenannte städtische Wärmeinseln wie bspw. die Innenstadt) 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.

Bei Betrachtung der bodennahen Lufttemperatur zeigt sich eine deutliche nächtliche Überwärmung der städtischen Bereiche – so weisen die Hanauer Innenstadt sowie die hochversiegelten Gewerbeflächen aktuell um mehr als 4 K höhere Temperaturen als eine unbebaute Freifläche im Umland auf. Der für Städte typische „Wärmeineffekt“ kommt vor allem nachts zum Tragen und geht u.a. auf den höheren Versiegelungsgrad bzw. geringeren Grünanteil in der Stadt, die Beeinträchtigung der Strömung durch Hindernisse sowie Emissionen aus Verkehr, Industrie und Haushalten zurück.

Infolge des Klimawandels ist im Raum Hanau bis 2055 von einer Temperaturzunahme von über 2 K (entsprechend RCP 8.5 Szenario) und vermehrten Hitzeperioden auszugehen. Diese Zunahmen sind in den (kern)städtisch geprägten Räumen besonders relevant, da dort aufgrund des Wärmeineffekts bereits heute ein höheres Belastungsniveau vorliegt.

Die Topografie im Stadtgebiet übt einen großen Einfluss auf die nächtliche Kaltluftströmung in Hanau aus. In den Hangbereichen treten Kaltluftabflüsse auf. Genau wie Flurwinden kommt diesen Kaltluftabflüssen eine besondere landschaftsplanerische Bedeutung zu: Größere Siedlungen wirken als Strömungshindernis, sodass der Luftaustausch mit dem Umland und die Durchlüftung innerhalb von Städten herabgesetzt sind.



Über die vorhandenen Strömungssysteme kann die Zufuhr von Kalt- und Frischluft eine wichtige klimaökologische Ausgleichsleistung den Siedlungsraum erbringen. Die Bedeutung einer Grün-/Freifläche bzw. eines Strömungssystems für den Kaltlufthaushalt ergibt sich daraus, wie viel Kaltluft auf der Fläche entsteht (Kaltluftproduktionsrate) und wie schnell und in welche Richtung die Kaltluft strömt (bodennahe nächtliche Windgeschwindigkeit). Zusätzlich spielt die Höhe der Kaltluftschicht (ihre Mächtigkeit) eine Rolle, die durch den Kaltluftvolumenstrom erfasst wird.

Zur Bewertung der Tagsituation wird die Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET) herangezogen, die ein Maß für die Wärmebelastung des Menschen im Außenraum ist und die Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie kurz- und langwellige Strahlungen berücksichtigt. Die Wärmebelastung wird in der Einheit „°C“ angegeben und ist stark von der Strahlungstemperatur geprägt (insb. Sonnenstrahlung). Entsprechend fällt die Wärmebelastung unter der angenommenen sommerlichen Strahlungswetterlage (keine Bewölkung) auf Freiflächen ohne Verschattung sehr hoch aus, während bspw. in den umliegenden großen Waldbereichen oder Parkanlagen (wie bspw. im Schlossgarten, Hauptfriedhof) überwiegend günstige Bedingungen herrschen.

### **Planungshinweiskarte**

Die hochaufgelösten Ergebnisse der Modellrechnung sind die Basis der Stadtklimaanalyse Hanau und erlauben genaue Aussagen zu den Klimaparametern verschiedener Flächen. Für die tägliche Arbeit in der Planungspraxis noch wichtiger ist das Inwertsetzen der Ergebnisse, etwa in Form der Planungshinweiskarte. In dieser wird eine Bewertung der Siedlungs- und Straßenflächen bzw. Plätze als „Wirkungsraum“ sowie der Grünflächen als „Ausgleichsraum“ hinsichtlich ihrer bioklimatischen Situation vorgenommen und mit allgemeinen Planungshinweisen verbunden. Die Bewertungen beruhen auf den klimaökologischen Funktionen, ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt das aus klimafachlicher Sicht gewonnene Abwägungsmaterial dar. Für Hanau wurde eine aggregierte Planungshinweiskarte erstellt, welche die Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes berücksichtigt.

Die Planungshinweiskarte basiert zum einen auf einer Bewertung der Grünflächen hinsichtlich ihrer Funktion für den nächtlichen Kaltlufthaushalt des Stadtgebiets, sodass den genannten Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflussbereichen bzw. den für das Kaltluftprozessgeschehen wichtigen Grünflächen die höchsten bioklimatischen Bedeutungen zugeschrieben werden. Die Bewertung des bewohnten Siedlungsraums spiegelt primär die nächtliche Überwärmung wider. Auch in den hochversiegelten Gewerbegebieten fällt die Belastung hoch aus, doch liegt der Fokus in der Nachtsituation auf der Möglichkeit eines erholsamen Schlafs und damit auf der Wohnbebauung.

Zum anderen fließt die Bewertung der Tagsituation in die Planungshinweiskarte ein. Betrachtet wird die Wärmebelastung außerhalb von Gebäuden. Dabei sind Wohn- und Gewerbegebiete gleichermaßen von Bedeutung, um die Auswirkungen auf die Wohn- sowie arbeitende Bevölkerung abzubilden. In den Vordergrund rückt zudem der Straßenraum für Wegebeziehungen und Pendlerströme sowie die Aufenthaltsqualität auf Plätzen und die Erreichbarkeit von (möglichst öffentlichen und kühlen) Grünflächen.

Insgesamt stellt die Planungshinweiskarte eine Synthese der vorangegangenen Bewertungsergebnisse dar. Sie macht unter anderem auf den ersten Blick ersichtlich, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben, wo Klimaanpassungsmaßnahmen im Stadtgebiet vorrangig umgesetzt werden können. Schlussendlich dient sie als zentrales Planungselement.



### **Stadtklimatische Maßnahmen**

Anhand der Bewertungsstufen der Planungshinweiskarte und der Beschreibung der klimaökologischen Funktionen können eine Reihe von weitestgehend allgemeingültigen Maßnahmenempfehlungen abgeleitet werden. Um diese Maßnahmenempfehlungen zu präzisieren, wurde für Hanau ein Katalog aus klimaökologisch wirksamen Maßnahmen identifiziert, die als Planungsempfehlungen und Ergänzung zur Planungshinweiskarte bzw. den allgemeingültigen Maßnahmenempfehlungen zu verstehen sind. Grundsätzlich sind alle Maßnahmen geeignet, den thermischen Stress für die Stadtbevölkerung direkt oder indirekt zu verringern und damit zur Erreichung eines gesunden Stadtklimas in Hanau beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

### **Ausblick**

Primäres Anwendungsfeld der Klimaanalyse im Allgemeinen sowie der Planungshinweiskarte im Speziellen ist die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Stadt- und Freiraumplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der vorbereitenden auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung sowie die Grünflächenentwicklung.

Um diesen Eigenanspruch der Klimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Hanauer Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von weiterhin ca. 10 Jahren anzustreben. Dabei sollte dann auch die explizite Berücksichtigung weiterer sich zukünftig ergebender Themen anvisiert werden.



# Quellenverzeichnis

39. BImSchV (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen vom 2. August 2010 (BGBl. I S. 1065)
- An der Heiden, M., Muthers S., Niemann H., Buchholz U., Grabenhenrich L., Matzarakis A. (2019): Schätzung hitzebedingter Todesfälle in Deutschland zwischen 2001 und 2015. In: Bundesgesundheitsblatt **62**, 571–579 (2019). DOI: 10.1007/s00103-019-02932-y
- Augter, G. (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst.
- BauGB (2017): Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), in der aktuellen Fassung.
- Becker, C., A. Herrmann, W. E. Haefeli, K. Rapp, U. Lindemann (2019): Neue Wege zur Prävention gesundheitlicher Risiken und der Übersterblichkeit von älteren Menschen bei extremer Hitze. In: Bundesgesundheitsblatt **62**, S. 565-570.
- Beckmann, S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. *Climate Risk Management*, Volume 32. DOI: 10.1016/j.crm.2021.100286
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte. ISBN: 978-3-87994-161-2
- Bundesministerium für Gesundheit (BMG) (2021): Gesund leben. Hitze: Ältere und pflegebedürftige Menschen schützen. <https://gesund.bund.de/hitze-pflegebeduerftigkeit#weitere-informationen>, Stand: 02.07.2021. zuletzt abgerufen am: 18.10.2024.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.businesswissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik>.
- Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (siehe IPCC, 2013)
- Deutschländer, T., Mächel H. (2017). Temperatur inklusive Hitzewellen. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöllner, S. (eds) *Klimawandel in Deutschland*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-50397-3\_6
- Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020.





- Donat, M.G., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., Ulbrich, U. (2010) European Storminess and Associated Circulation Weather Types: Future Changes Deduced from a Multi-Model Ensemble of GCM Simulations. *Climate Research*, 42, 27-43. DOI: 10.3354/cr00853
- DWD & ifp (1992): Klimagutachten Stadt Hanau, ifp-institut für Planungsdaten und Deutscher Wetterdienst, Wetteramt Frankfurt, Stand Oktober 1992.
- DWD (2012): Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO. Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2012. (Berichte des Deutschen Wetterdienstes; 240).
- DWD (2018): Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur.
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/)
- DWD (2020b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/)
- DWD (2020c): Stadtklimatische Untersuchungen der sommerlichen Temperaturverhältnisse und des Tagesgangs des Regionalwindes („Alpines Pumpen“) in München.
- DWD (2020d): Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut. Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 12.11.2020.
- DWD (2022a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/)
- DWD (2022b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. [ftp://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/grids\\_germany/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/)
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. [https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html).
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. [https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt\\_waermeinseln/startseite\\_projekt\\_waermeinseln.html](https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html).
- EU 2008: Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über Luftqualität und saubere Luft für Europa. 21. Mai 2008.
- Fanger, P.O. (1972): *Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering*. New York: McGraw Hill.
- Fink, A. H., S. Pohle, J. G. Pinto, P. Knippertz (2012), Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L07803, DOI:[10.1029/2012GL051025](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. *Int. J. Climatol.*, 32: 2348-2371. DOI: [10.1002/joc.3396](https://doi.org/10.1002/joc.3396)
- Fürst, D., Scholles, F. (Hrsg.) (2008): *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung*. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage. ISBN 978-3-939486-23-7



- Gaede, M., Härtling, J. (2010): Umweltbewertung und Umweltprüfung. Braunschweig: Westermann. ISBN:978-3-14-160360-6
- Groß, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 38, 315-337. DOI: 10.1007/BF00120851
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498. DOI: 10.1016/0169-5983(92)90035-U
- Groß, G., Frey T., Trute P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002) DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/0363
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/0291
- Groß, G. (2014): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326. DOI: 10.1007/s10546-013-9863-5
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the n environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- Groß, G. (2021): A numerical study on the effects of natural ventilation on summer nighttime indoor temperatures in an urban area, *Meteorologische Zeitschrift*. DOI: [10.1127/metz/2021/1066](https://doi.org/10.1127/metz/2021/1066)
- HESSEN MOBIL (2021): Ausschnitt aus der Verkehrsdatenbasis Rhein-Main (VDRM) 2015. Hessen Mobil, Straßen- und Verkehrsmanagement, Fachdezernat Grundsatzplanung Straßennetz, Verkehrsuntersuchung, Wiesbaden
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2019): KLIMPRAX Stadtklima. Handlungsleitfaden zur kommunalen Klimaanpassung in Hessen -Hitze und Gesundheit-. 167 S.
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2022a): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter [https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive\\_Entscheidungshilfe\\_Stadtklimaanalysen.pdf](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf), zuletzt geprüft am 11.01.2023.
- HLNUG - Hessische Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (2022b): Lufthygienische Jahreskurzberichte 2017 – 2021. Kontinuierliche Messungen und Diskontinuierliche Messungen von Stickstoffdioxid und Feinstaub PM<sub>2,5</sub>. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Wiesbaden.
- Höppe, P. und Mayer, H.: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IFU (2022): AKTERM-Zeitreihe, Windmessung und Ausbreitungsklassen Offenbach-Wetterpark (DWD: 7341), IFU GmbH Privates Institut für Analytik, Frankenberg, 20.08.2022



- IPCC (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA, 398 pp
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (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. Unter Mitarbeit von Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.). Geneva, Switzerland. Online verfügbar unter <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>, zuletzt geprüft am 14.04.2020.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, DOI:[10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
- ISO (2017): ISO 7243:2017 Ergonomics of the thermal environment — Assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards. <https://www.iso.org/standard/67188.html>
- IVU (2017): Ausbreitungsberechnungen zur flächendeckenden Ermittlung der Luftqualität in Hessen als Grundlage der Luftreinhalteplanung, IVU Umwelt GmbH, Freiburg
- IVU (2022): IMMISem/luft Version 9.001 IVU Umwelt GmbH, Freiburg
- Jacob, D., Kottmeier, C., Petersen, J., Rechid, D., Teichmann, C. (2017). Regionale Klimamodellierung. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöllner, S. (eds) Klimawandel in Deutschland. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-50397-3\_4
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. [https://www.utci.org/resources/windsor\\_ers05.pdf](https://www.utci.org/resources/windsor_ers05.pdf)
- Kaspar, Frank; Mächel, Hermann; Jacob, Daniela; Kottmeier, Christoph (2017): Beobachtung von Klima und Klimawandel in Mitteleuropa und Deutschland. In: Susanne Schuck-Zöllner, Daniela Jacob und Guy P. Brasseur (Hg.): Klimawandel in Deutschland. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 17–26. Online verfügbar unter [https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_3).
- Knutti, R., R. Furrer, C. Tebaldi, J. Cermak, G. A. Meehl (2010): Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *J. Climate*, **23**, 2739–2758, DOI: [10.1175/2009JCLI3361.1](https://doi.org/10.1175/2009JCLI3361.1).
- Cedeño Laurent J.G., Williams A., Oulhote Y., Zanobetti A., Allen J.G., Spengler J.D. (2018) Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. *PLoS Med* 15(7): e1002605. DOI: 10.1371/journal.pmed.1002605
- Hübener, Heike; Bülow, Katharina; Fooker, Cornelia; Früh, Barbara; Hoffmann, Peter; Höpp, Simona; Keuler, Klaus; Menz, Christoph; Mohr, Victoria; Radtke, Kai; Ramthun, Hans; Spekat, Arne; Steger, Christian; Toussaint, Frank; Warrach-Sagi, Kirsten; Woltd, Michael (2017). *ReKliEs-De Ergebnisbericht*. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe\\_Ergebnisbericht](https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht)



- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- Lohmeyer, A., Schädler, G. (1998): Das Kaltluftabflußmodell KALM. <https://www.lohmeyer.de/de/system/files/content/download/publikationen/KALMdeutsch.pdf>
- Maronga, B., Banzhaf, S., Burmeister, C., Esch, T., Forkel, R., Fröhlich, D., Fuka, V., Gehrke, K. F., Geletič, J., Giersch, S., Gronemeier, T., Groß, G., Heldens, W., Hellsten, A., Hoffmann, F., Inagaki, A., Kadasch, E., Kanani-Sühring, F., Ketelsen, K., Khan, B. A., Knigge, C., Knoop, H., Krč, P., Kurppa, M., Maamari, H., Matzarakis, A., Mauder, M., Pallasch, M., Pavlik, D., Pfafferoth, J., Resler, J., Rissmann, S., Russo, E., Salim, M., Schrempf, M., Schwenkel, J., Seckmeyer, G., Schubert, S., Sühring, M., von Tils, R., Vollmer, L., Ward, S., Witha, B., Wurps, H., Zeidler, J., and Raasch, S.: Overview of the PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.*, 13, 1335–1372, DOI: /10.5194/gmd-13-1335-2020, 2020.
- Mayer, H., Beckröge W., Matzarakis A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- McDonald R. E. (2011): Understanding the impact of climate change on Northern hemisphere extra-tropical cyclones. *Climate Dynamics* 37:1399–1425. DOI:[10.1007/s00382-010-0916-x](https://doi.org/10.1007/s00382-010-0916-x)
- Moore, G. E. (1903): *Principia Ethica*. Ditzingen: REKLAM.
- Moss, R., Edmonds, J., Hibbard, K., Manning, M., Rose, S., Vuuren, D., Carter, T., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G., Mitchell, J., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S., Ronald, S., Thomson, A., Weyant, J., Wilbanks, T. (2010). The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*. 463. 747-56. DOI: 10.1038/nature08823.
- Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg (MVI) (2012): Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke, T., Mills, G., Christen, A., Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/9781139016476.
- 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, 711-737. DOI: [10.1007/s00382-008-0396-4](https://doi.org/10.1007/s00382-008-0396-4)
- Pinto, J.G., Reyers, M. (2017). Winde und Zyklonen. In: Brasseur, G., Jacob, D., Schuck-Zöller, S. (eds) *Klimawandel in Deutschland*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. DOI:
- Rauthe M., Malitz G., Gratzki A., Becker A. (2014): Starkregen. In: Becker P., Hüttl R. F. (Hrsg.): *Forschungsfeld Naturgefahren*. Potsdam und Offenbach, S. 112.
- Romberg, E., Böisinger, R., Lohmeyer, A., Ruhnke, R.; Röth, E. (1996): NO-NO<sub>2</sub>-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft* 56 Nr. 6, S. 215-218. 1996
- Schär, Ch., Frei, D., Lüthi, H.C., Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672.
- STADT HANAU (2021-2024): Geodaten, Unterlagen zu den städtebaulichen Kulissen, Bebauungspläne, Katasterdaten sowie weitere projektbezogene Unterlagen und Informationen.



- Santholz und Sett (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. UNU Working paper.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM\_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satellitelaion-blog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- UBA (2005): GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.
- UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>
- UBA (2022): HBEFA Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs. Version 4.2.2/Februar 2022. INF-RAS AG, Bern, Schweiz, Hrsg.: UBA (Umweltbundesamt) Berlin
- UBA (2022a): Trend der PM10-Jahresmittelwerte. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung#feinstaubkonzentrationen-in-deutschland>
- Urban, H., Steininger, K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Pretenthaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322. DOI: 10.1007/978-3-319-12457-5\_16
- UVPG (2021): Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. März 2021 (BGBl. I S. 540), in der aktuellen Fassung.
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.
- VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (2013): Qualitätssicherung in der Immissionsberechnung. Kraftfahrzeugbedingte Immissionen. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 14, August 2013, VDI Düsseldorf
- VDI (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 1, September 2015, VDI Düsseldorf
- VDI (2017a): VDI-Richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.
- VDI (2017b): Prognostische mikroskalige Windfeldmodelle – Evaluierung für Gebäude- und Hindernisumströmung. VDI-Richtlinie 3783 Blatt 9, Mai 2017, VDI Düsseldorf
- VDI (2019): Methoden zur Beschreibung der Luftqualität für die Stadt- und Regionalplanung. VDI-Richtlinie 3787 Blatt 3, Januar 2019, VDI Düsseldorf





VDI (2020): VDI-Richtlinie 3787, Bl.4: Umweltmeteorologie. Methoden zur Beschreibung von Stark- und Schwachwinden in bebauten Gebieten und deren Bewertung.

VDI (2020a): VDI-Richtlinie 3787, Bl.8: Umweltmeteorologie. Stadtentwicklung im Klimawandel.

VDI (2020b): Kfz-Emissionsbestimmung – Luftbeimengungen. VDI-Richtlinie 3782 Blatt 7, Mai 2020, VDI Düsseldorf

VDI (2022): Richtlinie VDI 3787 Blatt 2. Umweltmeteorologie. Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf.

WHO (2021): Globale Luftgüteleitlinien der WHO: Feinstaubpartikel (PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub>), Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid. Zusammenfassung. Kopenhagen: Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa; 2021. Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.



# Anhang

Tabelle A 1: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2022)

PET	Thermisches Empfinden	Physiologische Belastungsstufe
4 °C	Sehr kalt	Extremes Kältestress
8 °C	Kalt	Starker Kältestress
13 °C	Kühl	Moderater Kältestress
18 °C	Leicht kühl	Leichter Kältestress
20 °C	Komfortabel (neutral)	Kein thermischer Stress
23 °C	Leicht warm	Leichte Wärmebelastung
29 °C	Warm	Moderate Wärmebelastung
35 °C	Heiß	Starke Wärmebelastung
41 °C	Sehr heiß	Extrem starke Wärmebelastung

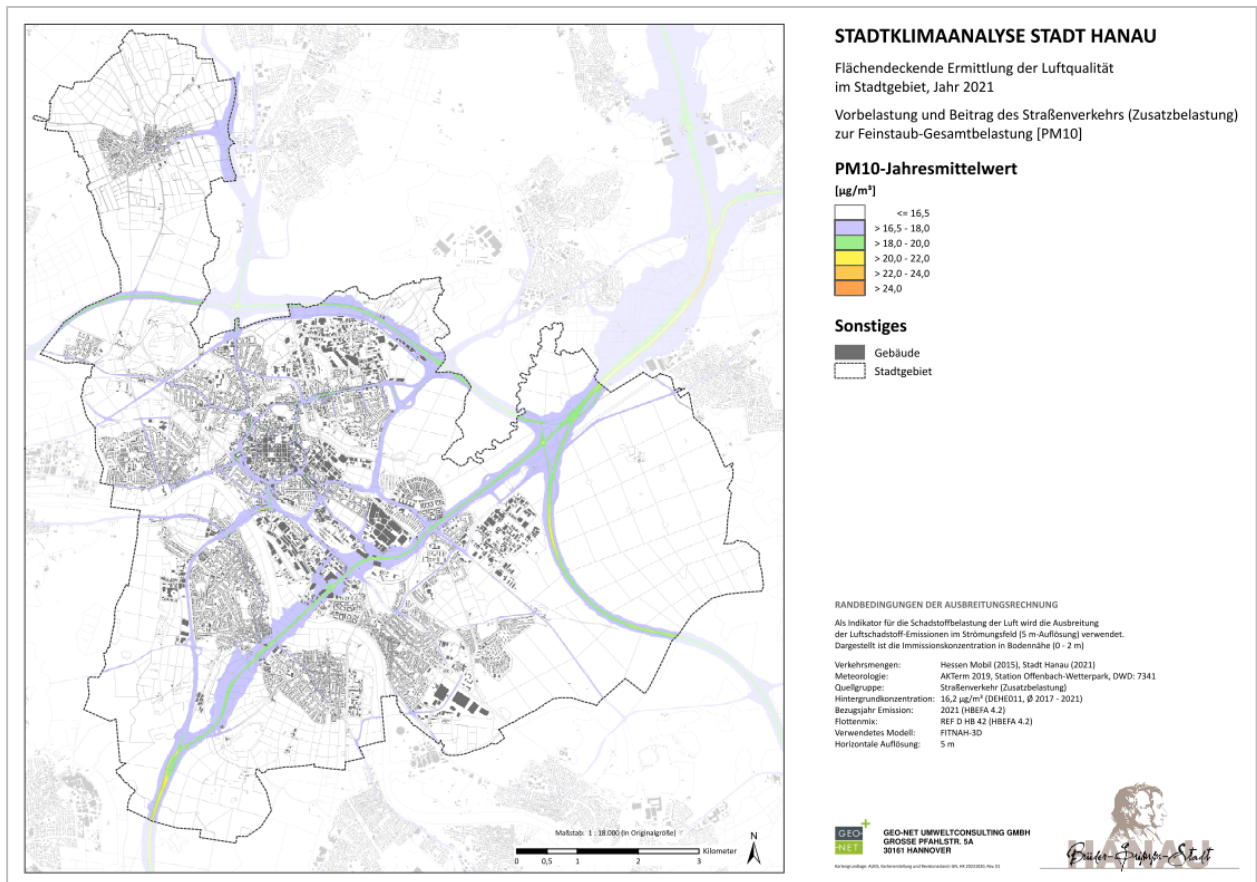


Abb. A 1: Jahresmittelwert der PM<sub>10</sub>-Konzentration im Hanauer Stadtgebiet



Tabelle A 2: Statistiken zu Windgeschwindigkeit und -richtung zu verschiedenen Auswerteziträumen für die Station „Innerstädtische Ausgleichsfläche“

Station Innerstädtische Ausgleichsfläche	Richtungssektor																																					
	0° 360°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	330°	340°	350°		
gesamter Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	12,60	8,00	6,30	4,30	2,90	2,30	2,00	1,30	1,30	1,40	1,20	1,00	1,70	1,20	1,90	1,40	1,10	1,00	1,40	1,80	2,10	1,70	1,20	1,40	0,70	0,80	1,20	0,70	0,80	1,30	1,20	1,70	2,70	5,20	4,90	8,60	9,50
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,00	0,70	0,70	0,70	0,80	0,80	1,00	1,20	1,00	1,00	1,30	1,40	1,40	1,40	1,30	1,30	1,10	1,20	1,10	1,20	1,10	1,10	1,00	1,10	1,10	1,10	0,90	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10	1,40	1,50	1,60	1,20
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,80	1,90	1,80	1,90	1,90	2,00	2,10	2,00	1,80	2,40	2,50	2,50	2,40	2,40	2,20	2,10	2,00	1,70	2,00	2,10	2,20	2,00	1,50	1,60	1,60	1,80	1,70	1,30	1,50	1,40	1,80	2,10	2,90	3,10	3,70	2,60	
alle Tagstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	6,50	4,50	4,00	3,50	2,60	2,10	2,20	1,80	1,50	1,60	1,40	2,60	2,20	2,40	2,00	1,60	1,40	1,70	2,20	2,80	2,00	1,60	2,40	1,20	1,50	1,70	1,20	1,30	2,20	2,20	3,30	6,00	7,10	7,30	7,40		
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,30	1,20	1,10	1,20	1,20	1,20	1,40	1,50	1,30	1,20	1,50	1,60	1,50	1,40	1,50	1,40	1,30	1,40	1,30	1,40	1,30	1,20	1,10	1,20	1,10	1,10	1,10	1,20	1,10	1,20	1,10	1,30	1,60	1,60	1,80	1,50	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,40	1,90	1,80	1,90	1,90	2,00	2,10	2,00	1,80	2,40	2,50	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,70	2,00	2,10	2,20	2,00	1,50	1,60	1,60	1,80	1,70	1,30	1,50	1,40	1,80	2,10	2,90	3,10	3,30	2,40		
alle Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	18,70	11,40	8,60	5,00	3,30	2,40	1,80	0,70	1,10	1,10	0,80	0,60	0,80	0,20	1,40	0,70	0,50	0,70	1,20	1,40	1,50	0,80	0,50	0,20	0,10	0,70	0,30	0,40	0,40	0,90	2,10	4,40	2,70	9,90	11,50		
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,80	0,60	0,50	0,40	0,40	0,50	0,60	0,60	0,70	1,00	0,90	1,00	1,30	1,00	0,80	1,00	0,90	1,00	0,90	0,70	0,80	0,60	0,50	0,90	0,50	1,00	0,40	0,40	0,60	0,70	1,00	1,30	1,40	1,00			
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,80	1,60	1,20	1,00	0,80	1,00	1,30	1,10	1,10	1,50	1,90	2,10	2,00	1,60	1,60	1,20	1,10	1,30	1,70	1,60	1,30	1,40	0,90	0,80	1,40	0,50	0,60	0,50	0,90	1,50	1,50	2,20	2,20	3,70	2,60		
autodithone Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	23,30	14,50	9,60	5,10	3,90	3,50	1,60	0,60	1,60	0,80	1,20	0,40	1,00	0,20	1,20	0,60	0,80	0,40	0,60	1,20	1,00	0,40	-	-	0,20	0,20	-	-	0,20	0,60	1,60	2,50	2,90	7,20	10,00		
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,80	0,60	0,50	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,70	1,20	0,50	1,00	1,00	1,00	0,90	1,00	0,90	1,10	0,60	0,60	0,70	0,50	-	-	0,50	1,10	-	-	0,70	0,60	0,60	1,00	1,30	1,30	0,90		
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,20	1,20	1,00	0,80	0,80	1,00	0,80	0,70	1,10	0,80	0,50	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20	1,10	1,10	1,20	0,70	0,80	1,00	0,60	-	-	0,50	1,10	-	0,70	1,10	1,80	2,20	2,70	2,10		



Tabelle A 3: Statistiken zu Windgeschwindigkeit und -richtung zu verschiedenen Auswerteziträumen für die Station „Mainnähe“

Station Mainnähe	Richtungssektor																																				
	0° 360°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	330°	340°	350°	
gesamter Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	7,40	7,30	6,60	5,10	1,90	1,80	1,40	1,70	1,00	1,90	1,60	1,80	2,20	2,40	3,40	3,10	2,90	2,50	2,00	1,70	1,80	2,40	2,50	2,10	1,70	1,40	0,70	0,90	1,40	2,40	3,50	4,10	3,70	4,60	6,10	
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,80	0,80	0,80	1,00	0,90	1,00	1,10	1,00	1,30	1,20	1,10	1,10	1,50	1,50	1,40	1,20	1,20	1,30	1,40	1,60	1,90	2,20	2,30	2,20	2,20	1,90	1,50	1,20	1,20	1,50	1,50	1,50	1,30	1,10	1,00	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,20	1,90	1,90	2,20	1,90	1,90	2,50	2,20	2,50	3,00	2,90	2,90	3,10	3,30	3,00	2,70	2,50	2,90	2,60	3,70	3,20	3,70	4,30	4,00	3,50	4,10	2,60	2,60	2,30	2,40	3,70	3,40	3,30	2,70	2,50	2,50
alle Tagstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	5,60	5,90	4,70	3,20	1,40	2,20	1,50	1,60	1,10	2,40	1,40	1,40	3,20	3,30	3,80	3,50	2,70	2,30	1,40	1,70	2,30	3,20	4,10	3,10	2,60	1,90	0,90	1,40	1,00	1,70	3,20	2,70	4,40	4,30	3,90	5,10
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,10	1,10	1,10	1,30	1,20	1,20	1,60	1,30	1,80	1,50	1,60	1,60	1,80	1,70	1,90	1,40	1,50	1,70	1,90	2,10	2,20	2,50	2,60	2,50	2,30	2,10	1,70	1,80	1,30	1,50	1,70	1,90	1,80	1,60	1,50	1,30
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	1,90	1,90	1,90	2,00	1,90	1,90	2,50	2,20	2,50	3,00	2,90	2,90	3,10	3,30	3,00	2,70	2,50	2,90	2,60	3,70	3,20	3,70	4,30	4,00	3,50	4,10	2,60	2,60	2,30	2,40	2,70	3,40	2,80	2,70	2,40	1,90
alle Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	9,20	8,80	8,40	7,10	2,40	1,40	1,30	1,80	0,90	1,40	1,80	2,20	1,30	1,50	3,00	2,60	3,00	2,70	2,70	1,70	1,40	1,60	1,00	1,20	0,80	1,00	0,50	0,50	0,80	1,00	1,50	4,30	3,80	3,10	5,30	7,20
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,60	0,60	0,70	0,90	0,70	0,60	0,60	0,70	0,70	0,60	0,70	0,80	0,80	0,80	0,80	1,00	1,00	1,00	1,00	1,20	1,10	1,50	1,70	1,30	1,40	1,60	1,50	1,10	0,50	1,10	1,00	1,30	1,10	1,00	0,80	0,80
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,20	1,90	1,60	2,20	1,70	1,70	1,80	1,70	1,20	1,30	1,50	2,90	2,00	2,50	1,90	2,30	2,40	2,30	2,40	3,70	2,80	3,30	2,90	3,00	2,70	2,90	2,10	0,60	2,10	1,40	3,70	2,90	3,30	2,30	2,50	2,50
autodithone Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	10,00	8,80	9,20	7,90	2,40	2,00	0,80	2,20	1,40	2,20	2,60	2,20	1,20	1,40	3,50	3,50	3,10	2,40	1,80	1,40	1,60	0,80	0,20	0,40	0,80	0,60	0,60	-	0,40	0,40	1,60	3,50	4,10	4,10	4,70	5,90
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,50	0,60	0,60	0,90	0,60	0,70	0,40	0,80	0,70	0,60	0,70	0,60	0,90	0,80	0,90	1,00	0,80	0,90	1,20	0,90	1,30	1,10	0,60	0,90	1,60	0,40	1,00	-	0,50	0,70	0,60	1,20	1,00	0,90	0,80	0,70
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	1,40	1,60	1,40	2,20	1,30	1,70	0,50	1,70	1,20	1,30	1,40	1,40	2,00	1,90	1,90	2,30	1,40	1,50	2,40	2,10	1,90	1,50	0,60	1,10	2,70	0,40	1,60	-	0,60	0,70	1,30	2,00	2,40	1,80	2,50	2,50



Tabelle A 4: Statistiken zu Windgeschwindigkeit und -richtung zu verschiedenen Auswerteziträumen für die „Rurale Messstation“

Rurale Messstation		Richtungssektor																																			
		0° 360°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	330°	340°	350°
gesamter Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	3,70	3,90	2,10	1,60	2,30	1,10	1,10	0,90	1,40	2,00	2,00	1,80	1,80	1,70	1,40	1,20	1,60	1,50	1,90	2,00	3,20	3,20	3,50	4,30	4,60	5,90	3,20	3,10	2,00	1,90	2,40	3,90	4,60	5,40	6,20	6,00
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	2,20	2,10	2,00	1,90	1,90	1,50	1,20	1,70	1,60	1,70	1,70	1,80	1,70	1,70	1,40	1,20	1,30	1,30	1,40	1,70	1,70	1,70	1,50	1,30	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	1,50	2,20	1,70	1,80	2,10	1,90	2,10
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	4,80	3,70	3,80	3,20	3,70	3,10	2,90	3,40	2,80	3,40	3,10	3,10	2,90	2,60	2,50	2,00	2,40	2,10	2,50	3,30	3,70	4,00	3,60	3,40	3,40	3,80	2,90	2,90	2,70	3,80	4,40	4,50	3,90	4,70	4,70	4,30
alle Tagstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	5,00	5,00	2,80	2,30	3,20	1,90	1,80	1,20	2,40	3,80	3,40	3,20	3,20	3,20	1,70	1,50	1,50	2,00	2,40	2,70	3,50	3,30	2,50	2,80	1,40	2,50	0,90	1,40	0,70	1,70	2,40	3,10	3,40	5,10	4,30	6,70
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	2,30	2,10	2,10	2,00	1,80	1,60	1,30	2,10	1,60	1,80	1,70	1,90	1,70	1,70	1,50	1,20	1,60	1,50	1,60	1,90	2,20	2,30	2,60	2,40	1,90	2,20	2,30	1,70	2,10	2,10	2,50	2,40	2,60	2,50	2,40	2,50
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	4,20	3,40	3,60	3,20	3,40	3,10	2,90	3,40	2,80	3,40	3,10	3,10	2,90	2,60	2,50	2,00	2,40	2,10	2,50	3,30	3,70	4,00	3,60	3,40	3,00	3,80	2,90	2,90	2,70	3,50	4,40	4,50	3,90	4,70	4,20	4,30
alle Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	2,50	2,70	1,40	0,90	1,40	0,30	0,40	0,50	0,50	0,30	0,60	0,50	0,40	0,30	0,30	0,80	1,60	1,10	1,40	1,30	2,90	3,10	4,40	5,90	7,70	9,20	5,50	4,80	3,40	2,00	2,50	4,70	5,90	5,70	8,10	5,30
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,90	2,10	2,00	1,80	2,10	0,80	0,70	0,70	1,40	1,00	1,60	1,20	1,40	1,30	0,60	1,30	1,10	1,10	1,00	1,30	1,20	1,00	0,80	0,80	0,70	0,60	0,70	0,60	1,00	1,50	1,30	1,40	1,80	1,70	1,70	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	4,80	3,70	3,80	2,30	3,70	1,30	0,90	1,00	2,20	1,30	2,50	2,00	2,00	1,80	0,70	2,00	2,30	1,40	1,50	2,90	2,70	3,30	2,20	3,20	3,40	2,90	2,70	1,80	1,80	3,80	4,00	4,10	3,10	4,70	4,70	3,20
autochthone Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	2,20	1,30	1,30	0,60	1,30	0,40	0,60	0,40	0,60	-	0,60	0,60	0,40	0,20	0,40	0,60	2,20	1,30	0,60	1,10	2,40	2,60	4,70	5,80	8,20	14,20	6,20	6,20	3,90	2,20	2,60	2,80	6,90	4,70	6,20	3,40
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,40	2,20	1,30	1,70	1,40	0,90	0,80	0,70	1,50	-	1,50	1,00	1,30	0,90	0,60	1,80	1,10	1,20	1,10	1,20	1,00	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,50	0,60	0,60	0,80	1,30	0,80	1,20	1,30	1,40	1,30
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,30	2,70	2,20	2,20	2,60	1,30	0,90	0,90	2,20	-	2,30	1,20	2,00	0,90	0,70	1,90	2,00	1,40	1,50	1,70	1,80	1,70	1,40	1,40	2,40	2,40	1,10	1,20	1,10	1,30	1,40	2,00	1,90	2,20	2,50	2,70





Tabelle A 5: Statistiken zu Windgeschwindigkeit und -richtung zu verschiedenen Auswerteziträumen für die „Urbane Messstation“

Urbane Messstation		Richtungssektor																																			
		0° 360°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°	180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	330°	340°	350°
gesamter Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	0,30	0,20	0,10	0,20	0,10	0,20	0,40	0,50	1,00	1,00	3,30	4,80	5,00	6,20	4,60	3,50	3,00	3,40	2,90	2,90	3,30	3,00	3,60	4,80	4,50	6,00	5,90	7,20	7,50	8,00	1,20	0,50	0,30	0,10	0,20	0,20
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,50	0,50	0,60	0,30	0,40	0,50	0,50	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70	0,60	0,60	0,70	0,60	0,60	0,80	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,10	1,20	1,20	0,80	0,80	0,60	0,60	0,30	0,40
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	1,10	1,00	0,60	0,40	0,50	0,80	1,10	0,90	0,90	0,90	1,60	1,90	1,70	1,40	1,50	1,30	1,30	1,30	1,40	1,30	1,30	1,70	1,60	1,70	2,30	2,10	2,10	1,90	2,40	2,60	1,50	1,40	0,90	1,10	0,50	0,80
	Anzahl Sektor [%]	0,20	0,10	0,10	0,10	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,40	0,30	1,50	4,40	4,70	7,30	5,10	3,80	3,90	3,10	2,80	2,70	2,40	3,30	3,20	5,30	5,10	7,30	7,50	8,60	6,10	0,80	0,60	0,30	0,10	-	0,20
alle Tagstunden im Messzeitraum	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,70	1,00	0,50	0,40	-	0,80	1,10	0,90	0,80	1,10	1,20	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90	0,80	0,90	0,80	0,90	0,90	1,00	1,00	1,20	1,20	1,20	1,30	1,30	1,50	1,00	1,00	0,60	1,10	-	0,70	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	0,90	1,00	0,50	0,40	-	0,80	1,10	0,90	0,90	0,80	1,60	1,90	1,70	1,40	1,50	1,30	1,30	1,30	1,40	1,30	1,30	1,70	1,40	1,70	2,30	2,10	2,10	1,90	2,40	2,50	1,50	1,40	0,70	1,10	-	0,80
	Anzahl Sektor [%]	0,50	0,30	0,10	0,40	0,30	0,40	0,60	1,00	1,00	1,70	5,10	5,10	5,30	5,00	4,20	3,20	2,10	3,70	3,00	3,00	4,20	2,70	4,10	4,40	4,00	4,60	4,30	5,80	6,40	9,90	1,60	0,50	0,40	0,10	0,40	0,30
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,40	0,40	0,60	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,80	0,70	0,80	1,00	1,00	0,70	0,60	0,20	0,30	0,20	0,20
alle Nachstunden im Messzeitraum	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	1,10	0,60	0,60	0,40	0,50	0,70	0,70	0,60	0,70	0,90	1,60	1,30	1,10	1,40	1,00	0,80	0,90	1,10	1,10	0,70	1,10	1,00	1,60	1,20	1,50	1,80	1,60	1,90	2,10	2,60	1,20	1,20	0,90	0,20	0,50	0,20
	Anzahl Sektor [%]	0,20	0,40	-	0,80	0,20	0,60	0,60	1,60	2,40	2,00	5,10	6,30	5,90	5,50	5,10	4,70	1,60	4,30	2,80	4,10	4,90	2,60	4,50	3,00	4,70	3,00	2,60	4,70	4,90	8,70	1,20	-	-	0,20	0,40	0,20
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	0,20	0,40	-	0,30	0,30	0,50	0,50	0,30	0,40	0,50	0,70	0,50	0,50	0,60	0,50	0,50	0,50	0,40	0,40	0,40	0,50	0,40	0,50	0,40	0,60	0,70	0,60	0,60	1,10	1,00	0,50	-	-	0,20	0,40	0,20
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	0,20	0,60	-	0,40	0,30	0,70	0,70	0,50	0,70	0,90	1,60	0,90	1,00	1,10	0,80	0,70	0,60	1,00	1,10	0,70	1,00	0,80	1,00	0,80	1,50	1,80	1,10	1,40	2,10	1,80	0,80	-	-	0,20	0,50	0,20



Tabelle A 6: Statistiken zu Windgeschwindigkeit und -richtung zu verschiedenen Auswerteziträumen für die „DWD-Referenzstation“

DWD-Referenzstation	Richtungssektor																		Fehlerte																		
	0° 360°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°	100°	110°	120°	130°	140°	150°	160°	170°		180°	190°	200°	210°	220°	230°	240°	250°	260°	270°	280°	290°	300°	310°	320°	330°	340°	350°
gesamter Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	6,80	6,60	6,20	4,30	3,20	3,00	2,30	2,40	2,30	1,70	2,30	2,00	2,60	2,90	2,70	2,30	1,20	1,40	2,00	2,40	2,40	2,70	2,60	2,50	1,70	1,40	2,00	1,70	1,60	1,50	2,20	3,00	2,40	3,20	2,90	1,40
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,80	1,80	1,80	1,70	1,90	1,60	1,40	1,50	1,40	1,40	1,70	1,70	1,30	1,20	1,20	1,20	1,00	1,60	1,50	1,80	1,90	2,20	2,30	2,60	2,50	2,90	2,70	2,90	2,90	2,50	2,20	2,10	1,90	2,00	-	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	3,30	3,30	3,30	3,40	3,20	3,50	3,80	3,30	3,80	3,40	3,80	3,70	4,10	3,70	3,40	3,70	3,00	2,20	4,00	3,30	3,30	3,80	4,10	3,90	5,50	4,60	4,30	5,00	5,00	3,80	3,60	4,00	3,80	3,70	-	
alle Tagstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	3,90	4,80	6,40	4,60	4,70	2,90	3,40	2,30	2,10	2,00	1,40	2,30	1,70	2,40	1,40	1,80	0,80	1,30	2,30	2,60	2,90	3,40	3,50	4,20	2,20	1,90	3,40	2,50	2,70	2,20	2,10	2,40	2,00	2,60	3,00	1,60
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	2,20	2,30	2,10	2,00	1,90	2,10	1,90	2,20	2,10	1,90	2,30	2,20	1,90	1,70	1,70	1,80	1,40	2,30	1,90	2,20	2,30	2,40	2,60	2,60	2,80	2,90	2,70	2,70	2,80	3,10	2,90	2,40	2,30	2,30	-	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	3,20	3,30	3,30	3,00	3,20	3,50	3,80	3,30	3,80	3,40	3,80	3,70	4,10	3,70	3,40	3,00	2,20	4,00	3,30	3,30	3,80	3,90	3,90	5,50	4,60	3,90	4,70	3,80	5,00	5,00	3,80	3,60	4,00	3,10	3,30	-
alle Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	9,60	8,40	6,00	3,90	3,90	5,50	2,60	2,30	2,60	2,50	2,40	1,80	3,40	3,40	3,90	2,80	1,60	1,70	2,20	2,00	2,00	1,70	0,80	1,20	1,00	0,50	0,80	0,50	0,80	2,30	3,70	2,80	3,70	2,80	1,10	
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,70	1,50	1,50	1,30	1,80	1,40	1,10	0,90	0,90	0,90	1,10	1,10	1,00	1,00	0,90	1,00	0,80	1,00	1,00	1,30	1,30	1,90	1,80	2,40	2,00	3,10	2,70	2,60	3,30	2,20	2,00	1,80	1,70	1,70	-	
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	3,30	2,90	3,30	3,40	3,20	3,30	2,60	2,30	2,40	2,10	3,00	2,80	2,10	3,20	2,60	3,70	2,00	1,50	2,40	2,10	2,90	2,10	4,10	2,70	3,70	4,20	4,90	5,60	4,30	3,80	3,50	3,30	3,50	3,80	3,70	-
autocorrigierte Nachtstunden im Messzeitraum	Anzahl Sektor [%]	10,20	10,00	6,60	2,80	3,40	3,00	2,80	2,80	4,20	3,60	3,00	2,80	2,50	3,40	4,90	4,00	2,10	3,00	1,30	1,90	0,60	1,50	1,10	0,20	1,10	0,20	0,00	0,20	0,00	0,20	0,80	3,00	1,90	2,50	1,90	2,50
	mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]	1,50	1,40	1,30	0,90	1,40	1,20	0,90	0,90	0,90	0,90	1,00	1,00	0,70	1,00	0,80	0,70	0,70	1,00	0,60	1,30	1,40	1,60	1,80	1,60	1,50	2,10	-	1,50	-	2,40	1,90	1,90	1,70	1,50	1,30	-
	maximale Windgeschwindigkeit [m/s]	2,70	2,70	2,60	1,80	2,40	2,40	2,60	1,60	2,40	1,70	2,20	2,40	2,10	1,20	2,60	1,90	1,80	1,50	2,40	0,80	1,90	1,60	2,40	2,60	1,80	2,10	-	1,50	-	2,40	2,10	2,70	2,50	2,30	2,10	-