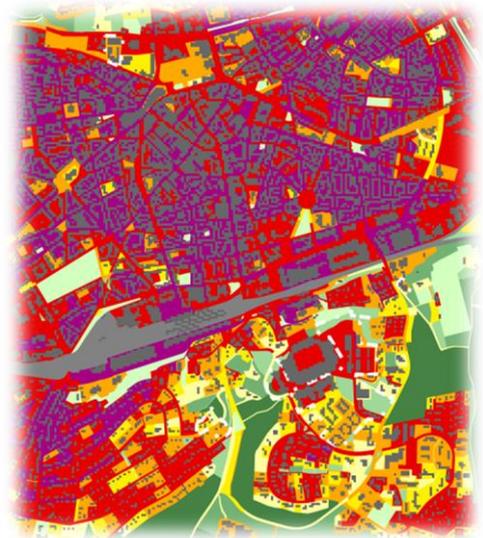
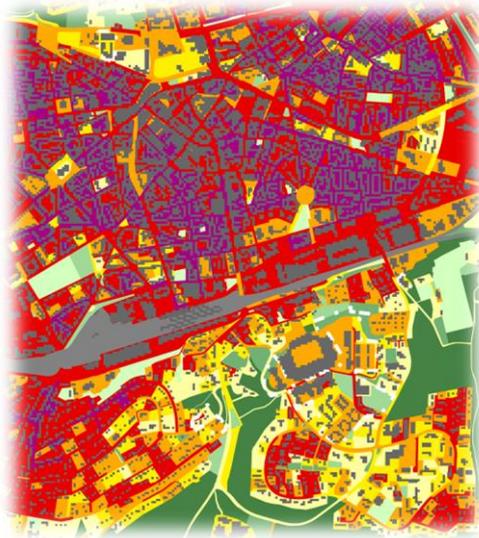




Stadtklimaanalyse 2024 -



Aktualisierung und Fortschreibung der Stadtklimaanalyse Kaiserslautern



erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH, Hannover

April 2024





Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	6
Glossar	8
1. Hintergrund und Anlass	11
2. Fachliche Grundlagen	13
2.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	13
2.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse.....	17
2.3 Stadtklima und Lufthygiene	19
2.4 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik.....	21
3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess.....	26
4. Klima und Klimawandel im Raum Kaiserslautern	29
4.1 Datengrundlage und Methodik.....	29
4.2 Gegenwärtiges Klima	34
4.3 Autochthone Wetterlagen	36
4.4 Zukünftige Klimaveränderungen.....	37
4.4.1 Temperaturerhöhung & Hitze.....	38
4.4.2 Niederschlagsverschiebung & trockenheit	44
4.4.1 Starkniederschlag.....	46
4.4.2 Wind & Sturm	50
5. Analysemethoden.....	51
5.1 Numerische Modellierung	51
5.1.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D.....	51
5.1.2 Szenarienentwicklung.....	55
5.1.3 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	60
5.1.4 Rahmen- und Randbedingungen	65
5.1.5 Modellausgabegrößen	68
5.1.6 Modellierung der Lufthygiene	70
5.1.7 Qualitätssicherung.....	74
5.1.8 Unsicherheiten und Herausforderungen	74
6. Analyseergebnisse	78
6.1 Numerische Modellierungen Klimaökologie	78



6.1.1	Nachtsituation	78
6.1.1.1	Nächtliches Temperaturfeld	78
6.1.1.2	Kaltluftströmungsfeld in der Nacht.....	81
6.1.2	Tagsituation	84
6.1.2.1	Wärmebelastung am Tag (PET).....	84
6.2	Numerische Modellierungen Lufthygiene	88
6.2.1	Allgemeines	88
6.2.2	Räumliche Ausprägung der Stickstoffdioxidbelastung	89
7.	Klimaanalysekarte als Zwischenprodukt	91
7.1	Klimaanalysekarten.....	91
8.	Kartenprodukte für Bewertung und Planung.....	98
8.1	Grundlagen	98
8.2	Geometrische Basis	99
8.3	Bewertungskarten	101
8.3.1	Wirkraum.....	101
8.3.2	Ausgleichsraum.....	103
8.3.3	Zusätzliche Karteninhalte zum Kaltluftprozessgeschehen – Methodik.....	106
8.3.4	Ergebnisse Bewertungskarten von Ist-Zustand und Zukunftsszenarien.....	107
8.3.4.1	Nachtsituation	107
8.3.4.2	Tagsituation	112
8.4	Planungshinweiskarte	116
8.4.1	Stadtklimatische Handlungspriorität im Wirkraum.....	117
8.4.2	Stadtklimatische Schutzbedarf im Ausgleichsraum	119
8.5	Vergleich mit der Stadtklimaanalyse 2012.....	121
8.6	Maßnahmenkatalog.....	122
8.7	Stadtklimamanagementsystem	137
	Quellenverzeichnis.....	139



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	13
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018)	14
ABBILDUNG 3: NÄCHTLICHE INNENRAUMTEMPERATUR (22:00 – 06:00 UHR) IN 500 AUGSBURGER SCHLAFZIMMERN IN DEN SOMMERMONATEN 2019 (BECKMANN, S., HIETE, M. UND BECK, C. 2021)	15
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	16
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019).....	17
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)).....	18
ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015)	22
ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER PLANUNGSHINWEISKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015).....	23
ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022A, 18)	24
ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE	26
ABBILDUNG 11: ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN IPCC-KLIMASZENARIEN, DIE SCHWARZE LINIE REPRÄSENTIERT MESSWERTE (CUBASCH ET AL. 2013).	32
ABBILDUNG 12: KLIMADIAGRAMM DER STADT KAISERSLAUTERN FÜR DEN ZEITRAUM 1981 – 2010, BASIEREND AUF DER DWD-STATIONEN KAISERSLAUTERN () (NACH DWD 2022)	34
ABBILDUNG 13: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN KAISERSLAUTERN IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2021 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022)	35
ABBILDUNG 14: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN KAISERSLAUTERN FÜR DEN ZEITRAUM 1991 – 2020, BASIEREND AUF DER DWD-STATION WEINBIET (DWD 2022)	36
ABBILDUNG 15: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN KAISERSLAUTERN (66 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1991 - 2020, BASIEREND AUF DER DWD-STATION MANNHEIM (DWD 2022)	37
ABBILDUNG 16: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN KAISERSLAUTERN (ALLE SZENARIEN). DIE DURCHGEZOGENEN LINIEN SIND DIE MEDIANE DER EINZELNEN SZENARIEN DES ENSEMBLES. DER MÖGLICKEITSBEREICH BILDET DIE BANDBREITE ZWISCHEN KLEINSTEM UND GRÖBTEM WERT DES ENSEMBLES ²	38
ABBILDUNG 17: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.	40
ABBILDUNG 18: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN KAISERSLAUTERN, SZENARIO RCP 8.5.	41
ABBILDUNG 19: ÄNDERUNG DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN (AUFEINANDERFOLGENDE TAGE MIT TMAX ≥ 30 °C) IN KAISERSLAUTERN, SZENARIO RCP 8.5.....	43
ABBILDUNG 20: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN KAISERSLAUTERN, SZENARIO RCP 8.5.	45
ABBILDUNG 21: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN KAISERSLAUTERN (RCP 8.5)	46
ABBILDUNG 22: ZEITLICHER TREND DER ANZAHL AN TAGEN PRO JAHR MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG (N ≥ 20 MM/D) IN KAISERSLAUTERN (ALLE SZENARIEN).	47
ABBILDUNG 23: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT N ≥ 30 MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN KAISERSLAUTERN (RCP 8.5).	49



ABBILDUNG 24: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITANH-3D	54
ABBILDUNG 25: 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	55
ABBILDUNG 26. DER SZENARIOTRICHTER (QUELLE: WWW.BUSINESS-WISSEN.DE).....	57
ABBILDUNG 27: ÜBERSICHT DER MÖGLICHEN STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN FÜR DIE ZUKUNFTS-SZENARIEN IN KAISERSLAUTERN	59
ABBILDUNG 28: DIGITALES GELÄNDEMOMENT FÜR KAISERSLAUTERN UND DIE NÄHERE UMGEBUNG	62
ABBILDUNG 29: MODELLEINGANGSDATEN „NUTZUNGSKLASSEN“ (LEGENDE IN DER RECHTEN ABBILDUNG) FÜR DEN STATUS QUO IN EINEM AUSSCHNITT DER KAISERSLAUTERNER KERNSTADT (LINKS) UND FÜR DIE DEN VERGLEICHBAREN AUSSCHNITT DER MÖGLICHEN GEPLANTEN ENTWICKLUNGEN IN DEN BEREICHEN „AN DER VOGELWEIDE“, „UMFELD BETZENBERG“, „KANTSTRASSE“ UND „KNIEBRECH“ (VON WEST NACH OST; BLAU UMRANDET IN DER RECHTEN ABBILDUNG).	63
ABBILDUNG 30: SCHEMA DER WERTZUORDNUNG ZWISCHEN FLÄCHEN- UND PUNKTINFORMATION	64
ABBILDUNG 31: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992)	65
ABBILDUNG 32: AUSGANGSPROFILE DER LUFTTEMPERATUR FÜR DIE BESTANDSSITUATION (GRÜNE KURVE) SOWIE FÜR DIE SZENARIEN „MÄßIGER“ (BLAUE) UND „STARKER“ KLIMAWANDEL (ROT).....	66
ABBILDUNG 33: VERKEHRSMENGEN (DTV) IM BETRACHTETEN MODELLGEBIET. KARTENHINTERGRUND: LVERMGEO RP, ESRI, TOMTOM, GARMIN, FOURSQUARE, GEOTECHNOLOGIES, INC, METI/NASA, USGS.....	72
ABBILDUNG 34: STRAßENVERKEHRSBEDINGTE EMISSIONSDICHEN VON STICKOXIDEN (NOX) IN GRAMM PRO METER UND TAG (G / M·D). KARTENHINTERGRUND: LVERMGEO RP, ESRI, TOMTOM, GARMIN, FOURSQUARE, GEOTECHNOLOGIES, INC, METI/NASA, USGS.....	73
ABBILDUNG 35: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR (T04) IM STATUS QUO IN DER KAISERSLAUTERNER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE)	79
ABBILDUNG 36: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN DEN SZENARIEN MÄßIGER KLIMAWANDEL (LINKS) UND STARKER KLIMAWANDEL (RECHTS) IN EINEM AUSSCHNITT DES KAISERSLAUTERNER STADTGEBIETS (VERKÜRZTE LEGENDE).	80
ABBILDUNG 37: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO IM KAISERSLAUTERNER STADTGEBIET (VERKÜRZTE LEGENDE).....	81
ABBILDUNG 38: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM STATUS QUO IN DER KAISERSLAUTERNER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE).	82
ABBILDUNG 39: BODENNAHES NÄCHTLICHES STRÖMUNGSFELD IM STATUS QUO IN DER KAISERSLAUTERNER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE).	83
ABBILDUNG 40: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM SZENARIO 2 „STARKER KLIMAWANDEL“ IN DER KAISERSLAUTERNER KERNSTADT (VERKÜRZTE LEGENDE).	83
ABBILDUNG 41: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IM STATUS QUO IN DER KAISERSLAUTERNER KERNSTADT (LEGENDE S. FOLGENDE ABBILDUNG)	85
ABBILDUNG 42: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PHYSIOLOGISCH ÄQUIVALENTE TEMPERATUR (PET)) IN DEN SZENARIEN „MÄßIGER KLIMAWANDEL“ (OBEN) UND „STARKER KLIMAWANDEL“ (UNTEN); (VERKÜRZTE LEGENDE).	87
ABBILDUNG 43: NO ₂ -ZUSATZBELASTUNG IM MORGENDLICHEN KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD. KARTENHINTERGRUND: LVERMGEO RP, ESRI, TOMTOM, GARMIN, FOURSQUARE, GEOTECHNOLOGIES, INC, METI/NASA, USGS.	90
ABBILDUNG 44: NAHAUFNAHME KERNSTADT: NO ₂ -ZUSATZBELASTUNG IM MORGENDLICHEN KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD. KARTENHINTERGRUND: LVERMGEO RP, ESRI, TOMTOM, GARMIN, FOURSQUARE, GEOTECHNOLOGIES, INC, METI/NASA, USGS.	90
ABBILDUNG 45: EINHEITLICHE LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTE (VERKÜRZTE DARSTELLUNG)	92



ABBILDUNG 46: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN UND LINIENHAFTEN KALTLUFTLEITBAHNEN (LINKS MIT UND RECHTS OHNE ENTSPRECHENDE AUSWEISUNG) INKLUSIVE LEGENDE.	94
ABBILDUNG 47: KLIMAANALYSEKARTE IM IST-ZUSTAND.	95
ABBILDUNG 48: KLIMAANALYSEKARTE IM ZUKUNFTSSZENARIO 2.	96
ABBILDUNG 49: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE (LINKS IST-ZUSTAND, RECHTS SZENARIO 2) ZUR VERDEUTLICHUNG DER LOKALEN UNTERSCHIEDE BZW. EINFLUSSNAHME VON POTENTIELLEN ENTWICKLUNGSFLÄCHE IM BEREICH DER HOHENECKERSTRASSE.	97
ABBILDUNG 50: LINKS DAS AUSGANGSRASTER (BEISPIEL) UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	100
ABBILDUNG 51: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008).....	101
ABBILDUNG 52: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION. ...	104
ABBILDUNG 53: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.....	106
ABBILDUNG 54: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM IST-ZUSTANDES (2022) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES KAISERSLAUTERNER STADTGEBIETS.....	109
ABBILDUNG 55: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO 2 (STARKER KLIMAWANDEL; ZIELHORIZONT 2055) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES KAISERSLAUTERNER STADTGEBIETS.	110
ABBILDUNG 56: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM IST-ZUSTANDES (2022) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES KAISERSLAUTERNER STADTGEBIETS.....	112
ABBILDUNG 57: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION IM ZUKUNFTSSZENARIO 2 (STARKER KLIMAWANDEL; ZIELHORIZONT 2055) FÜR EINEN AUSSCHNITT DES KAISERSLAUTERNER STADTGEBIETS.	115
ABBILDUNG 58: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA IN EINEM AUSSCHNITT DER STADT KAISERSLAUTERN (VERKÜRZTE LEGENDE).....	116
ABBILDUNG 59: SCREENSHOT AUS DER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB DES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	138



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN.	25
TABELLE 2: 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).....	30
TABELLE 3: BEWERTUNG DER STATISTISCHEN SIGNIFIKANZ ANHAND DES TREND-/RAUSCHVERHÄLTNISSES	33
TABELLE 4: MITTLERER LANGJÄHRIGER TEMPERATUR (IN °C) IN KAISERSLAUTERN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN)	39
TABELLE 5: LANGJÄHRIGE MITTLERE ÄNDERUNG (ANZAHL PRO JAHR) THERMISCHER KENNTAGE IN KAISERSLAUTERN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN)	42
TABELLE 6: LANGJÄHRIGE JÄHRLICHE ÄNDERUNG DER MITTL. NIEDERSCHLAGSSUMME (IN MM/JAHR) IN KAISERSLAUTERN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN)	44
TABELLE 7: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN (ANZAHL TAGE PRO JAHR) SOWIE DES MAXIMALEN TAGESNIEDERSCHLAGS IN KAISERSLAUTERN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	48
TABELLE 8: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 10 M.	53
TABELLE 9: MODELL-SZENARIEN ZUR ABBILDUNG DES KAISERSLAUTERNER STADTKLIMAS (2022 UND 2055) UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	57
TABELLE 10: AUFLISTUNG DER MÖGLICHEN STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN FÜR DIE ZUKUNFTS- SZENARIEN IN KAISERSLAUTERN.	59
TABELLE 11: AUFLISTUNG DER BERÜCKSICHTIGTEN RECHTSKRÄFTIGEN BEBAUUNGSPÄNE FÜR DAS BESTANDS- SZENARIO (STATUS QUO) IN KAISERSLAUTERN.	61
TABELLE 12: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER	68
TABELLE 13: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT	69
TABELLE 14: ABGELEITETE EINGANGSDATEN DER EMISSIONSBERECHNUNG	71
TABELLE 15: ERGEBNISSE DER QUALITÄTSSICHERUNG	74
TABELLE 16: ÜBERSICHT DER NÄCHTLICHEN LUFTTEMPERATUR ZWISCHEN DEN SZENARIEN UND NUTZUNGEN....	80
TABELLE 17: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004)	84
TABELLE 18: ÜBERSICHT DER PET-WERTE ZWISCHEN DEN SZENARIEN UND NUTZUNGEN	86
TABELLE 19: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN	93
TABELLE 20: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH TAGESZEIT UND STRUKTURTYP	102
TABELLE 21: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP.	106
TABELLE 22: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM IST-ZUSTAND UND DEN ZWEI ZUKUNFTSSZENARIEN.	111
TABELLE 23: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS	117
TABELLE 24: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZU DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN IM WIRKRAUM.....	118
TABELLE 25: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHSRAUMS	119



TABELLE 26: ALLGEMEINE STADTKLIMATISCHE PLANUNGSHINWEISE ZUM SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM	120
TABELLE 27: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT KAISERSLAUTERN.	125



Glossar

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

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

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

Austauscharme Wetterlage: → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

Städtische Wärmeinsel (Urban Heat Island): Städte weisen im Vergleich zum weitgehend natürlichen, 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.

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 Klimawandeltreibers (z.B. Änderung der CO_2 -Konzentration oder der von der Sonne abgegebenen Energie).

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

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

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

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



1. Hintergrund und Anlass

Die im vorliegenden Bericht dokumentierte „Stadtklimaanalyse 2024 – Aktualisierung und Fortschreibung der Stadtklimaanalyse Kaiserslautern“ stellt die Fortschreibung der vorangegangenen gesamtstädtischen Klimaanalysen von GEO-NET Umweltconsulting GmbH (2012) nach heutigem Stand der Technik dar. Die Notwendigkeit einer Aktualisierung rührt vor allem daher, dass die letztmalige Analyse bereits über 10 Jahre zurückliegt. Im Folgenden sind rechtliche, fachliche, planerische und politische Gründe aufgetragen, die eine Neufassung anraten:

- 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.
- Die Klimafolgenanpassung (hier die Hitzevorsorge und die Bedeutung von Kaltluft) ist in den letzten Jahren noch weiter in den Fokus von Politik, Planung und Stadtgesellschaft gerückt. Als Konsequenz ist die Fortschreibung und Detaillierung der Klimaanalyse eine übergeordnete Schlüsselmaßnahme, auch in Verbindung mit dem bestehenden Klimaanpassungskonzept der Stadt Kaiserslautern (Geo-Net, Dahlem, MUST 2019). In letzterem wurden Handlungserfordernisse herausgearbeitet, welche es ermöglichen den Klimawandelfolgen frühzeitig entgegenzuwirken. Die Klimaanalyse stellt in diesem Zusammenhang einen wichtigen Baustein zur weiteren Umsetzung des Konzeptes dar.
- Die derzeitige Basis für die weitere räumliche Stadtentwicklung in Kaiserslautern ist der Flächennutzungsplan 2025. Das Integrierte nachhaltige Stadtentwicklungskonzept (INSEK) stellt die Weichen für die zukünftige städtebaulichen Entwicklungen im Stadtgebiet. Die vorliegende Klimaanalyse knüpft durch die Berücksichtigung der aktuellen, rechtskräftigen Bebauungspläne und durch Integration der im FNP 2025 enthaltenen Entwicklungsflächen an dieses Konzept an und lässt eine erste klimaökologische Bewertung der geplanten Baumaßnahmen zu.

Aus diesen Rahmenbedingungen wurde für die vorliegende Klimaanalyse das übergeordnete Ziel einer Detaillierung und Konkretisierung der vorangegangenen Analysen hinsichtlich klimaanpassungsrelevanter Aspekte wie Hitze, Starkregen, thermischer Komfort sowie lufthygienische Belastung 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 stadtklimatisch 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).

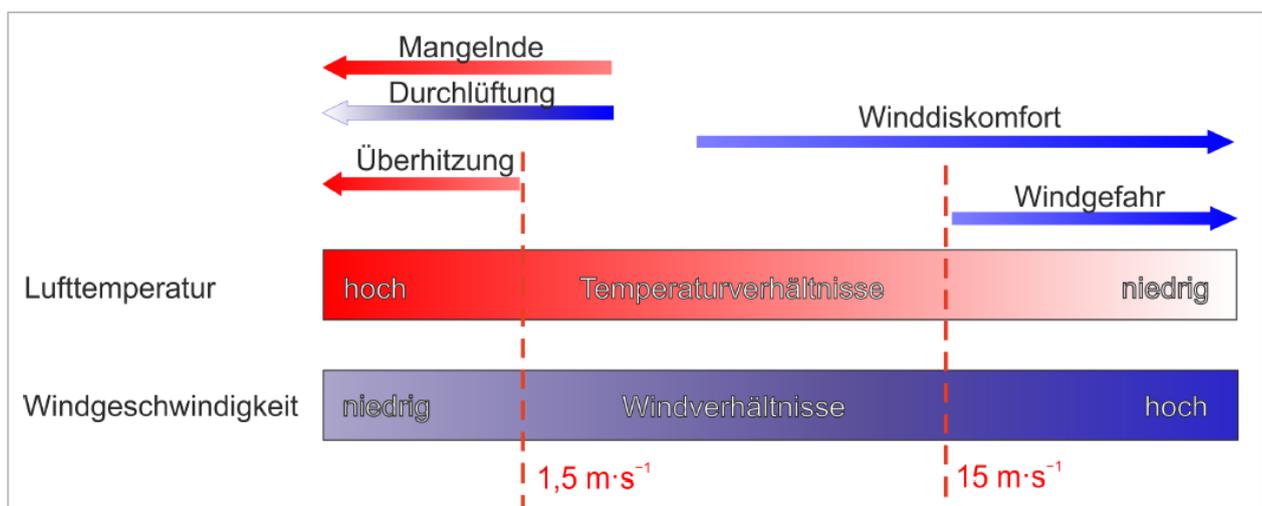


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))



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 $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder *Tropennächte* (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zur räumlichen Differenzierung von thermischen Belastungen vorgenommen werden sollen.

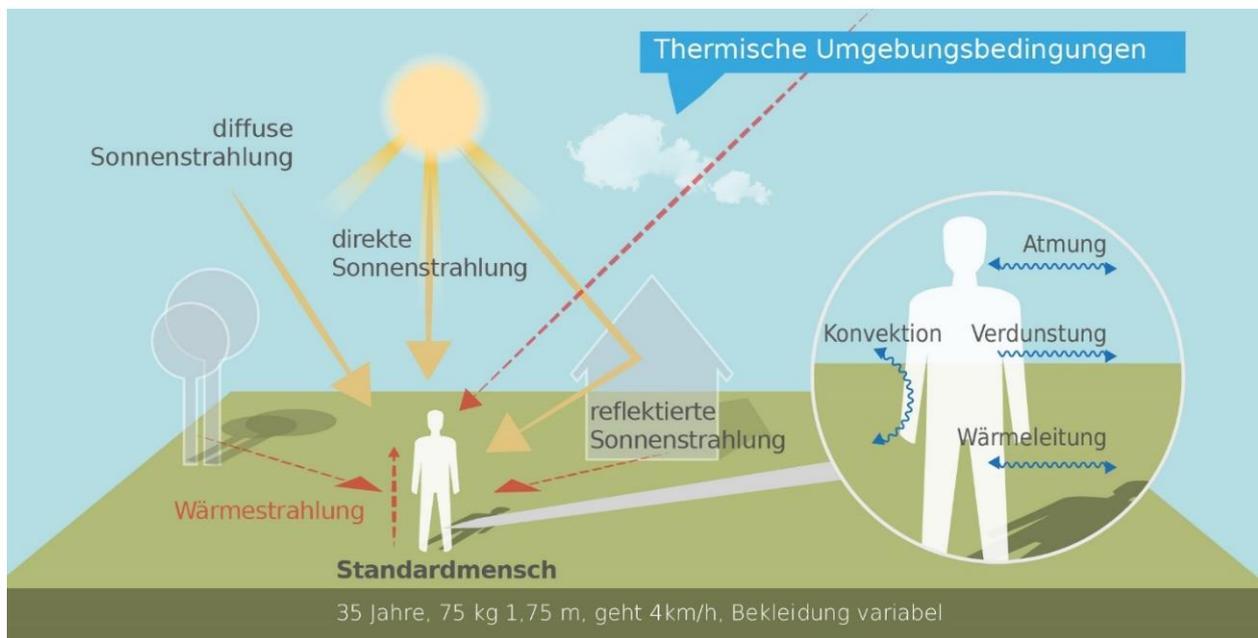


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

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



ergreifen (z.B. Flexibilisierung der Arbeitszeiten, Klimatisierung, Reduzierung innerer Wärmequellen wie Elektrogeräte). Ein direkter Rechtsanspruch auf z.B. klimatisierte Räume oder "Hitzefrei" lässt sich für Beschäftigte aus der Verordnung jedoch nicht ableiten.

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

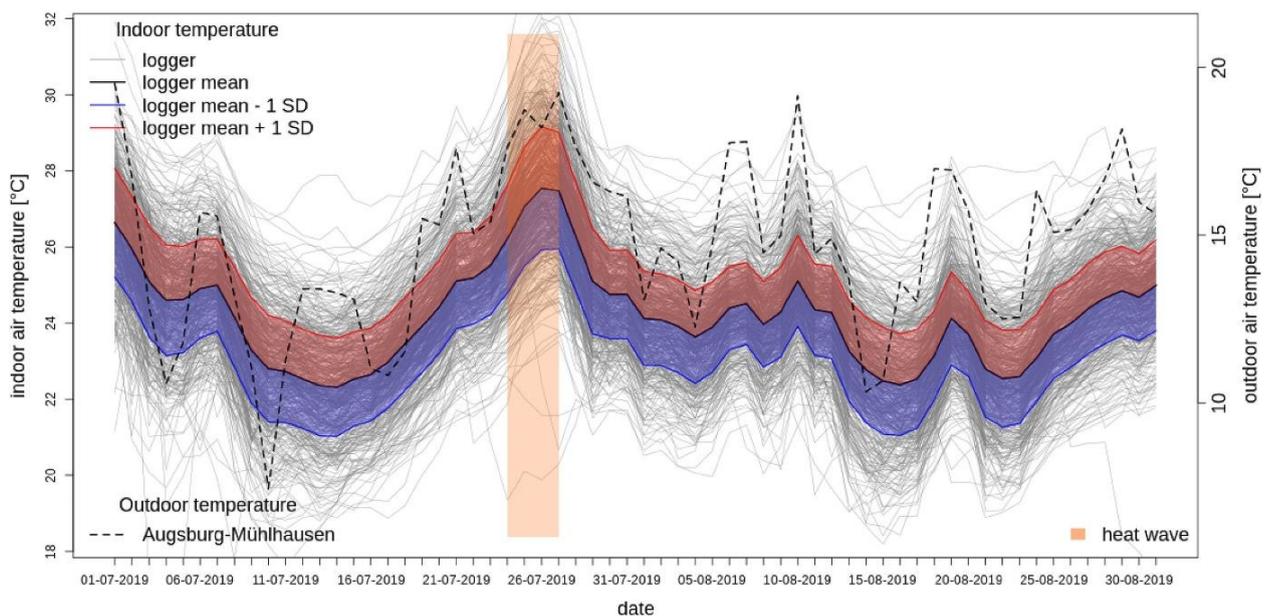


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 bis 12 % aus (Urban & Steining 2015). In einer amerikanischen Studie, die die kognitiven Fähigkeiten junger Erwachsener in Wohnumfeldern mit und ohne Klimaanlage vergleicht, wurden signifikant bessere Werte im Bereich von



10-15 % für die Reaktionszeiten und die Gedächtnisleistungen in der klimatisierten Umgebung gefunden (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 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).

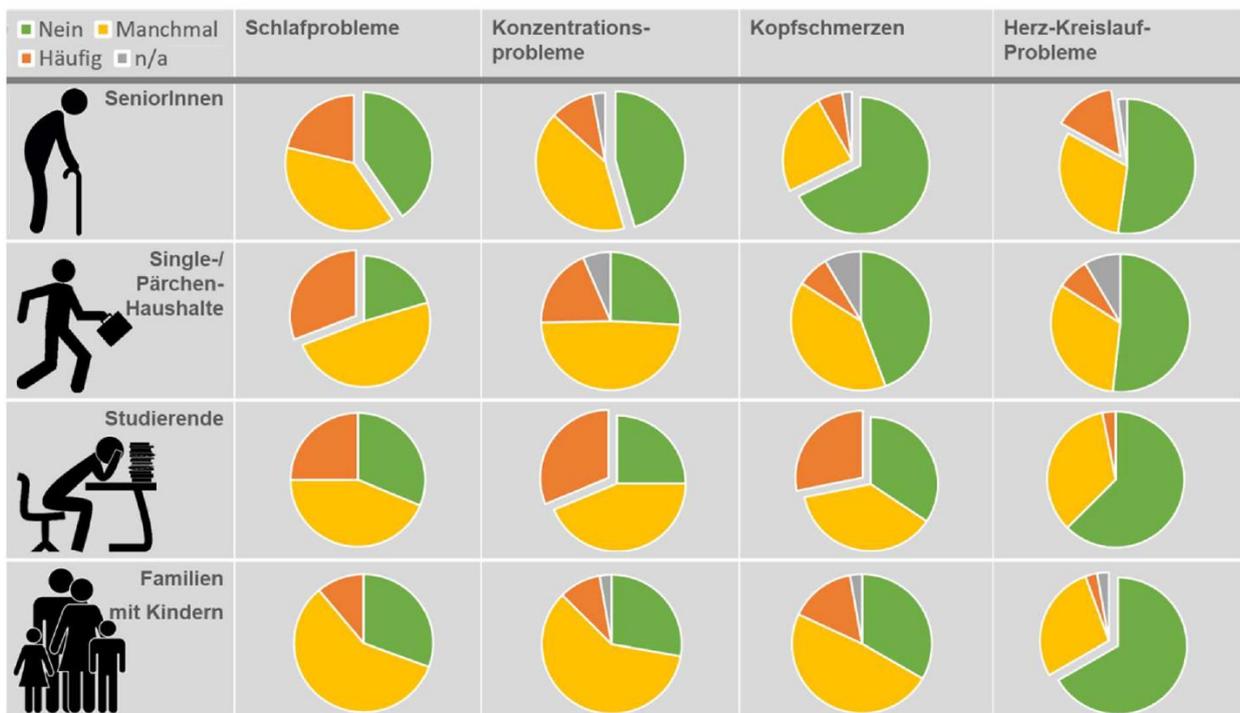


Abbildung 4: Gesundheitsliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

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 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

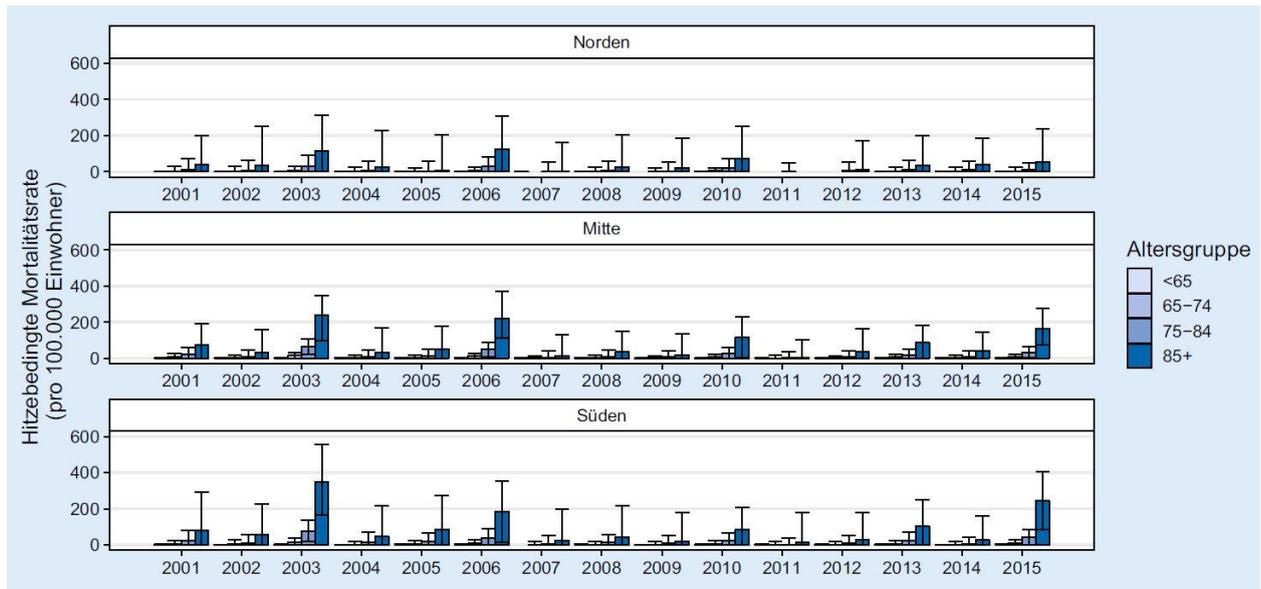


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

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

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

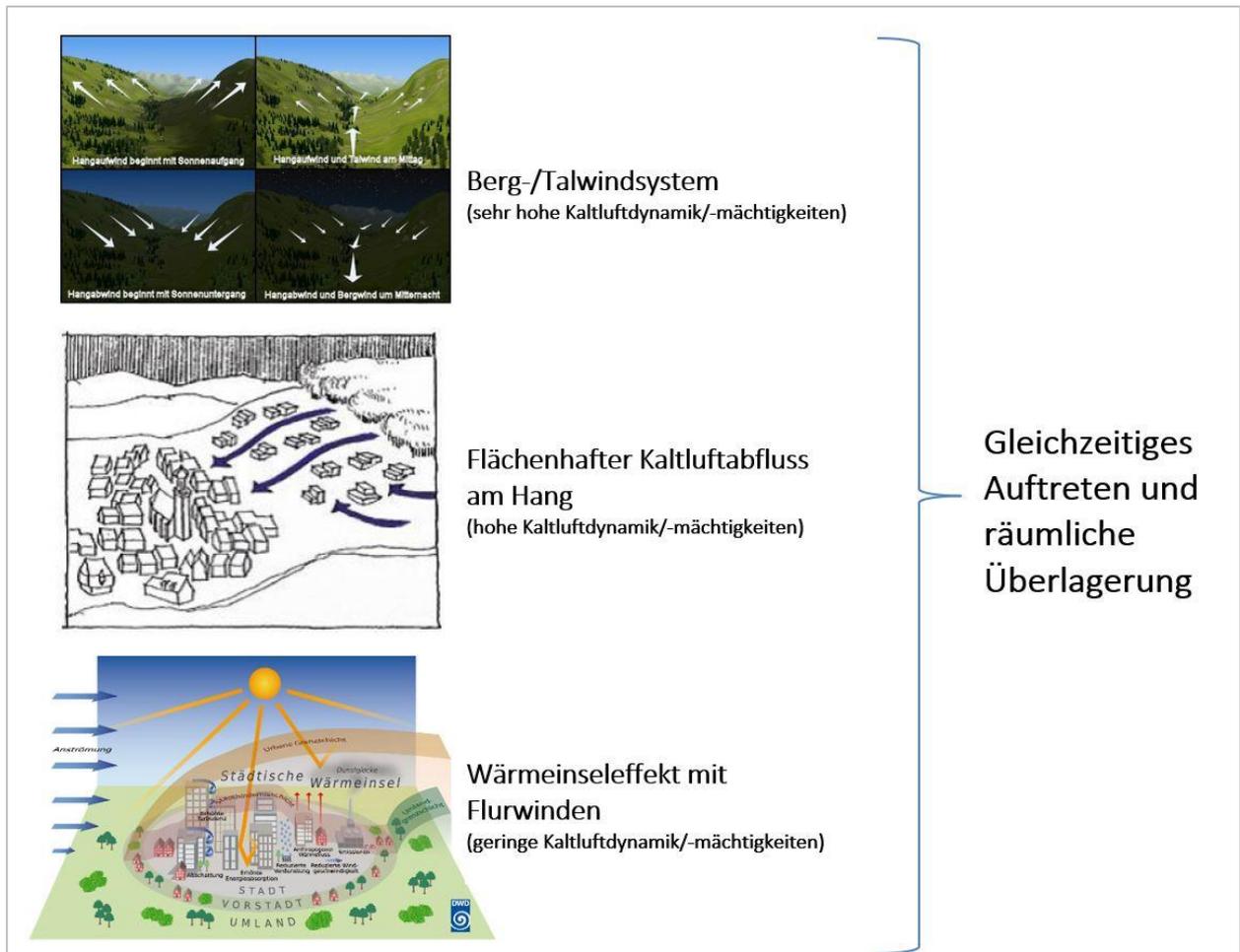


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten))

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al. 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, dem ein geringer Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche gegenübersteht. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener 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 („Flurwindensystem“). 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 Flurwindensysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von



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

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

2.3 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.

Die im Rahmen dieser Fortschreibung der Stadtklimaanalyse Kaiserslautern vorgenommene lufthygienische Untersuchung einer austauscharmen Wetterlage wird mit dem Modell FITNAH durchgeführt. Als Indikator für die Luftgüte bei austauscharmen Wetterlagen wird die Ausbreitung der Luftschadstoffkomponenten Stickstoffoxid (NO_x) im Strömungsfeld der Kaltluft bzw. die daraus resultierende momentane Immissionskonzentration verwendet. Die Ausgangswerte hierfür liefern die Berechnungen der Emissionsmengen auf der Basis des Verkehrsaufkommens.



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, Stadtsanierung, Grünflächenentwicklung) dar. Mindestanforderungen an die zu verwendenden Methoden und zu erstellenden Produkte werden in umweltmeteorologischen VDI-Richtlinien vordefiniert. Von Bedeutung sind insbesondere folgende Richtlinien:

- VDI 3785 Blatt 1 (2008): Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima
- VDI 3787 Blatt 1 (2015): Klima- und Lufthygienekarten für Städte und Regionen
- VDI 3787 Blatt 2 (2022): Methoden zur humanbiometeorologischen 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
Klimatope			Luftaustausch		
Gewässer-, Seenklima		0/127/255 dunkelblau	Luftleitbahn, unbelastet		43/75/155 blau
Freilandklima		190/232/255 hellblau	Luftleitbahn, klimatisch und/oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Waldklima		115/178/115 dunkelgrün	Kaltluftabfluss, unbelastet		43/75/155 blau
Klima innerstädtischer Grünflächen		174/241/176 hellgrün	Kaltluftabfluss, lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Vorstadtklima		255/255/225 hellgelb	Talabwind, unbelastet		18/79/158 blau
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	Kaltluftzugsgebiet		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 (Abbildung 8). Seit der letzten Überarbeitung der Richtlinie sollen bei der Bewertung auch die Themen Klimawandel und Umweltgerechtigkeit Berücksichtigung finden. Auf weitergehende methodische Hinweise verzichtet die Richtlinie jedoch. Somit erfolgt die Erstellung der Planungshinweiskarte auch weiterhin im Spannungsfeld zwischen fachgutachterlichen Empfehlungen, planerischen Zielsetzungen und politischer Willensbildung.



Planungshinweise	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Grün- und Freiflächen		
Ausgleichsraum hoher Bedeutung		115/178/115 dunkelgrün
Ausgleichsraum mittlerer Bedeutung		174/241/176 grün
Ausgleichsraum geringer Bedeutung		211/255/190 hellgrün
Siedlungsflächen		
Bebautes Gebiet mit geringer Belastung und geringer klimarelevanter Funktion		255/255/225 gelb
Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion		246/197/103 orange
Bebautes Gebiet mit bedeutender klimarelevanter Funktion		255/127/127 rot
Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygienischen Nachteilen		138/43/226 violett
Raumspezifische Hinweise		
Begrünung im Stadt- 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-System¹, 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).

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



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

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

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

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

Übersicht stadtklimatischer Modelle

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



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

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

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

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

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



3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 10). Die Bearbeitungszeit lag zwischen März 2022 und Januar 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 sowie Auswertungen von frei verfügbaren Klimadaten (u.a. des DWD). Zentrale Zwischenprodukte sind kartographische Darstellungen ausgewählter Modellergebnisse sowie insbesondere die Klimaanalysekarten. Auftretende methodische Herausforderungen (z.B. im Zusammenhang mit Eingangs-/Basisdaten) wurden in enger Abstimmung mit der Auftraggeberin, insbesondere der dortigen Referatsleitung beim Amt für Umweltschutz sowie zu speziellen Einzelthemen (vorallem Entwicklungsflächen) zusätzlich mit weiteren Fachstellen (wie bspw. der Stadtplanung) innerhalb der Stadtverwaltung, wie auch extern zum Thema Klimawandelszenarien mit dem (Rheinlandpfälzischen Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen gelöst.

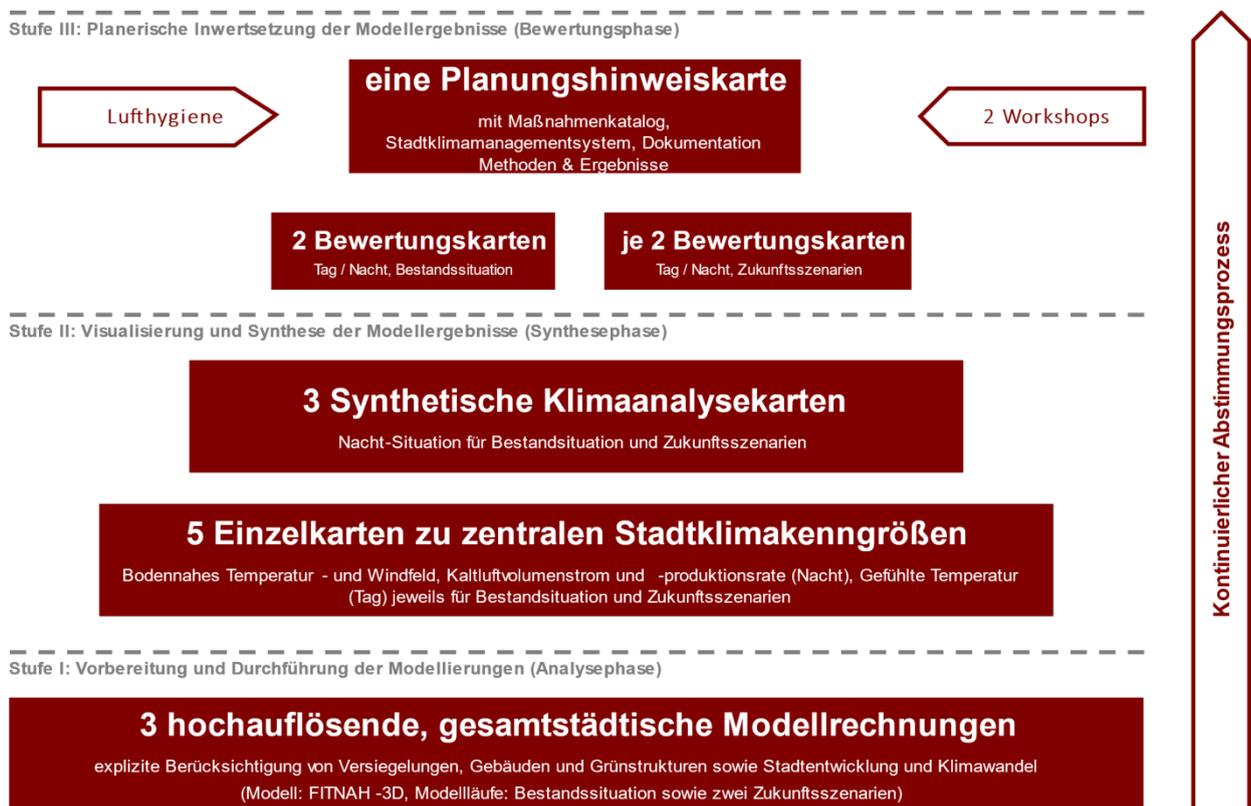


Abbildung 10: die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

In der Phase der planerischen Bewertung rückten neben gutachterlichen Tätigkeiten gleichberechtigt auch diskursorientierte Ansätze ins Zentrum der Projektbearbeitung. Erfahrungsgemäß besteht die größte Herausforderung bei der Erstellung der Planungshinweiskarte als zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse in ihrem wertenden und empfehlenden Charakter, denn sie „[...] umfasst Empfehlungen, Vorschriften oder Werturteile. Wertaussagen beschreiben die Umwelt wie sie aus Sicht des Betrachters sein soll. Ziele gehören zur Wertebene der Planung“ (Gaede & Härtling 2010, 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 nicht abschließend weiter. Folglich muss die Operationalisierung auf regionaler und kommunaler Ebene in individuellen politisch-planerischen Abwägungs-/Zielfindungsprozessen unter Berücksichtigung fachlicher Expertisen immer wieder aufs Neue erfolgen.

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



Folgende Institutionen waren regelmäßiges Mitglied der PAG:

- Referat Umweltschutz
- Referat Stadtentwicklung

Insgesamt fanden 5 Sitzungen der PAG zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- PAG 1 (Einführung und Zentrale Produkte der Stadtklimaanalyse) am 09.05.2022
- PAG2 (Ergebnispräsentation Status Quo) am 15.09.2022
- PAG3 (Ergebnispräsentation Zukunft) am 03.03.2023
- PAG4 (Vorstellung & Diskussion Bewertungskarten zur PHK) am 23.06.2023
- PAG5 (Vorstellung & Diskussion Planungshinweiskarte) am 09.01.2024



4. Klima und Klimawandel im Raum Kaiserslautern

4.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Gegenwärtiges Klima

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Kaiserslautern basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD; Kaspar et al. 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1961.

Anhand der Stadtgrenze Kaiserslautern 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 Messgenauigkeiten 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 Kaiserslautern 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 2 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 Kaiserslautern auf ein Ensemble bestehend aus 12 Regionalen Klimamodellen zurückgegriffen.

Tabelle 2: 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 Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke et al. 2016).

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa 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/m², 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/m²). Zum Ende des Jahrhunderts sinkt dieser langsam, aber stetig auf 2,6 W/m² ab. Die globale Mitteltemperatur würde in diesem Szenario das 2 °C-Ziel 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 2022).
- 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 1985-2005 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 Projektes² 2013 proklamierten, befanden und befinden wir uns, gemessen an den globalen CO₂-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 CO₂-Emissionen am ehesten dem RCP 8.5 und 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 CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Die Stadt Kaiserslautern 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 Emissions 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).

² www.globalcarbonproject.org



Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Ermittlung des dem Stadtzentrum von Kaiserslautern am nächsten gelegenen Gitterpunktes sowie den acht 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 2016). Alle Auswertungen basieren auf diesen Zeitreihen.

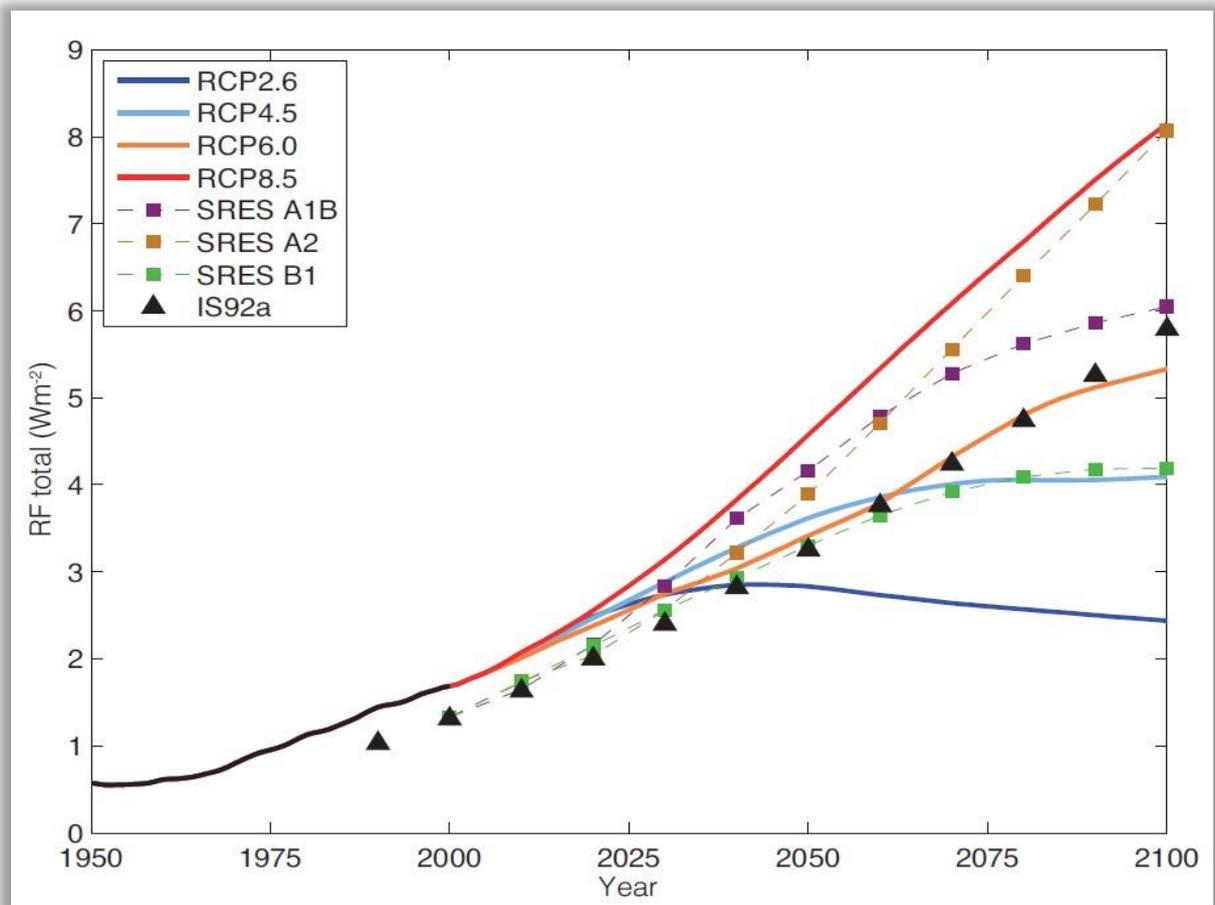


Abbildung 11: Anthropogener Strahlungsantrieb der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien, die schwarze Linie repräsentiert Messwerte (Cubasch et al. 2013).

Die Analyse des Klimawandels in Kaiserslautern 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 3).



Tabelle 3: Bewertung der statistischen Signifikanz anhand des Trend-/Rauschverhältnisses

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

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in welchem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die WMO (World Meteorological Organisation) 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 - 2000
- Zukunftsperiode 1 (kurzfristiger Planungshorizont): 2023 - 2050
- Zukunftsperiode 2 (mittelfristiger Planungshorizont): 2041 - 2070
- Zukunftsperiode 3 (langfristiger Planungshorizont): 2071 - 2100

Die Wahl der 30-jährigen Zeiträume erfolgte nach dem Stand der Technik. Im vorliegenden Fall gemäß dem Vorgehen 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

Kaiserslautern ist gekennzeichnet durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,6 °C (DWD 2022) und eine mittlere Niederschlagssumme von 558 mm/Jahr, wobei die höchsten monatlichen Niederschlagssummen in den Monaten Juni, Oktober und Dezember auftreten (Abbildung 12). Damit ist die Stadt um 0,7 °C wärmer als im deutschlandweiten Durchschnitt von 8,9 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge mit 558 mm/Jahr liegt unter dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 818 mm/Jahr.

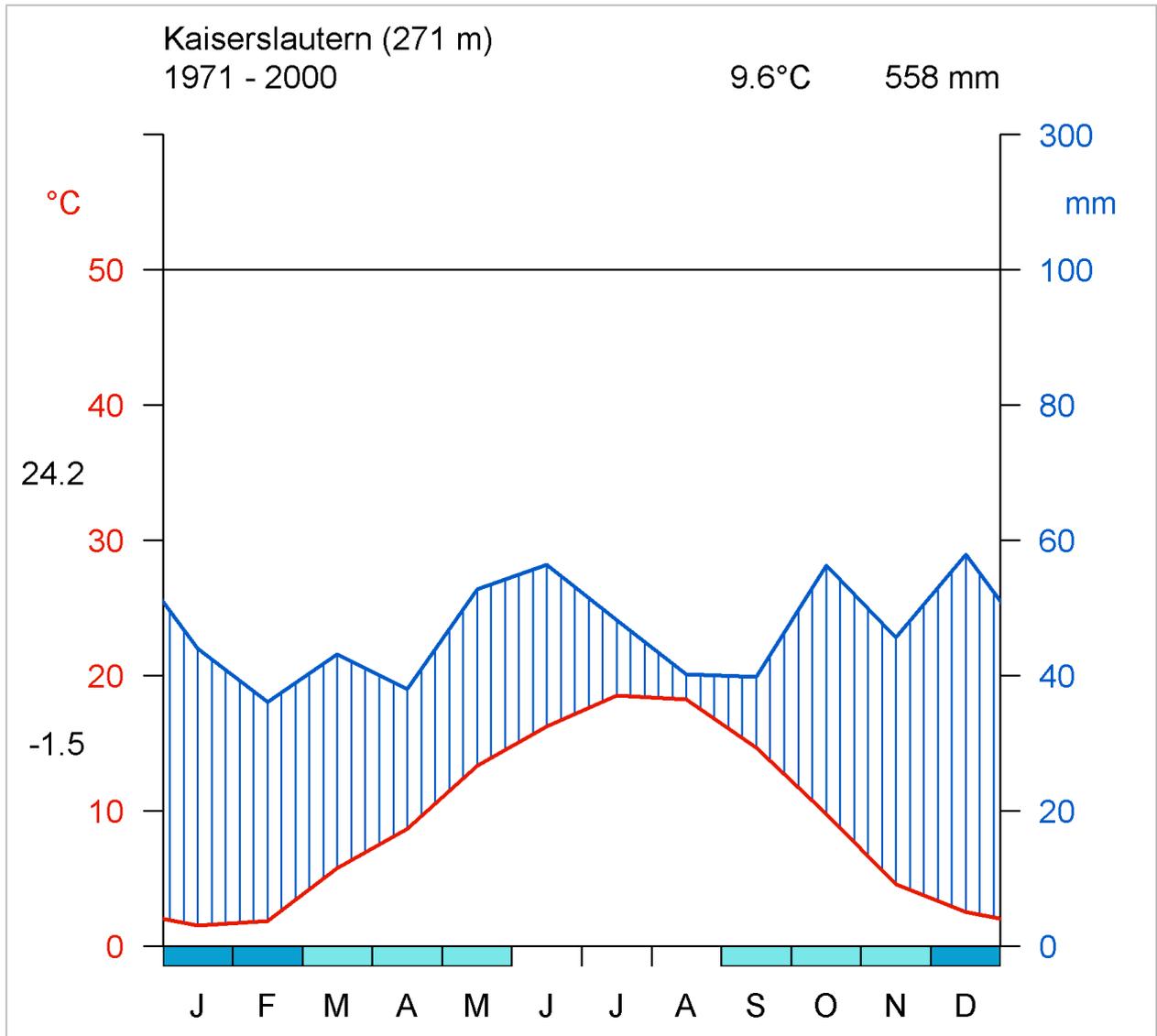


Abbildung 12: Klimadiagramm der Stadt Kaiserslautern für den Zeitraum 1981 – 2010, basierend auf der DWD-Stationen Kaiserslautern () (nach DWD 2022)

Ein Blick in die Vergangenheit macht deutlich, dass in Kaiserslautern – 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 1991 – 2020 im Vergleich zu 1901 – 1930). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 13).

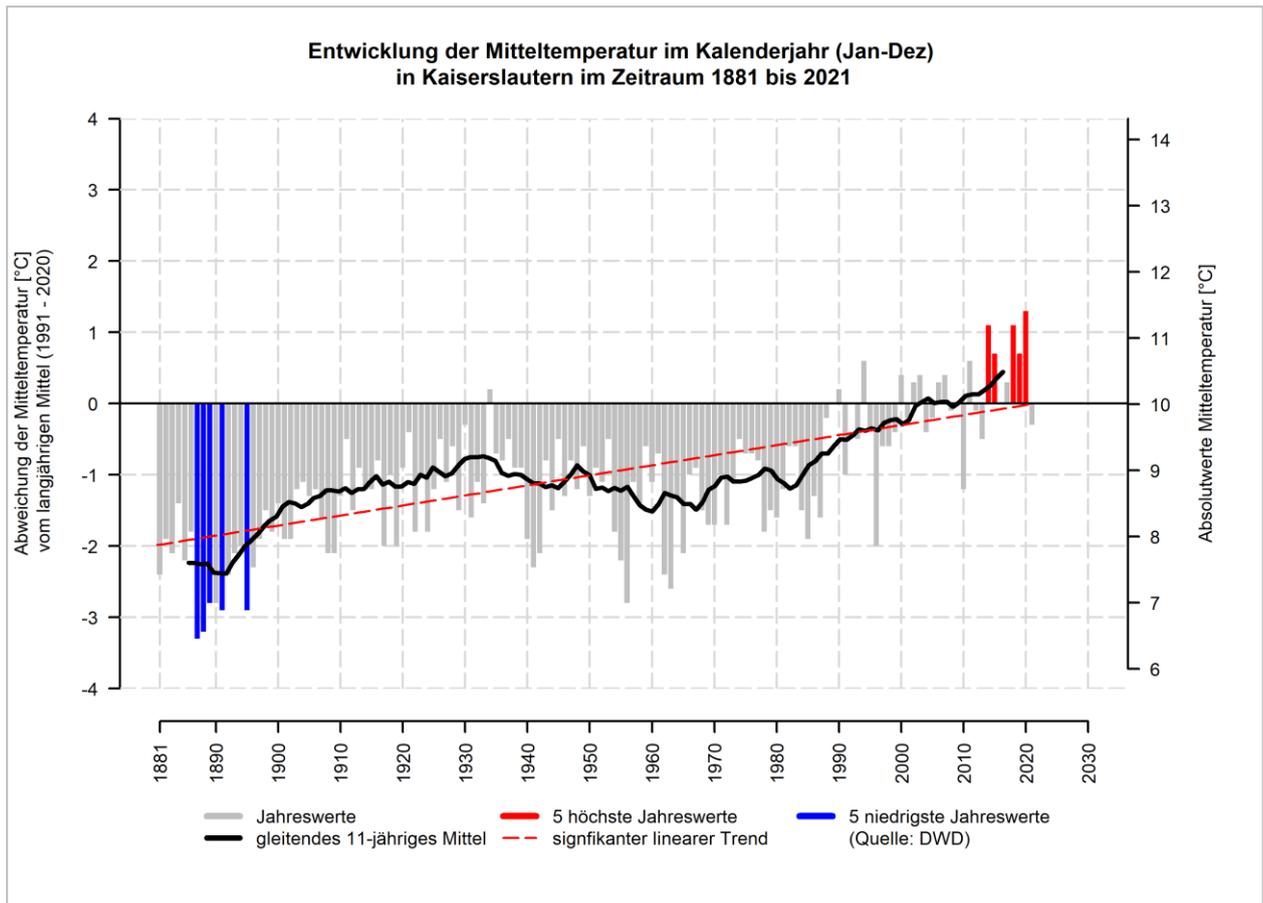


Abbildung 13: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Kaiserslautern im Zeitraum von 1881 bis 2021 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2022)

Im langjährigen Mittel des Zeitraums 1991 - 2020 traten in Kaiserslautern 50 Sommertage und 13 Heiße Tage pro Jahr auf, was über dem deutschlandweiten Durchschnitt (35 Sommertage bzw. 7 Heiße Tage pro Jahr) liegt. Die warm-gemäßigte Lage Kaiserslauterns zeigt sich in der Anzahl meteorologischer Kenntage im Winter. In Kaiserslautern wurden in den letzten drei Dekaden im Mittel 73 Frosttage und 15 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 Weinbiet dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in Kaiserslautern. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 6,2 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 (süd)westlichen wie auch östlichen Richtungen (Abbildung 14).

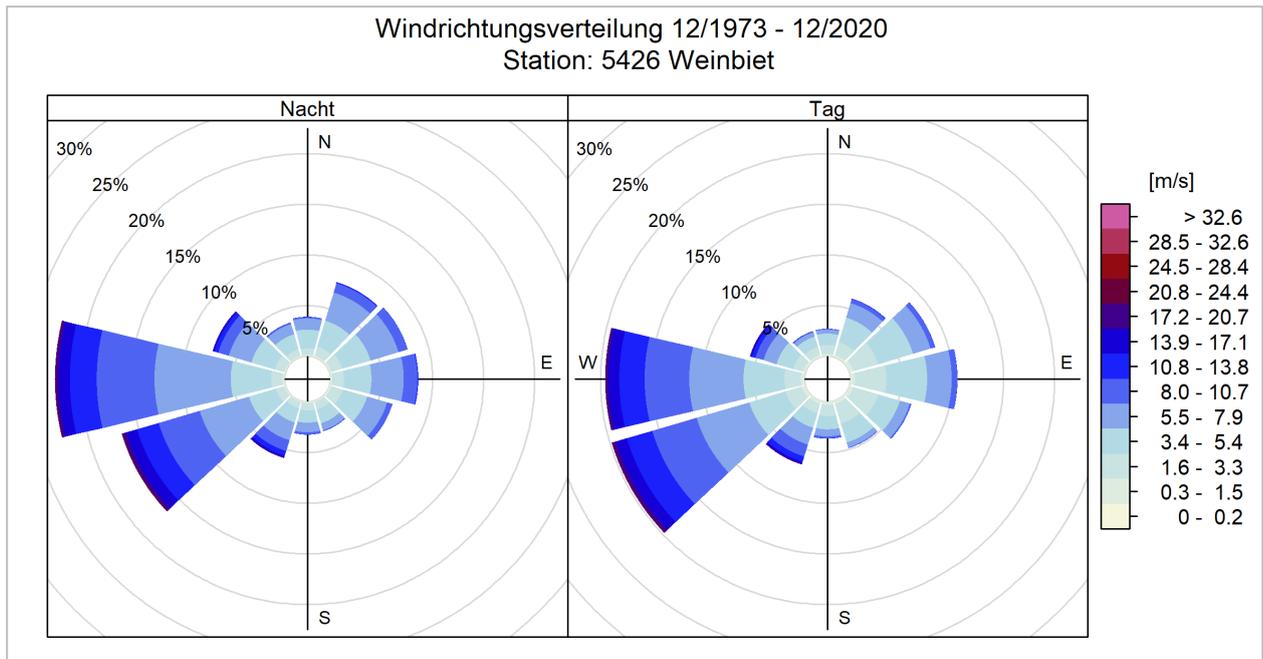


Abbildung 14: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Kaiserslautern für den Zeitraum 1991 – 2020, basierend auf der DWD-Station Weinbiet (DWD 2022)

4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

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

In Kaiserslautern traten im langjährigen Mittel von 1991 - 2020 rund 66 windschwache Strahlungs Nächte 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 Strahlungs Nächte beobachtet, was einem Anteil von 25 % entspricht – jede vierte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

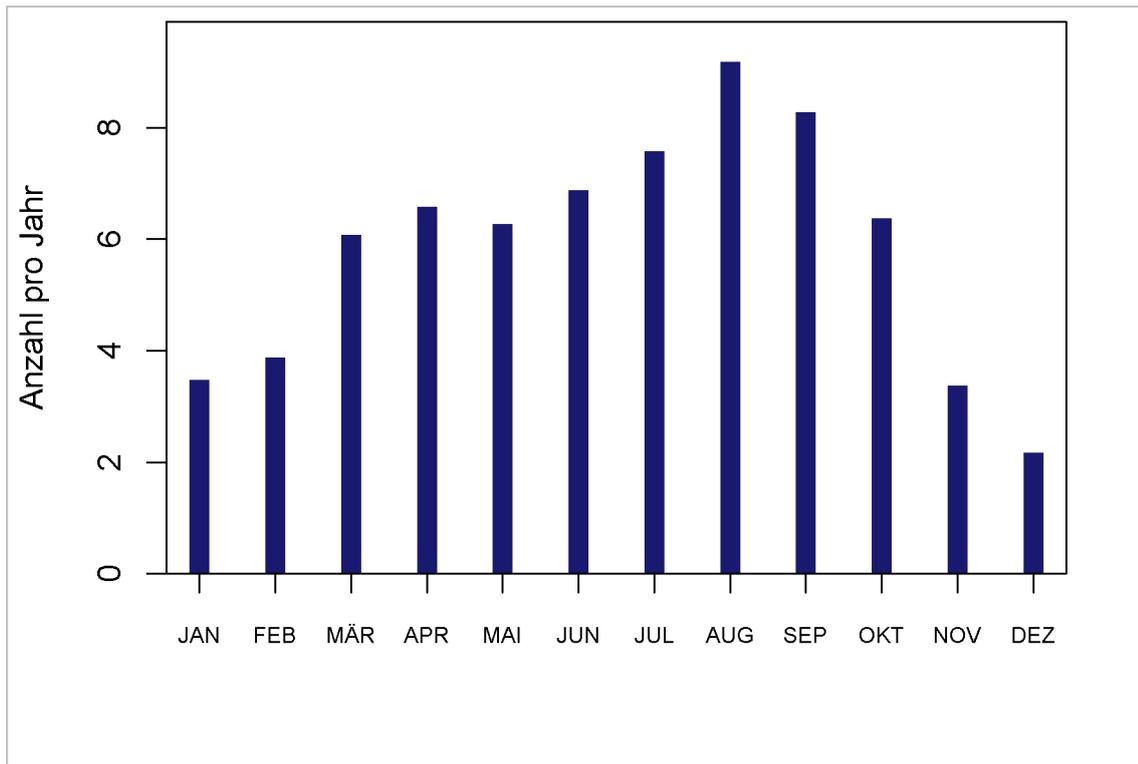


Abbildung 15: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungsnächten in Kaiserslautern (66 pro Jahr) für den Zeitraum 1991 - 2020, basierend auf der DWD-Station Mannheim (DWD 2022)

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

Der menschengemachte Klimawandel ist bereits heute erkenn-, mess- und spürbar (IPCC 2021/2022). Besonders im Hinblick auf die Entwicklung von Anpassungsstrategien und Konzepten zum Umgang mit veränderten klimatischen Bedingungen ist es wichtig zu wissen, in welchem Umfang sich die Klimaelemente Temperatur, Niederschlag und Wind in den nächsten Dekaden verändern.

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

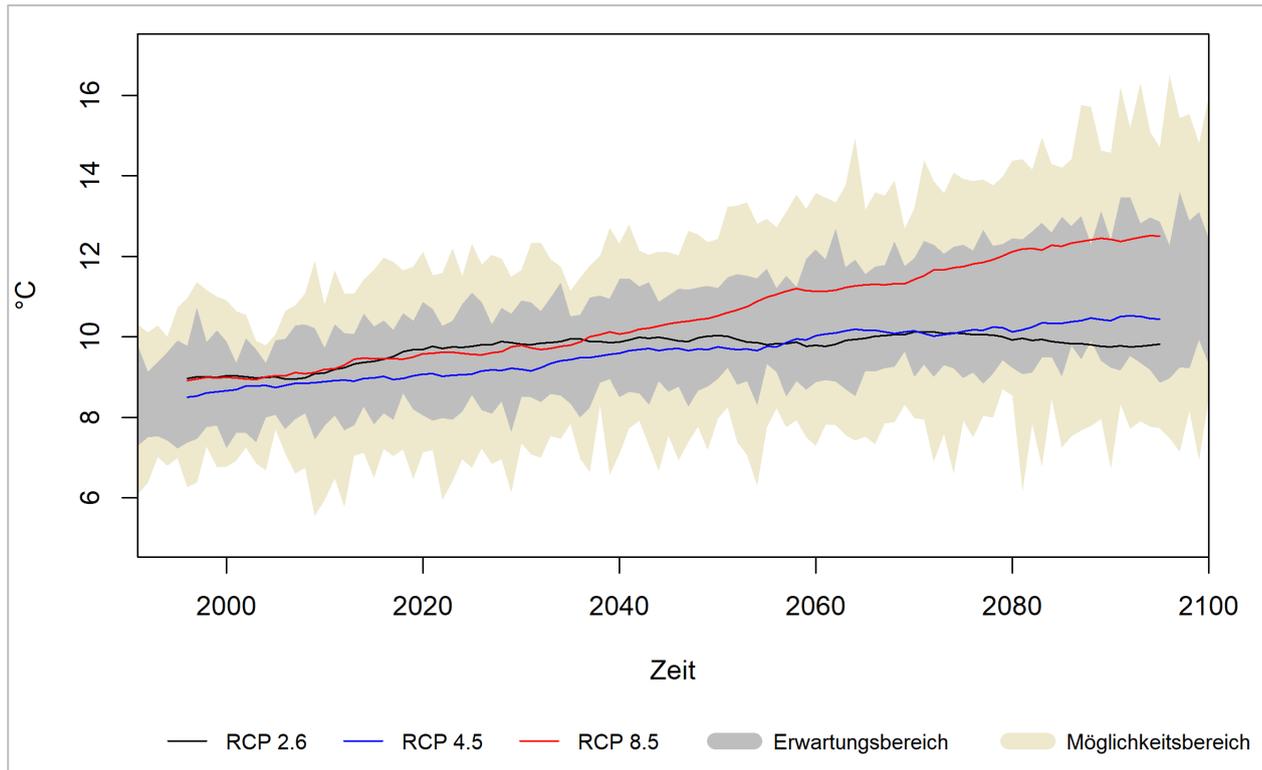


Abbildung 16: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Kaiserslautern (alle Szenarien). Die durchgezogenen Linien sind die Mediane der einzelnen Szenarien des Ensembles. Der Möglichkeitbereich bildet die Bandbreite zwischen kleinstem und größtem Wert des Ensembles².

Die Änderungen der langjährigen Mittelwerte der Temperatur zeigen für Kaiserslautern ebenfalls einen deutlichen Anstieg in allen Zeiträumen, wobei im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts die stärksten Zunahmen zu verzeichnen sind (Tabelle 4). Im RCP 8.5 steigen die jährlichen Minimumtemperaturen am stärksten. Es zeigt sich zudem, dass die Änderungen der Temperaturmaxima höher ausfallen als die der Mitteltemperaturen. Die höchsten Zunahmen der Mitteltemperatur treten in der Zukunftsperiode von 2071 bis 2100 bei den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5 auf. Beim Szenario RCP 2.6 ist ein leichter Rückgang der Temperatur zu erkennen (Tabelle 4). Hier zeigen sich die projizierten positiven Auswirkungen globaler Klimaschutzmaßnahmen deutlich.

² Der Möglichkeitbereich 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.



Tabelle 4: Mittlerer langjähriger Temperatur (in °C) in Kaiserslautern (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

Parameter	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971-2000								
		2021/2050			2041/2070			2071/2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,8	1	1,4	0,8	1,2	1,5	0,9	1	1,6
	RCP 4.5	0,8	1,2	1,5	1	1,7	2,3	1,5	2,1	2,6
	RCP 8.5	0,9	1,5	1,8	1,8	2,4	2,8	2,9	3,9	4,8
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	1	2,2	3	1,7	2,1	2,7	1,5	2,4	3,5
	RCP 4.5	2,2	3	3,8	2,1	3,8	5,7	4	5	5,9
	RCP 8.5	1,5	3,2	3,9	2,8	4,3	5,9	5,7	7,8	9,1
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0,9	1,4	2,9	0,7	1,7	2,9	0,9	1,7	2,4
	RCP 4.5	0,8	1,6	2,3	1,2	2,1	3,6	1,6	2,8	4,2
	RCP 8.5	1,3	1,8	2,9	2,4	3,1	5	4,2	5,4	8,5

Eine Zunahme der Temperaturen ist in allen Regionen Deutschlands beobachtbar und auch in den regionalen Klimaprojektionen erkennbar (DWD 2016, Deutschländer und Mächel 2017). In der 3. Zukunftsperiode (2071-2100) liegt die Temperaturänderung des Szenarios RCP 8.5 in Kaiserslautern mit 3,9 °C leicht über dem deutschlandweiten Mittelwert von 3,8 °C. Bei der Annahme dieses Szenarios würde die Jahresmitteltemperatur in Kaiserslautern zum Ende des Jahrhunderts somit bei ca. 14 °C bis 15 °C liegen. Dies entspricht beispielsweise der heutigen Jahresmitteltemperatur von Madrid.



Die nachfolgenden Ausführungen enthalten einige 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 zur Erläuterung der Plots).

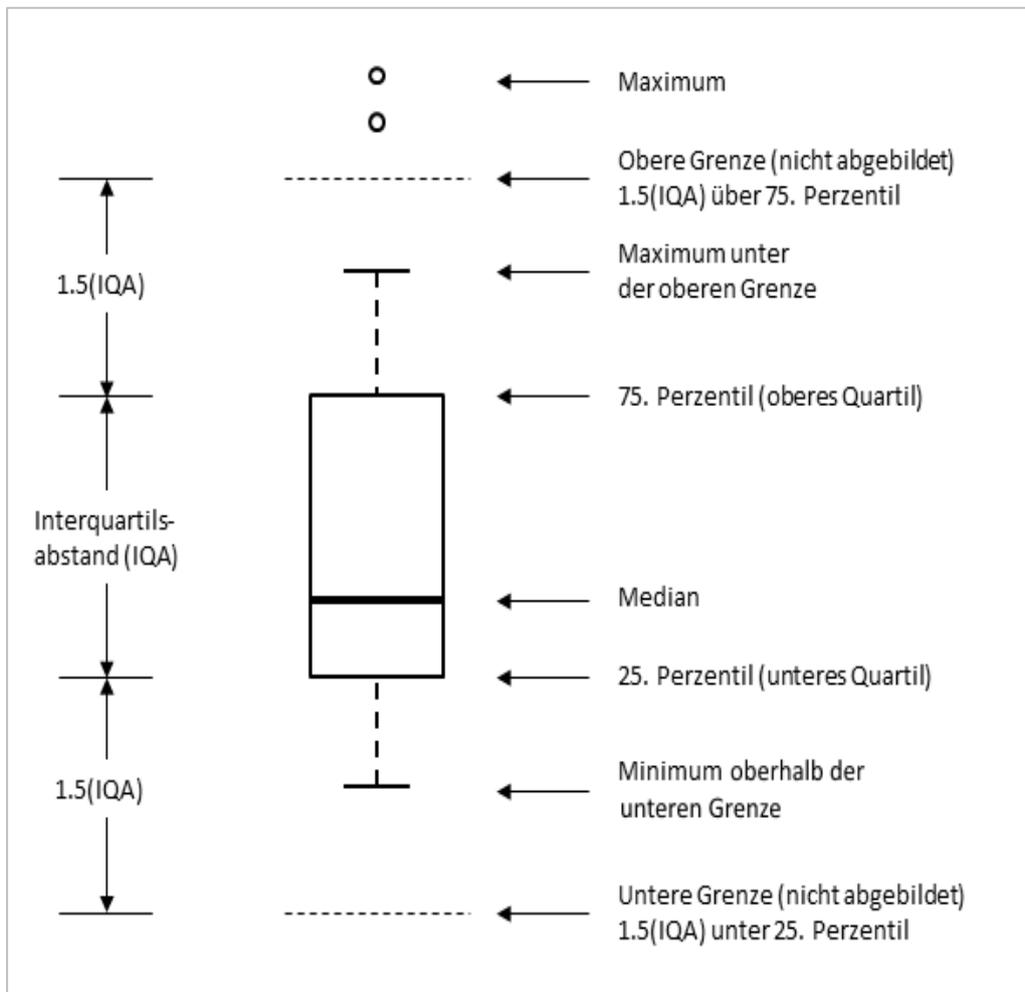


Abbildung 17: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots.



Die nachfolgende Abbildung zeigt die langjährige Änderung der mittleren Tagestemperatur für das Szenario RCP 8.5. 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.

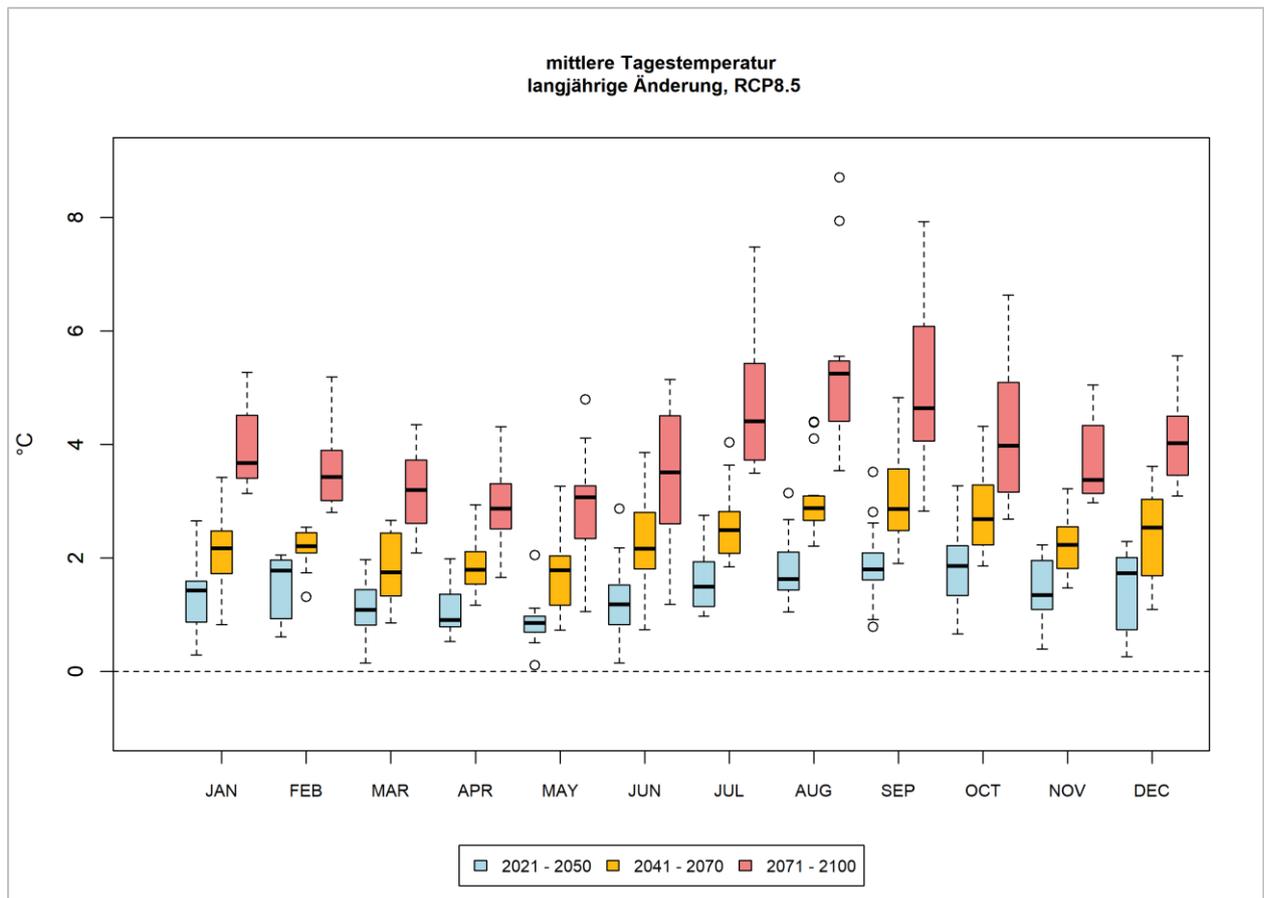


Abbildung 18: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Kaiserslautern, Szenario RCP 8.5.

Der projizierte Anstieg der Temperatur steht in engem Zusammenhang mit der Entwicklung meteorologischer Kennwerte, die eine anschaulichere Sicht auf klimatischen Änderungen zulassen. In Tabelle 5 sind die langjährigen mittleren Änderungen ausgewählter Kennwerte 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.

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 19 zusätzlichen Tropennächten im Jahr (Tabelle 5).



Tabelle 5: Langjährige mittlere Änderung (Anzahl pro Jahr) thermischer Kenntage in Kaiserslautern (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

Kenntage	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971-2000								
		2021/2050			2041/2070			2071/2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Tropennächte [n/Jahr] (T _{min} ≥ 20°C)	RCP 2.6	0,5	0,9	1,9	0,3	0,8	1,9	0,8	1,5	2,5
	RCP 4.5	0,4	1,1	2,2	1,2	2,4	3,9	1,6	4,3	6,3
	RCP 8.5	1,1	1,9	2,9	2,5	5,2	8,4	9	19,5	23,1
Heiße Tage [n/Jahr] (T _{max} ≥ 30°C)	RCP 2.6	2,6	5,3	10,7	3,3	4,9	10,4	4,2	5,7	10,5
	RCP 4.5	4,2	6,2	8,7	6,9	9,2	14,3	7,8	11,1	15,2
	RCP 8.5	5,2	6,2	13,7	10,4	14,1	23	23,4	29,6	40,7
Sommertage [n/Jahr] (T _{max} ≥ 25°C)	RCP 2.6	7,8	13,5	20,8	9,7	11,6	22,1	10	13,2	18,6
	RCP 4.5	8,9	13,3	19,1	10,4	20,2	32	17,2	22,8	30,1
	RCP 8.5	10,4	14,7	20,9	21,8	29,5	40,5	42,9	50,1	65,2
Frosttage [n/Jahr] (T _{min} < 0°C)	RCP 2.6	-22,6	-14,8	-12	-22,5	-20,4	-13,5	-23,2	-17	-12,3
	RCP 4.5	-26,4	-18,5	-15,5	-36	-24,8	-15,4	-40,5	-35,6	-28,2
	RCP 8.5	-28,5	-23,1	-17	-39,2	-36	-29,2	-57,7	-54,4	-50,2
Eistage [n/Jahr] (T _{max} < 0°C)	RCP 2.6	-6,7	-5,7	-4	-6,3	-5,4	-4,7	-8	-6,1	-5,3
	RCP 4.5	-8,7	-6,3	-3,2	-11,2	-7,6	-3,8	-11,5	-8,8	-6,8
	RCP 8.5	-8,5	-7,5	-2,3	-11,3	-9,6	-5,7	-13,6	-12,9	-11,8

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 Kaiserslautern treten im langjährigen Mittel ca. 73 Frosttage pro Jahr auf. Darin enthalten sind etwa 15 Eistage pro Jahr. Beim Szenario RCP 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel nur noch 19 Frosttage und 3 Eistage pro Jahr auftreten (Tabelle 5).

Die Zunahme der Heißen Tage lässt in Zukunft eine zunehmende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen 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 Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden, ungewöhnlich hohen Temperaturen und damit einer extremen Hitzebelastung für die Bevölkerung. Wird der Schwellenwert einer Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Wert erreicht oder überschritten haben, zeigt sich für Kaiserslautern, dass die Länge von Hitzeperioden in Zukunft zunimmt (Abbildung 19). Grundlegend besteht eine Hitzeperiode ab einer Länge von mindestens 3 aufeinanderfolgenden Tagen mit Tageshöchsttemperatur ≥ 30 °C. Je nach Szenario erhöht sich die Länge der Hitzeperioden in Kaiserslautern von ca. 3 Tagen in 1971 – 2000 auf zu 10 Tage bis zum Ende des Jahrhunderts.

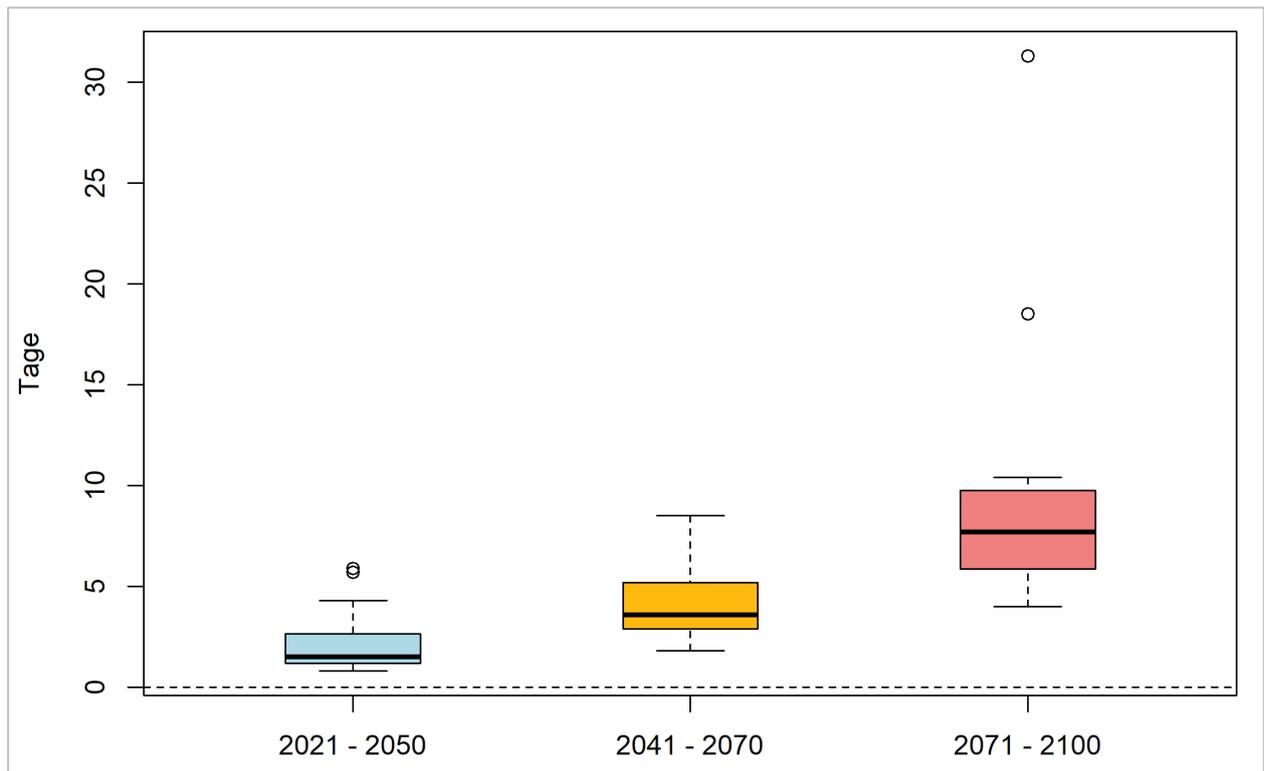


Abbildung 19: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in Kaiserslautern, Szenario RCP 8.5.



4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG & TROCKENHEIT

Niederschlagsverschiebung

In Bezug auf die Jahresniederschlagssumme sind in Kaiserslautern keine eindeutigen Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigen die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 steigende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert, wobei im Szenario RCP 8.5 in dem mittleren Zeithorizont ein Rückgang zu verzeichnen ist. Beim RCP 2.6 ist tendenziell ein leichter Rückgang zu erwarten (Tabelle 6). Mit Blick auf den Erwartungsbereich zeigt sich eine gewisse Variabilität zwischen den Modellen, die teilweise leichte Abnahmen voraussagen, in der Mehrzahl jedoch auf relativ geringe Auswirkungen schließen lassen – der zukünftige mittlere Jahresniederschlag weicht jeweils um weniger als 10 % von den derzeitigen Verhältnissen ab. Insgesamt kann für Kaiserslautern eine Tendenz zukünftig leicht steigender Jahresniederschläge abgeleitet werden, die aufgrund der geringen Änderungen jedoch keine statistische Signifikanz aufweist.

Neben den Niederschlagssummen ist der Zeitpunkt, wann es (wieviel) regnet entscheidend u.a. für die Vegetation und den Bodenwasserhaushalt. Der Blick auf den Jahresgang offenbart saisonale Unterschiede in der zukünftigen Entwicklung des Niederschlags. In allen RCP-Szenarien ist eine Tendenz geringerer Niederschläge im Sommer und leicht höherer Werte in den übrigen Monaten zu erkennen. Am stärksten treten diese Effekte bei langfristiger Betrachtung bis Ende des Jahrhunderts und im RCP-Szenario 8.5 auf, das gerade für den Juli, August und für September, deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abbildung 20). Die in den Abbildungen wahrnehmbare Niederschlagsverschiebung mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, sollte jedoch als auffallende Tendenz mindestens Erwähnung finden.

Tabelle 6: Langjährige jährliche Änderung der mittl. Niederschlagssumme (in mm/Jahr) in Kaiserslautern (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median)

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 191 – 2000								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-30,1	29,3	59,7	-36,1	9,2	47,1	-19,4	3,8	54,7
	RCP 4.5	0,9	37,9	79,1	-2	46,2	69,7	19,1	58,8	102,1
	RCP 8.5	5,9	33,8	82,5	4,3	26,2	104,5	-14,8	56,5	141

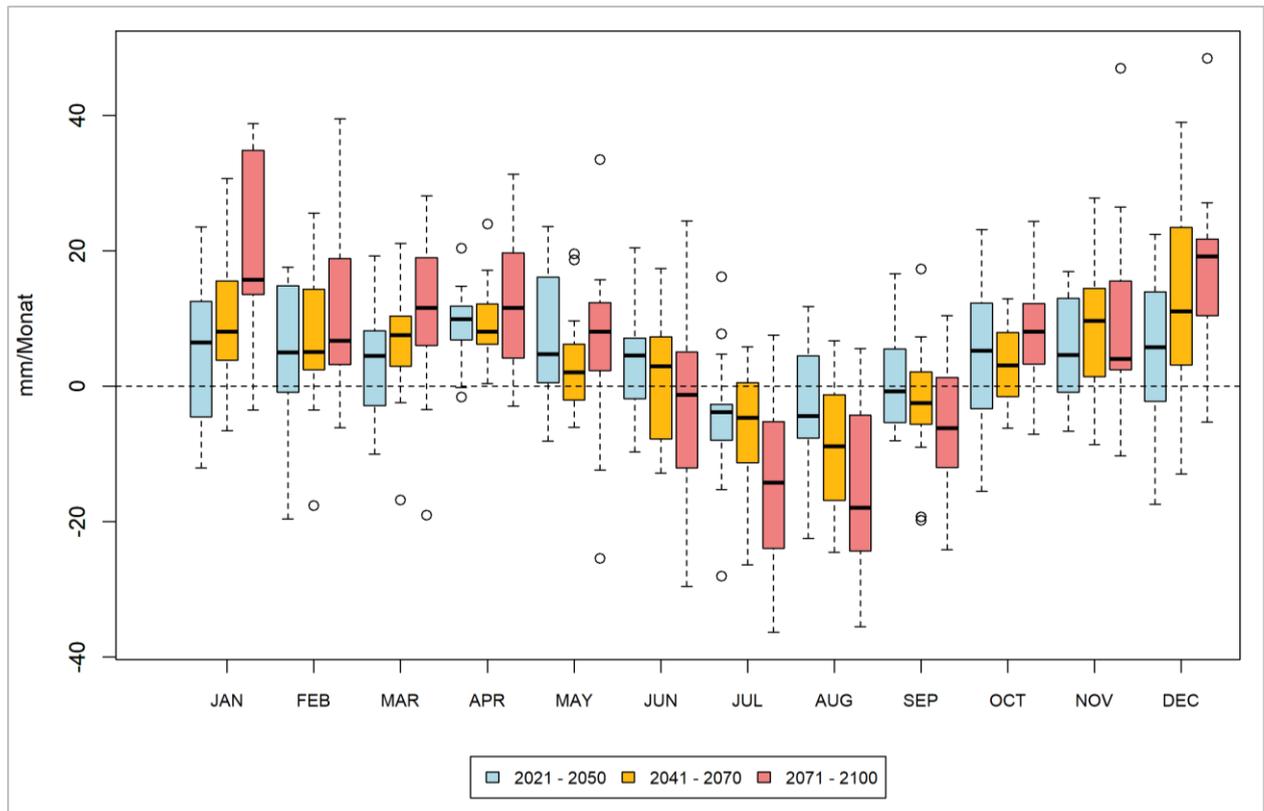


Abbildung 20: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen Niederschlagssummen in Kaiserslautern, Szenario RCP 8.5.

Trockenheit

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

In der Jahressumme sind keine relevanten Änderungen der klimatischen Wasserbilanz in Kaiserslautern feststellbar. Die erwarteten monatlichen Änderungen weisen allerdings entscheidende jahreszeitliche Differenzen auf. Während die Winter- und Frühjahrsmonate überwiegend (leicht) positive Änderungen der klimatischen Wasserbilanz zeigen, sind im RCP 8.5 in den Monaten Juni bis September Abnahmen erkennbar (Abbildung 21). Diese saisonale Verschiebung der klimatischen Wasserbilanz gilt für alle drei Zukunftsperioden, wobei die Effekte am deutlichsten zum Ende des Jahrhunderts auftreten. In der 1. Zukunftsperiode fallen die Änderungen in den Sommermonaten noch relativ gering aus. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die genannten Ergebnisse wiederum mit Unsicherheiten behaftet sind, da die Variabilität des Niederschlags mitentscheidend für die klimatische Wasserbilanz wirkt.



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

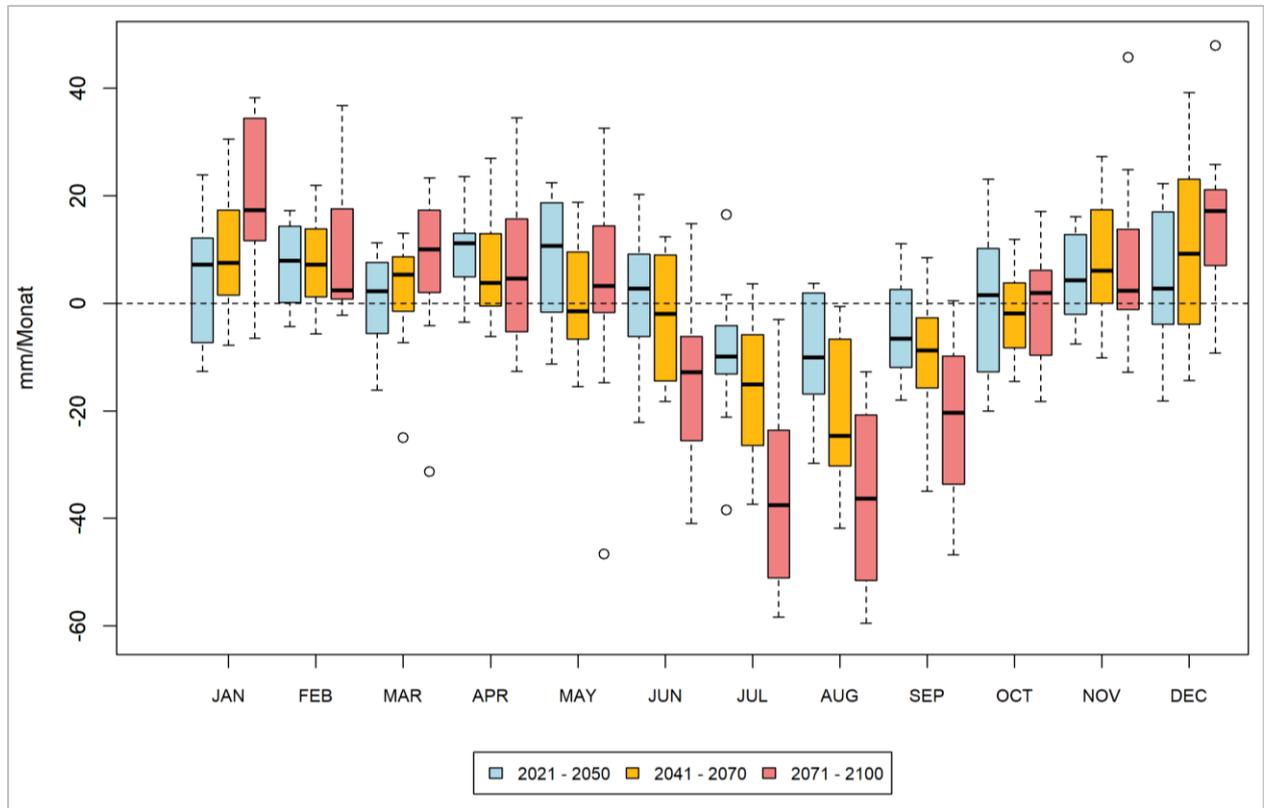


Abbildung 21: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Kaiserslautern (RCP 8.5)

4.4.1 STARKNIEDERSCHLAG

Mehr noch als die mittleren Niederschlagssummen ist besonders für Städte und Gemeinden die Frage der Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen relevant. Verschiedene Ereignisse in jüngster Vergangenheit haben gezeigt, dass diese ein erhebliches Schadens- und Gefahrenpotenzial besitzen.

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

Der DWD warnt vor Starkregen in zwei Stufen, wenn folgende Schwellenwerte voraussichtlich überschritten werden: Regenmenge ≥ 10 mm/1 h bzw. ≥ 20 mm/6 h (Markante Wetterwarnung) oder Regenmenge ≥ 25 mm/1 h bzw. ≥ 35 mm/6 h (Unwetterwarnung; DWD 2022d). In der Klimaforschung wird meist die Tagesniederschlagssumme betrachtet. Dabei werden Schwellenwerte festgelegt (z.B. $N \geq 20$ mm/d), deren Überschreitung als Starkniederschlag verstanden werden kann. Diese sind jedoch nicht einheitlich definiert, sodass verschiedene Ansätze zu deren Bestimmung existieren. In diesem Bericht werden fol-



gende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:

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

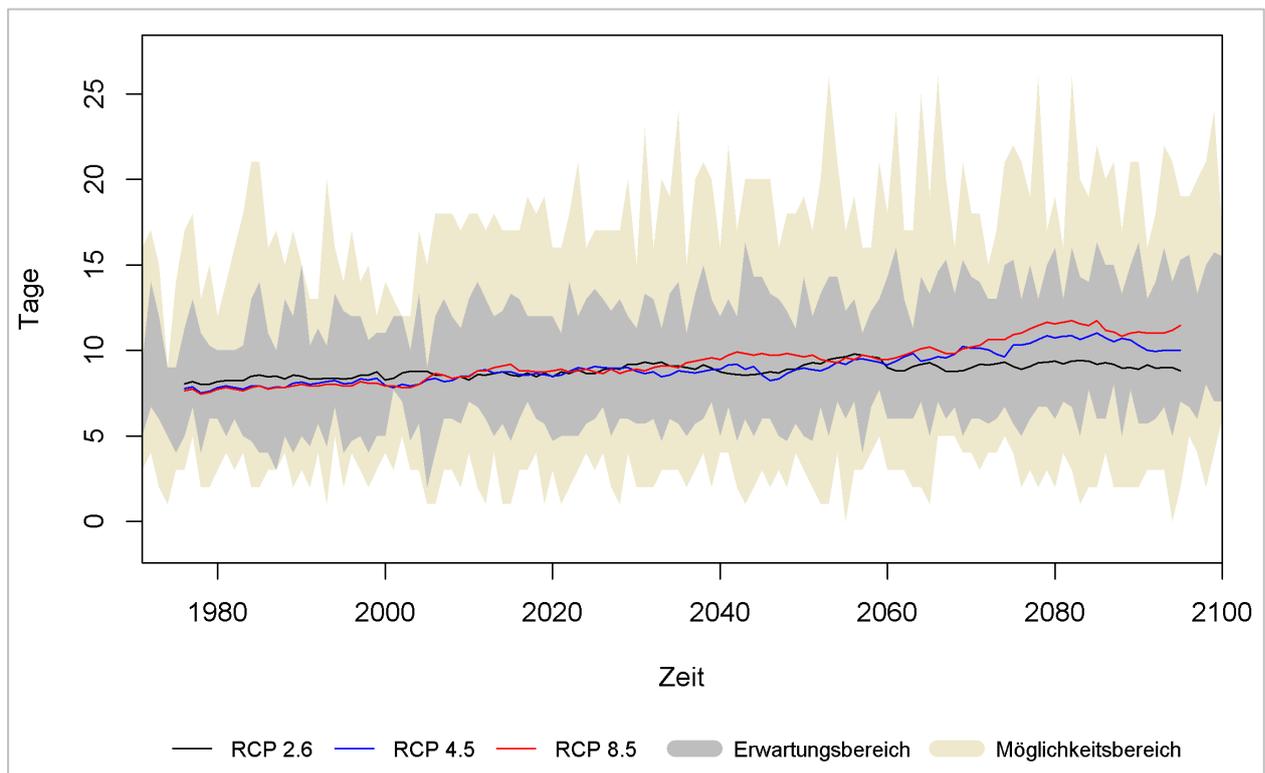


Abbildung 22: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20 \text{ mm/d}$) in Kaiserslautern (alle Szenarien).

Starkregenereignisse treten relativ selten auf, sodass auch die mittleren jährlichen Änderungen der Häufigkeit solcher Ereignisse äußerst gering ausfallen und statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Dies wird bspw. bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge ($N \geq 20 \text{ mm/d}$) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (Abbildung 22).

Aufgrund des enormen Schadenspotenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse $N \geq 10 \text{ mm/d}$ und $N \geq 20 \text{ mm/d}$ überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind (Tabelle 7). Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen um 1-3 Ereignisse in den jeweiligen Zunkunftszeiträumen.

Starkniederschläge $\geq 30 \text{ mm/d}$ treten momentan sehr selten auf (im Mittel 2 Ereignisse pro Jahr) und



haben eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität, sodass valide Prognosen derzeit kaum möglich sind. Gerade langfristig und unter Annahme des RCP-Szenarios 8.5 wird jedoch im Mittel mit 1-2 zusätzlichen Starkniederschlagsereignissen pro Jahr gerechnet (Tabelle 7 und Abbildung 23).

Tabelle 7: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in Kaiserslautern (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2026 – 2055			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Starker Niederschlag (N ≥ 10mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,7	0,6	3,6	-1,4	0,3	2,9	-0,2	1,4	3
	RCP 4.5	-0,1	1,5	4,6	-0,1	2,9	4,5	1,7	3,8	5,8
	RCP 8.5	-0,2	2,5	4,9	1,1	3,8	6,8	1,3	4,7	7,3
Stärkerer Niederschlag (N ≥ 20mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,6	0,8	2,1	-0,1	0,8	1,4	-0,4	0,4	1,9
	RCP 4.5	0,1	0,9	2,2	0,7	1,8	2,3	1,3	2,1	3,1
	RCP 8.5	0,4	1,5	2,5	1,4	2,1	3,5	1,9	3,1	4,9
Starkniederschlag (N ≥ 30mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,4	0,5	1	0	0,2	1	-0,1	0,1	1,4
	RCP 4.5	0	0,5	1,2	0,2	0,6	1,4	0,8	1,2	2
	RCP 8.5	0,5	0,9	1,3	0,4	1,1	1,9	0,9	1,5	2,9
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-1,6	2,5	7,2	-1,4	4	8,4	-1,6	4,1	9,8
	RCP 4.5	-0,6	2,5	4,5	0,1	2,4	6,8	3,8	5,8	11
	RCP 8.5	2,1	5,4	8,6	2,7	6,5	11,8	2,9	8,2	15,6

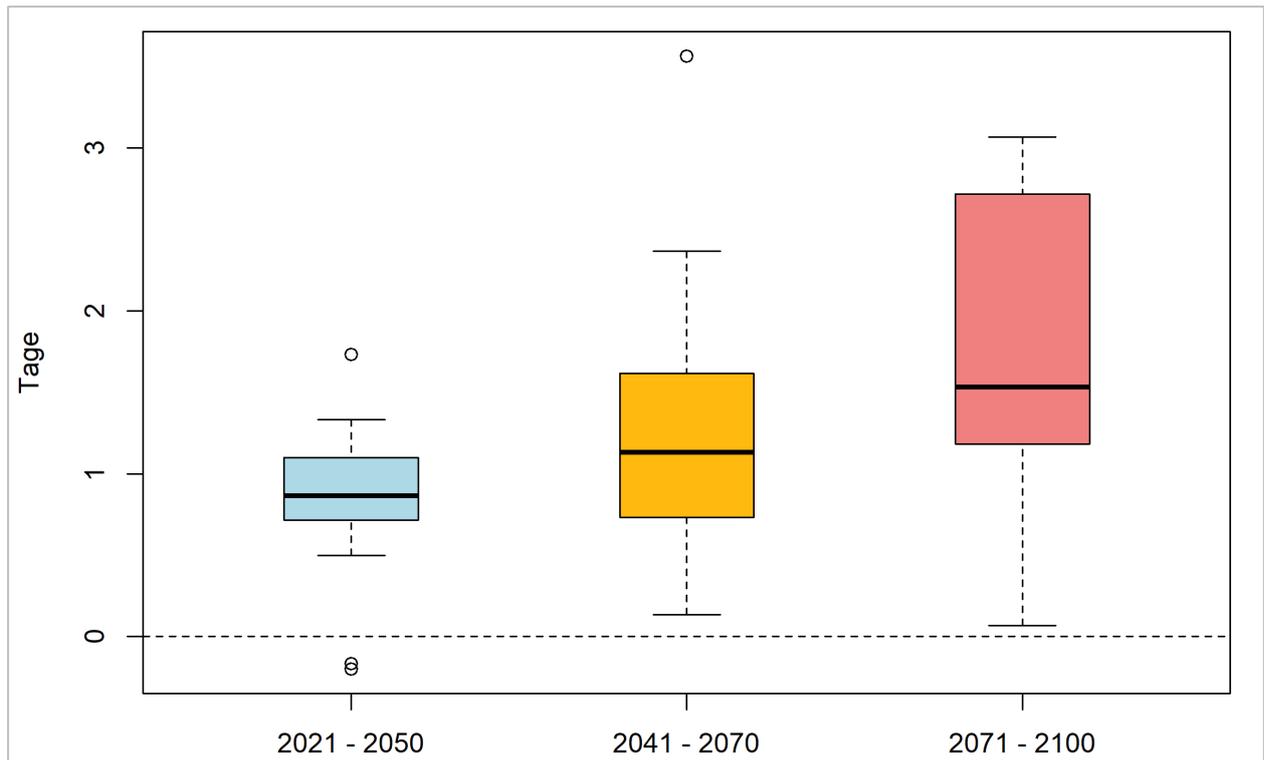


Abbildung 23: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Kaiserslautern (RCP 8.5).

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

Die genannten Unsicherheiten bezüglich der von den Regionalmodellen abgebildeten (insb. extremen) Niederschläge ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Auf der anderen Seite muss erwähnt werden, dass Starkregenereignisse oftmals kleinräumig auftreten und somit von den obgleich relativ hoch aufgelösten Regionalklimamodellen nicht erfasst und potenziell unterschätzt werden (DWD 2020a). Eine wärmere Atmosphäre kann zudem mehr Wasserdampf aufnehmen, was dazu führt, dass auch mehr Wasser für Niederschlagsereignisse zur Verfügung steht (vgl. ZAMG 2020). Somit erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der Zunahme starker Niederschlagsereignisse angesichts steigender Temperaturen. In Ansätzen deutet sich dieser Effekt in den bisherigen Ergebnissen an, die insb. langfristig und im RCP-Szenario 8.5 einen Anstieg der mittleren maximalen täglichen Niederschlagsmenge verzeichnen.



4.4.2 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).

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



5. Analysemethoden

5.1 NUMERISCHE MODELLIERUNG

5.1.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

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

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

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

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

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

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

Die Anwendungsbereiche von FITNAH reichen von teilstädtischen Analysen zu den klimaökologischen Auswirkungen von Stadtentwicklungsvorhaben über gesamtstädtische und regionale/kantonale Klimaana-



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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 10 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Kaiserslautern und angrenzendes Umland rd. 3,5 Mio. Rasterzellen. Entsprechend große Gebäude- und Grünstrukturen werden dabei explizit aufgelöst. Es handelt sich demzufolge um einen Modellansatz am Übergangsbereich von der Meso- zur Mikroskala. Mit dieser Auflösung lassen sich alle für gesamtstädtische und quartiersbezogene Fragestellungen relevanten Aussagen ableiten.

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 100 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 8 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 8: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 10 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	0
28	Sandboden	0

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

Abbildung 24 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen. Nachts reduziert die Baumkrone allerdings die Ausstrahlung und damit die Abkühlung der Oberfläche, sodass die Temperatur mehrere Kelvin (K) über denen der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin (K) unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (komplett) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

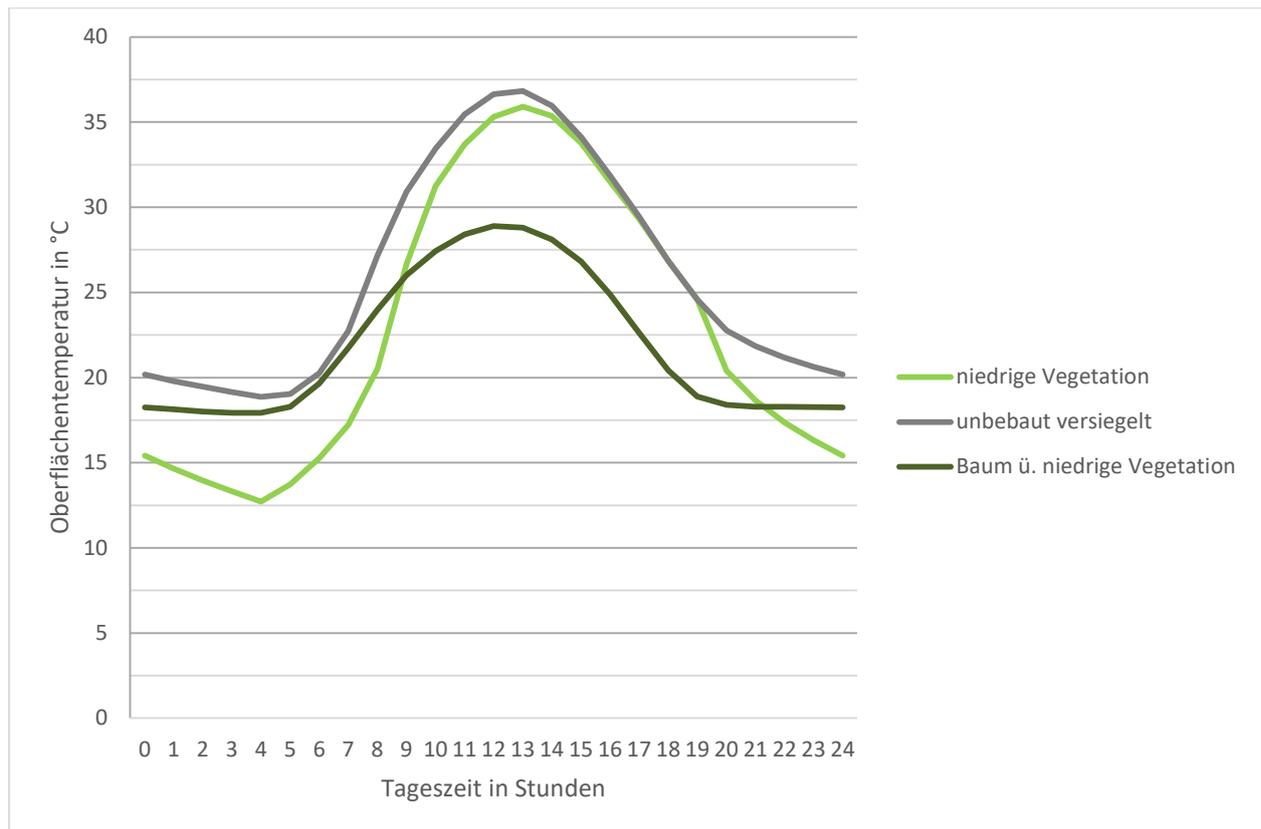


Abbildung 24: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITANH-3D

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich dies in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 25 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K, wobei die Kurve im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen bleibt. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzier-



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

Ähnlich wie für die Bodenfeuchte gilt für das vertikale Stadtgrün, dass 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.

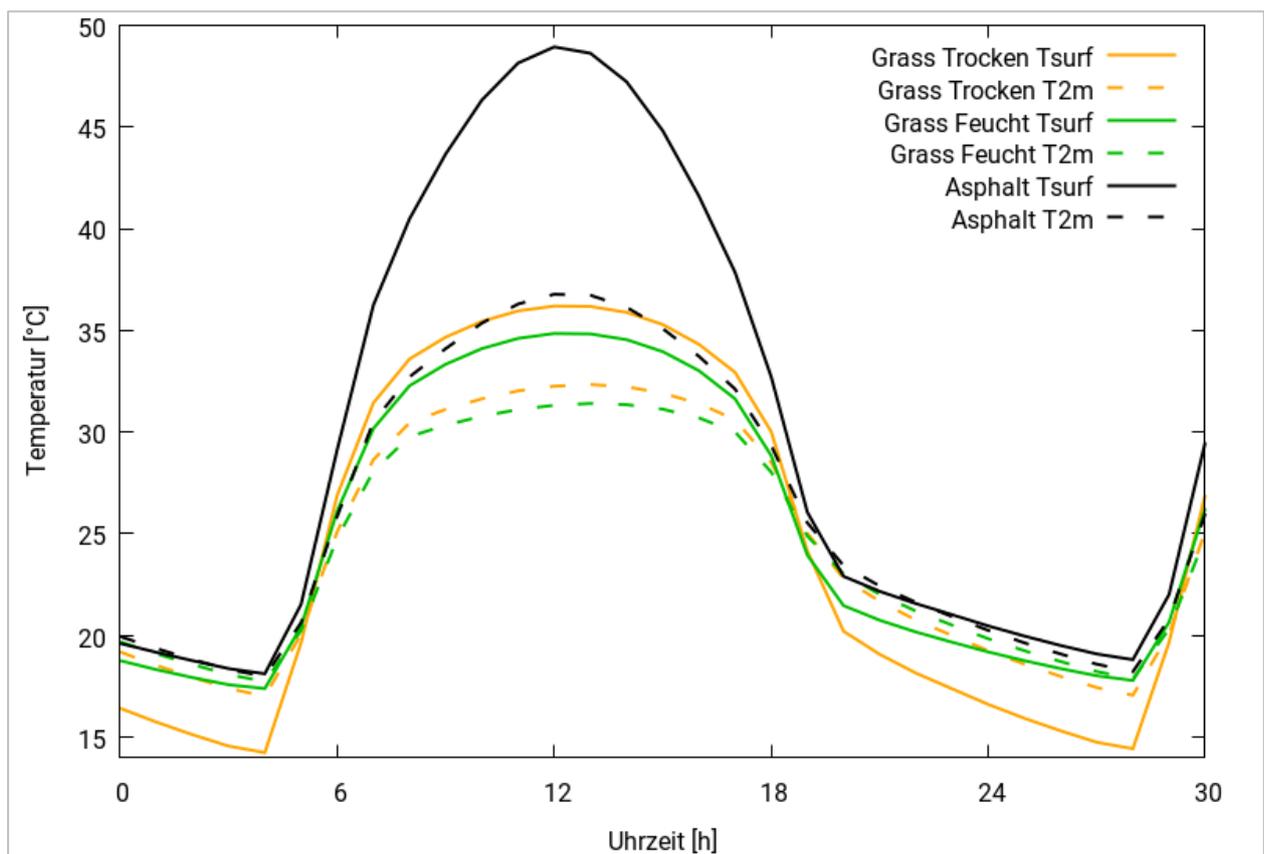


Abbildung 25: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur sowie der bodennahen Lufttemperatur von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

5.1.2 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 Szenarienentwicklung mithilfe der Szenariotechnik. Ziel ist, mögliche Entwicklungen in der näheren und/oder fernerer Zukunft zu projizieren, zu analysieren und zusammenhängend darzustellen. Beschrieben werden dabei alternative zukünftige Situationen. Szenarien beschreiben hypothetische Folgen von Ereignissen, um auf kausale Prozesse und Entscheidungsmomente in der Zukunft aufmerksam zu machen, ohne dabei davon auszugehen, dass diese Szenarien tatsächlich real werden. Eine Hauptfunktion von Szenarien ist auf Alternativen und Varianten von Entwicklungen aufmerksam zu machen, um gegensteuern zu können (Abbildung 26, Wilms 2006; Kosow und Gaßner 2008). Es gibt unterschiedliche Ansätze der Szenarienentwicklung, im Projekt kommt die vorausschauende (forecasting) Szenariomethodik zum Tragen.

Die Entwicklung dieser Szenarien stellt – insbesondere mit Blick auf die räumliche Komponente - eine anspruchsvolle Aufgabe dar. Die Komplexität der Grundgesamtheit aller denkbaren Szenarien potenziert sich bei der notwendigen Zusammenführung der Einzelfaktoren Klimawandel – Stadtentwicklung – Anpassungsmaßnahmen in einem Szenariotrichter mit vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten (siehe Abbildung 26). 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.

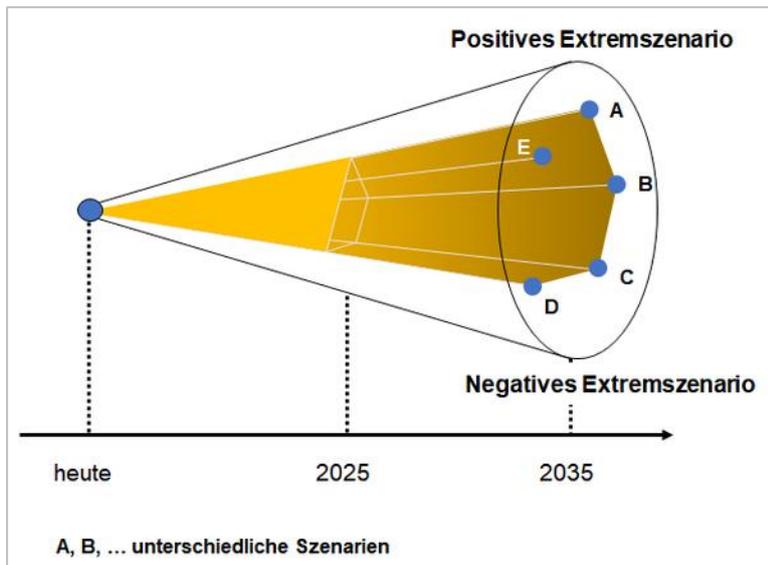


Abbildung 26. Der Szenariotrichter (Quelle: www.business-wissen.de)

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen das zukünftige Kaiserslauterner Stadtklima im Jahr 2055 in zwei verschiedenen Szenarien simuliert (Tabelle 9). Als Stellschrauben zur Bestimmung des zukünftigen Stadtklimas wurden das Modul 1 (klimatischer Änderungen infolge des Klimawandels) und Modul 2 (Landnutzungsänderungen) verwendet.

Tabelle 9: Modell-Szenarien zur Abbildung des Kaiserslauterner Stadtklimas (2022 und 2055) und ihre zentralen Merkmale.

Szenario	Zentrale Merkmale
Status quo (Referenz / Bestand)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gegenwärtige Siedlungsstruktur in Kaiserslautern (Stand 2022; inkl. beschlossener, rechtskräftiger Bebauungspläne (Vgl. Tabelle 11)) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung³: 21,0 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 1 Mäßiger Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 22,9 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 60 %
Szenario 2 Starker Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächenkulisse möglicher städtebaulicher Entwicklung (analog Szenario 1) ■ Lufttemperatur zum Start der Modellierung: 24,4 °C ■ Bodenfeuchte zum Start der Modellierung: 30 %

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



Die Auflösung regionaler Klimamodelle hat sich in den letzten Jahren so weit erhöht, dass für Kaiserslautern 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 Kaiserslautern 2055 in zwei verschiedene Szenarien „Mäßiger Klimawandel“ (Szenario 1) und „Starker Klimawandel“ (Szenario 2) unterschieden. Die Auswahl bzw. Festlegung der beiden Szenarien erfolgte in Abstimmung mit dem rheinland-pfälzischen Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen. Die beiden Szenarien können als base case- bzw. worst case-Varianten verstanden werden und es gilt als äußerst wahrscheinlich, dass sich die tatsächlich eintretenden Klimaänderungen in Kaiserslautern innerhalb der beiden Szenarien bewegen. Im „mäßigen Klimawandel“ wird die Lufttemperatur zu Beginn der Modellrechnung um 1,9 °C, im „starken Klimawandel“ um 3,4 °C erhöht⁴. Diese Aufprägung des Temperatursignals basiert auf dem in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatz (Schär et al. 1996).

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Delta-Wertes berücksichtigt (+ 1,27 bzw. 2,27 °C). Zum anderen wird dem Modell für das Szenario 2 („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 Kaiserslautern 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 (+ 0,95 bzw. 1,70 °C).

Für beide Zukunfts-Szenarien wurde dasselbe **Szenario zukünftiger städtebaulicher Entwicklung** verwendet, das ein starkes Siedlungswachstum in Kaiserslautern bis 2055 abbildet (Abbildung 27 und Tabelle 10). Dabei wurde, in Abstimmung mit dem zuständigen Stadtplanungsamt, angenommen, dass noch nicht entwickelte Bebauungspläne sowie potentielle wohnbauliche und gewerbliche Entwicklungsflächen aus dem Flächennutzungsplan bebaut werden. Für alle Entwicklungsflächen lagen beispielhafte Planentwürfe vor, die eine flächenscharfe Übersetzung in das Modell ermöglichten (vgl. Abbildung 27). Da die bauliche

⁴ 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 „Mäßigen Klimawandel“ beruht das Änderungssignal auf dem 50. Perzentil aller Modellläufe des RCP 4.5, für den „starken Klimawandel“ auf dem 85. Perzentil des RCP 8.5.



Entwicklung einzelner Bauflächen z.T. erst in weiteren Planungs- und Umsetzungsschritten konkretisiert werden können, sind kleinräumige Änderungen jedoch möglich.

Auf dieser Basis können die einzelnen Entwicklungsflächen hinsichtlich ihrer Stadtklimaverträglichkeit untersucht und bewertet werden (siehe Planungshinweiskarte in Kap. 8).

Tabelle 10: Auflistung der möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen für die Zukunfts-Szenarien in Kaiserslautern.

ID	Entwicklungsfläche	Typ
1	GE-Nordwest	Gewerbe
2	Kaiserstraße	Wohnbau
3	Bahnkonversionsfläche	Gewerbe
4	Gewerbepark P300	Gewerbe
5	Hohenecker Straße: westlich Fa. ACO Guss	Gewerbe
6	Turmstraße	Wohnbau
7	Lauterstraße	Wohnbau
8	An der Vogelweide	Wohnbau
9	Umfeld Betzenberg: südlich des Stadions	Wohnbau
10	Kantstraße	Wohnbau
11	Husarenäcker	Wohnbau
12	Kniebrech: Gewerbe / Rettungswache DRK	Gewerbe
13	Salingstraße: bislang Busunternehmen	Wohnbau
14	Quatermastkaserne	Wohnbau



Abbildung 27: Übersicht der möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen für die Zukunfts-Szenarien in Kaiserslautern



5.1.3 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Ein numerisches Modell wie FITNAH-3D benötigt spezifische Eingangsdaten, um die Stadtstruktur und die Topographie im Umfeld abbilden zu können. Für das Kaiserslauterner Stadtgebiet wurden folgende Geodaten von der Stadt Kaiserslautern bzw. der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz (LVermGeo) zur Verfügung gestellt.

- Geländehöhe
 - Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (Stand 2021)
- Landnutzung
 - ALKIS-Nutzung (Stand 2022)
 - Gebäude: (LOD2-Daten, Stand 2021; Umland: Open Street Map (OSM) Daten mit Annahme der Gebäudehöhe von 8 m)
 - Straßennetz (aus ALKIS-Nutzung; Stand 2022)
 - Baumbestand Stadt Kaiserslautern (Friedhöfe und Straßenbäume; Stand 2022)
 - RGBI-Luftbilder⁵ (Stand 2020)
- Strukturhöhe
 - Digitales Oberflächenmodell (bDOM) in 1 m Auflösung (Stand 2020)
 - Lage von Lärmschutzwänden (Stand 2014 (Deutsche Bahn, Stadt Kaiserslautern))

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Kaiserslauterns wird aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens dem Jahr 2020 aufweisen. Da die Eingangsdaten zudem mittels der in der Software ESRI ArcGIS integrierten Luftbildern hinsichtlich ihrer Plausibilität verglichen wurden, kann 2022 als Bezugsjahr für den Status quo der Klimaanalyse verstanden werden. Zudem wurden die aktuell rechtskräftigen Bebauungspläne mit ihrer städtebaulichen Kulisse, wenn auch gegenwärtig noch nicht baulich abgeschlossen, im Modell in der Endausbaustufe berücksichtigt. Die konkrete Auflistung ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen.

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



Tabelle 11: Auflistung der berücksichtigten rechtskräftigen Bebauungspläne für das Bestands-Szenario (Status Quo) in Kaiserslautern.

ID	Bebauungsplan	Typ
1	Pfaff-Quartier (gemäß städtebaulichem Rahmenplan)	Mischnutzung
2	Universität Gesamtcampus (inkl. Chemieneubau, Institute, etc.)	Mischnutzung
3	Hauptbahnhof-Süd, Zollamtstraße; 2. Teiländerung	Mischnutzung
4	Hauptbahnhof-Süd, Zollamtstraße; 3. Teiländerung	Mischnutzung
5	Vogelwoogstraße, Dürerstraße, Feuerbachstraße	Mischnutzung
6	Haselstraße – Otterbacher Straße – Otterberger Straße	Wohnbau
7	Europahöhe Teiländerung 5	Mischnutzung
8	Europahöhe Erweiterung 1	Gewerbe
9	Donnersbergerstraße- Gärtnerestraße- Zypressenweg	Wohnbau
10	Gewerbegebiet Nord-Ost, Erweiterung 2, Teil A	Gewerbe
11	Pariser Straße 300, östlicher Teilbereich	Mischnutzung
12	Morlautern: Kalckreuthstraße – Neue Straße	Mischnutzung
13	Siegelbach, Zwerchäcker	Mischnutzung

Außerhalb des Kaiserslauterner Stadtgebiets wurde auf online frei verfügbare Daten aus OpenStreetMap zurückgegriffen. Die Eingangsdaten für das Kaiserslauterner Umland besitzen eine geringere Auflösung (25 m), sind aber ausreichend genau, um das Prozessgeschehen zwischen Kaiserslautern und seinem Umland zu erfassen.

Untersuchungsgebiet

Das Stadtgebiet Kaiserslautern erstreckt sich bei einer maximalen Ausdehnung von ca. 17,7 km in Ost-West- und 15,5 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von knapp 274 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 343 km² auf (ca. 19,5 km x 17,6 km), damit die im Umland gelegenen Höhen- und Landnutzungsunterschiede mit Einfluss auf das Kaiserslauterner Stadtklima berücksichtigt werden können.



Geländehöhe

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, das von einer ursprünglichen 1 m-Auflösung in das für die Modellierung notwendige 10 m-Raster gemittelt wurde.

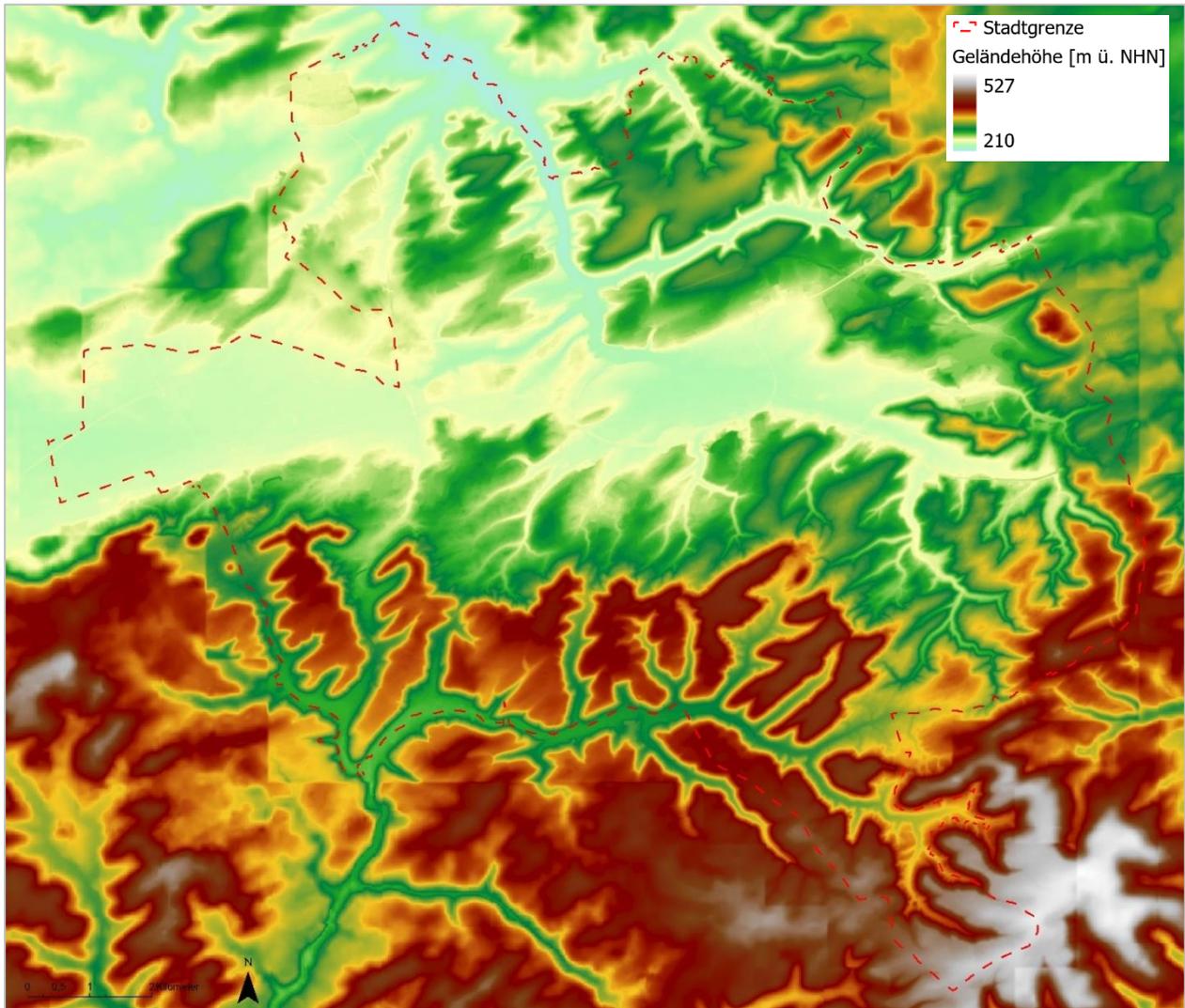


Abbildung 28: Digitales Geländemodell für Kaiserslautern und die nähere Umgebung

Das Kaiserslauterner Stadtgebiet liegt auf einer Höhe von 251 m und wird südlich durch Erhebungen mit über 400 m Höhe wie bspw. dem Humberg und südöstlich dem Damberg eingerahmt. Es ergeben sich somit teils deutliche Höhenunterschiede im Modellgebiet (Abbildung 28). Die Kernstadt wird topographisch betrachtet vorrangig durch den südlich gelegenen Betzenberg (285 m) und Lämmchesberg (280 m) sowie die östlich befindlichen Erhebungen Großer Steinberg und Kleiner Specht eingefasst.

Die Topographie nimmt Einfluss auf die nächtliche Kaltluftströmung. In den benannten Bereichen der Erhebungen treten Kaltluftabflüsse auf, die das klimatische Geschehen im Kaiserslauterner Stadtgebiet beeinflussen



Landnutzung

Die Kaiserslauterner Landnutzung wird über verschiedene Landnutzungsklassen definiert, die jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen (Abbildung 29). Mit der vorliegenden Rasterzellenbreite von 10 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungsclassifizierung aufzulösen (vgl. Tabelle 8 auf Seite 53).

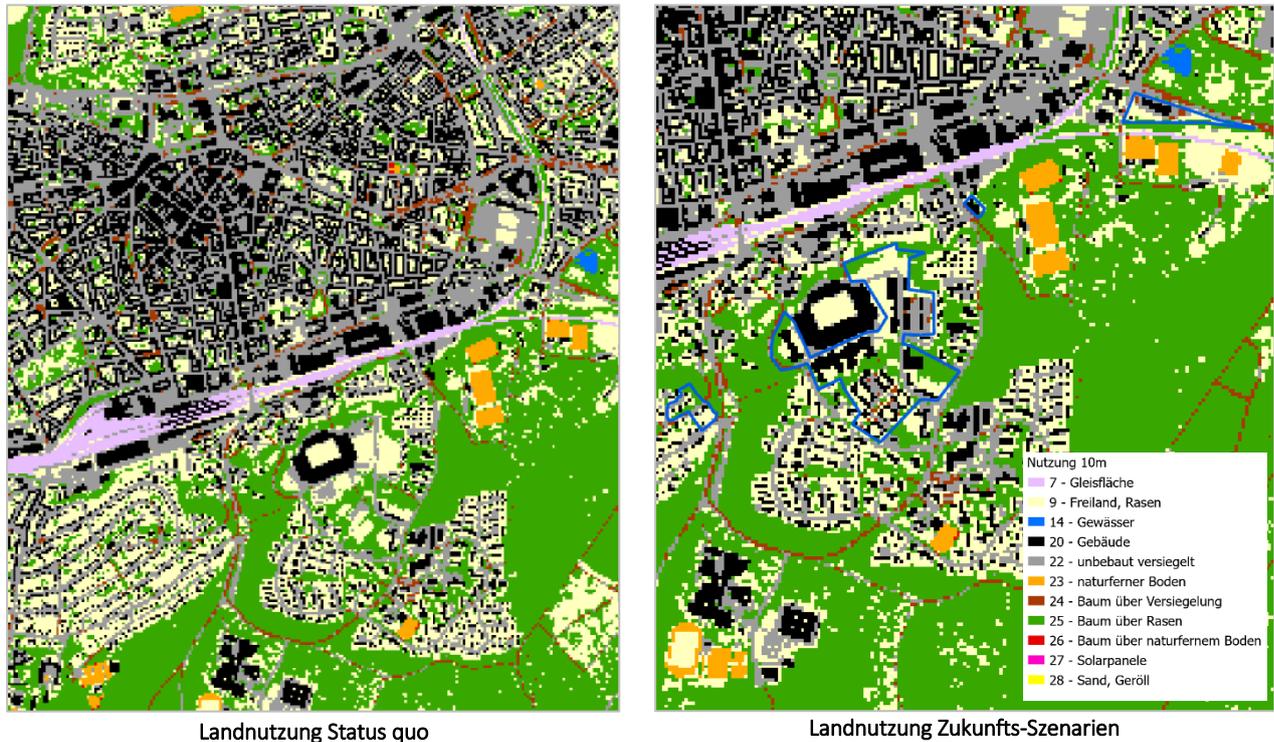


Abbildung 29: Modelleingangsdaten „Nutzungsklassen“ (Legende in der rechten Abbildung) für den Status quo in einem Ausschnitt der Kaiserslauterner Kernstadt (links) und für die den vergleichbaren Ausschnitt der möglichen geplanten Entwicklungen in den Bereichen „An der Vogelweide“, „Umfeld Betzenberg“, „Kantstraße“ und „Kniebrech“ (von West nach Ost; blau umrandet in der rechten Abbildung).

Zur Erfassung der Bäume wurden die RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2020 in den Vegetationsindex NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) überführt. Über einen NDVI-Schwellwert von 0,1 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 vorgegeben Modellauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von 2,5 m und kleiner) separat im Raster auszuweisen. Letztere gelangten über die Berücksichtigung des städtischen Baumkatasters in das Landnutzungsraaster der Modelleingangsdaten.

Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus der flächenhaft vorliegenden Referenzgeometrie punkthaft gerasterte Modelleingangsdaten mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen (Schritte 1 und 2 in Abbildung 30). 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 2022), die auf Basis von digitalen Orthophotos (Stand 2020) manuell überarbeitet wurden. Die rasterbasierten Modellergebnisse wurden auf die Blockflächen gemittelt, sodass jede Blockfläche Informationen bspw. zur Lufttemperatur oder dem Kaltluftvolumenstrom enthält (Schritt 4).

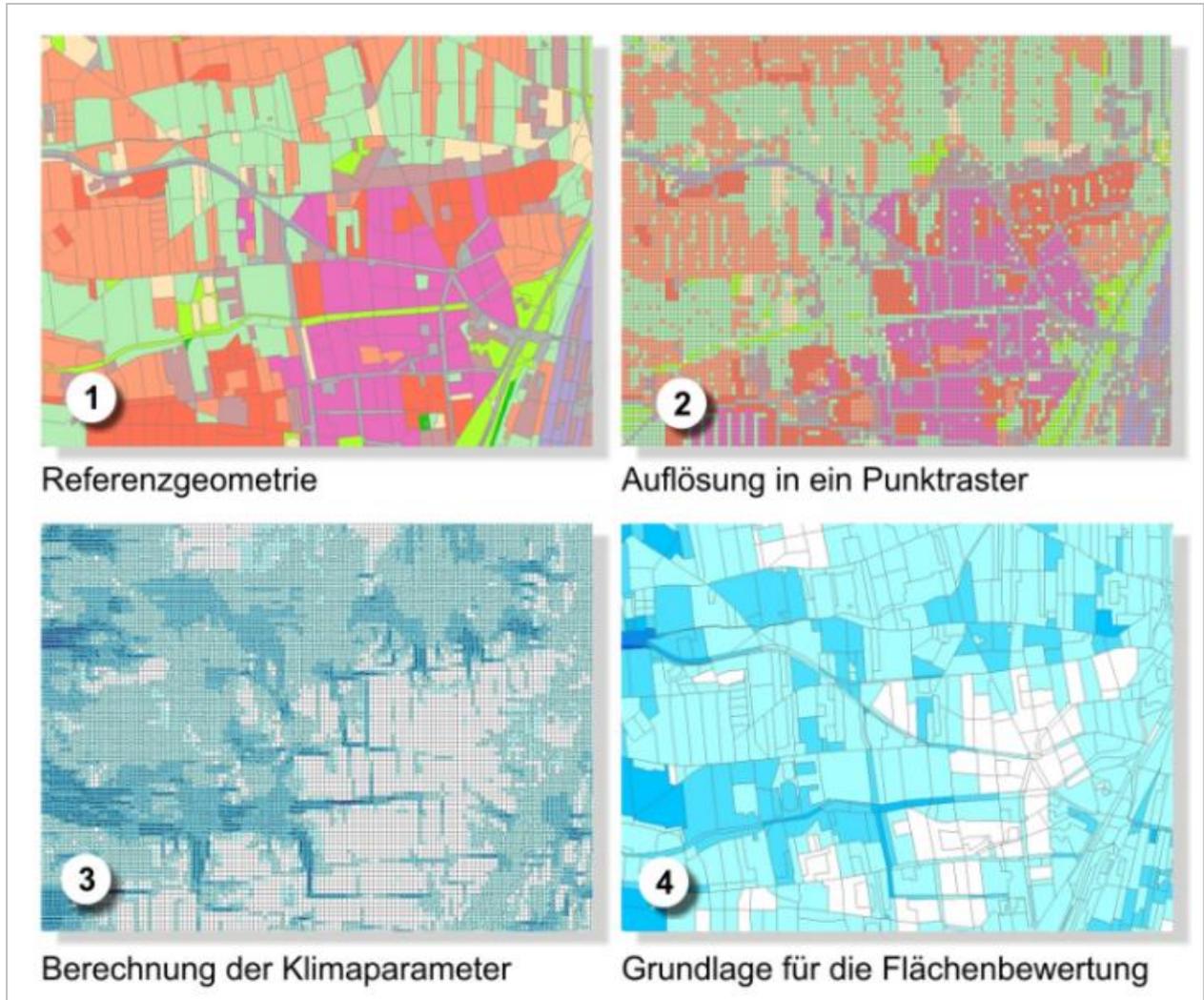


Abbildung 30: Schema der Wertezuordnung zwischen Flächen- und Punktinformation

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

5.1.4 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend ein sog. autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Auch wenn es sich dabei um eine besondere meteorologische Situation handelt, tritt eine solche Wetterlage in Kaiserslautern und jeden Sommer mehrfach auf (s. Kap. 4.3). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis um 14:00 des Folgetages zum Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch einen wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen (typisch, lokalen) Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Kaiserslautern 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 31 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.

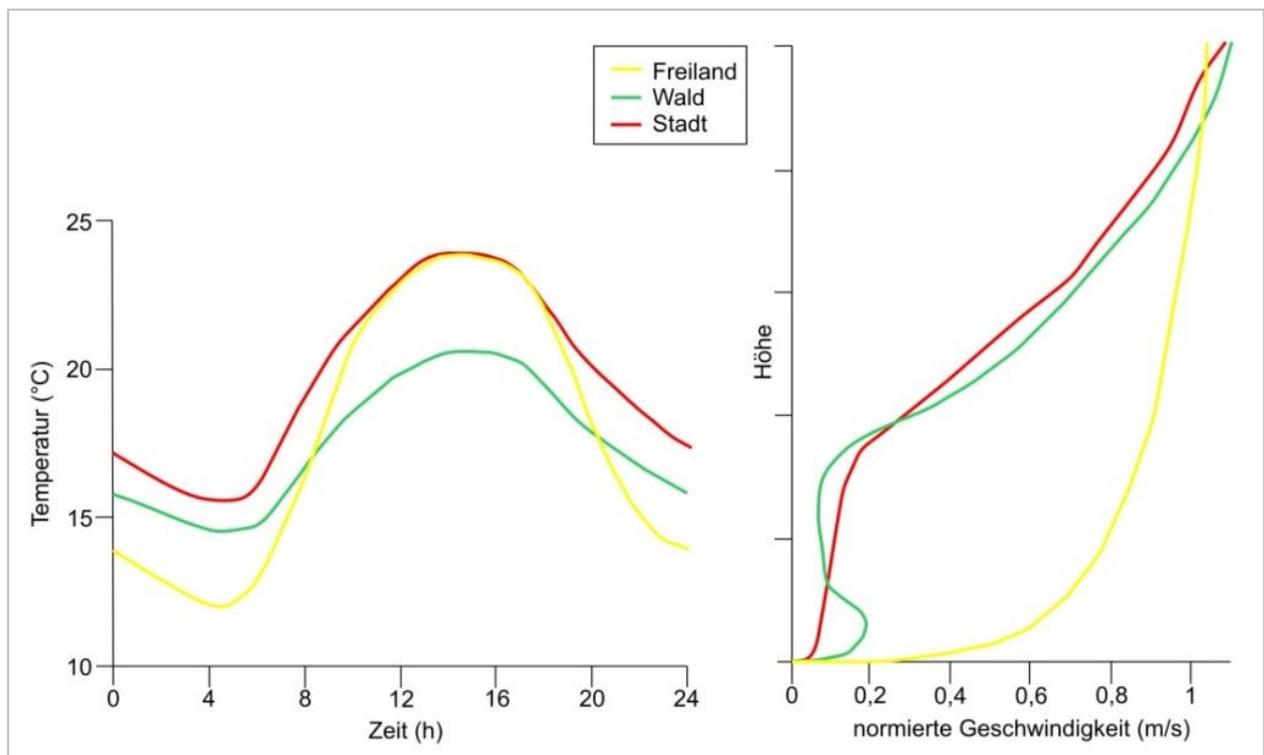


Abbildung 31: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

Die Berücksichtigung der in Kapitel 4.4 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgte über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Auf-



prägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen erfolgte auf 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 +1,9 K (Ensemble zum RCP 4.5; Szenario „mäßiger Klimawandel“) und einem Delta von +3,4 K (Ensemble 8.5; Szenario „starker Klimawandel“) versehen. Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhenniveaus addiert (Abbildung 32). Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21 °C bzw. 22,9 °C bzw. 24,4 °C.

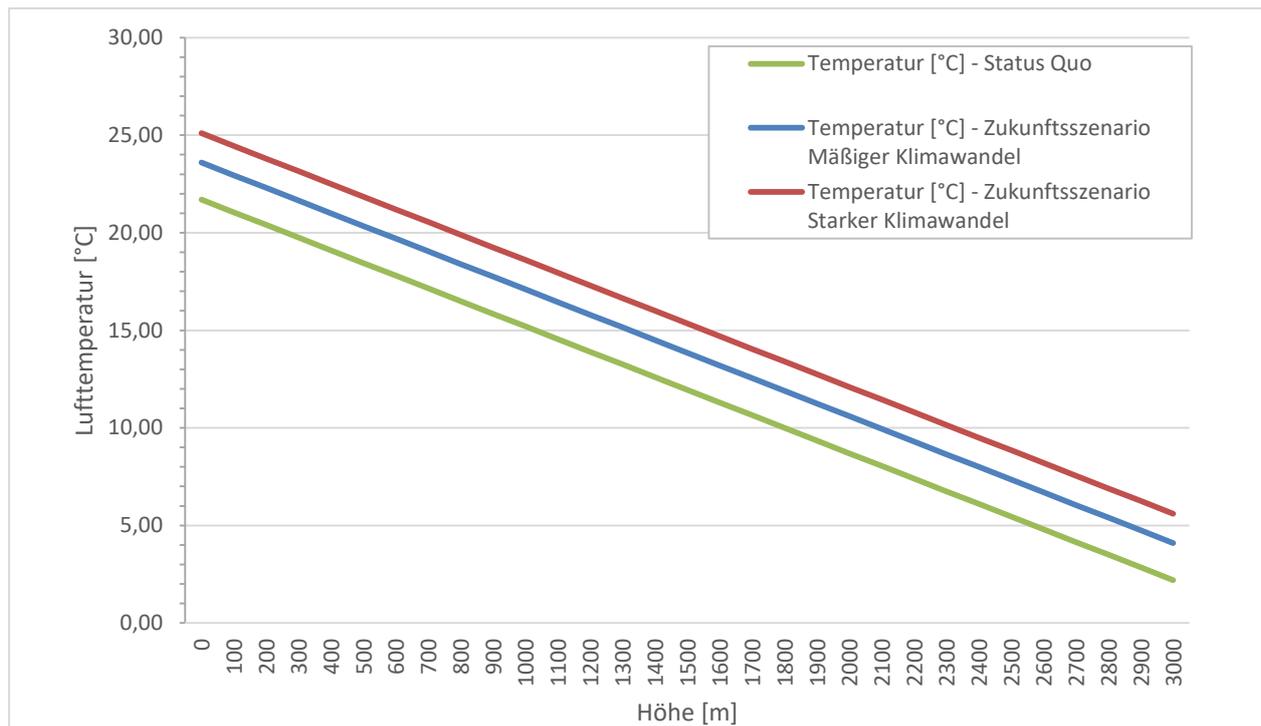


Abbildung 32: Ausgangsprofile der Lufttemperatur für die Bestandssituation (grüne Kurve) sowie für die Szenarien „mäßiger“ (blaue) und „starker“ Klimawandel (rot)

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch in den Erdboden, woraus höhere Erdbodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Diese beiden Effekte wurden bei den Modellrechnungen zum einen durch die Vorgabe einer erhöhten Bodentemperatur in 1 m Tiefe von 2/3 des Deltas berücksichtigt. Zum anderen wurde die Bodenfeuchte im roten Szenario Szenario 2 („Starker Klimawandel“) unter den Welkepunkt gesenkt. In Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation ist nicht mehr ausreichend Wasser vorhanden, welches dann nicht mehr verdunsten kann, sodass im Modell die einfallende kurzwellige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt. Demgegenüber liegt die Bodenfeuchte sowohl in der Referenzsituation als auch im blauen Szenario 1 („Mäßiger Klimawandel“) 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, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch positiv beeinflussen lassen. Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um alleine auf Basis, der in klassischen Stadtklimaanalysen im Allgemeinen und dieser Untersuchung im Speziellen betrachteten Maßnahmenets entschärft werden, zu können. Dennoch besitzen selbstverständlich alle im Szenario 1 („Mäßiger Klimawandel“) durchgeführten Maßnahmen das Potential, auch absolute Extremwetterlagen in ihrer gesundheitlichen Wirkung zu reduzieren. Ergänzend sind hier allerdings auch zusätzliche sozial-medizinische Maßnahmen im Rahmen eines Hitzeaktionsplans angeraten (BMU 2017).



5.1.5 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf auch für noch kürzere - Zeitschnitte aus (Tabelle 12). 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 12: von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter

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

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

Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteniveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 13). In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt - handelt es sich dabei insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was



dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert (das Integral/das Volumen berechnet) wird. Die Auswertzeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Die Vorwärtstrajektorien (die Vorhersage zur Ausbreitungsrichtung der Luftströmung) werden in einer Zeitspanne von Sonnenuntergang bis Sonnenaufgang ausgewertet.

Tabelle 13: Abgeleitete Ausgabegrößen von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt

Parameter und Einheit	Einheit	Höheniveau	Zeitliche Dimension	Im Projekt ausgewertet
Windgeschwindigkeit	[m/s]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Windrichtung [als geographische Rotation]	°	2 m ü.Gr.	04:00 Uhr	ja
Vorwärtstrajektorien im Ausgleichsraum	[m]	10 m ü.Gr.	21:00 bis 04:00 Uhr	nein
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Absolute Lufttemperatur	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(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



5.1.6 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 bezögen 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).

Standard bei der Ermittlung von KFZ-Emissionen ist in Deutschland das „Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ HBEFA in der Version 4.1 (UBA [Hrsg.] 2019). 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 2019) von entscheidender Bedeutung für die Berechnung des Schadstoffausstoßes. Im Standard-Szenario „REF D HB41“ 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 (NO₂) zunächst gemeinsam als Stickstoffoxide (NO_x) in Gramm pro Fahrzeug und Kilometer. Dies ist darauf zurückzuführen, dass NO_x zu einem großen Teil als NO emittiert und erst in den bodennahen Luftschichten zu NO₂ oxidiert werden. Der entsprechende Gleichgewichtsprozess ist unter anderem abhängig von der Ozonkonzentration und der Strahlung. Die Ermittlung der NO₂-Immission aus der NO_x-Emission über unterschiedlich komplexe Regressionsanalysen sowie die Ableitung der Gesamtmission unter Berücksichtigung der weiteren Rahmenbedingungen obliegt dem jeweiligen Ausbreitungsmodell.

Bei den Feinstaubimmissionen 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. Die Anteile von schweren Lkw, die einen erheblichen Einfluss auf die Emissionen haben, müssen besonders sorgfältig bestimmt werden. Die Emissionen der einzelnen Quellgruppen basiert auf Eingangsdaten und z.T. stark vereinfachten Rahmenbedingungen der folgenden.

Tabelle 14: Abgeleitete Eingangsdaten der Emissionsberechnung

Daten	Ausprägung	Quelle / Annahmen
Straßennetz und Verkehrsmengen	Verkehrsmengen Schwerverkehr (> 3,5 t), Leichtverkehr (< 3,5 t) und aller Kfz pro Streckenabschnitt	Verkehrsbelastungen Analysefall 2019
Verkehrssituation	Funktionaler Straßentyp	s.o., Verkehrsmengenkarte
Gebietstyp	Agglo	Agglomerationsraum
Verkehrszustand	Level of Service	Festlegung Geo-Net
Geschwindigkeit	Variabel	Verkehrsbelastungen Analysefall 2019
Freisetzungshöhe	0,5 m	Festsetzung
Bezugsjahr	2023	Festlegung Geo-Net
Flottenzusammensetzung	Definiert im HBEFA	HBEFA Flottenmix REF D HB42

Die Verkehrsmengen zur Berechnung der Emissionen wurden von der Stadt Kaiserslautern zur Verfügung gestellt und entstammen dem Verkehrsmodell der LfU (Landesamt für Umwelt, Rheinland-Pfalz). Die Straßendaten entstammen der städtischen Lärmkartierung 2022. Bei den Verkehrsmengen handelt es sich um den durchschnittlichen täglichen Verkehr an Werktagen inkl. Sonn- und Feiertage, welcher ausgehend von vorangegangenen Messungen auf das Jahr 2019 datiert wurde. Die Verkehrsmengen für alle Kfz, also für den Schwer- und Leichtverkehr werden pro Streckenabschnitt in Abbildung 33 dargestellt. Der Gebietstyp wurde als „Agglomeration“ festgelegt. Da zu den Verkehrszuständen (Level of Service) in Kaiserslautern keine Informationen vorlagen, wurde eine mittlere Situation (gesättigter Verkehr) angenommen. 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).

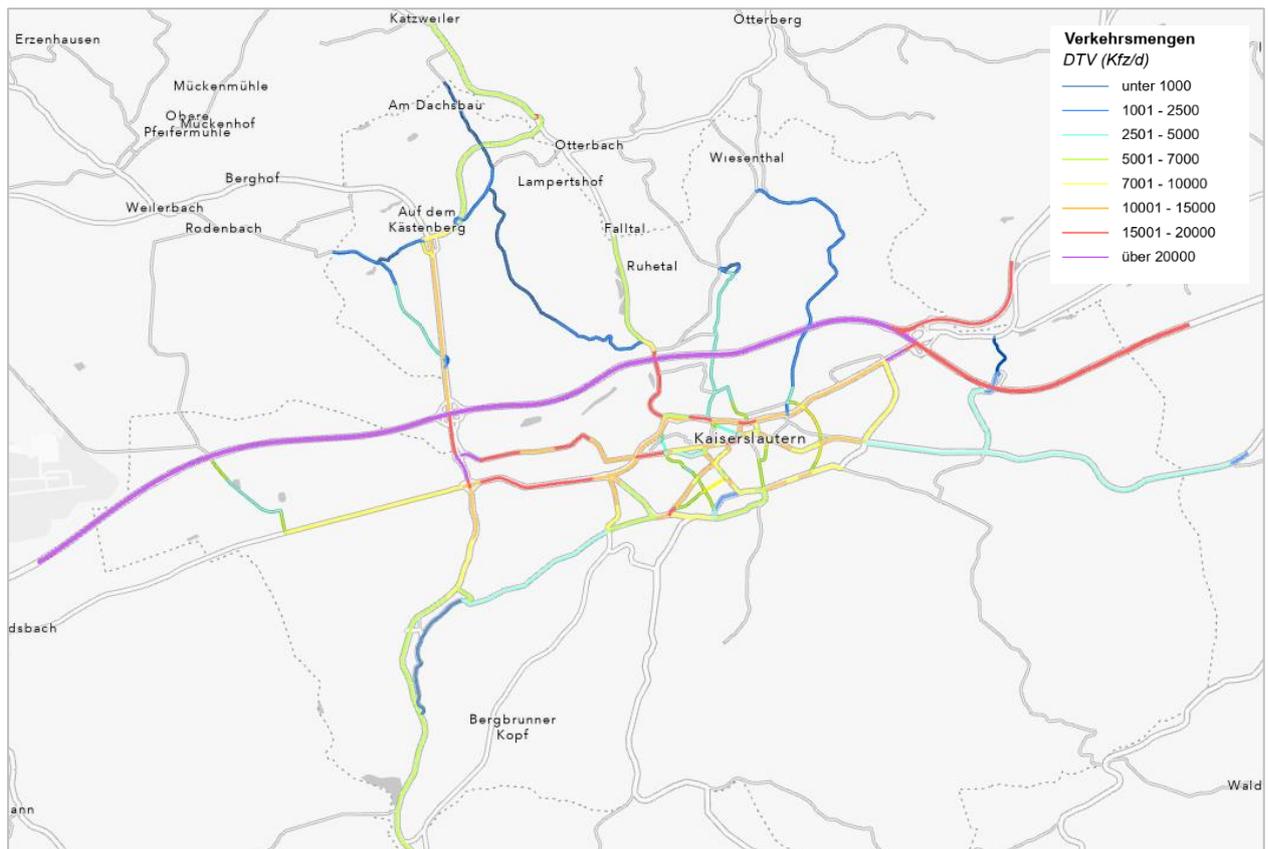


Abbildung 33: Verkehrsmengen (DTV) im betrachteten Modellgebiet. Kartenhintergrund: LVermGeo RP, Esri, TomTom, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS.

Auf der Basis der Eingangsdaten und der getroffenen Annahmen wurden mit dem HBEFA die Emissionsdichten von Stickoxiden und Feinstäuben pro Streckenabschnitt berechnet. Am Beispiel der Stickoxide werden die Emissionsbedingungen in den Kaiserslauternern Streckenabschnitten in der Abbildung 34 dargestellt. Anders als die Emissionen aus industriellen Quellen, Schiffen und Kleinfeuerungsanlagen werden die straßenverkehrsbedingten Emissionen in geringen Höhen und in direkter Nähe zu den Aufenthaltsbereichen des Menschen freigesetzt. Zusätzlich sind die Ausbreitungs- und Verdünnungsbedingungen in Bodennähe herabgesetzt, so dass sich Luftschadstoffe, vor allem in Straßenschluchten und bei austauscharmen Wetterlagen schnell anreichern können. Auf der Basis der Emissionsmengen kann anschließend die Schadstoffbelastung im Stadtgebiet mit einer Ausbreitungsmodellierung ermittelt werden, was in Kapitel 6.2 erläutert wird.

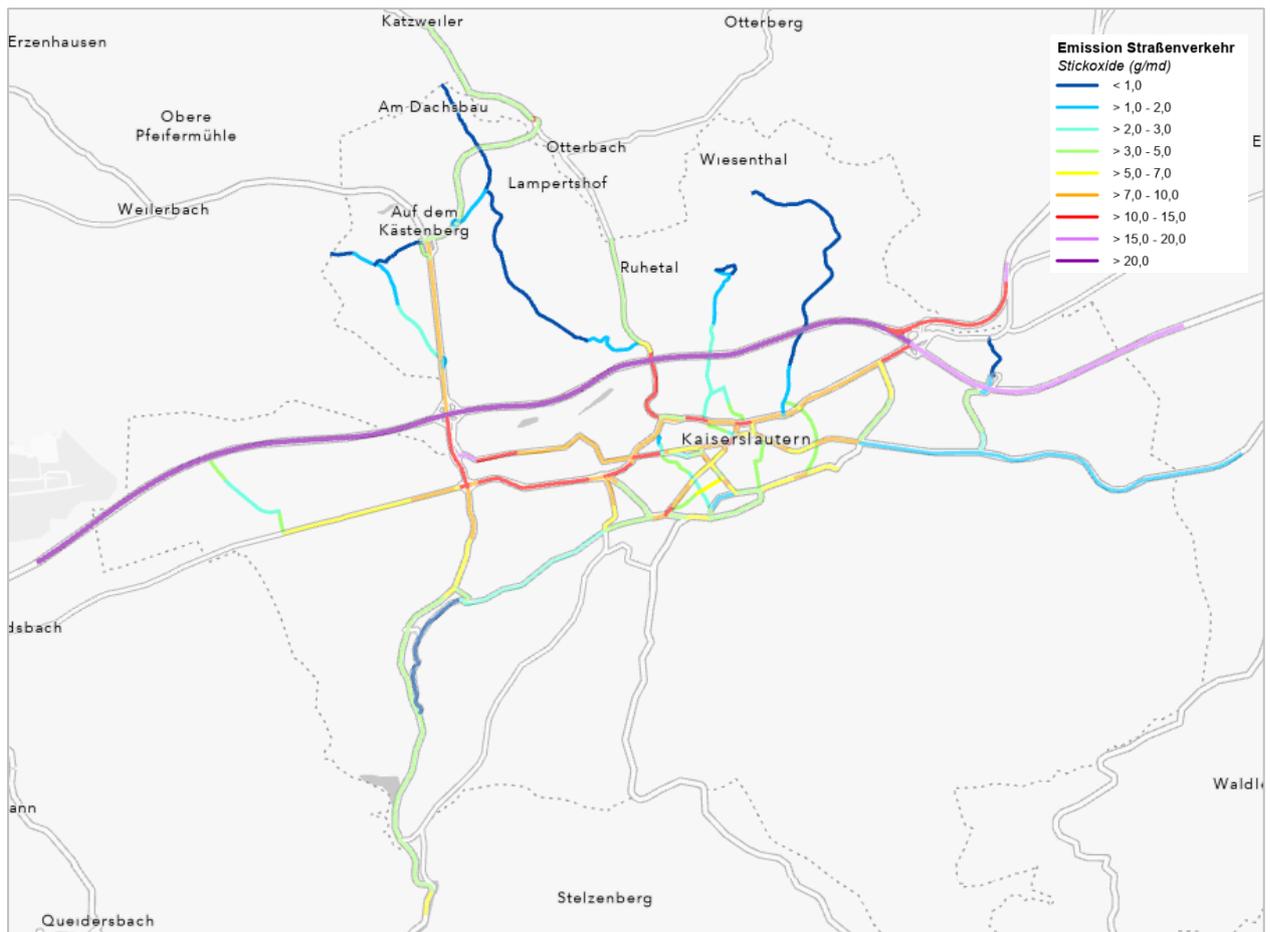


Abbildung 34: Straßenverkehrsbedingte Emissionsdichten von Stickoxiden (NOx) in Gramm pro Meter und Tag (g / m-d). Kartenhintergrund: LVerGeo RP, Esri, TomTom, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS.



5.1.7 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 getrennt nach den drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung der Stadtstruktur im Wirkgefüge mit dem Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 zusammengefasst. Demnach durchliefen alle Modellläufe erfolgreich die Qualitätssicherung.

Tabelle 15: Ergebnisse der Qualitätssicherung

Modelllauf	Ergebnis der Qualitätssicherung
Bestandsfall „Status Quo“	Qualitätssicherung erfolgreich
Planfall	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel“	Qualitätssicherung erfolgreich
Zukunfts-Szenario 2 „Starker Klimawandel“	Qualitätssicherung erfolgreich

5.1.8 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 2017) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren auch Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu ge-



währleisten 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 den Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E₆-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 dies auch für die im Modell abgebildeten Parameter des Kaltluftthaushaltes. Bei der Kaltluftvolumenstromdichte liegt der Wert bei +/- 1 – 2 % bezogen auf eine Fläche der Basisgeometrie, bei der Kaltluftproduktionsrate besteht aufgrund ihres primär empirisch hergeleiteten Wertes keine Unsicherheit. Insgesamt zeigt sich, dass zwar modellinterne Unsicherheiten bestehen, diese aber spätestens auf der Ebene der flächenhaft aggregierten Werte in der Basisgeometrie zu vernachlässigen sind.

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

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

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 100 m² repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 10 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer auch ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

Die bedeutsamste Unsicherheitsquelle ist die Informationstiefe der zur Verfügung stehenden Daten. Dies bezieht sich zum einen auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind



Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

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

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall zu einem Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K führen kann, was wiederum auch zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2014). Es sei noch einmal betont, dass diese Unsicherheiten nicht im Modell begründet liegen – in dem diese Informationen grundsätzlich verarbeitet werden könnten – sondern in nicht oder nicht flächendeckend zur Verfügung stehenden (Geo-)Basisinformationen. Angesichts der rasanten Entwicklung in der Fernerkundung und der Datenstandards (z.B. im Bereich des BIM - Building Information Modeling) ist damit zu rechnen, dass entsprechende Informationen mittelfristig (+/- 10 Jahre) für die gesamstädtische Ebene bereitstehen und dann auch modelltechnisch abgebildet werden können.

Auch für andere Unsicherheitsquellen muss zwischen der Referenzsituation und den Szenarien differenziert werden. So gilt bzgl. der Aktualität der Daten zum Beispiel: Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.1.3 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 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN KLIMAÖKOLOGIE

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo und die beiden Zukunfts-Szenarien beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (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 Kaiserslautern übergeben.

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltluftaushalt sowie Luftqualität wurden in gelayouteten Karten als ArcPro- Kartenpaket visualisiert und inkl. Legenden sowie als hochauflösende .pdf Dokumente übergeben (s. Kap. 8.7). Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug: ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben.

6.1.1 NACHTSITUATION

6.1.1.1 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. 13 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis über 19 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Kaiserslautern damit eine Spannweite von mehr als 6 °C (Abbildung 35). Die mittlere Temperatur im Untersuchungsgebiet liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 15,1 °C.

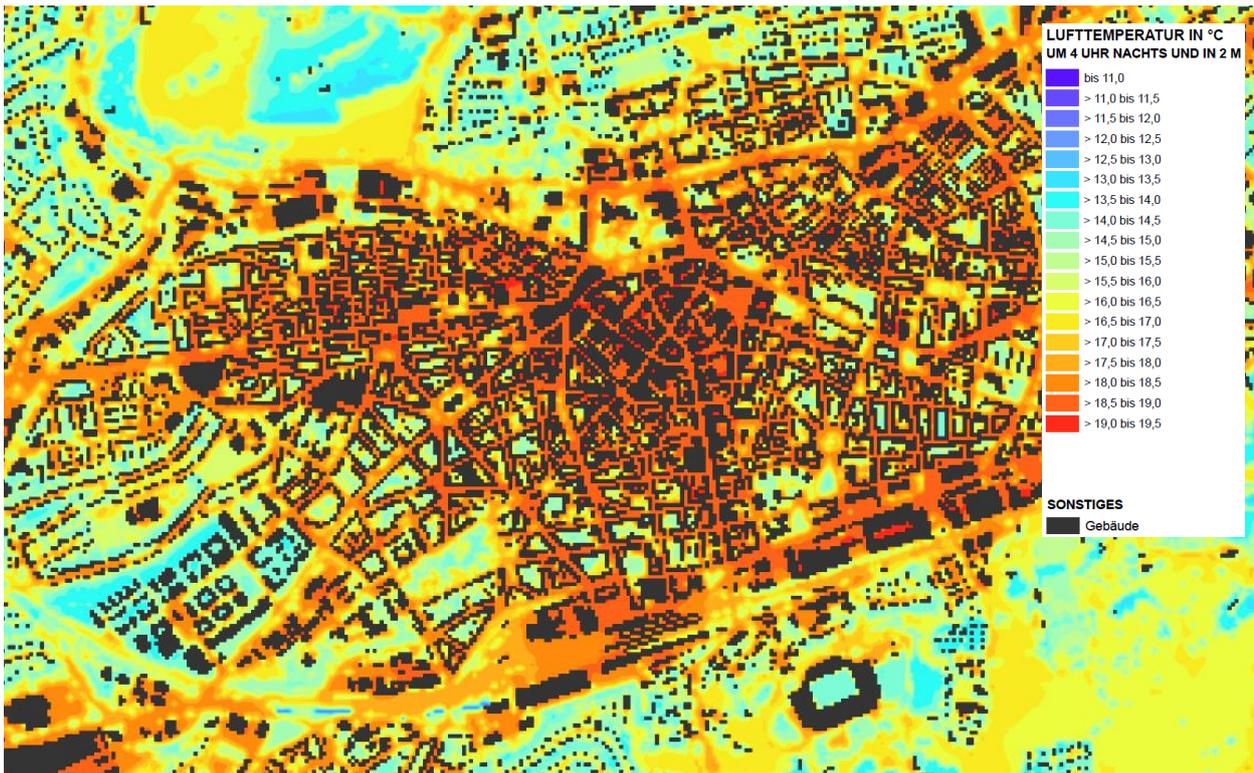


Abbildung 35: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur (T04) im Status quo in der Kaiserslauterner Kernstadt (verkürzte Legende)

Die höchsten nächtlichen Belastungen (über 18 °C) treten vorwiegend in der Kaiserslauterner Innenstadt (Fußgängerzone, Eisenbahnstraße/ Richard-Wagner-Straße zum Hauptbahnhof, Stadtteil Kotten inkl. des Westpfalzkrankenhauses, sowie der Altstadt bis zur Mainzer Straße) im Bereich der östlich gelegenen Kasernengelände und in den hoch versiegelten Gewerbe- und Industriegebieten (im Umfeld der Barbarossastraße, sowie Merkurstraße/Denisstraße (Pfalz-Boulevard) und bei ACO Guss) auf. Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen im Siedlungsraum mit Werten zwischen 14 – 16 °C finden sich in den aufgelockerten Wohnbebauungen (z.B. Lämmchesberg, Fischerrück, Grübentälchen) und in vielen Bereichen der Außenstadtteile (geringe Bebauungsdichte).

Grünflächen (wie der Stadtpark, der Volkspark, der Hauptfriedhof und das Gartenschauengelände) wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich ein differenziertes Bild ergibt. Im Umland kühlen Freiflächen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 12 - 14 °C auf (z.B. landwirtschaftliche Flächen entlang der A6 zwischen dem Autobahndreieck Kaiserslautern und Kaiserberg). 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 15 – 16,5 °C erreicht werden (z.B. Bereich Wildpark Betzenberg, die stadtumgebenden großflächigen Waldareale). Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrünten Siedlungsräumen bedeutet, nehmen größere Waldgebiete bzw. mit Bäumen bestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht – zudem kann sich über dem Kronendach Kaltluft bilden.



In den beiden Klimawandel-Szenarien zeigt sich eine flächendeckende Erwärmung des Kaiserslauterner Stadtgebiets (Abbildung 36). Gegenüber dem Ist-Zustand kommt es im Bereich der bebauten Entwicklungsflächen zu zusätzlichen Erwärmungen, wie bspw. im Umfeld Betzenberg (südlich des Stadions). Die relativen Unterschiede der bodennahen nächtlichen Lufttemperatur bleiben, wie im Ist-Zustand, 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 2 „Starker Klimawandel“ werden nächtliche Temperaturen über 22 °C erreicht. Begrünte innerstädtische Flächen sowie die aufgelockert bebauten Bereiche stellen dagegen weiterhin die günstigsten Strukturen im Siedlungsraum dar (gleichwohl auch diese eine Erwärmung erfahren) und siedlungsferne Freiflächen kühlen am stärksten aus.

Ein Vergleich verschiedener Bereiche zwischen den drei Szenarien zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16: Übersicht der nächtlichen Lufttemperatur zwischen den Szenarien und Nutzungen

Szenario	T04 Stadtpark [°C]	T04 Innenstadt [°C]	T04 Wald [°C]
Status Quo	14,2	19,1	16,3
Szenario 1	16,1	20,9	18,3
Szenario 2	17,5	22,6	19,8

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

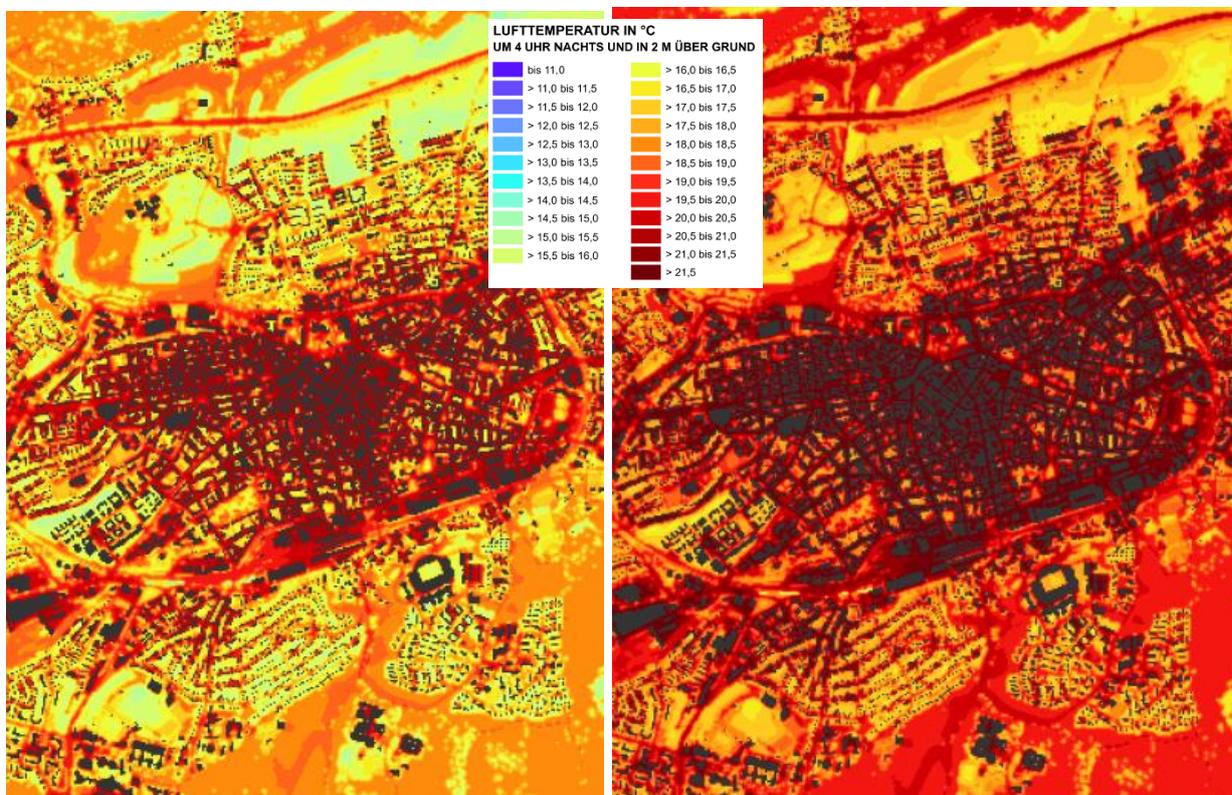


Abbildung 36: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in den Szenarien Mäßiger Klimawandel (links) und Starker Klimawandel (rechts) in einem Ausschnitt des Kaiserslauterner Stadtgebiets (verkürzte Legende).



6.1.1.2 KALLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird im Kaiserslauterner Stadtgebiet wesentlich durch das Relief bestimmt, zeigt im hügeligen Gebiet eine große Variabilität und reicht von sehr geringen bis zu maximalen Werten über $90 \text{ m}^3/(\text{s m})$.

Die gesamthafte Betrachtung des Stadtgebietes, wie in Abbildung 37 dargestellt zeigt, dass es Bereiche mit erhöhtem Kaltluftvolumenstrom im Stadtgebiet gibt. Dazu zählen die nachfolgenden Bereiche: Bereich entlang der Bahntrasse, ausgehend vom Hauptbahnhof bis hin zur Kleber Kaserne, über den Volkspark bis hin zum Messeplatz; der Bereich südlich der A6 zwischen Kaiserberg und dem Gewerbegebiet Nord-Ost, nach Süden hin entlang des Baalborner Wegs, der östliche Rand des Stadtteils „Grüebentälchen“, der Bereich nördlich der Hohenecker Straße (Karl-Pfaff-Siedlung), südlich des Gewerbegebiet West bis hin zur Siedlung am Belzappel.

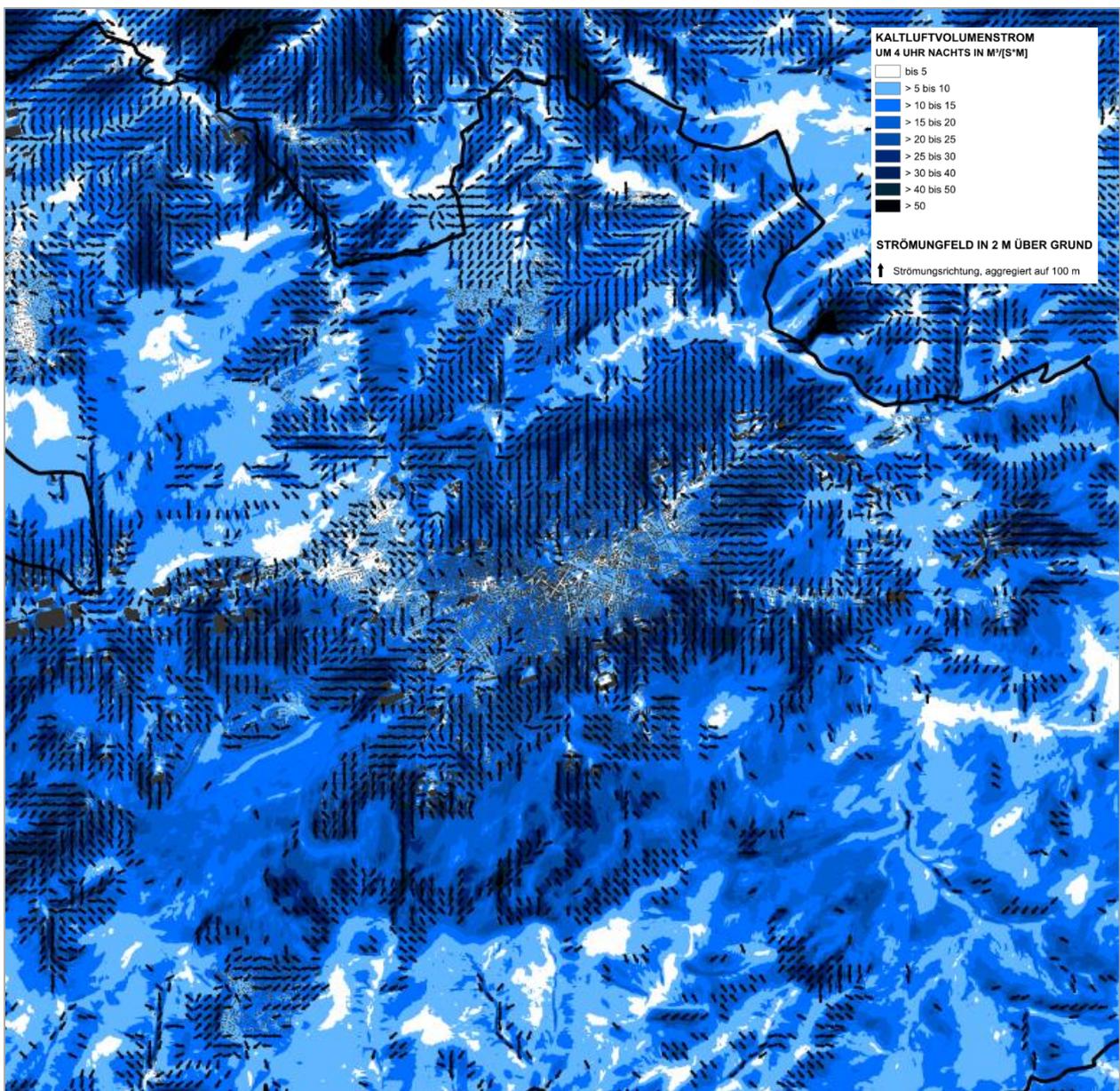


Abbildung 37: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo im Kaiserslauterner Stadtgebiet (verkürzte Legende).



Die für den Kaiserslauterner 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 39 ist das Strömungsfeld der bodennahen Kaltluftströmung über Pfeile dargestellt, die im Sinne der Lesbarkeit auf eine Auflösung von 100 m aggregiert wurden. Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert (z.B. Gebäude umströmt) und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

Die bodennahe Kaltluftströmung bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie in den zahlreichen Wäldern in und vor allem um Kaiserslautern 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.

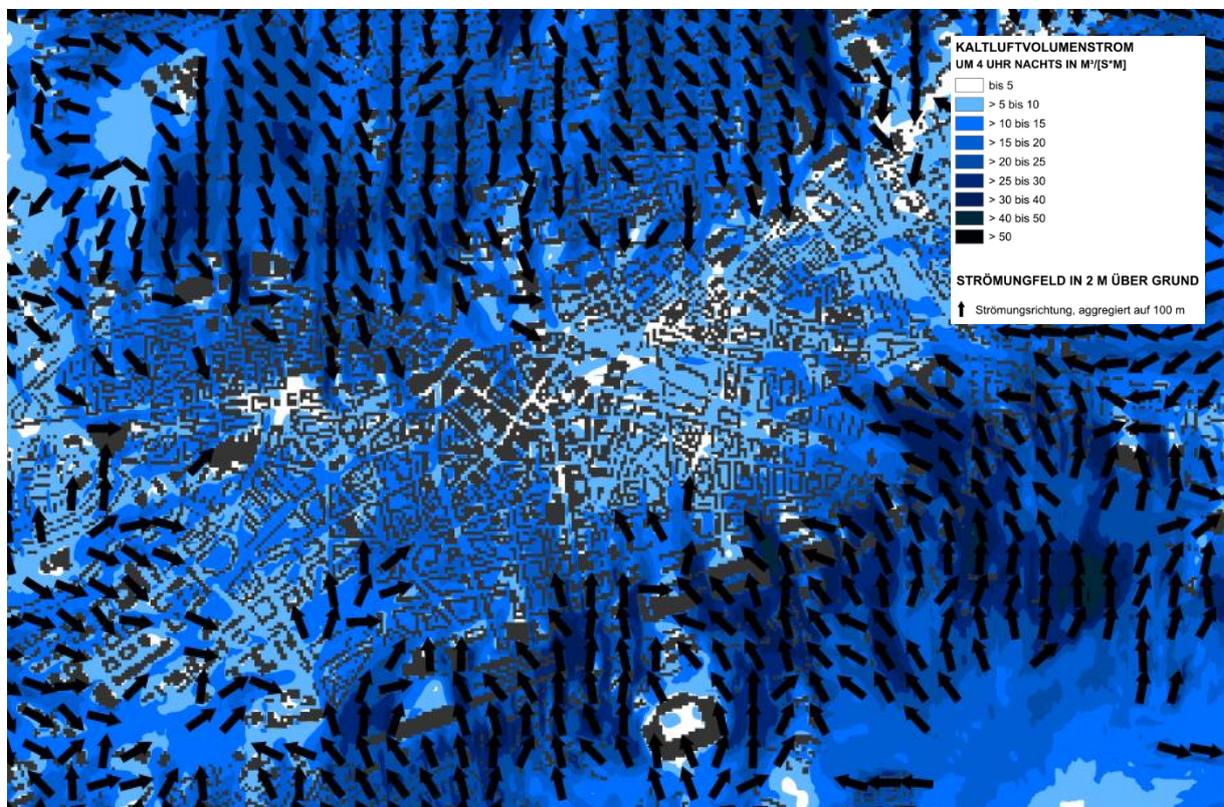


Abbildung 38: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Status quo in der Kaiserslauterner Kernstadt (verkürzte Legende).

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 (vgl. Abbildung 38 und Abbildung 40). Eine Bebauung in den möglichen städtebaulichen Entwicklungsflächen kann sich dagegen auf das Kaltluftströmungsfeld auswirken. Bestehende Kaltluftströmungen werden durch die Überbauung der Flächen in der Regel gemindert. Allerdings lässt sich das Ausmaß der Minderung über eine an das Strömungsfeld angepasste Bebauung steuern. Kleinräumig können sich zudem neue Ausgleichsströmungen im Umfeld der Entwicklungsflächen ergeben, insbesondere wenn es sich um großflächige Vorhaben mit einer starken Überwärmung handelt.

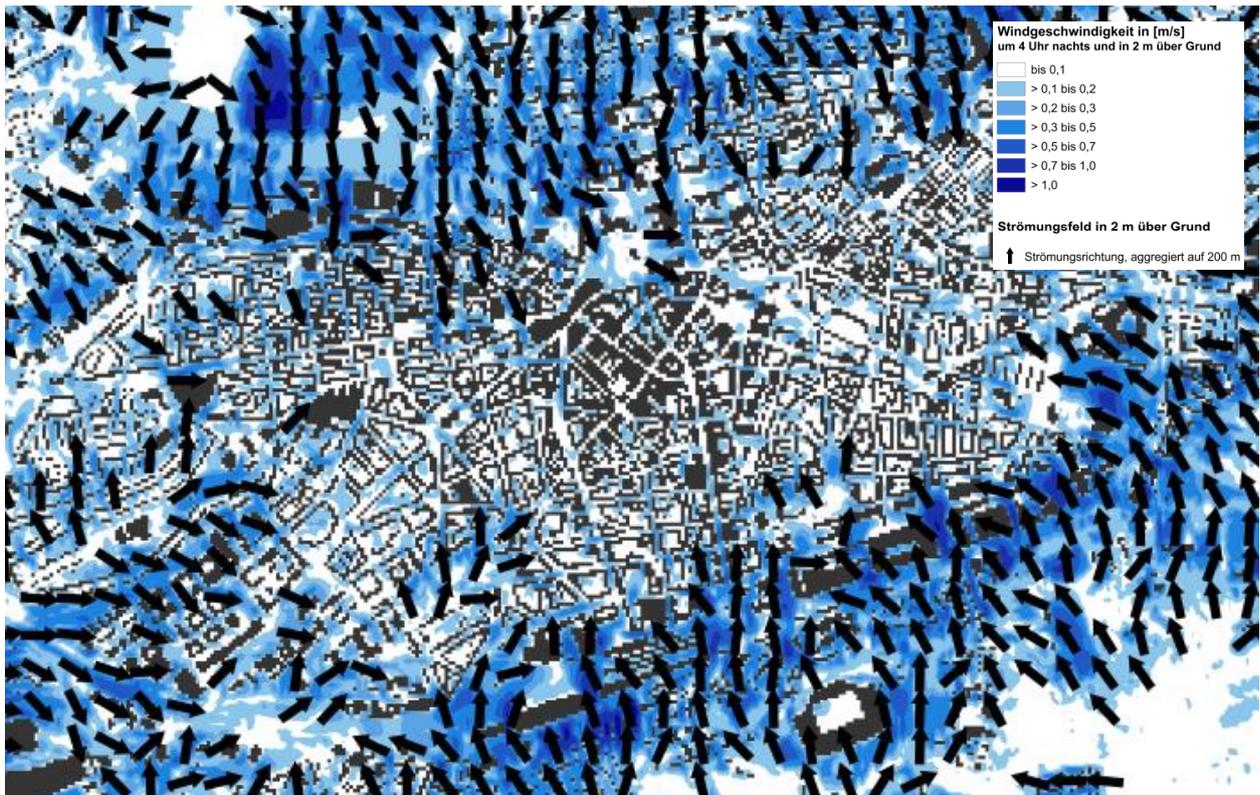


Abbildung 39: Bodennahes nächtliches Strömungsfeld im Status quo in der Kaiserslauterner Kernstadt (verkürzte Legende).

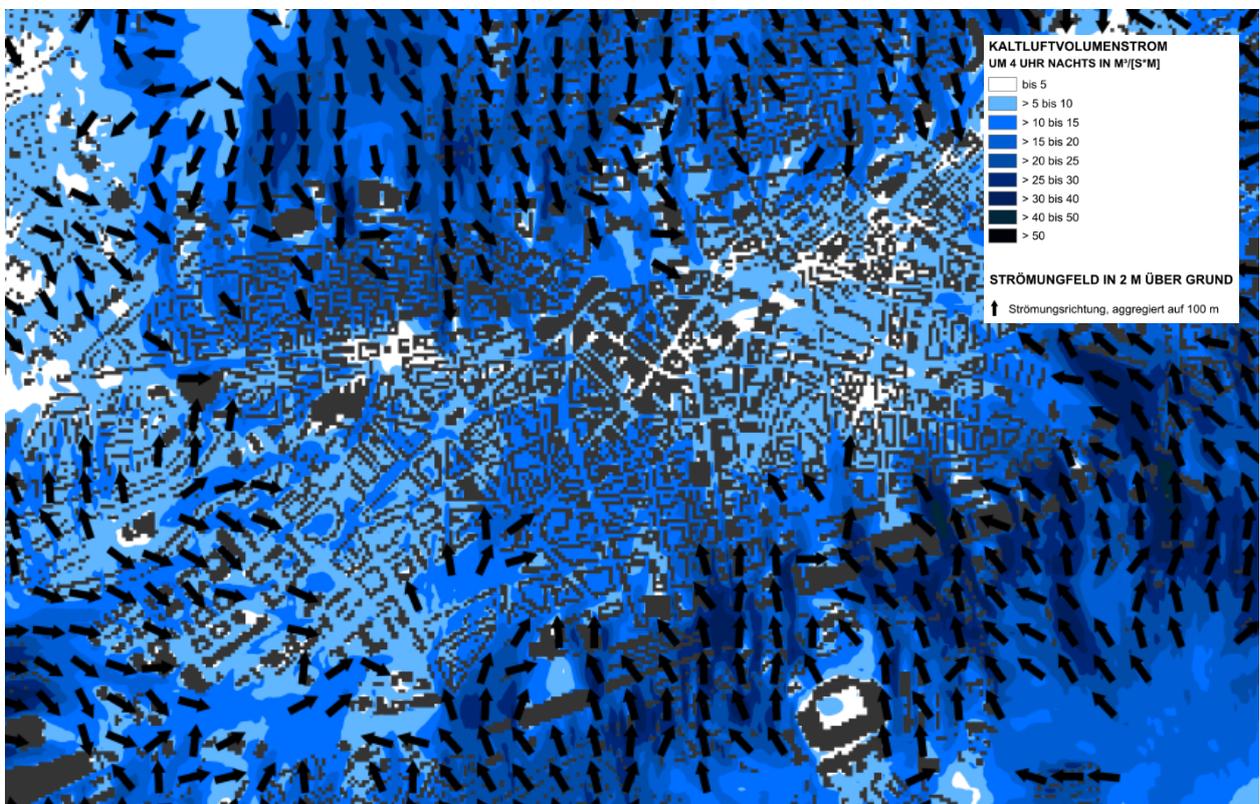


Abbildung 40: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Szenario 2 „Starker Klimawandel“ in der Kaiserslauterner Kernstadt (verkürzte Legende).



6.1.2 TAGSITUATION

6.1.2.1 WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET)

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist der PET-Wertebereich 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 17).

Tabelle 17: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2004)

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

Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder als Rückzugsorte dienen können (z.B. im Stadtpark, Volkspark, den umliegenden Waldarealen; Abbildung 41). Auch Gewässer wirkend am Tag kühlend auf ihre Umgebung (bspw. Weiher im Volkspark).



Abbildung 41: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) im Status quo in der Kaiserslauterner Kernstadt (Legende s. folgende Abbildung)

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt und vielen Gewerbegebieten zu finden sind. Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in den umliegenden Außenstadtteilen wie Siegelbach, Erfenbach oder Morlautern (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 zentrumsnahe gelegenen Siedlungen, wie am Betzenberg oder Bännjerrück, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 10 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend 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. Stadtpark, Hauptfriedhof, Volkspark).

Durch den Klimawandel steigt die Wärmebelastung am Tag flächendeckend in Kaiserslautern, sodass die Aufenthaltsqualität auf Grünflächen sinken kann. Die relativen Unterschiede zwischen den Flächen im Stadtgebiet bleiben jedoch bestehen und selbst im Szenario 2 „Starker Klimawandel“ gibt es noch viele Wälder und Parks mit hohen Aufenthaltsqualitäten sowie Siedlungsflächen mit einer geringen Wärmebelastung, wenn sie einen hohen Baumbestand aufweisen. Im Bereich der potentiellen Entwicklungsflächen kommt es aufgrund der neuen Gebäude, in deren Nahbereich, lokal zu Verschattungseffekten und somit zu Abnahmen der PET (Abbildung 42).



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

Tabelle 18: Übersicht der PET-Werte zwischen den Szenarien und Nutzungen

Szenario	PET Freifläche [°C]	PET Innenstadt [°C]	PET Gewerbe [°C]	PET Wald [°C]
Status Quo	39	44	41	23,5
Szenario 1	42	46	43,5	25
Szenario 2	43,5	47	45	27

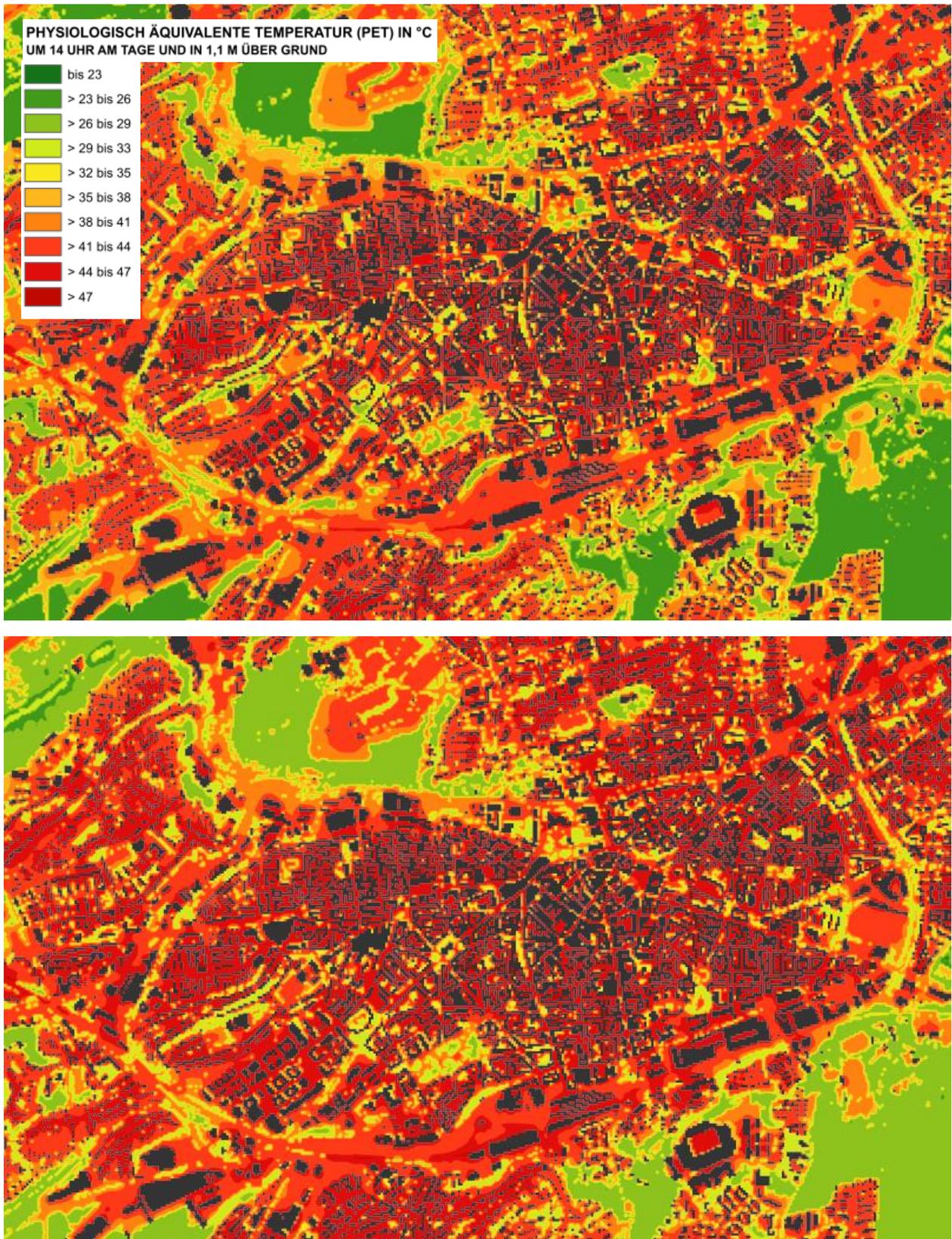


Abbildung 42: Wärmebelastung am Tag (Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET)) in den Szenarien „Mäßiger Klimawandel“ (oben) und „Starker Klimawandel“ (unten); (verkürzte Legende).



6.2 NUMERISCHE MODELLIERUNGEN LUFTHYGIENE

6.2.1 ALLGEMEINES

Für das Verständnis der im Folgenden gemachten Aussagen ist es wichtig, sich noch einmal die Unterschiede zu Messungen und quantitativen Berechnungen von Immissionskonzentrationen innerhalb bestimmter Mittelungszeiträume, wie sie beispielsweise im Luftreinhalteplan angeführt werden, zu verdeutlichen: Die hier beschriebenen Immissionsfelder beziehen sich ganz explizit auf eine Ausbreitungssituation, die nur bei speziellen meteorologischen Situationen und nur in den Frühstunden des Tages auftritt. Sie sind nicht geeignet, grenzwertrelevante Aussagen im Sinne der 39. BImSchV (2010) zu treffen, die sich auf jahresmittlere Luftschadstoffkonzentrationen oder Überschreitungshäufigkeiten beziehen, sondern dienen lediglich dazu, Austauschbereiche zwischen Grün- und Siedlungsflächen zu identifizieren, in denen bei autochthonen Wetterlagen mit erhöhten Luftschadstoffbelastungen zu rechnen ist (Indikatorfunktion).

Als Indikator für die Belastung der Luft dient die Ausbreitung eines Luftschadstoffs im dreidimensionalen Strömungsfeld der Kaltluftmodellierung. Die Ausgangswerte hierfür liefern die Berechnungen der Emissionsmengen von Stickstoffoxiden (NO_x).

Stickstoffdioxid (NO_2) ist der wichtigste, maßgeblich durch den Straßenverkehr induzierte Luftschadstoff. Zwar können die komplexen Reaktionen der NO_2 -Ozonchemie in der vorliegenden Modellierung keine detaillierte Berücksichtigung finden, doch ist die Feinstaub-Konzentration wesentlich stärker abhängig von verschiedenen, nicht straßenverkehrsbedingten Gegebenheiten als die des NO_2 . Hierzu gehören 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. Die für die Erzeugung des Strömungsmodells wichtigsten Eingangsparameter stellen normalerweise die Strukturhöhen der jeweiligen Nutzung dar. Hierfür wurde in der vorliegenden Untersuchung das im Rahmen der Klimaanalyse abgeleitete Eingangsdatenraster und das hieraus erzeugte Windfeld verwendet. Bei der Interpretation der Ausbreitungsrechnungen für Luftschadstoffe ist zu berücksichtigen, dass eine Rasterauflösung von 10 m reale Ausbreitungs- und Verdünnungsbedingungen nicht hinreichend repräsentieren kann.

Zusammengefasst sind folgende Einschränkungen zu berücksichtigen:

- Die Rasterauflösung ist nicht dazu geeignet, die Luftschadstoffsituation innerstädtischer Hauptverkehrsstraßen mit dichter Randbebauung (Straßenschluchten) realistisch wiederzugeben.
- Die Immissionen sind aufgrund der Rasterauflösung repräsentativ nur für größere Raumeinheiten und aufgrund der austauscharmen Wetterlage nicht mit grenzwertrelevanten Jahresmittelkonzentrationen zu vergleichen.
- Das Modell beruht auf Nutzungskategorien, die in Hinblick auf klimatische Fragestellungen optimiert sind und enthält keine konkreten Gebäude und sonstige Hindernisse ohne Porosität. Es stellt somit stark generalisierte Schadstoffausbreitungsbedingungen dar.
- Grundsätzlich besitzen die berechneten Immissionen lediglich eine Indikatorfunktion für Belastungsschwerpunkte während autochthoner Wetterlagen.

Zu den Tageszeiten der maximalen Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens um ca. 4 Uhr morgens sind die Verkehrsmengen in der Regel noch sehr gering. In den Morgenstunden nimmt der Verkehr zwar rasch zu, doch lösen sich die siedlungsgerichteten Kaltluftsysteme bald nach Sonnenaufgang auf und werden von einem konvektionsgeprägtem, relativ turbulenten Strömungsgeschehen abgelöst. Die größte zeitliche



Überschneidung einer signifikanten Emissionsfreisetzung mit einem noch deutlich durch Ausgleichströmungen geprägten Windfeld ergibt sich zur Früh-Hauptverkehrszeit, die auch die morgendliche Spitzenstunde beinhaltet. Die Auswertungen beziehen sich daher auf das Strömungsgeschehen für die Uhrzeit 7 Uhr.

Um die Gesamtimmisionsbelastung einer autochthonen Wetterlage im Untersuchungsgebiet abschätzen zu können, sind Daten zur Hintergrundkonzentration der berücksichtigten Schadstoffkomponenten nötig. Diese Vorbelastungs-Immissionen treten unabhängig von lokalen Zusatzbelastungen auf und stammen aus Quellen wie Kleinf Feuerungsanlagen, Gewerbe und regionalem Verkehr. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde, um eine leichtere Deutbarkeit der Ergebnisse zu erzielen, auf eine summierte Darstellung der Gesamtbelastung verzichtet und lediglich die verkehrlichen Zusatzbelastungen ohne Berücksichtigung der Grundbelastung (Hintergrundbelastung, welche die Emissionen aus Hausbrand, Gewerbe und Industrie abbildet) abgebildet.

Die berechnete Ausbreitungssituation ist somit quantitativ nicht auf reale Immissionsbedingungen zu übertragen. Die Schadstoffbelastung wird im Rahmen der eingesetzten Methodik hauptsächlich durch die Emissionsmenge und die zum gegebenen Zeitpunkt modellierte Strömung bestimmt und ist geeignet, Siedlungsbereiche zu identifizieren, in denen bei autochthonen Wetterlagen mit erhöhten Luftschadstoffbelastungen zu rechnen ist.

6.2.2 RÄUMLICHE AUSPRÄGUNG DER STICKSTOFFDIOXIDBELASTUNG

Die nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen die Transportwege der über den Straßenverkehr freigesetzten Stickstoffdioxid-Immissionen im nächtlichen Strömungsfeld. Ausgehend von der räumlichen Verteilung der Verkehrsmengen, der Bebauungsdichte und der Kaltluftströmungsrichtung ergeben sich im Stadtgebiet von Kaiserslautern mehrere lufthygienische Belastungsschwerpunkte (Abbildung 43). Die Kernstadt und insbesondere große Kreuzungsbereiche sowie stark frequentierte Straßenabschnitte weisen erwartungsgemäß hohe Schadstoffkonzentrationen auf, während die umliegenden Ortslagen vergleichsweise gering betroffen sind (Abbildung 44).

Die stark befahrenen Straßen wie Mainzer Straße, Ludwig Straße und Pariser Straße treten als Bereiche mit einer hohen Belastung von Stickstoffdioxid hervor. Daneben zeigen sich auch die Karl-Marx-Straße, Eisenbahnstraße, Logenstraße und die Barbarossastraße ausgesprochen belastet. Grund für die Belastungssituation sind die eingeschränkten Durchmischungsbedingungen aufgrund der umliegenden, dichten Bebauung im innerstädtischen Bereich (Abbildung 44).

Stärker ausgeprägte Strömungen tragen zwar zum Ferntransport, aber auch zu einer raschen Verdünnung der Luftschadstoffe bei. Dieses Phänomen ist beispielsweise entlang der Lauterstraße gut zu verfolgen. Hier fällt die lufthygienische Belastung, trotz eines vergleichbar hohen sowie streckenweise höheren Verkehrsaufkommens, aufgrund der Strömung von Norden geringer aus als in der Ludwigs- oder auch der Pariser Straße.

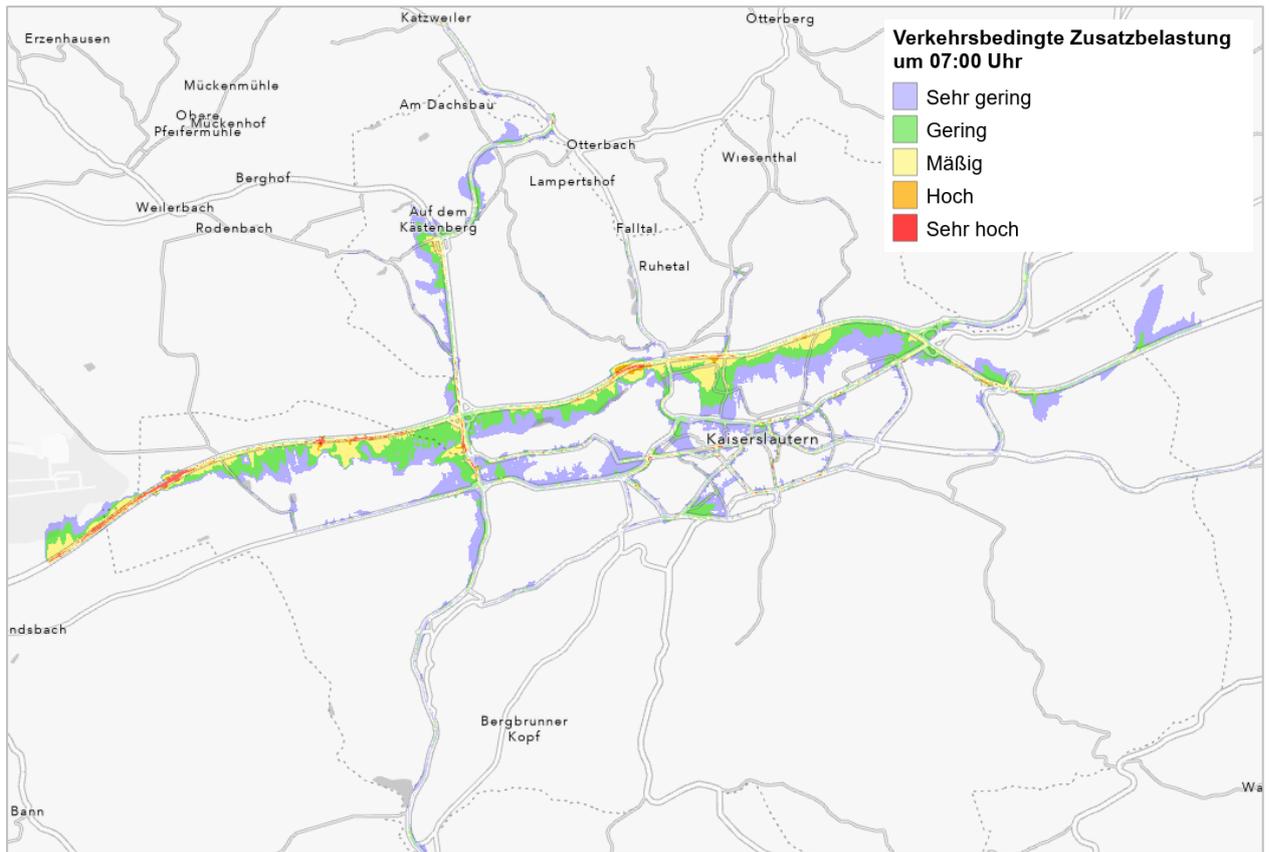


Abbildung 43: NO₂-Zusatzbelastung im morgendlichen Kaltluftströmungsfeld. Kartenhintergrund: LVermGeo RP, Esri, TomTom, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS.

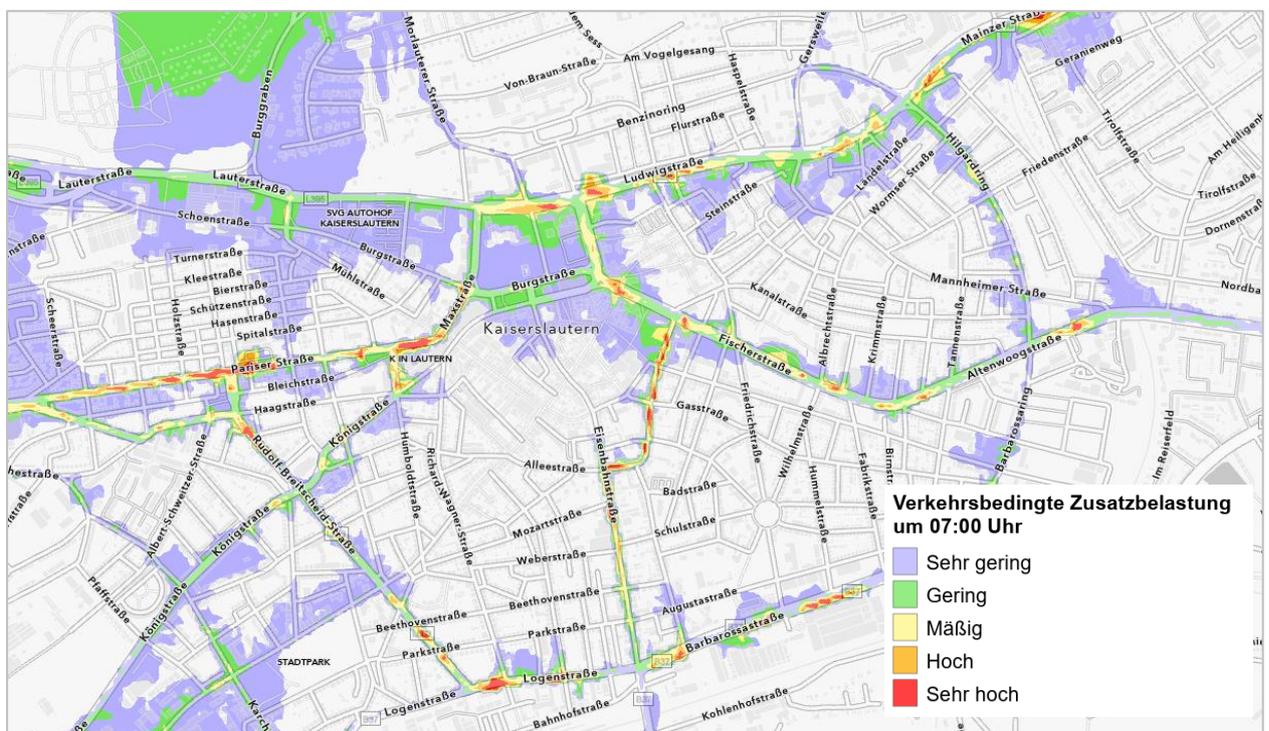


Abbildung 44: Nahaufnahme Kernstadt: NO₂-Zusatzbelastung im morgendlichen Kaltluftströmungsfeld. Kartenhintergrund: LVermGeo RP, Esri, TomTom, Garmin, Foursquare, GeoTechnologies, Inc, METI/NASA, USGS.



7. Klimaanalysekarte als Zwischenprodukt

7.1 KLIMAANALYSEKARTEN

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 wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte. Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation (Status Quo)
- Klimaanalysekarte für das Szenario 1 „Mäßiger Klimawandel (2055)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario 2 „Starker Klimawandel (2055)“

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.

Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit der drei Klimaanalysekarten wurde eine einheitliche Legende entwickelt (Abbildung 45). Diese gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto dynamischer (oder auch hochwertiger) ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht mit 10 m der Modellausgabe. Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung der Ergebnisse über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier nächstgelegenen Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte. Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für das 2 m Niveau flächenhaft



dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.

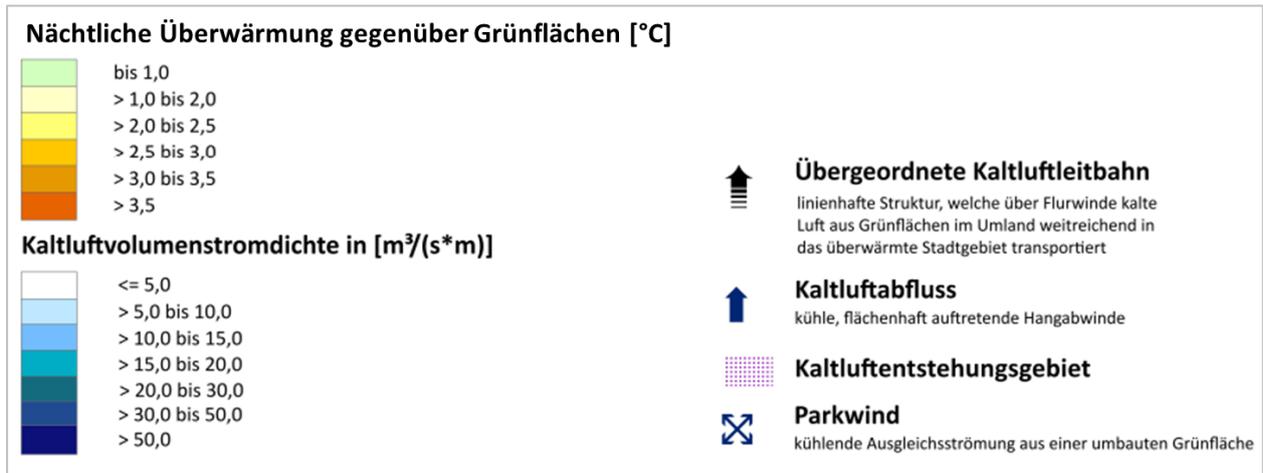


Abbildung 45: Einheitliche Legende der Klimaanalysekarte (verkürzte Darstellung)

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch vier Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 19). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlicher. 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 $> 26,3 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Dieser Schwellenwert bezeichnet den Mittelwert der Kaltluftproduktionsrate.

Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Kaiserslautern 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 vorge-



nommenen gutachterlichen Einschätzungen immer auch ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. noch einmal intensiver zu prüfen ist.

Tabelle 19: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Strömungsrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiet	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 26,3 m ³ /m ² 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 („händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen und der Orographie. Abbildung 46 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für das Einzugsgebiet „Betzenberg“ einmal mit und einmal ohne Darstellung der beiden zentralen Elemente des Prozessgeschehens.

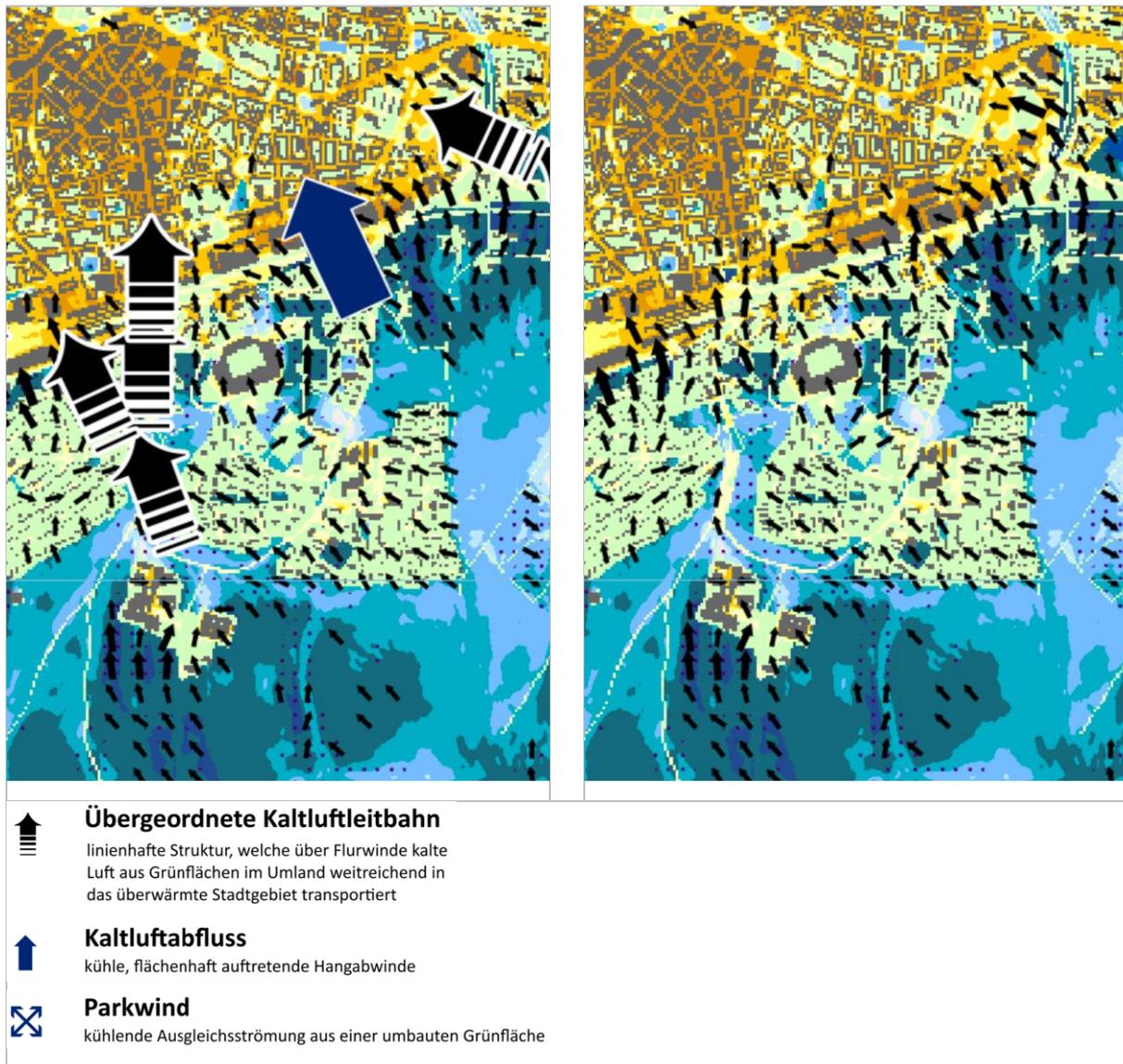


Abbildung 46: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen und linienhaften Kaltluftleitbahnen (links mit und rechts ohne entsprechende Ausweisung) inklusive Legende.

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, wenn sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können Bereiche mit höheren Belastungen besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der beiden Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte (siehe Kapitel 8). In den folgenden Karten ist die Klimaanalysekarte für den Status Quo (Abbildung 47) und für das Szenario 2 (Abbildung 48) dargestellt.

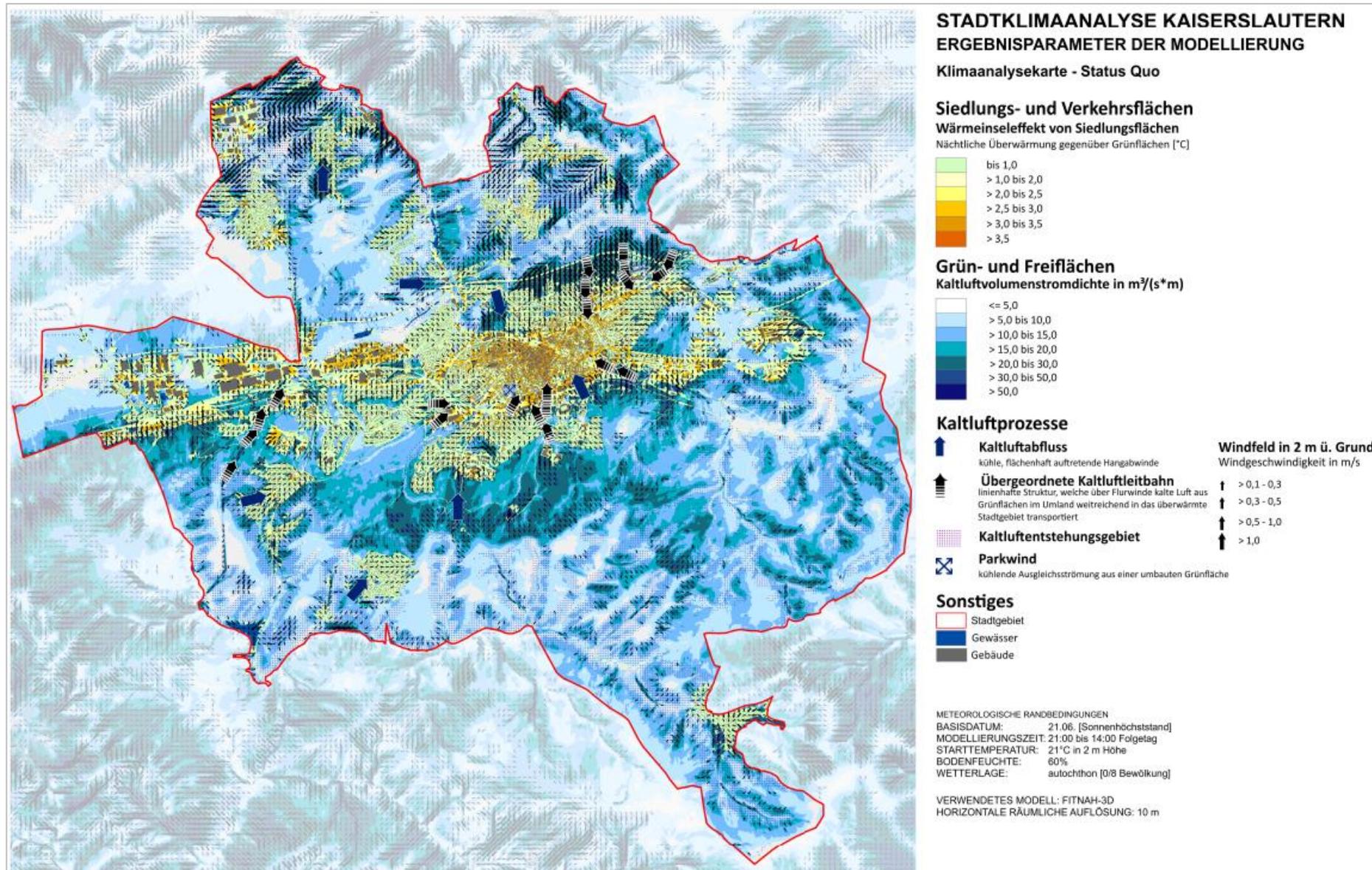
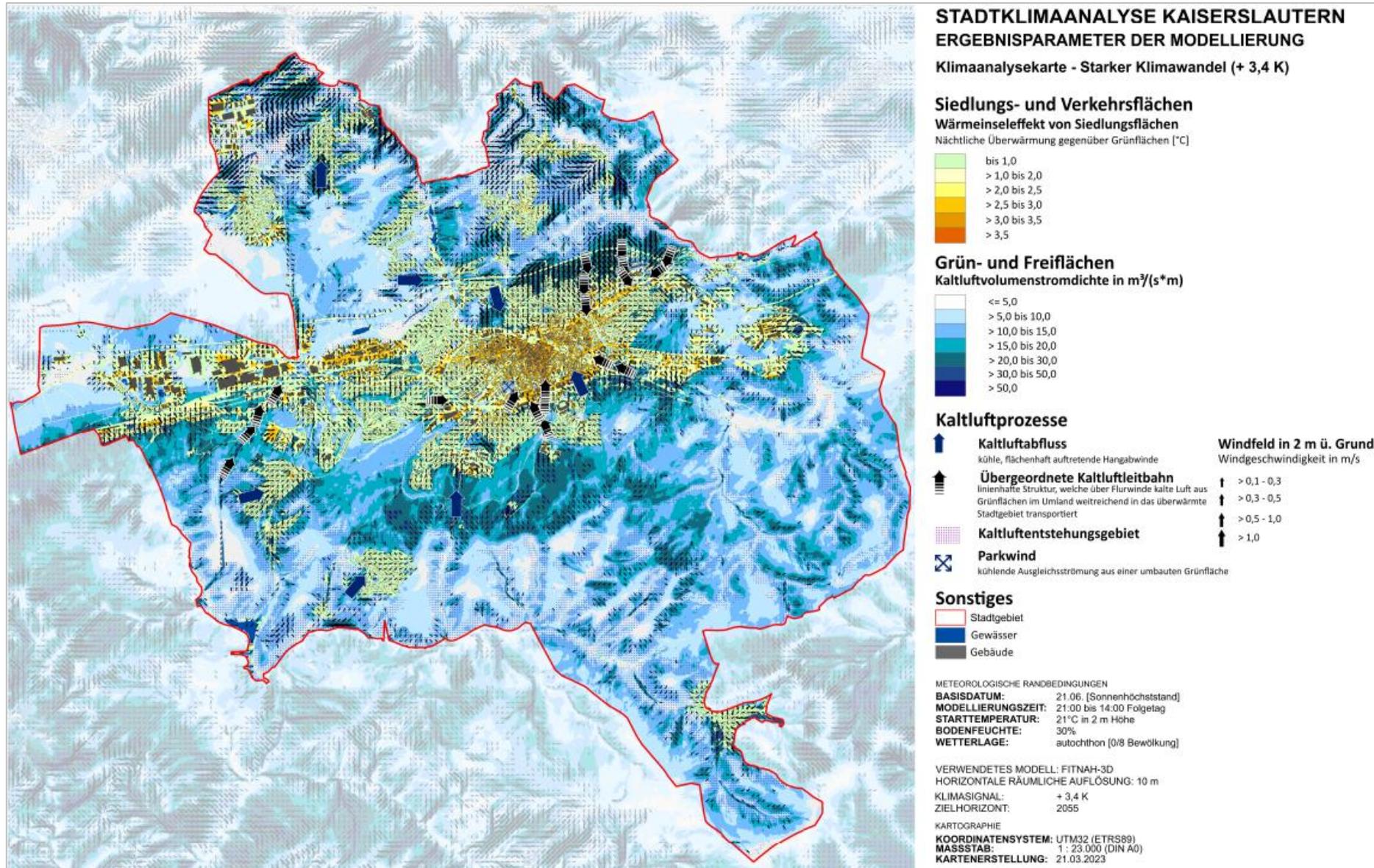


Abbildung 47: Klimaanalysekarte im Ist-Zustand.



Abbildung

48:

Klimaanalysekarte

im

Zukunftsszenario

2.



In den Karten der Zukunfts-Szenarien (wie bspw. Abbildung 48) kommt es durch die Berücksichtigung von potentiellen Entwicklungsflächen lokal zu Änderungen von Kaltluftleitbahnen bzw. -abflüssen (Vgl. Abbildung 47 und Abbildung 48). Eine endgültige Bewertung kann jedoch erst erfolgen, wenn die flächenkonkrete Umsetzung der Planungen bekannt ist.

Am Beispiel der Kaltluftleitbahn entlang der Hoheneckerstraße (in den obigen Karten zu erkennen am Südwestrand des Kernstadtbereichs) kann dies näher erläutert werden. Die von Südwesten ausgehende Kaltluftleitbahn kann sich entlang der Hoheneckerstraße erstrecken, da es begrünte Flächen entlang der Straße sowie keine unmittelbare Bebauung gibt. Durch die Berücksichtigung einer potentiellen Bebauung in den Zukunftsszenarien entfällt diese Leitbahn, da diese nicht weiter als solche fungieren kann. Dies liegt an der exemplarisch angenommenen großflächigen Bebauung, welche die nächtlichen kühlen Luftmassen thermisch anzieht und zugleich die Strömungen aufgrund der Hinderniswirkung des neuen Gebäudes zum Großteil aufhält.

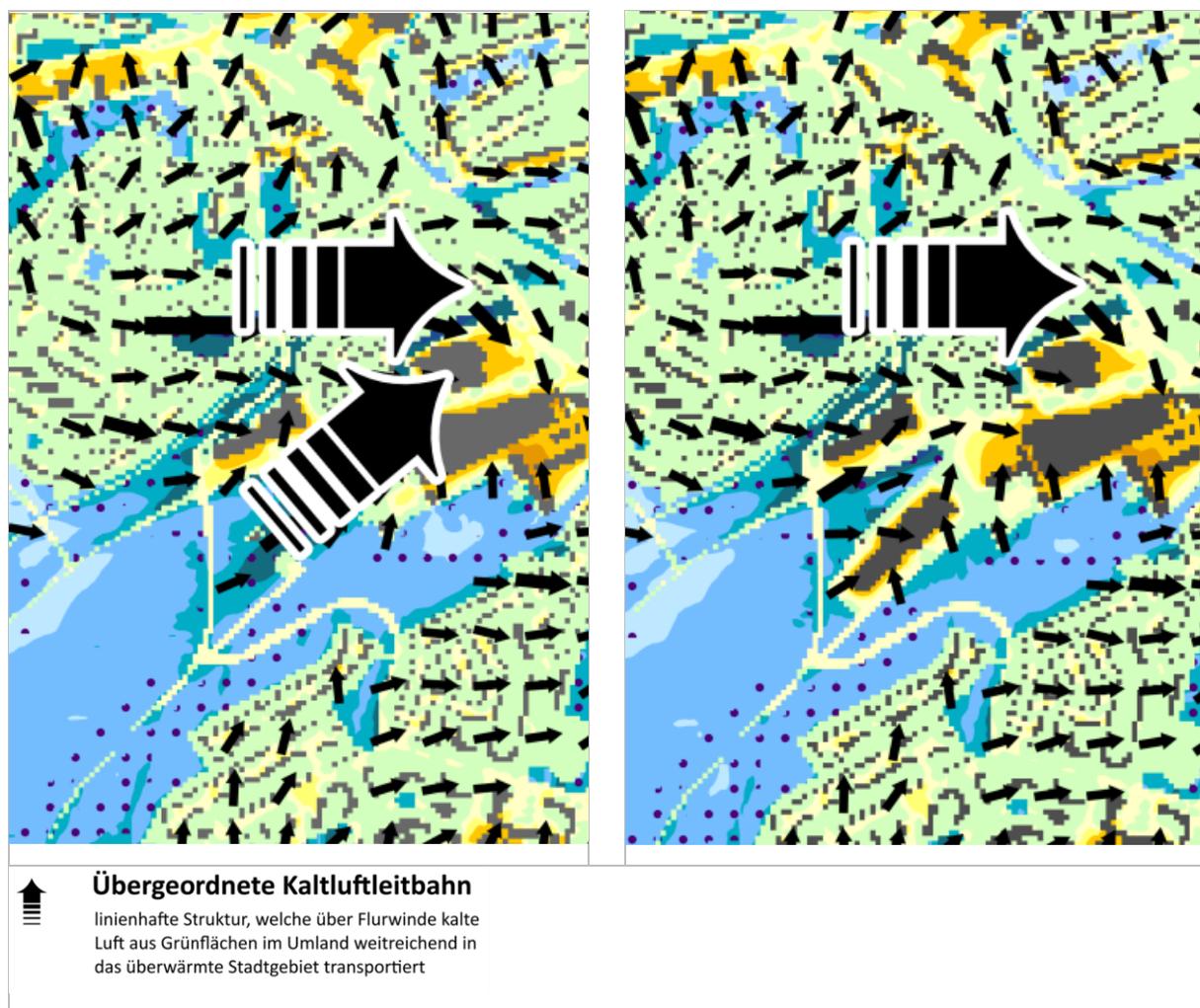


Abbildung 49: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte (links Ist-Zustand, rechts Szenario 2) zur Verdeutlichung der lokalen Unterschiede bzw. Einflussnahme von potentiellen Entwicklungsfläche im Bereich der Hoheneckerstraße.

Da beiden Klimawandel-Szenarien dieselbe Bebauung zugrunde liegt und der Klimawandel zu keinen relevanten Änderungen des Kaltlufthaushalts führt (vgl. Kap. 6.2), sind die ausgewiesenen besonderen Kaltluftprozesse in den Szenarien 1 und 2 identisch.



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 Ist- und Zukunftssituation in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, gemäß der Produktpyramide (Abbildung 10) vorgelagert sog. Bewertungskarten auszugeben. Die sechs Bewertungskarten („Nacht Ist“, „Tag Ist“, „Nacht Zukunft1“, „Tag Zukunft1“, „Nacht Zukunft2“, „Tag Zukunft2“; Vgl. hierzu Tabelle 9) 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.6.1) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadtraum 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 und
- passfähig sowohl für den gesamtstädtischen Maßstab als auch für den hochauflösenden Analyseansatz sein, also weder zu kleinteilig noch zu grob ausfallen

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene per se nicht. Mit den im städtischen ALKIS definierten und räumlich zugewiesenen Nutzungsarten existiert aber eine gute Grundlage, die durch eine gutachterliche Tätigkeit entsprechend weiterqualifiziert wurde. Die Modifikation betrifft dabei sowohl die Zusammenfassung von sehr kleinräumigen Strukturen (vorrangig im Außenbereich bzw. Ausgleichsraum) als auch die Aufteilung größerer zusammenhängender Flächen in kleinere Funktionseinheiten (vorrangig im Wirkraum). Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Klimaanalysekarten (zur Abgrenzung von Ausgleichs- und Wirkungsräumen) sowie der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen, nicht gewichteten Raummittels aus allen die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor: Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 100 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel höhere und/oder niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 50).

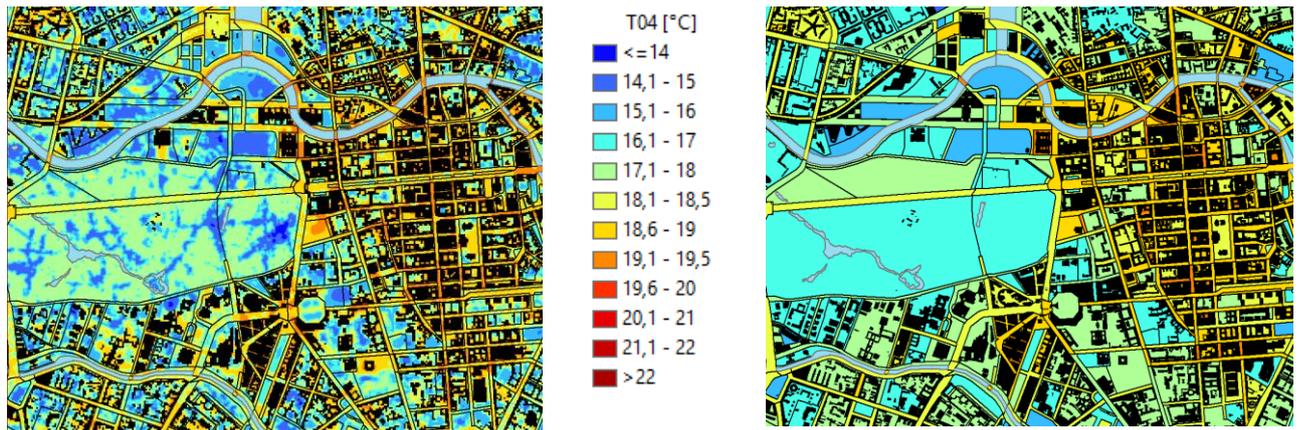


Abbildung 50: links das Ausgangsraster (Beispiel) und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie



8.3 BEWERTUNGSKARTEN

Die Modellergebnisse und die Klimaanalysekarte bilden das Prozessgeschehen in Form absoluter Werte ab – diese gelten jedoch nur für den Zustand einer autochthonen Sommerwetterlage. Die Beurteilung in den Bewertungskarten (und später auch der Planungshinweiskarte „PHK“) fußt dagegen auf relativen Unterschieden der meteorologischen Parameter (dargestellt in Kap. 6.1) zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

Dabei wurden separate Bewertungskarten für die Nacht- und Tagsituation sowie für Ist-Zustand und die Zukunftsszenarien erstellt. Die Bewertung der bioklimatischen Belastung im Wirkraum sowie der Bedeutung von Grünflächen als Ausgleichsraum erfolgte in Anlehnung an die VDI-Richtlinien 3785, Bl. 1 bzw. 3787, Bl. 1 (VDI 2008a, 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 für die Wirkraumklassen sind die PET um 14:00 Uhr für die Tagsituation sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 Uhr als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.1.5). 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 gültig sind. Tatsächlich existieren innerhalb der zu betrachtenden Strahlungswetterlage aber auch deutlich wärmere oder auch kühlere Situationen. Die Flächenbewertung muss nun den Anspruch haben, repräsentativ für die Grundgesamtheit dieser Situationen zu sein, was eine unmittelbare Bewertung auf der Basis der modellierten Absolutwerte – z.B. die Belastungsstufen an der Über- oder Unterschreitung einer Tropennacht festzumachen – fachlich verbietet.

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008a) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen auch gemessenen) Werte definiert. Bei dieser 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 S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 51).

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

Dabei ist

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

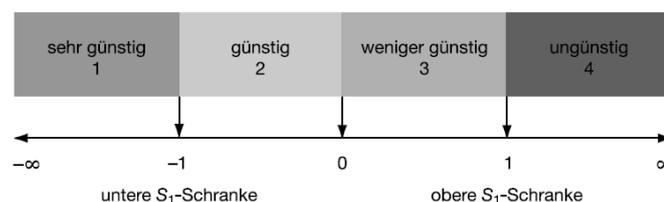


Abbildung 51: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)



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. Die Methode ist jedoch optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Sollen mehrere z.B. zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die beiden zu betrachtenden Situationen (Ist-Situation, Zukunftsszenario 1 „Mäßiger Klimawandel“ und Zukunftsszenario 2 „Starker Klimawandel“) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperaturfeldern ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden die Statistiken jeweils für die Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes und des Zukunftsszenarios berechnet, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für vier verschiedene Bewertungskarten ergaben. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für alle vier Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Kaiserslautern 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 20). 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 20: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Tageszeit und Strukturtyp

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



	4= ungünstig 5= sehr ungünstig	z-Wert >1	
--	-----------------------------------	-----------	--

8.3.2 AUSGLEICHSPAUM

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. Sowohl für den Ist-Zustand als auch die Zukunftsszenarien wurden hierbei jeweils dieselben Methodiken angewandt.

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen, Kaltluftabflüssen bzw. Parkwinden stehende Grünflächen eine sehr hohe Bedeutung, wenn sie einen unmittelbaren Siedlungsbezug aufweisen (Primärfunktion), eine hohe Bedeutung, wenn sich in deren direktem Luv befanden (Sekundärfunktion) und eine mittlere Bedeutung, wenn sie Kaltluftproduktionsflächen darstellen, die die Kaltluftleitbahnen bzw. Kaltluftabflüsse speisen (Einzugsgebiet). 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 52 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Klimafunktion:
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 12,7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (identisch in den Zukunftsszenarien) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,13 \text{ m/s}$ (identisch in den Zukunftsszenarien) *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate von $26,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ (identisch in den Zukunftsszenarien)
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen⁷

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:

⁷ Zusammenhängende Wohn-Ortsteile (ohne Einzelflächen im Innen-/Außenraum).



- 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.

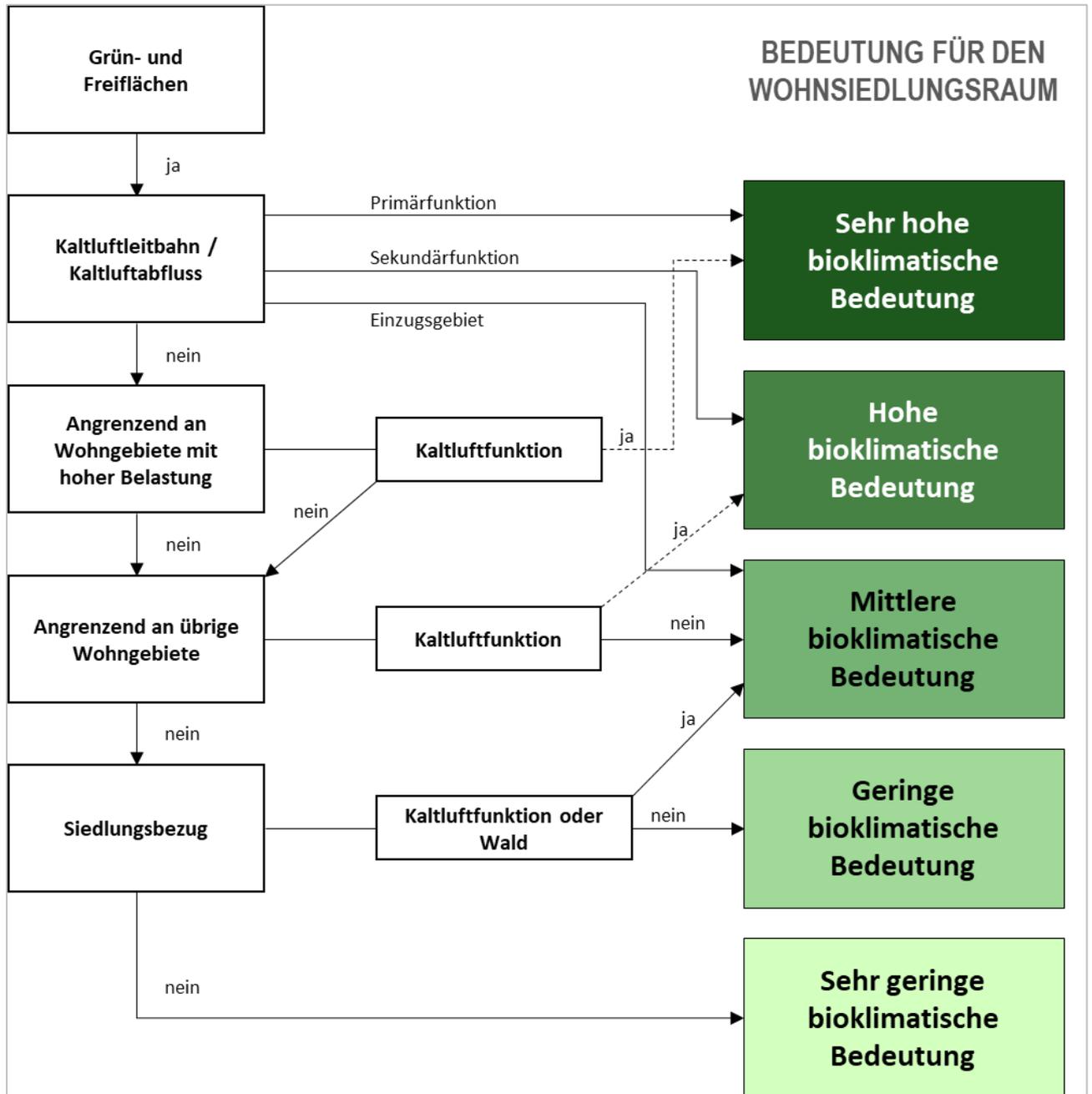


Abbildung 52: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.

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





Tabelle 21: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Betrachteter Parameter	Strukturtyp
Tagsituation 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 (Ist/Zukunft)</i> bis -0,5 > -0,5 bis ≤ 0 > 0 bis ≤ 0,5 > 0,5 bis ≤ 1 > 1	<i>PET 14:00 Uhr [°C] (Ist-Zustand) & Zukunftsszenarien)</i> bis 24,54 > 24,54 bis ≤ 27,21 > 27,21 bis ≤ 29,90 > 29,90 bis ≤ 32,58 > 32,58	Grün-/Freiflächen, Wald

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarten (Abbildung 47 und Abbildung 48) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen, -abflüsse und Parkwinde aufgetragen. Zusätzlich sind erneut Kaltluftentstehungsgebiete durch eine violette Punktschraffur dargestellt, deren Methodik jener der Klimaanalysekarten gleicht (s. Kapitel 7).

Neben diesen die Ausgleichflächen überlagernden Inhalten zu Kaltluftprozessen wird in den nächtlichen Bewertungskarten auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Zum einen zeigt der Kaltlufteinwirkungsbereich in hellblauer, rasterbasierter Schraffur an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann, zum anderen sind Wohnraumsiedlungsbereiche mit Klimafunktion (vgl. folgender Abschnitt) durch eine blaue Umrandung hervorgehoben (s. Abbildung 53).



Abbildung 53: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

Kaltlufteinwirkungsbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von 15,5 m³/(s*m) (Zukunft 1: 15,22 m³/(s*m), Zukunft 2: 15,09 m³/(s*m)) oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von 0,23 m/s (für die Zukunft identisch) erreichen oder überschreiten. Sollten mindestens 50 % einer Wohnsiedlungsblockfläche als Kaltlufteinwirkungsbereiche ausgewiesen worden sein, wird diese Blockfläche zusätzlich als „Wohnsiedlung mit Klimafunktion“ gekennzeichnet. Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.



8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN VON IST-ZUSTAND UND ZUKUNFTSSZENARIEN

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 54 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Kaiserslautern im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden.

Etwa 52 % aller Wirkräume der Stadt sind in der Bestandssituation 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 südlich und westlich der Kernstadt, wie in den Stadtteilen Fischerrück, Bännjerrück, Vogelweh, Belzappel, aber auch Teile von den Siedlungsbereichen Lämmchesberg, Uni-Wohnstadt, Betzenberg und Grübentälchen sowie ebenfalls große Bereiche der Ortschaften Dansenberg, Hohenecken, Erzhütten, Wiesenthalerhof und Erfenbach. Im Allgemeinen weisen diese Bereiche einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte am Tage bereits dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann.

Große Bereiche der weiter außen gelegenen Stadtteile Morlautern und Erlenbach und der bereits zuvor genannten Stadtteile wie Fischerrück oder Grübentälchen, aber auch Bereiche unmittelbar um die Kernstadt herum zählen zu etwa einem Drittel (29 %) 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 zwischen den Stadtteilen Fischerrück im Westen und Grübentälchen im Osten oder Gebiete im Übergangsbereich von Innenstadt und weiter außen gelegenen Stadtteilen. Beispielhaft sind hierfür die nördlich gelegenen Bereiche Morlautern und Erlenbach, wo Flächen auf diese Kategorie entfallen. Dazu kommen große Teile der Gewerbe- und Industriegebiete und Teile der Kasernen-Gelände, welche ebenfalls in diese Kategorie fallen.

Lediglich 5 % der Wohn- und Gewerbeflächen Kaiserslauterns gehören der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Darunter entfällt neben einigen zentrumsnahen Siedlungsräumen entlang der Eisenbahn- und Schneiderstraße sowie entlang der Pariser Straße, auch ein Bereich des Hauptbahnhofs. Ein weiterer Teil entfällt auf Gewerbeflächen entlang der Barbarossastraße und im Gewerbegebiet West. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt und verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Darüber hinaus stehen in unmittelbarer Umgebung oftmals nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten.

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



Neben der thermischen Situation des Wirkraums wird in den Bewertungskarten auch die klimaökologische Bedeutung der Flächen im **Ausgleichsraum** thematisiert und eingeschätzt. Dabei fand eine Ausweisung von 3 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt der Großteil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftleitbahnen, der Kaltluftabflüsse und des Parkwinds. Zusätzlich gehören einige weitere städtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an, z.B. die Grünflächen der Kleingartenanlage Buchenloch oder der Westbereich des Japanischen Gartens. Außerdem zeigen die weiter nördlich gelegenen Ortschaften Morlautern und Erlenbach ebenfalls Flächen dieser Kategorie

Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich zu 13 % innerhalb der Kaiserslauterner Stadtgrenzen wieder und befinden sich vorrangig in der nahen Peripherie o.g. Kaltluftprozesse. Weiterhin zählen hierzu beispielsweise siedlungsraumnahe Kaltluftentstehungsgebiete wie Sportplätze (z.B. Trainingsplatz auf dem Betzenberg), Kleingartenanlagen (am Kaiserberg), Grünflächen wie der Hauptfriedhof oder an den Siedlungsraum anschließende Agrar- und Waldflächen.

38 % der Ausgleichsflächen entfallen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftleitbahnen oder -abflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der 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 9 % den geringsten 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 37 % der Flächen. Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um weitläufige Waldareale mit keinem direkten Bezug zu Siedlungsflächen.

Abbildung 55 zeigt die Bewertungskarte der Nachsituation für Kaiserslautern Zukunftsszenario 2.

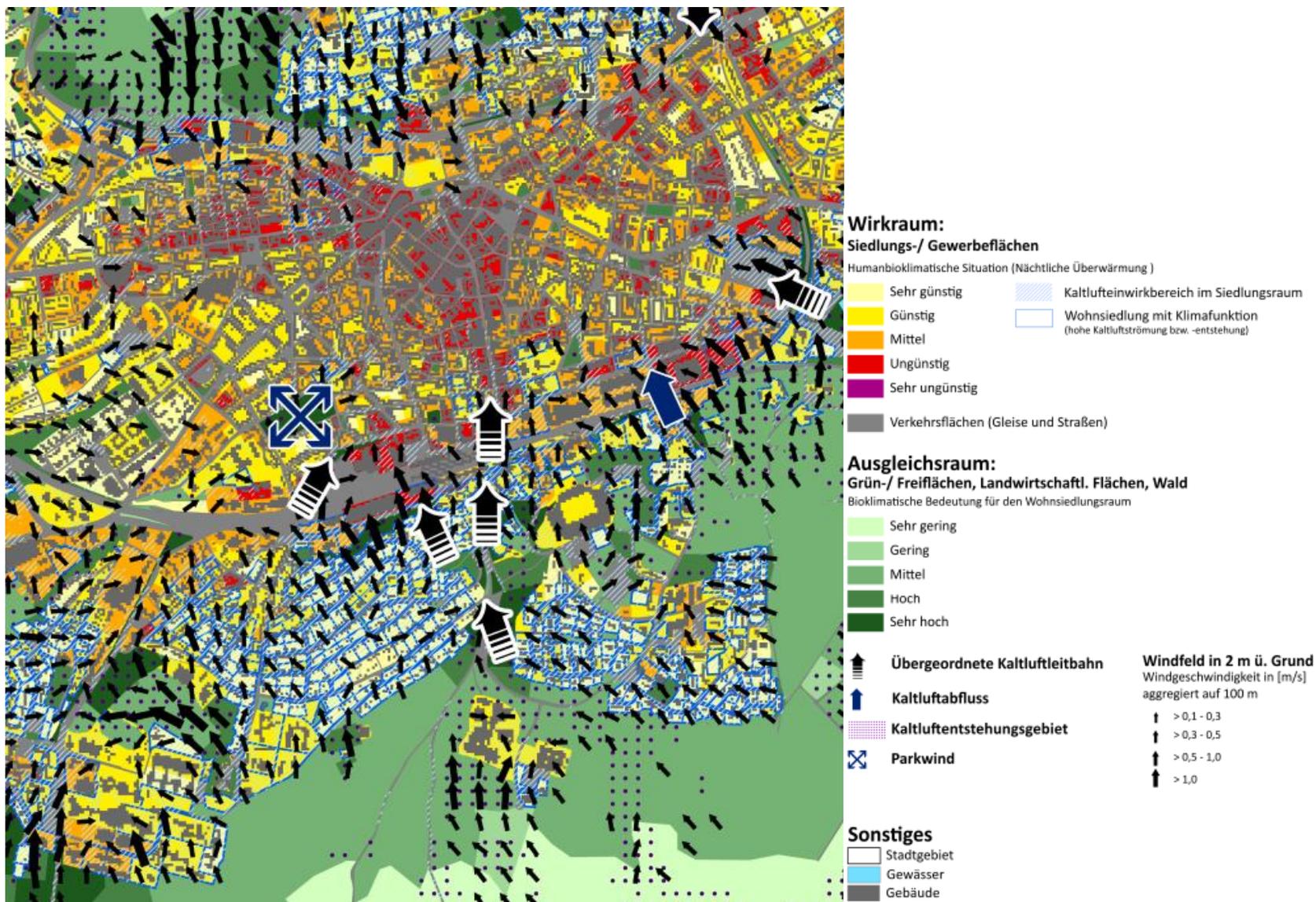


Abbildung 54: Bewertungskarte der Nachtsituation im Ist-Zustandes (2022) für einen Ausschnitt des Kaiserslauterner Stadtgebiets.

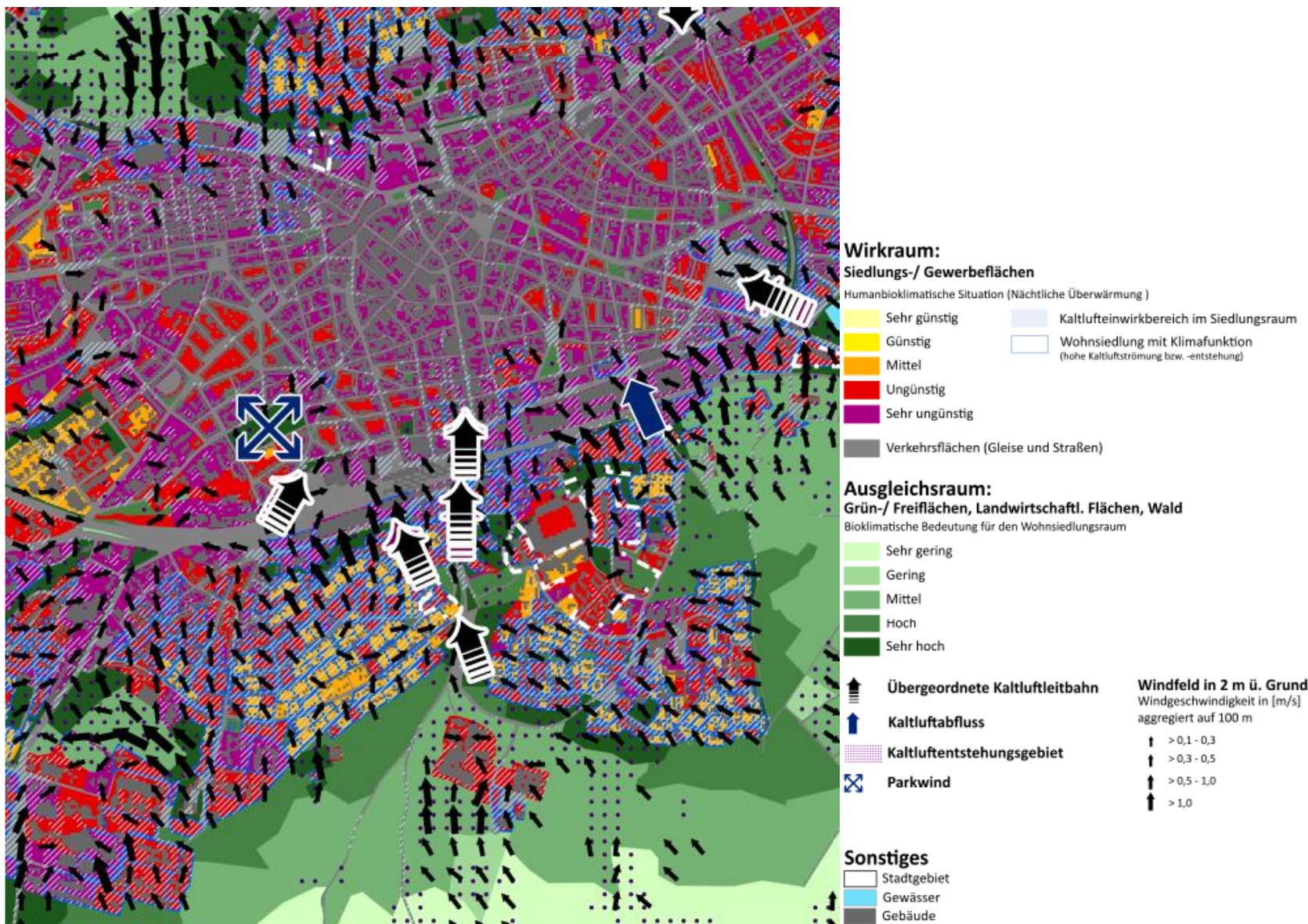


Abbildung 55: Bewertungskarte der Nachtsituation im Zukunftsszenario 2 (starker Klimawandel; Zielhorizont 2055) für einen Ausschnitt des Kaiserslauterner Stadtgebiets.



Die größten Unterschiede im Vergleich zum Ist-Zustand sind in der nächtlichen Bewertungskarte des hier betrachteten zweiten Zukunftsszenarios („starker Klimawandel“) sowohl durch das Klimawandelsignal als auch durch die modellbasierte Einarbeitung der Entwicklungs- und Siedlungsreserveflächen zu beobachten (s. Abbildung 55). Im Wirkraum ergeben sich bei der Bewertung der Siedlungs- und Gewerbeflächen, die bereits im Ist-Zustand existierten, eine deutliche Verschiebung hin zu schlechteren Bedingungen (Tabelle 22) – durch die Flächenentwicklung bis 2055 erhöht sich die Größe des bebauten Areals von ca. 2419 ha auf 2455 ha. Diese neuen Wirkraumflächen erhielten im Rahmen der nächtlichen Bewertungskarten der Zukunft nun ebenfalls eine Beurteilung. Die Bewertungen dieser Entwicklungsflächen entsprechen zumeist den angrenzenden Flächen.

Bei den Ausgleichsraumflächen zeigen sich die Änderungen hinsichtlich der prozentualen Flächenanteile beim Vergleich zwischen Ist-Zustand und Zukunftsszenarien vor allem im Bereich der „sehr hohen“ Klasse, welche in Zukunft mehr Anteile erhält. Die „mittlere“ Klasse verzeichnet hingegen leichte Abnahmen. Die übrigen Klassen bleiben größtenteils unverändert.

Tabelle 22 zeigt zusammengefasst die prozentualen Veränderungen der Bewertungsstufen in Wirk- und Ausgleichsraumflächen im Vergleich von Ist-Zustand zu den beiden Zukunftsszenarien.

Tabelle 22: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Ist-Zustand und den zwei Zukunftsszenarien.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen <i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i>	Flächenanteile	Flächenanteile	Flächenanteile
			[%] Ist-Zustand	[%] Zukunftsszenario 1	[%] Zukunftsszenario 2
Nacht	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	52	1	0
		2= günstig	29	32	0
		3= mittel	14	40	28
		4= ungünstig	5	18	44
		5= sehr ungünstig	0	9	28
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	3	12	13
		4= hoch	13	11	11
		3= mittel	38	31	29
		2= gering	9	9	10
	1= sehr gering	37	37	37	
Tag	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	23	11	7
		2= günstig	23	13	8
		3= mittel	32	22	16
		4= ungünstig	22	47	46
		5= sehr ungünstig	0	7	23
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	44	36	0
		2= günstig	25	11	0
		3= mittel	18	16	12
		4= ungünstig	13	30	9
		5= sehr ungünstig	0	7	79
	Ausgleichsraum (hu- manbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	52	6	0
		4= hoch	13	50	38
		3= mittel	7	10	23
		2= gering	7	6	7
		1= sehr gering	21	28	32



8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Kaiserslautern, die im Ist-Zustand in Abbildung 56 aufgetragen ist, werden die Wirkräume hinsichtlich ihrer thermischen Situation und Ausgleichsräume im Hinblick auf die humanbioklimatische Bedeutung bewertet. Anders als in der Nacht ist am Tage nicht das Kaltluftprozessgeschehen die bewertungssteuernde Größe, sondern die PET, die vornehmlich durch Verschattung modifiziert wird.

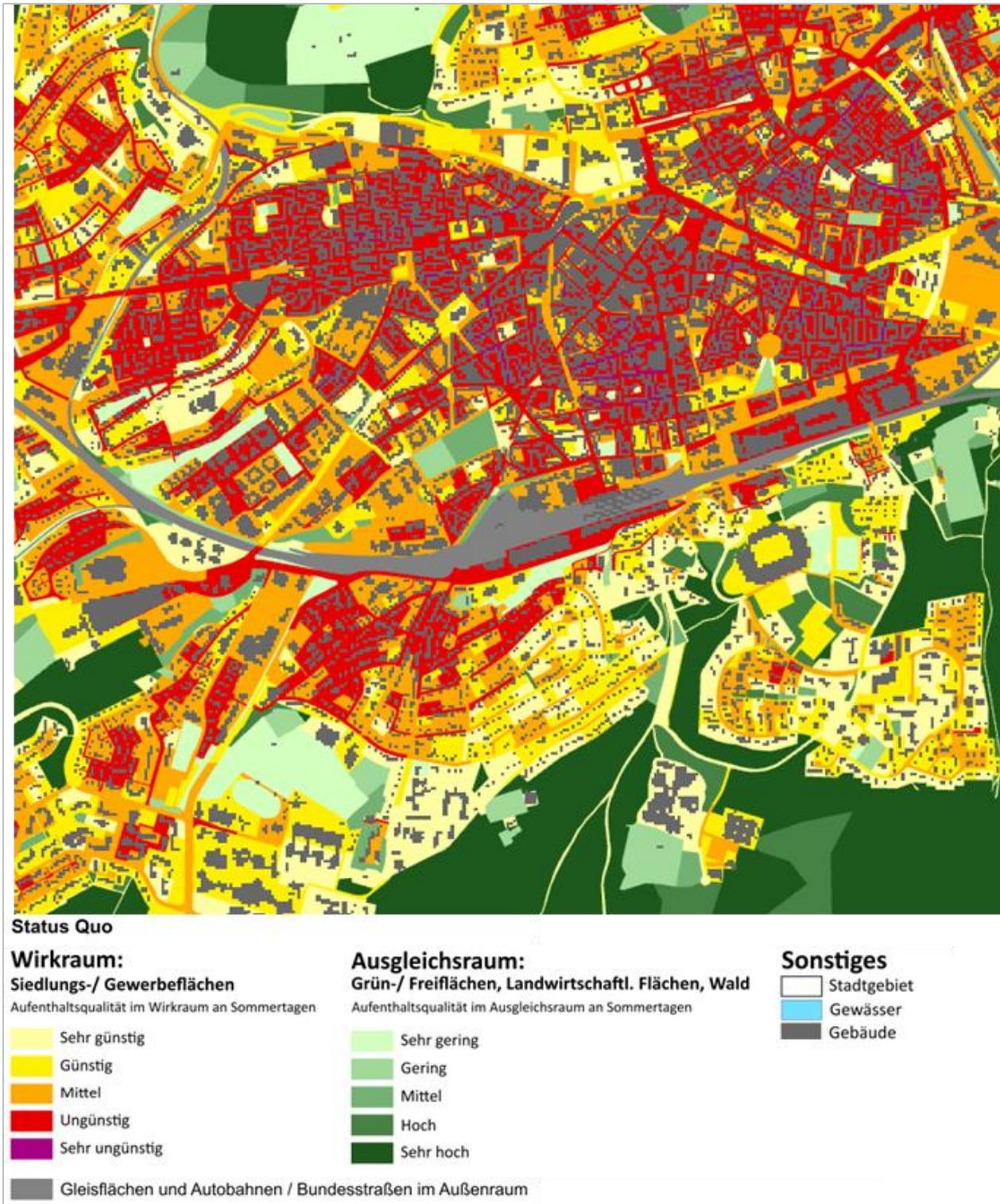


Abbildung 56: Bewertungskarte der Tagsituation im Ist-Zustandes (2022) für einen Ausschnitt des Kaiserslauterner Stadtgebiets.



In Kaiserslautern sind 23 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 44 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Vor allem die durchgrünten, zumeist waldnahen Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbebauung (z.B. Bännjerrück, Vogelweh, Betzenberg, Hohenecken, Fischerrück) 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 Kantstraße, der Bremerstraße, Teile der Donnersbergstraße, Enterswellerstraße und einige der Straßen außerhalb des Stadtgebietes, welche durch den Wald führen.

23 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Kaiserslautern wurden der Kategorie der günstigen humanklimatischen Situation zugeordnet. Diese vergleichsweise noch immer 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 Bännjerrück-Viertel, in der Uni-Wohnstadt, dem Betzenberg oder den westlich gelegenen Industriegebieten wie Einsiedlerhof und Teile des Opelareals. Bei den Verkehrsflächen weisen 25 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf, wie Teile der Altenwoogstraße, der Trippstadter Straße oder der Königsstraße.

Mit 32 % ist der größte Anteil der Wohn- und Gewerbeflächen heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Bei den Verkehrsflächen und öffentlichen Flächen sind es 18 %. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten. Obwohl die Grünausstattung hier oftmals gering ausfällt, erzeugt die enge Gassenbebauung verschattete Straßenzüge oder Wohnflächenanteile, die die PET absenken und zu einer immerhin mittleren Einstufung führen. Dagegen finden sich auch im Grübentälchen oder in der Uni-Wohnstadt, sowie in Hohenecken und Dansenberg viele Wirkraumflächen mit mittlerer Belastung, bei niedrigerer Bebauung und etwas höherem verschattenden Grünanteil. Einige der Gewerbeareale wie das Gewerbegebiet Nordost I, das Gewerbegebiet West sowie das Opelgelände fallen mit einem 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 Kaiserslauterner Wohn- und Gewerbeflächen und 13 % 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 Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen weiter außen gelegenen Stadtteile (z.B. Hohenecken, Siegelbach, Erfenbach, Morlautern, Erlenbach). Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 10 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei Teilen der großen Industrie- und Gewerbearealen (bspw. Industriegebiet Nord I) sowie Teilen der Kasernengelände am Stadtrand ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen - ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören z.B. die Pariser Straße, die Fischerstraße/Splitterstraße oder der Großteil der Innenstadt-Straßenbereiche, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr mit sich bringen.



Im Status Quo entfallen keine Flächen auf die Kategorie „sehr ungünstige“ thermischen Situation. Anders zeigt sich der Vergleich mit dem Szenario 2 „starker Klimawandel“. Ein Blick in Tabelle 22 zeigt, dass 23 % der Wohn- und Gewerbeflächen und 79 % der Verkehrsflächen in diese Kategorie fallen. Es kommt insgesamt im Wirkraumbereich bei den Zukunftsszenarien, verglichen zum Ist-Zustand, zu einer Verschiebung der Flächenanteile hin zu den ungünstigeren Klassen. So sind die beiden Klassen „sehr günstig“ und „günstig“ im Zukunftsszenario 2 für den Wirkraum 2 nicht belegt, im Ist-Zustand hingegen besitzen diese beiden Klassen zusammen betrachtet noch einen Anteil von knapp 70 %. Zurückzuführen ist dies auf die Temperaturerhöhungen in den Zukunftsszenarien, welche für deutlich heißere und somit ungünstigere Bedingungen, insbesondere in den versiegelten Stadtbereichen, allen voran den Innenstadtbereichen, sorgen.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltlufthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher Aufenthaltsqualität (52,0 %) 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, welche flächenmäßig über die Hälfte des Stadtgebietes ausmachen und die meisten Siedlungsbereiche am Stadtrand wie einen Saum umschließen. Innenstadtnah gibt es im Bereich des Kaiserbergs 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. Auch im Siedlungsraum sind solche Flächen weiterhin zu finden (z.B. Hauptfriedhof, Volkspark, Bereich um das Fritz-Walter-Stadion herum), die ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume wirken.

Ausgleichsräume mittlerer Aufenthaltsqualität (7 % 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 (7 %) oder sehr geringer (21 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen nördlich und südlich der Kaiserslauterner Kernstadt ausmachen.

Die Bewertungskarte für den Tag im Szenario 2 „starker Klimawandel“ ist in Abbildung 57 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass hier das Klimawandelsignal, wie auch in den Wirkraumflächen, deutliche Auswirkungen auf die Klassifizierung hat, was auch an den Prozentsätzen in Tabelle 22 erkennbar wird. So gibt es im Zukunftsszenario 2 keine Flächen in der „sehr hohen“ Kategorie, wo es im Ist-Zustand noch über die Hälfte der Flächen waren. Eine Zunahme der Flächenanteile im Zukunftsszenario 2, gegenüber dem Ist-Zustand, erfahren die Klassen „hoch“ und „mittel“ mit jeweils dem Faktor 3. Auch die Klasse „sehr gering“ legt um ca. 10 Prozentpunkte zu.



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

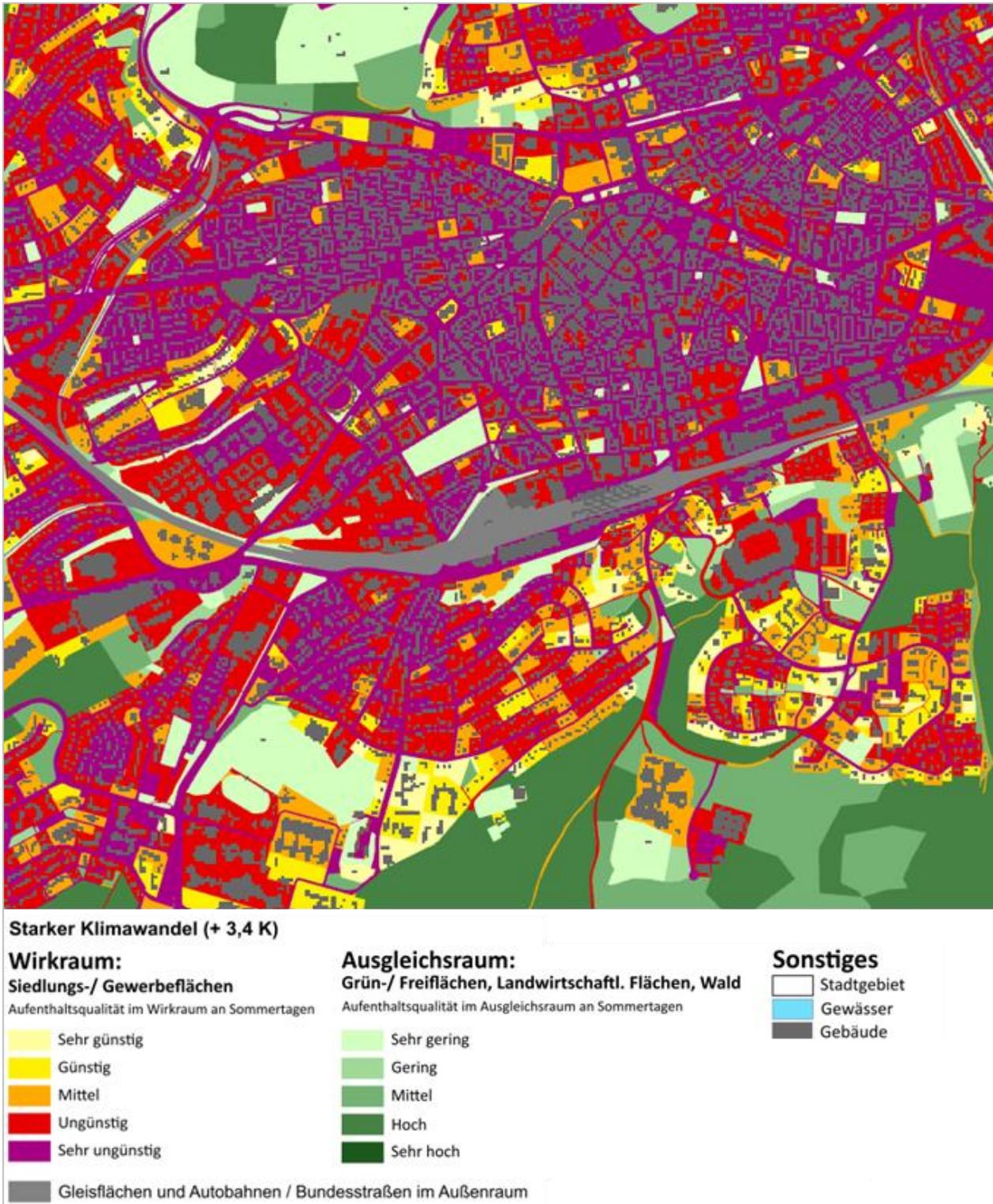


Abbildung 57: Bewertungskarte der Tagsituation im Zukunftsszenario 2 (Starker Klimawandel; Zielhorizont 2055) für einen Ausschnitt des Kaiserslauterner Stadtgebiets.



8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

In der gemeinsamen *Planungshinweiskarte Stadtklima* wurden die Ergebnisse der sechs Planungshinweiskarten (PHK)-Bewertungskarten zusammengefasst. Die Karte macht auf den ersten Blick ersichtlich, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben, wo in Kaiserslautern Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden müssen und wie sich die berücksichtigten Nutzungsänderungen der integrierten potentiellen Entwicklungsflächen in das Stadtgebiet einfügen (Abbildung 58). Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für die weitere Umsetzung des bestehenden Klimaanpassungskonzepts der Stadt Kaiserslautern (Geo-Net, Dahlem, MUST, 2019) dar.

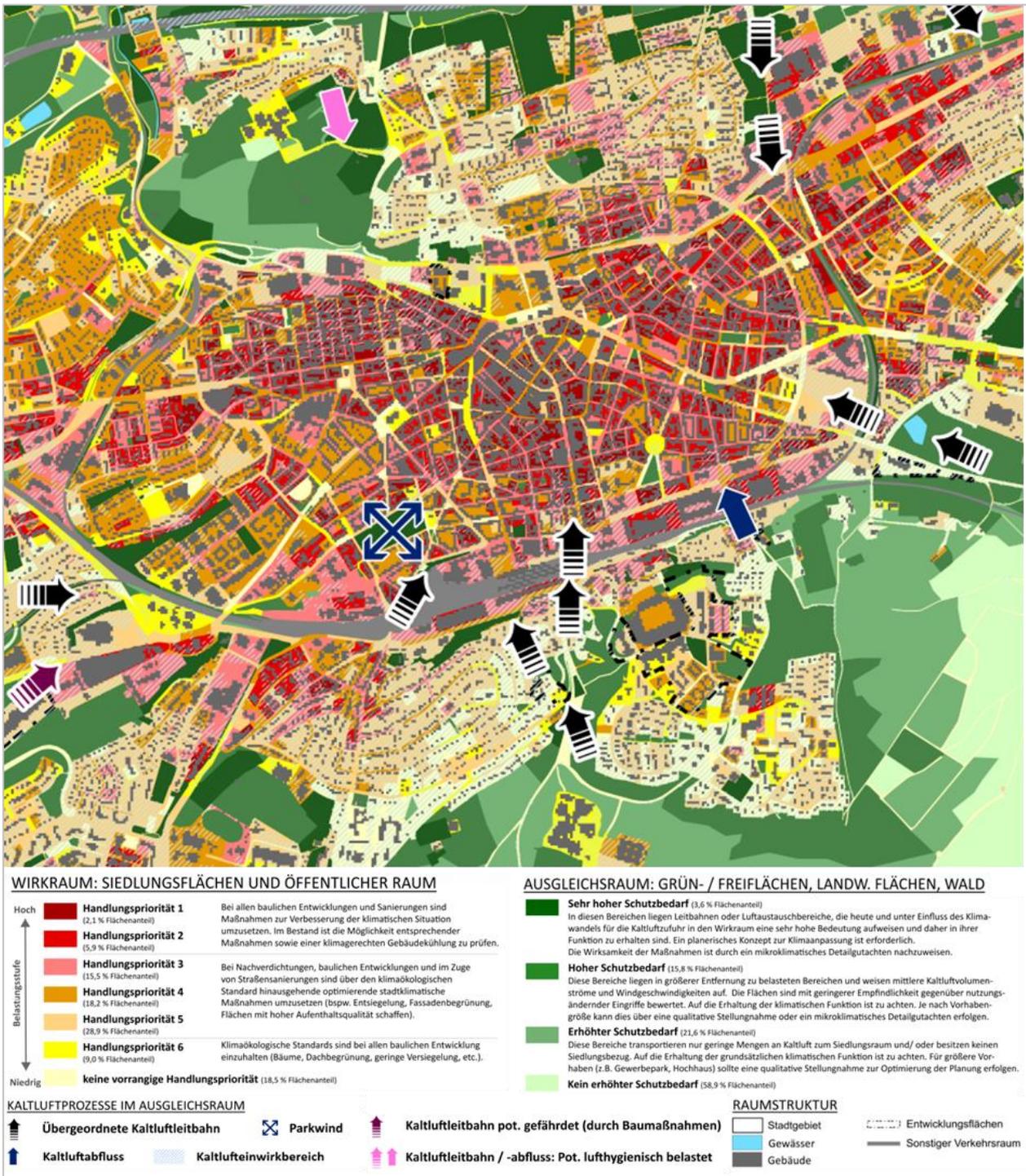


Abbildung 58: Planungshinweiskarte Stadtklima in einem Ausschnitt der Stadt Kaiserslautern (verkürzte Legende)



8.4.1 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). Somit wurde die 5-stufige Bewertungsklassifikation aus den Bewertungskarten aufrechterhalten.

Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und auf die Klimafunktion der Siedlungsflächen berücksichtigt. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute (Status quo) oder dem als *base case* anzusehendem Szenario „Mäßiger Klimawandel“ die höchste bioklimatische Belastung und keine Klimafunktion aufweisen. Übernehmen die am höchsten belasteten Flächen dagegen eine Klimafunktion, fallen sie in die zweite Handlungspriorität. In der Klasse „Handlungspriorität 2“ liegen ebenfalls die Siedlungsflächen, die unter dem Einfluss des Szenarios Starker Klimawandel die höchste Belastung und keine Klimafunktion verzeichnen. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 23 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist.

Tabelle 23: 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 oder P1 = 5 & keine KLF	2,1 %
Handlungspriorität 2	IST oder P1 = Höchste Belastung & KLF ODER P2 = Höchste Belastung & keine KLF	5,9 %
Handlungspriorität 3	IST oder P1 = Sehr hohe Belastung & keine KLF ODER P2 = Höchste Belastung & KLF	15,5 %
Handlungspriorität 4	IST oder P1 = Sehr hohe Belastung & KLF ODER P2 = Sehr hohe Belastung & keine KLF	18,2 %
Handlungspriorität 5	IST oder P1 = Hohe Belastung & keine KLF ODER P2 = Sehr hohe Belastung und KLF	28,9 %
Handlungspriorität 6	IST oder P1 = Hohe Belastung & KLF ODER P2 = Hohe Belastung & keine KLF	9,0 %
Keine vorrangige Handlungspriorität	Übrige Flächen	18,6 %

IST = Status quo, P1 bzw. P2 = Szenario Mäßiger bzw. Starker Klimawandel 2055, 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 24 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen.

Tabelle 24: 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 – 5	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).
Handlungspriorität 6 bzw. keine vorrangige Handlungspriorität	Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Dachbegrünung, geringe Versiegelung, etc.).

In Flächen der fünf höchsten Handlungsprioritäten, die in Kaiserslautern 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 ist in den Flächen der beiden höchsten Handlungsprioritäten (ca. 8 % Flächenanteil) bei *allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Situation umzusetzen und zu prüfen, ob* im Bestand die Möglichkeiten zur, bevorzugt klimagerechten, Gebäudekühlung bestehen, um das Innenraumklima in den Belastungsreichen zu verbessern. In ca. 27 % des Kaiserslauterner Siedlungsraums besteht eine geringe oder keine vorrangige stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung gewisser klimaökologische 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 Kaltlufteinwirkbereiche 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 Kaltluftfunktion der Flächen zu beachten ist (Grünflächen erhalten, Gebäudestellung beachten, etc.).



8.4.2 STADTKLIMATISCHE SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSRAUM

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche 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, die im Status quo die höchste stadtklimatische Bedeutung aufweisen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen. Zusätzlich erhalten auch Flächen, die unter Einfluss der Klimawandel-Szenarien die höchste stadtklimatische Bedeutung erlangen, den höchsten Schutzbedarf (Tabelle 25). Die Abstufung des Schutzbedarfs ist auf den Siedlungsraum bezogen, sodass auf siedlungsfernen Flächen, die keine relevanten stadtklimatischen Funktionen aufweisen kein besonderer stadtklimatischer Schutzbedarf gesehen wird (58,9 % der Flächen im Ausgleichsraum in Kaiserslautern). Dieser Anteil ist verhältnismäßig hoch, was daran liegt, dass über die Hälfte des Stadtgebietes Waldflächen ausmachen. Dennoch gilt es auch diese Flächen im besten Fall zu erhalten. Stadtklimatische Hinweise zu den Bewertungsklassen sind in Tabelle 26 enthalten.

Tabelle 25: Methodische Herleitung des stadtklimatischen Schutzbedarf und der Anteil an den Flächen des Ausgleichsraums

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Sehr hoher Schutzbedarf	IST oder P1 oder P2 = Höchste Bedeutung	3,6 %
Hoher Schutzbedarf	IST oder P1 oder P2 = Sehr hohe Bedeutung	15,8 %
Erhöhter Schutzbedarf	IST oder P1 oder P2 = Hohe Bedeutung	21,6 %
Kein erhöhter Schutzbedarf	Übrige Flächen	58,9 %

IST = Status quo, P1 bzw. P2 = Szenario Schwacher bzw. Starker Klimawandel



Tabelle 26: Allgemeine stadtklimatische Planungshinweise zum Schutzbedarf im Ausgleichsraum

Bewertung im Ausgleichsraum	Stadtklimatische Planungshinweise
Sehr hoher Schutzbedarf	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 kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
Hoher Schutzbedarf	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 kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
Erhöhter Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die jeweilige stadtklimatische Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
Keine besondere stadtklimatische Funktion	Die Flächen übernehmen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion (etwa als Park oder Kaltluftproduktionsfläche). Waldflächen können als Rückzugsorte an heißen Tagen fungieren.

Im Ergebnis dient die Planungshinweiskarte Stadtklima 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 (Wo sind Maßnahmen zur Anpassung nötig? Wo sind bei geplanten Vorhaben stadtklimatische Belange besonders zu berücksichtigen?) werden. 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 Kaltfluthaushalt und/oder als Rückzugsorte an heißen Tagen von Bedeutung?).



8.5 VERGLEICH MIT DER STADTKLIMAANALYSE 2012

Der vorliegenden Untersuchung sind die Stadtklimaanalyse 2009 und deren Fortschreibung, die Stadtklimaanalyse 2012, vorausgegangen. Innerhalb der knapp 10 Jahre, welche zwischen der letzten Stadtklimaanalyse (2012) und der vorliegenden Aktualisierung der Klimaanalyse liegen, hat sich nicht nur die Stadtstruktur entwickelt, sondern auch die Methodik sowie das verwendete Modell. Vor diesem Hintergrund wird nachfolgend auf die wesentlichen Änderungen zwischen den beiden Klimaanalysen eingegangen.

Angefangen bei den zugrunde liegenden Geodaten, ist anzumerken, dass Strömungshindernisse wie Lärmschutzwände bspw. in das Modell eingepflegt werden können, was bei der vorausgegangenen Analyse nicht der Fall war. Dadurch ergeben sich, zusammen mit der feineren Rasterweite von 10 m x 10 m anstatt von 20 m x 20 m (2012), in den Ergebnissen detailliertere Aussagen zu dem Strömungsgeschehen sowie den klimatischen Einzelparametern. Zudem wurden die Nutzungsklassen, welche dem Modellgebiet zugrunde liegen, im Zuge der Fortentwicklung des FITNAH-3D-Modells überholt.

Weiterhin wurden in der aktuellen Analyse neben der Ist-Situation noch weitere Szenarien (s. Kap. 5.1.2), basierend auf regionalen Klimamodellen der EURO-CORDEX Initiative, modelliert. Auf dieser Basis können die Auswirkungen von einem Temperaturanstieg und reduzierter Bodenfeuchte im gesamten Stadtgebiet modelliert und aufgezeigt werden. Dies war in den vorangegangenen Analysen nicht der Fall.

Zudem wurden in den sog. „Zukunftsszenarien“ potentielle Flächen der Stadtentwicklung berücksichtigt. Diese lokalen Nutzungsänderungen und deren klimatischen Auswirkungen auf das nahe Umfeld werden in den Ergebniskarten ersichtlich. Anstatt der Klimafunktionskarte wurde unter Berücksichtigung der VDI 3787 Bl. 1 (2015) für jedes der drei Szenarien eine Klimaanalysekarte (s. Kap. 7) erstellt. Diese ähnelt in Aufbau und Inhalt stark der Klimafunktionskarte aus den vorangegangenen Analysen und gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen. Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt.

Die Planungshinweiskarte aus 2012, welche lediglich eine Flächenkulisse und den Ist-Zustand beschreibt, setzt sich in der vorliegenden Analyse aus den sechs Bewertungskarten (s. Kap. 8.3) zusammen. Für jedes der drei Szenarien gibt es eine Bewertung der Tagsituation und der Nachtsituation. Hintergrund ist die detaillierte Berücksichtigung von potentiellen Stadtentwicklungsflächen sowie des modifizierten Temperatur- und Trockenheitssignals vor dem Hintergrund des Klimawandels. Die Planungshinweiskarte hat zum Ziel abzubilden, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben, wo in Kaiserslautern Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden müssen und wie sich die berücksichtigten Nutzungsänderungen der integrierten potentiellen Entwicklungsflächen in das Stadtgebiet einfügen. Sie dient als zentrales Planungselement und nichts zuletzt als (aktualisierte) Grundlage des städtischen Klimaschutzkonzeptes.



8.6 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 Kaiserslautern 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 stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 27 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 Kaiserslauterner 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). Insbesondere die großflächigen Waldgebiete Kaiserslauterns stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ 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 Deposi-



tion 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 umgebenen Luft, desto stärker ist die kühlende Wirkung. Dabei erzielt bewegtes Gewässer einen stärkeren Kühleffekt als stehendes, da durch Bewegung die verdunstungsfähige Oberfläche vergrößert, und der Austausch mit den tieferen, kühleren Wasserschichten verstärkt wird. Durch ihre geringe Rauigkeit wirken Gewässer überdies teils als hindernisarme Ventilationsbahnen, über die v.a. bei allochthonen⁸ Wetterlagen der Transport von Kalt- und Frischluft stattfindet. Obwohl während längerer Hitzeperioden in der Nacht Gewässer durch deren Trägheit phasenweise wärmer sein können als umgebener Siedlungsraum, überwiegen insgesamt die genannten Vorteile. Daher ist der Schutz bestehender Gewässer, deren Erweiterung (z.B. über die Offenlegung eingehauster Kanäle und Flussläufe) und die Neuerschließung von Gewässern stets zu berücksichtigen (→ M09: Offene, bewegte Wasserflächen schützen, erweitern und anlegen). Diese Maßnahme hat enge Synergien zur Regenwasserspeicherung und zur Etablierung von Bewässerungssystemen (→ M10), wo etwa durch das Anlegen von Regenwasserteichen, aber auch die Etablierung von Versickerungsmulden auf Grünflächen ebenfalls verdunstungsfähige Strukturen entstehen können, die zum humanbioklimatischen Komfort am Tage beitragen und durch ausgeklügelte Bewässerungssysteme den Schutz vorhandener Grünräume sicherstellen.

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



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 Hitzeertrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeertrag 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. 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 27: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Kaiserslautern.

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

01 Innen-/Hinterhofbegrünung	Kurzerläuterung
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit
Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts ▪ Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zum Niederschlagswassermanagement und zur Biodiversität 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Innen- und Hinterhöfe



Bild: Grüner Innenhof in München (Quelle: © Jan Weber-Ebnet)



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

Bild: Sheridan Park (Quelle: © Pascal Cormont)

THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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

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



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

Bild: Theodor-Heuss-Platz (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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

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



Bild: Verlängerung Linie 3, Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)

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

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



Bild: Königsplatz in Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Kurzerläuterung	
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftproduktion tagsüber und nachts Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und dadurch Synergien zur Biodiversität 		<ul style="list-style-type: none"> Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen) Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Grün- und Freiflächen Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze 	
<p>Bild: Kräutergarten im Park am Roten Tor in Augsburg (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)</p>			
08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	Kurzerläuterung	
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Bedeutung für den städtischen Kaltlufthaushalt, da durch Kaltluftproduktion und -transport die Abkühlung benachbarter Siedlungsbereiche unterstützt wird Niederschlagsrückhalt und Naturraumschaffung und damit Synergien zu Erholung, Biodiversität und Niederschlagswassermanagement 		<ul style="list-style-type: none"> Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten) Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten) 	
<p>Bild: Schlosspark Charlottenburg in Berlin (Quelle: © Mirian Lübbecke)</p>			



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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

Bild: Schwalllech Am Schwall in Augsburg (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)

Bild: Regenwasserteich am Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: © Miriam Lübbecke)



THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>11</p> <p>(Temporäre) Saisonale klima-angepasste Umgestaltung öffentlicher Räume</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 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)
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung tagsüber und nachts durch Verschattung, Verdunstung und lokale Kaltluftentstehung ▪ Gesellschaftliche Etablierung des Themas Klima und Dialogmöglichkeit mit den Anwohnern 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Plätze, Brachflächen (auch als Übergangslösung bis langfristige Flächenentwicklung bzw. -entsiegelung erfolgt)



Bild: Stiftsplatz in Bonn (Quelle: © Bundesstadt Bonn)

MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

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

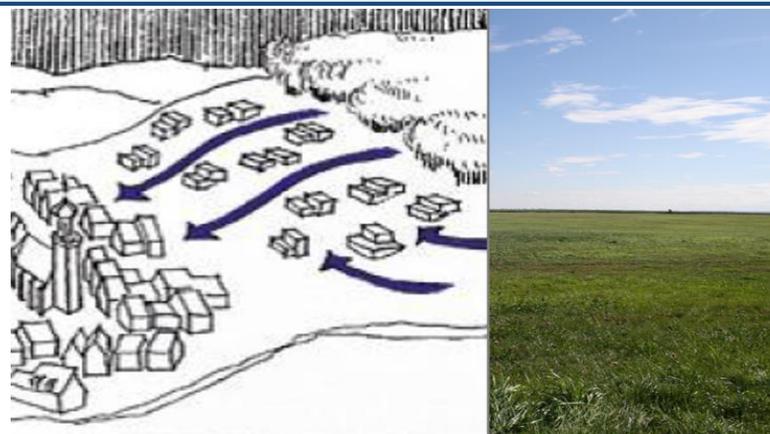


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)



VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG		
13	Optimierung der Gebäudetypologie und -stellung für kleinskaligen Luftaustausch	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Gebäudeanordnung parallel oder geöffnet zu anliegenden Grün- und Parkanlagen, die insb. in Augsburg oftmals Parkwinde induzieren Durchfahrten oder -gänge und allgemein wenig überbaute Fläche halten das kleinskalige Strömungsge-schehen auch für nahe Bestandsquartiere aufrecht
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Schutz kleinerer, innerstädtischer Luftaus-tauschsysteme Synergie zum Thermischen Wohlbefinden: Verschattung anliegender Straßen und Plätze durch durchdachte Baukörperstellung 		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Neubau im Umfeld bestehender Grünflächen oder Parks
 <p>Bild: Mit dem Schindlerpark vernetzter Innenhof. (Quelle: Fachplanung Hitzeminderung. Stadt Zürich (Hrsg.). Zürich, 2020.)</p>		
14	Entdichtung (Rückbau)	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> Rückbau von Gebäuden verringert die Bebauungs-dichte und das Bauvolumen
Wirkung <ul style="list-style-type: none"> Reduktion der Wärmebelastung insb. nachts Verbesserung der Durchlüftung Synergien zum Niederschlagswasserma-nagement 		Räumliche Umsetzung <ul style="list-style-type: none"> Gebäude(-teile), z.B. in Blockinnenhöfen Garagen Lagerhallen ggf. Industrie- und Gewerbebrachen Bahnanlagen
 <p>Bild: Symbolbild Rückbau (Quelle: ©Josephine Förster, GEO-NET)</p>		



VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

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



Bild: Rudoph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: © Dominika Leßmann, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

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



Bild: Dachgarten Diakonissenkrankenhaus Augsburg (Quelle: © Evangelische Diakonissenanstalt)



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

17	Fassadenbegrünung	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Boden- oder systemgebundene Fassadenbegrünung (Bevorzugung heimischer bzw. bienenfreundlicher Pflanzen)
-----------	--------------------------	--

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas und des unmittelbar angrenzenden Außenraumklimas -> Steigerung der Aufenthaltsqualität ▪ Durch Naturraum an der Fassade entstehen Synergien zur Biodiversität sowie zu Lärm- und Gebäudeschutz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand; soweit rechtlich zugelassen)



Bild: Fassadenbegrünung Fuggerei Augsburg (Quelle: © Sebastian Köhler, STPLA)

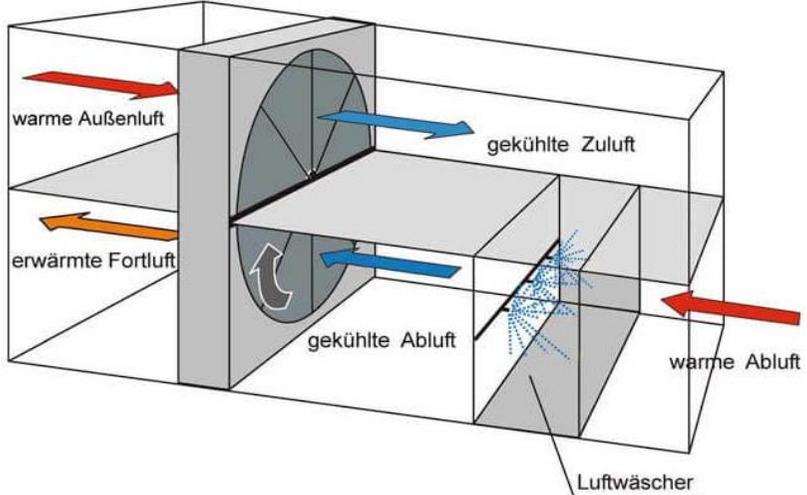
18	Verschattung von Gebäuden durch Bäume oder bautechnische Maßnahmen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fassadenbegrünung, Bäume, Balkongestaltung, benachbarte Gebäude, bautechnische Maßnahmen wie außen liegende Sonnenschutzelemente (Jalousien, Markisen, etc.), reflektierendes Sonnenschutzglas bzw. -folie
-----------	---	---

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduktion der Wärmebelastung durch Verschattung und Verdunstung (bei vorhandener Vegetation) tagsüber und nachts - > Erhöhung der Aufenthaltsqualität ▪ Verbesserung des Innenraumklimas ▪ Synergien zum Klimaschutz 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Neubau und Bestand)



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



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM			
19	Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Dämmung von Gebäuden, helle Farbgebung (Erhöhung des Albedowertes), geeignete Raumlüftung, Nutzung von Prozessabwärme 	 <p>Bild: Symbolbild Energetische Sanierung (Quelle: © ginasanders/123RF.com)</p>
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ in erster Linie Klimaschutzmaßnahme durch Reduktion des Energiebedarfs ▪ Verbesserung des Innenraumklimas tagsüber 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude (Bestand) 	
20	Technische Gebäudekühlung	Kurzerläuterung <ul style="list-style-type: none"> ▪ Möglichst ressourcenschonende Lösung ▪ Adiabate Abluftkühlung, in der Regenwasser genutzt wird ▪ Erdkältenutzung ▪ Adsorptionskältemaschinen, die durch solare Energie oder Abwärme angetrieben werden 	 <p>Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/)</p>
Wirkung		Räumliche Umsetzung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung 		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gebäude, in denen passive Maßnahmen nicht ausreichend angewendet werden können 	



REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

21	Anpassung des Raumnutzungskonzeptes	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung der Gebäudeausrichtung und der Nutzung von Innenräumen, d.h. sensible Räume nicht nach Süden ausrichten (z.B. Schlaf-, Arbeits- oder von Risikogruppen genutzte Zimmer, z.B. im Seniorenzentrum)

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



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



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

Kernelement des Stadtklimamanagementsystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der über 20.000 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 Sachdaten (**Abbildung 59**).

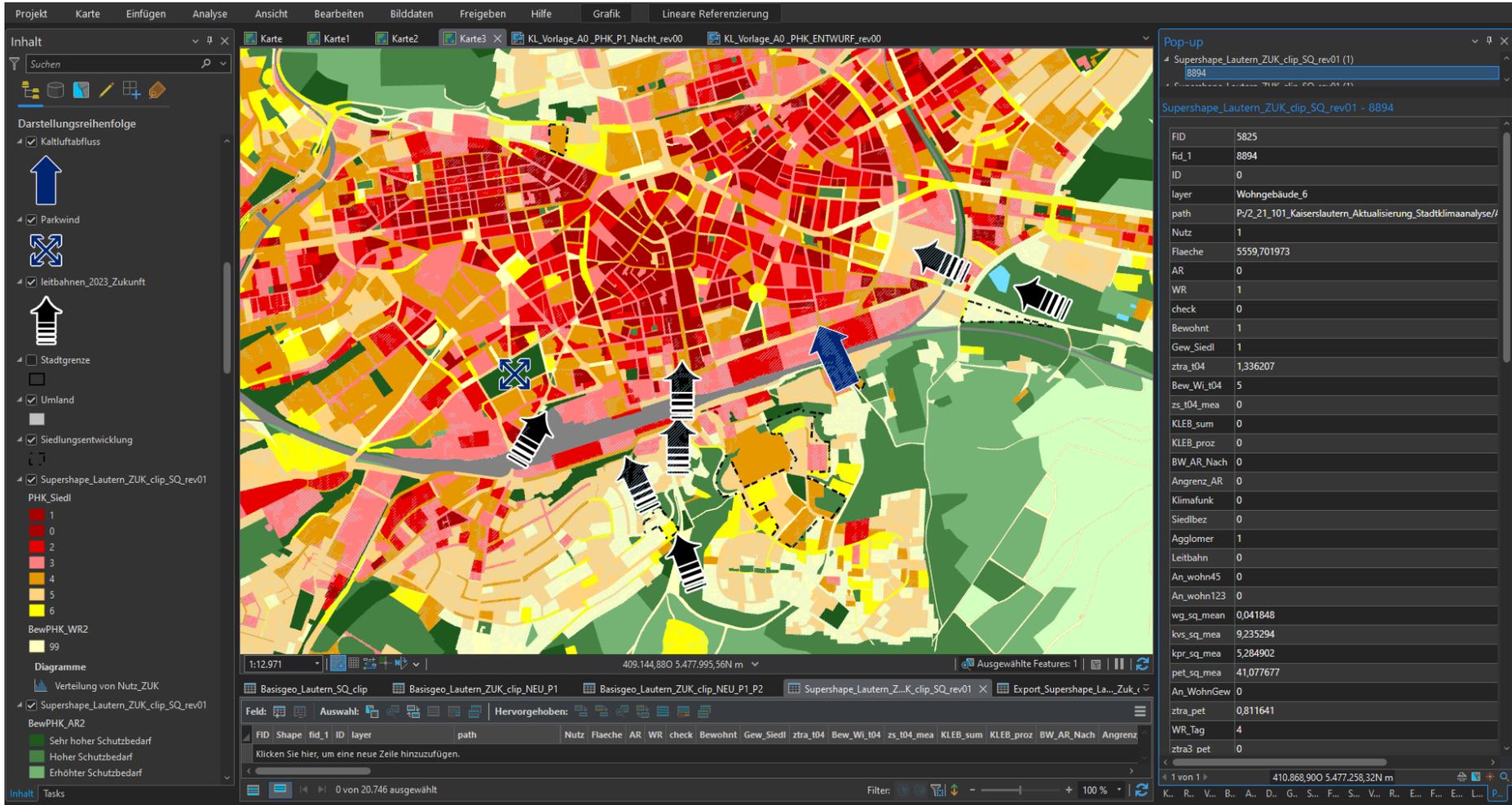


Abbildung 59: Screenshot aus der digitalen Planungshinweiserte innerhalb des Stadtklimamanagementsystems mit Auszug aus dem „Super Shape“



Quellenverzeichnis

39. BImSchV (2010): Neununddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen 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, Heft 5, S. 571-579.
- Augter, G. (1997): Berechnung der Häufigkeiten windschwacher Strahlungsnächte und windschwacher Abkühlungsnächte. Deutscher Wetterdienst.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. *Climate Risk Management*, Volume 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286>
- Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt Hamburg (2012): Stadtklimaanalyse und Klimawandelszenario zum Landschaftsprogramm Hamburg.
- BFN (2016) – BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (HRSG.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung: BFN-Skripte Nr. 444.
- BMVI (2016): Handlungshilfe Klimawandelgerechter Regionalplan. Ergebnisse des Forschungsprojektes KlimREG für die Praxis: Schriftenreihe: MORO-Praxis. BMVI.
- 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>
- Bayerische Staatsregierung (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS).
- Cannon A.J.; Sobie S.R.; Murdock T.Q. (2015): Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? *J. Climate*, 28, 6938–6959.
- Chen, Yen-Chang; Tan, Chih-Hung; Wei, Chiang; Su, Zi-Wen (2014): Cooling effect of rivers on metropolitan Taipei using remote sensing. In: *International journal of environmental research and public health* 11 (2), S. 1195–1210. DOI: 10.3390/ijerph110201195.
- CLC (2017): Corine Landcover 2018. Technical Guidelines. https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/clc2018technicalguidelines_final.pdf
- Cubasch et al. (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*. (siehe IPCC, 2013)
- Deuschländer, T. & Mächel, H. (2017). Temperatur inklusive Hitzewellen. *Klimawandel in Deutschland*. 10.1007/978-3-662-50397-3_6.



- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges bauen.
- Donat M.G. et al. (2010) European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of GCM simulations. *Climate Research* 42:27–43
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- 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/
- DWD (2020b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten.
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 (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html.
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel.
https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html.
- EU 2008: Richtlinie 2008/50/EG ...
- Fanger, P.O. (1972): *Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering*. New York: McGraw Hill.
- Fink A.H. et al. (2012) Diagnosing the influence of diabatic processes on the explosive deepening of extratropical cyclones. *Geophysical Research Letters* 39:L07803
- Fischer et al. (2012): Climate Change Projections for Switzerland based on a Bayesian Multi-Model Approach. *International Journal of Climatology*. 32. 7797-. 10.1002/joc.3396.
- Freie Hansestadt Bremen (2013): Klimaanalyse für das Stadtgebiet der Hansestadt Bremen.
https://www.lapro-bremen.de/assets/Lapro-Plan/FB_Stadtklima_2013/2_12_013_Bremen_Klimaanalyse_rev02_Aug2013.pdf
- Fürst, D. und Scholles, F. (Hg.) (2008): *Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung*. Dortmund: Dorothea Rohn, 3.Auflage.
- Gaede, M. und Härtling, J. (2010): *Umweltbewertung und Umweltprüfung*. Braunschweig: Westermann.
- Geo-Net Umweltconsulting, Dahlem Beratende Ingenieure und MUST Städtebau (2019): *Klimaanpassungskonzept Kaiserslautern – Kaiserslautern im Klimawandel – Wir gestalten unsere Zukunft!*
- Geo-Net Umweltconsulting (2012): *Aktualisierung der gesamtstädtischen Klimaanalyse und deren planungsrelevanten Inwertsetzung für die Stadt Kaiserslautern*.



- Groß, G. (1987): Some effects of deforestation on nocturnal drainage flows and local climate – a numerical study. *Boundary-Layer Meteorol.* 38, 315-337.
- Groß, G. (1992): Results of supercomputer simulations of meteorological mesoscale phenomena. *Fluid Dynamics Research* (10): 483-498.
- Groß, G.; Frey, T.; Trute, P. (2002): Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände, *DEWI Magazin* Nr. 20.
- Groß, G. (2002): The exploration of boundary layer phenomena using a nonhydrostatic mesoscale model, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 11, No. 5, 701-710 (October 2002) DOI: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601..
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. Micro-scale numerical experiments, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Groß, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Groß, G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the 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*.
- Höppe, P.; H. Mayer: Planungsrelevante Bewertung der thermischen Komponente des Stadtklimas. *Landschaft und Stadt* 19 (1987) 1, S. 22–29.
- IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- ISO (1989). ISO 7243. Hot environments - Estimation of the heat stress on working man based in the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva, Switzerland, International Organisation for Standards.
- IVU (2022): IMMISem/luft Version 9.001 IVU Umwelt GmbH, Freiburg
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf



- Knutti et al. (2010): Challenges in Combining Projections from Multiple Climate Models. *Journal of Climate - J CLIMATE*. 23. 2739-2758. 10.1175/2009JCLI3361.1.
- Krauser et al. (2018): Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker
Krauser, Helena and Feigenwinter, Christian and Wicki, Andreas. (24 August 2018) Tropennächte - Forscher belegen: Darum schwitzen die Basler in Sommernächten stärker. *bz basel*. p. 1. Liestal.
- Kuttler, W. (2013): *Klimatologie*. Paderborn: UTB, 2. Auflage.
- LANUV (2018): *Klimaanalyse Nordrhein-Westfalen*. Schriftenreihe: LANUV-Fachbericht 86.
- Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: *PLOS Medicine*.
- LfU (2002): *Methodikband zur Erstellung von Landschaftsentwicklungskonzepten (lek) in Bayern*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. interne Arbeitsanleitung.
- LfU (2009): *Lufthygienischer Jahresbericht 2009*. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU (2020): *das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftenreihe: *UmweltSpezial*.
- LfU (2020a): *Emissionskataster genehmigungsbedürftige Anlagen*. Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LfU (2020b): *Mündliche Absprache, GEO-NET/Bayerisches Landesamt für Umwelt*.
- LfU (2021): *Klimareport Bayern 2021*. Bayerisches Landesamt für Umwelt. Schriftenreihe: *UmweltSpezial*.
- Linke C. et al. (2016): *Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamolldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Inter-pretation regionaler Klimamolldaten“*, Potsdam.
- Maronga et al. (2020): Review of the PALM model system 6.0, *Geosci. Model Dev.*, 13, 1335-1372.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ;Matzarakis, A. (1994): *Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen*. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- McDonald R. E. (2011) *Understanding the impact of climate change on Northern hemisphere extra-tropical cyclones*. *Climate Dynamics* 37:1399–1425
- Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (2012): *Handbuch Stadtklima. Maßnahmen und Handlungskonzepte für Städte und Ballungsräume zur Anpassung an den Klimawandel*.
- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (2011): *Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung*.
- Moore, G. E. (1903): *Principia Ethica*. Ditzingen: REKLAM.
- Mosmann et al. (1998): *Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immisi- onsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan*. Schriftenreihe: *Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen*. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss et al. (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.



- Mpelasoka F.S.; Chiew F.H. (2009): Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. *J. Hydrometeor.*, 10, 1168–1183.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke et al. (2017): *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Pinto et al. (2009) Factors contributing to the development of extreme North Atlantic cyclones and their relationship with the NAO. *Clim Dyn* 32, 711–737. <https://doi.org/10.1007/s00382-008-0396-4>
- Pinto, J. & Reyers, M. (2017). Winde und Zyklonen. 10.1007/978-3-662-50397-3_8.
- Rauthe M., Malitz G., Gratzki A., Becker A. (2014): Starkregen. In: Becker P., Hüttl R. F. (Hrsg.): *Forschungsfeld Naturgefahren*. Potsdam und Offenbach, S. 112.
- R Core Team (2019): *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- ROMBERG et al. (1996): NO-NO₂-Umwandlungsmodell für die Anwendung bei Immissionsprognosen für Kfz-Abgase. *Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft* 56 Nr. 6, S. 215-218, 1996.
- STADT JENA (2016): *Bäume in Jena. Stadt- und Straßenbäume im Klimawandel*. Schriften zur Stadtentwicklung Nr. 7.
- STADT KAISERSLAUTERN (2022): *Geodaten, Unterlagen zu den städtebaulichen Kulissen sowie Verkehrsdaten*.
- SANTHOLZ und SETT (2019): *Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress*. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. UNU Workingpaper.
- Schädeler, G.; Lohmeyer, A. (1994): Simulation of nocturnal drainage flows on personal computers. *Meteorologische Zeitschrift*. 3, 167-171.
- Schär, Ch., Frei, D., Lüthi, H.C., Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. *Geophys. Res. Lett.* 23, 669-672.
- Schlünzen, K. H. et al. (2018): *Stadtklima in Hamburg*. In: von Storch H., Meinke I., Claußen M. (eds) *Hamburger Klimabericht – Wissen über Klima, Klimawandel und Auswirkungen in Hamburg und Norddeutschland*. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- SenStadtUm (2015): *Klimamodell Berlin – Ausgabe 2016*. <https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ib411.htm>
- SenStadtUm (2015a): *Stadtentwicklungsplan Klima konkret. Klimaanpassung in der Wachsenden Stadt*.
- SenSW (2021): *Stadtentwicklungsplan Klima 2.0 für die Bundeshauptstadt Berlin*. Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen Berlin. bisher unveröffentlicht.
- Sievers, U. (2005): *Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21*. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer.
- Stadt Karlsruhe (2014): *Städtebaulicher Rahmenplan Klimaanpassung*. <https://www.karlsruhe.de/b3/bauen/projekte/klimaanpassung.de>



- Stadt Zürich (2020): Fachplanung Hitzeminderung. <https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html>
- STMUV (2015): Klimaschutzprogramm Bayern 2050. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satelliteliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). Nature 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>
- UBA (2005): GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? Praktische Tipps für den Alltag. Umweltbundesamt.
- UBA (2019): Handbuch für Emissionsfaktoren für Straßenverkehr (HBEFA). Umweltbundesamt.
- UBA (2019a): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte.
- UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>
- UBA (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., Prettenthaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zulka K. 2015: Economic Evaluation of Climate Change Impacts – Development of a Cross-Sectoral Framework and Results for Austria. Basel: 301–322.
- VDI (2003): VDI-Richtlinie 3787, Bl.5: Umweltmeteorologie. Lokale Kaltluft.
- VDI (2004) VDI-Richtlinie 3787, Bl.9: Umweltmeteorologie. Berücksichtigung von Klima und Lufthygiene in räumlichen Planungen.
- VDI (2008) VDI-Richtlinie 3785, Bl.1: Umweltmeteorologie. Methodik und Ergebnisdarstellung von Untersuchungen zum planungsrelevanten Stadtklima.
- VDI (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 (2017): VDI-richtlinie 3783, Bl.7: Umweltmeteorologie. Prognostische mesoskalige Windfeldmodelle - Evaluierung für dynamisch und thermisch bedingte Strömungsfelder.
- VDI (2017 a): 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 (20022) VDI-Richtlinie 3785, Bl.2: Umweltmeteorologie. Methoden zur humanbiometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.

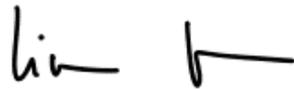
WHO (2021): Globale Luftgüteleitlinien der WHO: Feinstaubpartikel (PM_{2,5} und PM₁₀), Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und Kohlenmonoxid. Zusammenfassung. Kopenhagen: Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa; 2021. Lizenz: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 04.04.2024

Erstellt von: 

Dr. Jens Dahlhausen (M. Sc. Geoökologie)

Geprüft von: 

Vivien Voss (M. Sc. Meteorologie)

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse erfolgte entsprechend dem Stand der Technik nach bestem Wissen und Gewissen. Die Stadtklimaanalyse bleibt bis zur Abnahme und Bezahlung alleiniges Eigentum des Auftragnehmers. Eigentum und Nutzungsrecht liegen bei den Auftraggebern.