

Auftraggeberin

Stadt Lüdenscheid

Rathausplatz 2
58511 Lüdenscheid

Projektbegleitung

Fachbereich Umwelt und Klima
Fachdienst Klima- und Umweltschutz



Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Tel: (0511) 388 72-00
www.geo-net.de





Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	I
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	VI
GLOSSAR	VIII
1. HINTERGRUND UND ANLASS	11
2. FACHLICHE GRUNDLAGEN	12
2.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT	12
2.2 WÄRMEINSELEFFEKT UND KALTLUFTPROZESSE	16
2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK	18
3. BEARBEITUNGS- UND BETEILIGUNGSPROZESS	24
4. KLIMA UND KLIMAWANDEL IM RAUM LÜDENSCHIED	27
4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN	27
4.2 KLIMA IN GEGENWART UND VERGANGENHEIT	31
4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN	35
4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN	35
5. ANALYSEMETHODEN – NUMERISCHE MODELLIERUNG	45
5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D	45
5.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN	49
5.3 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN	55
5.4 MODELLAUSGABEGRÖßEN	57
5.5 QUALITÄTSSICHERUNG	58
5.6 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN	59
6. ANALYSEERGEBNISSE – NUMERISCHE MODELLIERUNG	62
6.1 NACHTSITUATION	62
6.2 TAGSITUATION	72
7. KLIMAAANALYSEKARTE	75
8. BEWERTUNGSKARTEN UND PLANUNGSHINWEISKARTE	81
8.1 GRUNDLAGEN	81
8.2 GEOMETRISCHE BASIS	82
8.3 BEWERTUNGSKARTEN	83
8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA	94
8.5 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN	100
8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM	114
QUELLENVERZEICHNIS	115



ANHANG I: KLIMAWANDEL IN LÜDENSCHIED121

METHODIK..... 121

BEOBACHTETE KLIMAVÄNDERUNGEN 123

TEMPERATURZUNAHME UND HITZE 124

NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG 125

TROCKENHEIT 126

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 10$ MM/D) 127

STARKNIEDERSCHLÄGE: STÄRKERER NIEDERSCHLAG ($N \geq 20$ MM/D)..... 127

STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKNIEDERSCHLAG ($N \geq 30$ MM/D) 128

STURM..... 128



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 2020)	12
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2018).....	13
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)	14
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANDHOLZ UND SETT 2019).	15
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION ZWISCHEN 2001 UND 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019).....	16
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017 (OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN)).	17
ABBILDUNG 7: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015)	20
ABBILDUNG 8: AUSWAHL MÖGLICHER LEGENDENPUNKTE EINER KLIMAANALYSEKARTE GEMÄß VDI 3787 BL.1 (VDI 2015)	21
ABBILDUNG 9: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLUNG 2022)	22
ABBILDUNG 10: DIE DREI BEARBEITUNGSSTUFEN DER STADTKLIMAANALYSE	24
ABBILDUNG 11: ANTHROPOGENER STRAHLUNGSANTRIEB (RF = RADIATIVE FORCING) DER VERSCHIEDENEN IPCC-KLIMASZENARIEN (DIE SCHWARZE LINIE REPRÄSENTIERT MESSWERTE; CUBASCH ET AL. 2013).	29
ABBILDUNG 12: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.....	31
ABBILDUNG 13: KLIMADIAGRAMM DER STADT LÜDENSCHIED FÜR DEN REFERENZZEITRAUM 1991 – 2020 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B).	31
ABBILDUNG 14: ENTWICKLUNG DER MITTELTEMPERATUR IN LÜDENSCHIED IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B).	32
ABBILDUNG 15: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JÄHRLICHEN ANZAHL AN TAGEN MIT EINEM NIEDERSCHLAG > 30 MM IN LÜDENSCHIED (NACH DWD 2022B).	34
ABBILDUNG 16: WINDRICHTUNGSVERTEILUNG IN DER NACHT (LINKS) UND AM TAG (RECHTS) IN LÜDENSCHIED FÜR DEN ZEITRAUM 1994 – 2020, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN DWD-STATION LÜDENSCHIED (DWD 2022A).....	34
ABBILDUNG 17: LANGJÄHRIGE MITTLERE MONATLICHE ANZAHL AN WINDSCHWACHEN STRAHLUNGSNÄCHTEN IN LÜDENSCHIED (58,4 PRO JAHR) FÜR DEN ZEITRAUM 1995 - 2021, BASIEREND AUF DER NÄCHSTGELEGENEN REPRÄSENTATIVEN DWD-STATION LÜDENSCHIED (DWD 2022A).	35
ABBILDUNG 18: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN LÜDENSCHIED (ALLE RCP-SZENARIEN).	36
ABBILDUNG 19: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN SAISONALEN MITTELTEMPERATUREN IN LÜDENSCHIED (RCP 8.5). ..	37
ABBILDUNG 20: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN SAISONALEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN IN LÜDENSCHIED (RCP 8.5).....	40
ABBILDUNG 21: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MITTLEREN MONATLICHEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN LÜDENSCHIED (RCP 8.5).....	41
ABBILDUNG 22: ZEITLICHER TREND DER ANZAHL AN TAGEN PRO JAHR MIT STÄRKEREM NIEDERSCHLAG (N ≥ 20 MM/D) IN LÜDENSCHIED (ALLE SZENARIEN).	42



ABBILDUNG 23: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN MIT $N \geq 30$ MM/D INNERHALB DER JEWEILIGEN 30-JÄHRIGEN PERIODE IN LÜDENSCHIED (RCP 8.5)..... 44

ABBILDUNG 24: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D. 48

ABBILDUNG 25: IDEALISIERTER TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR (TSURF = „SURFACE TEMPERATURE“) SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR (T2M = TEMPERATUR AUF 2 M Ü. GR.) VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES 49

ABBILDUNG 26: MODELLGEBIET (SCHWARZER RAHMEN) UND STADTGRENZE (PINKE LINIE) (QUELLE DES LUFTBILDES: GEOBASIS NRW)..... 50

ABBILDUNG 27: DIGITALES GELÄNDEMOMELL FÜR LÜDENSCHIED UND UMGEBUNG (REFERENZSITUATION AUF RASTEREBENE). 52

ABBILDUNG 28: KLASSIFIZIERTE LANDNUTZUNG / STADTSTRUKTUR DER BESTANDSSITUATION IN LÜDENSCHIED UND UMGEBUNG (REFERENZSITUATION AUF RASTEREBENE). 53

ABBILDUNG 29: BEISPIELHAFTHE ARBEITSSCHRITTE ZUR IDENTIFIKATION VON BAUMSTANDORTEN ANHAND VON NDVI-WERTEN UND STRUKTURHÖHEN..... 54

ABBILDUNG 30: BEISPIELHAFTHE ÜBERFÜHRUNG DER INFORMATIONEN EINES B-PLANS UND EINES STÄDTEBAULICHEN ENTWURFS IN DAS FITNAH-NUTZUNGRASTER. 55

ABBILDUNG 31: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992) 56

ABBILDUNG 32: NÄCHTLICHES BODENNAHES TEMPERATURFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS. 64

ABBILDUNG 33: PRINZIPSKIZZE KALTLUFTVOLUMENSTROM. 65

ABBILDUNG 34: NÄCHTLICHE KALTLUFTVOLUMENSTROMDICHTHE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS. 68

ABBILDUNG 35: NÄCHTLICHES BODENNAHES WINDFELD VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS..... 69

ABBILDUNG 36: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRADE VON 04 UHR DES IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS..... 71

ABBILDUNG 37: WÄRMEBELASTUNG UM 14 UHR AM TAGE IM IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS..... 73

ABBILDUNG 38: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTE. 76

ABBILDUNG 39: ZWEI AUSSCHNITTE AUS DER KLIMAANALYSEKARTE ZUR VERDEUTLICHUNG DER GUTACHTERLICHEN ABLEITUNG VON FLÄCHENHAFTEN KALTLUFTAUSTAUSCHBEREICHEN (LINKS OHNE UND RECHTS MIT ENTSPRECHENDER AUSWEISUNG)..... 78

ABBILDUNG 40: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM IST-ZUSTANDES FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS..... 79

ABBILDUNG 41: KLIMAANALYSEKARTE DER NACHT IM IST-ZUSTANDES FÜR LÜDENSCHIED. 80

ABBILDUNG 42: LINKS DAS AUSGANGSRASTER DER NÄCHTLICHEN LUFTTEMPERATUR UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE FÜR LÜDENSCHIED. 83

ABBILDUNG 43: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008) 84

ABBILDUNG 44: BEWERTUNGSSCHEMA FÜR DIE BEDEUTUNG VON GRÜNFLÄCHEN IN DER NACHTSITUATION..... 87



ABBILDUNG 45: SYMBOLOGIE DER KALTLUFTPROZESSE IM WIRKRAUM.	88
ABBILDUNG 46: BEWERTUNGSKARTE DER NACHTSITUATION DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS.	90
ABBILDUNG 47: BEWERTUNGSKARTE DER TAGSITUATION DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS.	93
ABBILDUNG 48: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR EINEN AUSSCHNITT DES LÜDENSCHIEDER STADTGEBIETS.	98
ABBILDUNG 49: PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA FÜR LÜDENSCHIED.	99
ABBILDUNG 50: BEISPIELBILD AUS EINER DIGITALEN PLANUNGSHINWEISKARTE INNERHALB EINES STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEMS MIT AUSZUG AUS DEM „SUPER SHAPE“	114



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN ... 23

TABELLE 2: LANGJÄHRIGE MITTLERE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUREN, DES NIEDERSCHLAGS SOWIE VON METEOROLOG. KENNTAGEN IN LÜDENSCHIED IN DER VERGANGENHEIT (NACH DWD 2022A BZW. DWD 2022B). 33

TABELLE 3: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN LÜDENSCHIED (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 37

TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG THERMISCHER KENNTAGE IN LÜDENSCHIED (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 38

TABELLE 5: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER MITTL. NIEDERSCHLAGSSUMME IN LÜDENSCHIED (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 39

TABELLE 6: ÄNDERUNG DER AUFTRITTSHÄUFIGKEIT VON STARKNIEDERSCHLAGSEREIGNISSEN (ANZAHL TAGE PRO JAHR) SOWIE DES MAXIMALEN TAGESNIEDERSCHLAGS IN LÜDENSCHIED (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN). 43

TABELLE 7: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 10 M..... 47

TABELLE 8: PLANFLÄCHEN, DIE IM RAHMEN DES IST-ZUSTANDS DER KLIMAANALYSE LÜDENSCHIED BEREITS BERÜCKSICHTIGUNG FANDEN. 54

TABELLE 9: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER. 57

TABELLE 10: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT. 58

TABELLE 11: ZUORDNUNG VON SCHWELLENWERTEN DES BEWERTUNGSINDEXES PET WÄHREND DER TAGSTUNDEN (NACH VDI 2004) 72

TABELLE 12: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN 77

TABELLE 13: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE SITUATION IM WIRKRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP..... 85

TABELLE 14: BEWERTUNGSSTUFEN FÜR DIE HUMANBIOKLIMATISCHE BEDEUTUNG IM AUSGLEICHSDRAUM NACH SZENARIO, TAGESZEIT UND STRUKTURTYP..... 87

TABELLE 15: PROZENTUALE FLÄCHENANTEILE DER BEWERTUNGSRÄUME IM IST-ZUSTAND..... 89

TABELLE 16: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR WOHNRAUM UND GEWERBE. 94

TABELLE 17: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSBEDARFE FÜR DEN WIRKRAUM. 95

TABELLE 18: BEWERTUNGSMATRIZEN DER INFORMATIONEN DER BEWERTUNGSKARTEN FÜR DEN AUSGLEICHSDRAUM. 95

TABELLE 19: AUS BEWERTUNGSKARTEN ABGELEITETE STADTKLIMATISCHE BEDEUTUNG FÜR DEN AUSGLEICHSDRAUM. 96

TABELLE 20: FLÄCHENANTEILE DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSBEDARFE IM WIRKRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE. 96



TABELLE 21: FLÄCHENANTEILE DER BIOKLIMATISCHEN AUSGLEICHSFUNKTION IM AUSGLEICHSRAUM DER PHK UND ABGELEITETE PLANUNGSHINWEISE.	98
TABELLE 22: EMPFEHLUNGEN ALLGEMEINER STADTKLIMATISCH WIRKSAMER MAßNAHMEN FÜR DIE STADT LÜDENSCHIED.	103



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: **Grüngeprägte, 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.

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).



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

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

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

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

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

Strahlungswetterlage → *Autochthone Wetterlage*

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

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



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



1. Hintergrund und Anlass

Das Schutzgut Klima ist ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung und vor dem Hintergrund konkurrierender Planungsziele sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel zu dessen sachgerechter Beurteilung. Aus der Kenntnis des in einer Stadt vorherrschenden Lokalklimas und den klimatischen Funktionszusammenhängen lassen sich Schutz- und Entwicklungsmaßnahmen zur Verbesserung des Klimas ableiten. Dieser Leitgedanke zielt auf die Erhaltung und Verbesserung günstiger bioklimatischer Verhältnisse ab. Für eine fundierte Erarbeitung einer Strategie in der Klimaanpassung ist unter anderem die Klimaanalyse mit der Beurteilung des Status Quo (zum Stichtag der zugrundeliegenden Daten) des Klimas und daraus einhergehenden Planungsempfehlungen eine wichtige Grundlage. Für Lüdenscheid existiert eine derartige Untersuchung im passenden Maßstab bisher nicht. Die Klimaanalyse NRW (LANUV, 2018) gab bisher einen Anhaltspunkt über die gesamtstädtischen, feldhaften Zusammenhänge des Klimas in Lüdenscheid und Umgebung. Allerdings ist der Bezugsmaßstab der Klimaanalyse NRW zu grobskalig, um für städtebauliche Entwicklungen oder andere Fragestellungen auf einem Maßstab, der geringer als der eines Flächennutzungsplans ist, Anwendung finden zu können.

Der Umgang mit „Hitze in der Stadt“ ist eins der relevanten Themen bei der Entwicklung einer Klimaanpassungsstrategie für Lüdenscheid, da in einigen Stadtgebieten bereits heute hohe Wärmebelastungen auftreten und sich in Zukunft steigende Temperaturen sowie häufigere Hitzeereignisse abzeichnen. Um Strategien bzw. Maßnahmen zur Minderung der Belastung und Anpassung an die erwartenden Klimaveränderungen zu entwickeln, bedarf es räumlich genauer Informationen zur bioklimatischen Situation in Lüdenscheid, die mit der vorliegenden Klimaanalyse gegeben werden. Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 10 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Durch die kleinräumige Erfassung von Gebäuden und Grünstrukturen, insbesondere Bäumen, samt deren individueller Strukturhöhe, können detaillierte Aussagen zum Einfluss des Stadtkörpers auf das Mikroklima und insb. das Strömungsfeld getroffen werden. Die Ergebnisse der Modellrechnung spiegeln neben der Nachtsituation auch die bioklimatische Belastung am Tage wider und erlauben somit eine umfassende Betrachtung des Lüdenscheider Stadtklimas. Primäres Anwendungsfeld der Analyseergebnisse und insbesondere der daraus abgeleiteten Planungshinweiskarte soll unter anderem die vorbereitende und verbindliche Bauleitplanung sein. Zudem sollen sie eine fundierte Grundlage für in Planungsprozessen erforderliche kleinräumige Klimamodellierungen darstellen.

Der vorliegende Bericht gibt zunächst einen Überblick über die fachlichen Grundlagen zum Themenkomplex Stadtklima (Kap. 2). In Kap. 3 folgt die Dokumentation des Bearbeitungs- und Beteiligungsprozesses. Die übergeordnete Einordnung der Stadtklimaanalyse für Lüdenscheid erfolgt im Kapitel zum Thema Klima und Klimawandel (Kap. 4). Danach wird die Methodik der Stadtklimaanalyse (Kap. 5) erläutert und die Ergebnisse der Modellrechnung dargestellt (Kap. 6). Planerische Fragestellungen lassen sich am besten in einer Zusammenschau der Ergebnisse beantworten, sodass die Ergebnisse des nächtlichen Prozessgeschehens (Überwärmung des Stadtgebiets, Kaltluftströmungsfeld) in einer „Klimaanalysekarte“ zusammengefasst wurden (Kap. 7). Um daraus planerische Konsequenzen ableiten zu können ist allerdings eine zusammenfassende Betrachtung von Tag- und Nachtsituation auf der sog. „Wertebene“ und eine Verknüpfung mit Maßnahmenpotentialen notwendig (Kap. 8).



2. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist - seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend - ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kapitel 2.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kapitel 4) über stadtklimatisch relevanten meteorologisch-physikalischen Prozessen im urbanen Umfeld (Kapitel 2.2) bis hin zu planungs- und umweltrechtlichen Aspekten (u.a. Kapitel 3). 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 hat 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 kommt 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).

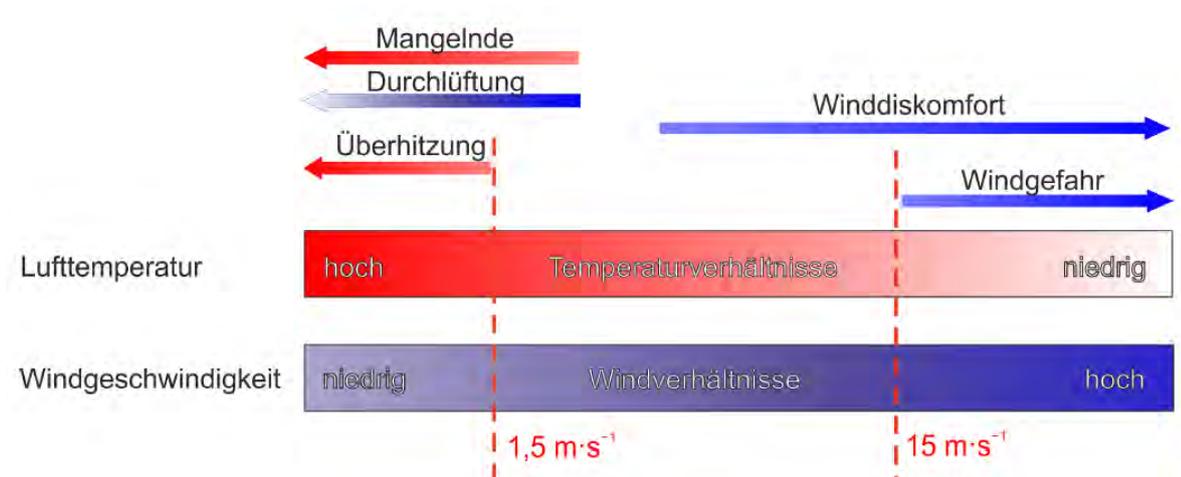


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 2020)

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 Climate Index“ UTCI (Jendritzky 2007). In der Vergangenheit kam zudem auch der heute eher nicht mehr gebräuchliche Index „Predicted Mean Vote“ (PMV) zum Einsatz (Fanger 1972). Allen Ansätzen ist gemein, dass sie neben den meteorologischen Einflussgrößen auch die Wärmebilanz des Menschen in die Berechnung mit einfließen lassen (Abbildung 2). Auf diese Weise können physiologische Belastungsstufen abgeleitet werden, die beispielsweise bei der PET von einer extremen Kältebelastung bis zu einer extremen Wärmebelastung reichen. Da die Indizes hohen Anforderungen an die zugrundeliegenden Mess- bzw. Modelldaten stellen und diese nicht überall vorliegen, besitzen nach wie vor auch relativ einfache Auswerteroutinen wie die Auftretshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) 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 soll.

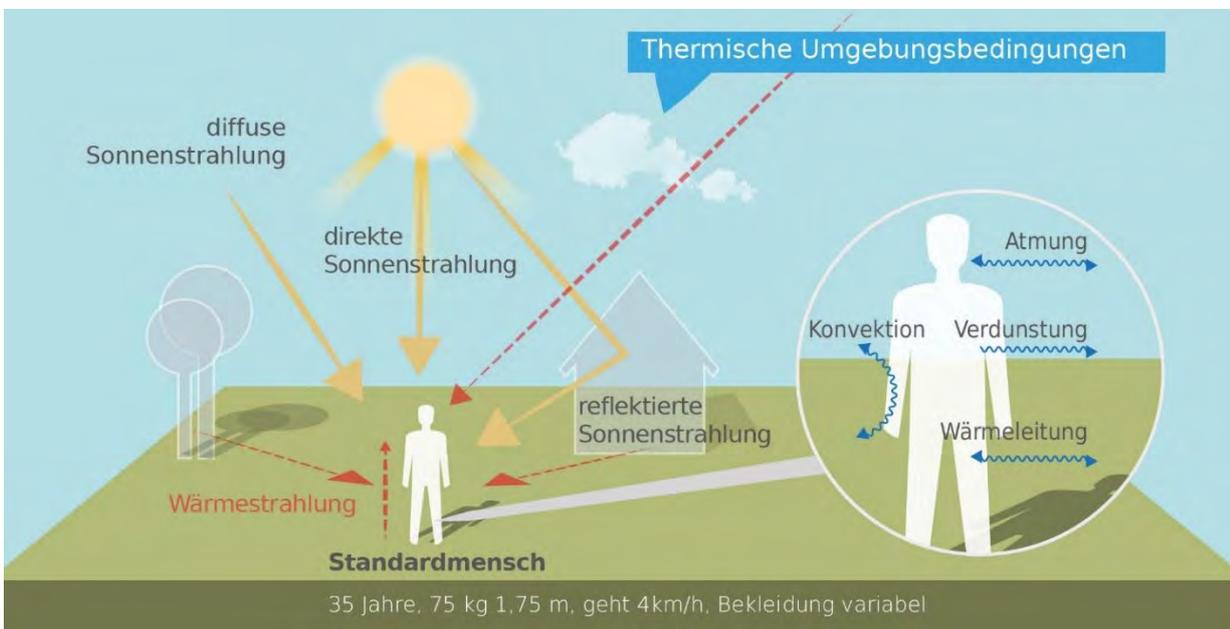


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2018)

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 gesundheitlich zuträgliche Raumtemperaturen von maximal $+26^{\circ}\text{C}$ 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 aber 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 BürgerInnen 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 (s. 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 annähernd oder sogar über 30 °C; Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021).

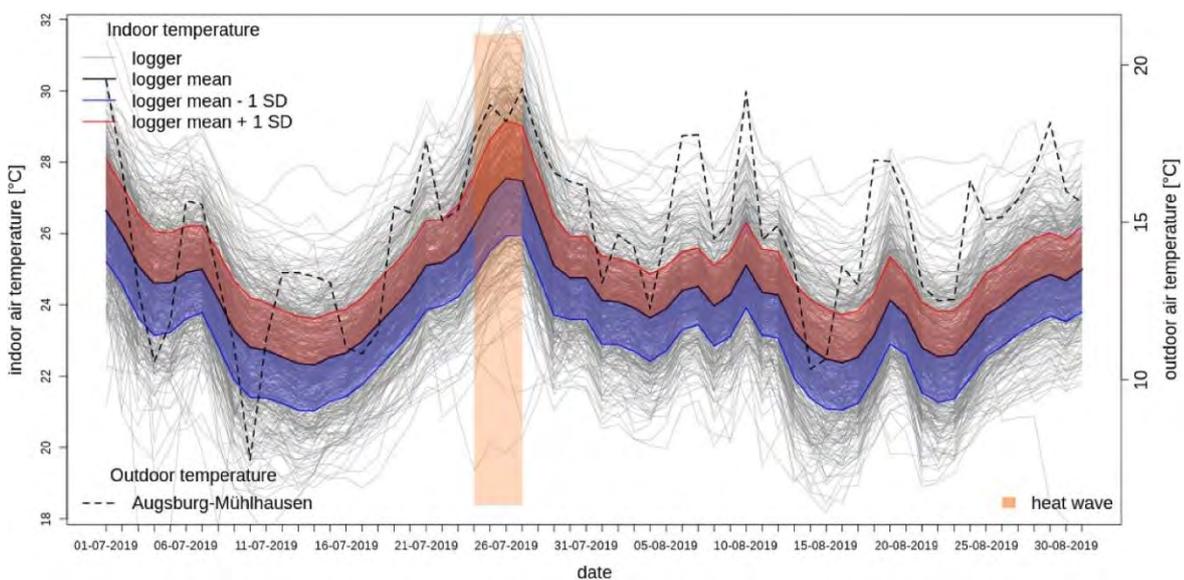


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule) ab. Wie stark diese Abnahme ist, ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt bei moderater körperlicher Arbeit die Leistungsfähigkeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30°C in Kombination mit 50% Luftfeuchtigkeit, dies entspricht einer Wet Bulb Globe Temperature¹ von 29°C) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 Prozent ab (ISO 1989).

¹ Wet Bulb Globe Temperature: Sog. Kühlgrenztemperatur. Sie bezeichnet die niedrigste Temperatur, die sich durch direkte Verdunstungskühlung in einer Umgebung erreichen lässt, wobei die Wasserabgabe einer feuchten Oberfläche mit der Wasseraufnahme der Umgebungsluft im Gleichgewicht steht.



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

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst aber 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 zum einen Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie zum anderen ältere Menschen ab 65 Jahren und vor allem über 80 Jahre (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis eine Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem differenzierteren Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte SeniorInnen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen, und Single-/Pärchenhaushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten vergleichsweise seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

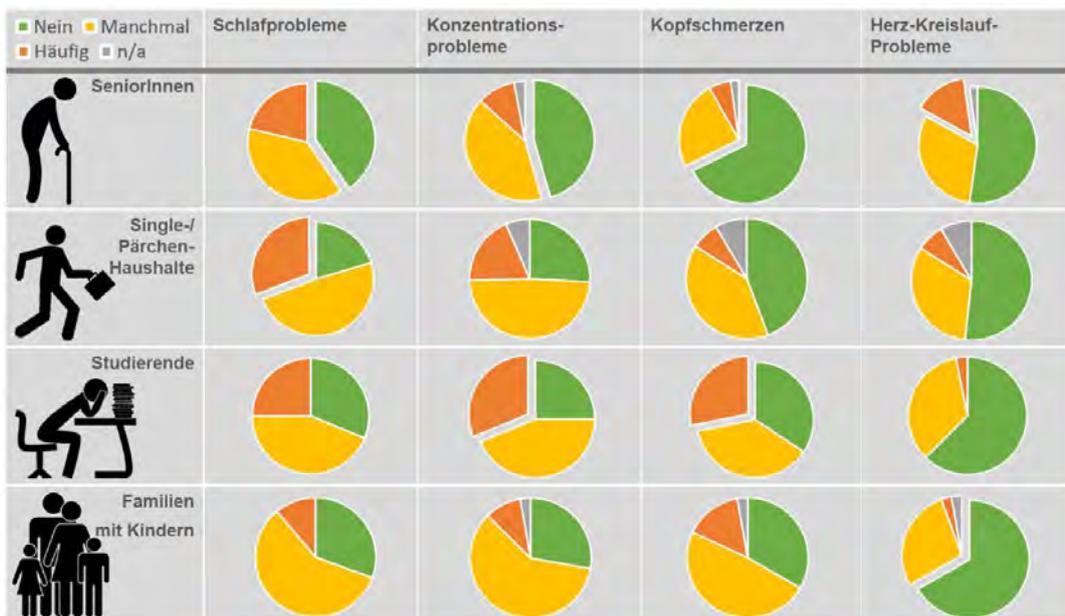


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Sandholz und Sett 2019).

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 Prozent pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist.



Dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen durch Hitze pro Jahr bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

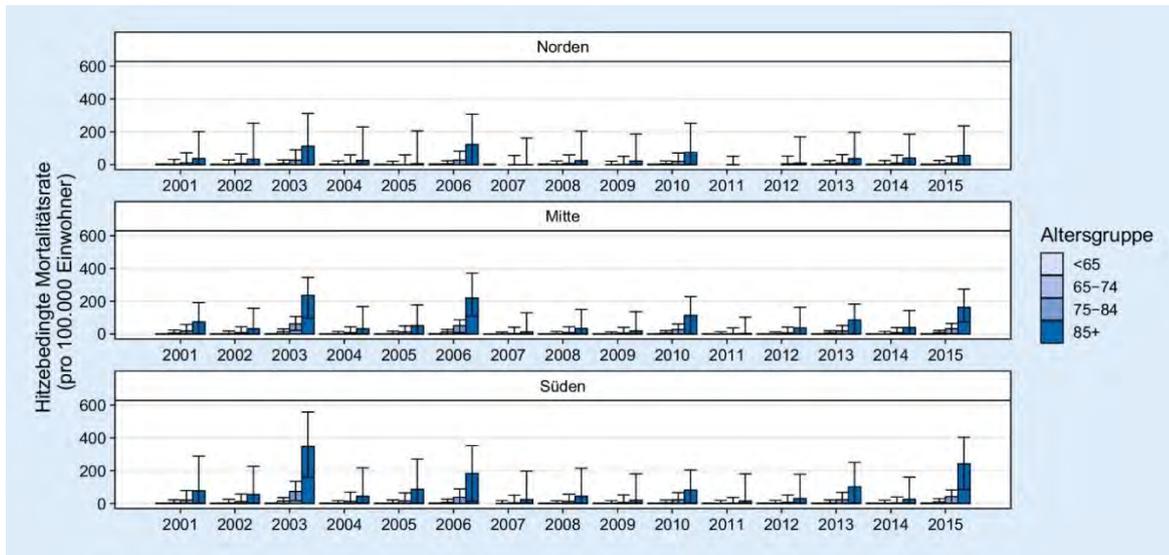


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region zwischen 2001 und 2015 (An der Heiden et al. 2019)

2.2 WÄRMEINSELEFFEKT 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, was zu einem Abbau der Wärmebelastung des Menschen führen kann. 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 2012).

Als wichtige Prämisse für die vorliegende Analyse sollen die relevanten Prozesse und Zusammenhänge im Folgenden noch einmal überblicksartig als Beitrag zu einem Grundverständnis beleuchtet werden. Wie Abbildung 6 zeigt, sind hier 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 Inversionsneigung auftreten. Eine Inversion ist die Umkehr des normalerweise mit der Höhe abnehmenden Temperaturverlaufs, der adiabatischen Luftschichtung, in eine mehr oder weniger mächtige, stabile Schichtung der Atmosphäre. Inversionen können durch großräumige Advektion von Warmluft oder durch Absinkvorgänge in der Höhe sowie durch Abkühlung der unteren Luftschichten entstehen. Eine Inversion stellt eine Sperrschicht dar, die einen Austausch zwischen tief liegenden und höher liegenden Luftschichten verhindert. Inversionen wirken in der Atmosphäre somit stabilisierend. In den Sommermonaten gehen mit ihnen häufiger thermische und ggf. auch lufthygienische Belastungen einher.

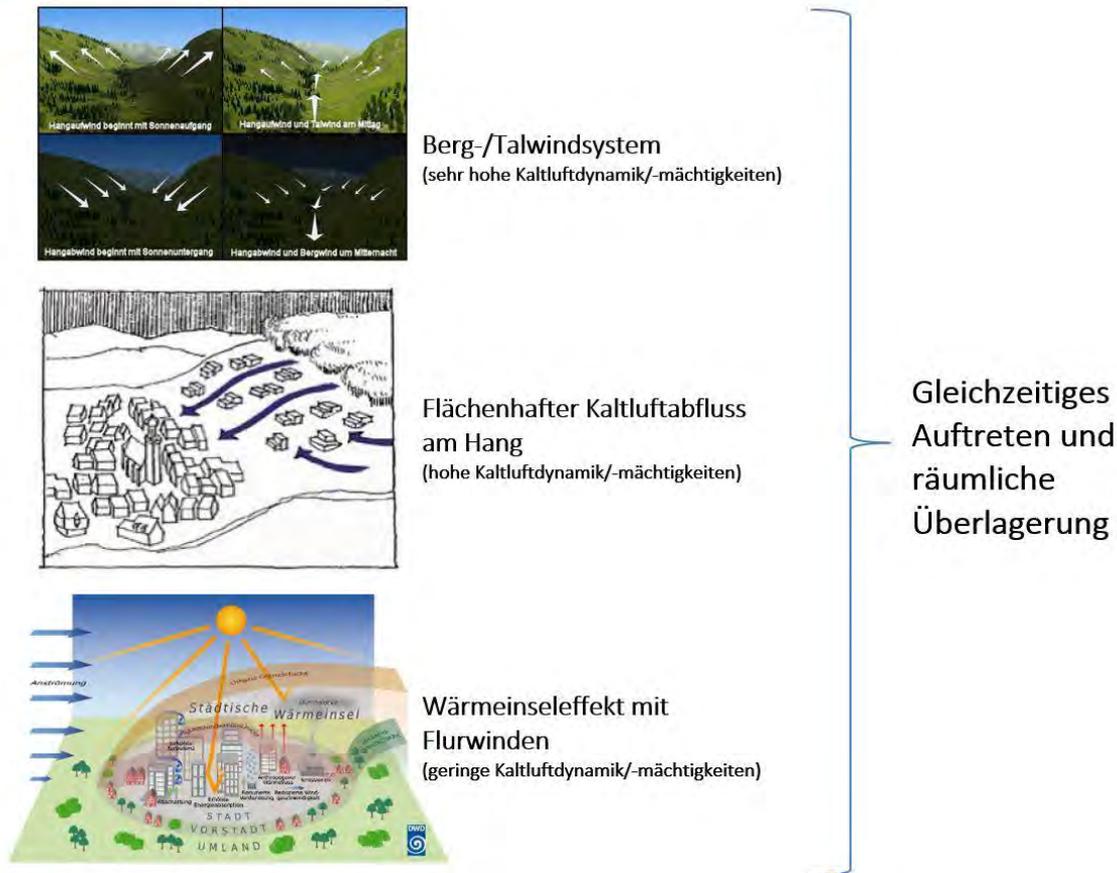


Abbildung 6: Stadtklimatisch relevante Prozesse (eigene Darstellung auf Basis der Quellen: The COMET Program 2017 (oben), MVI 2012 (Mitte), DWD 2023b (unten)).

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke 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 Wärmeffluss). Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts dagegen kann kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und auch innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.



Während Flurwindssysteme in aller Regel mit relativ geringen Kaltluftdynamiken von < 1 m/s und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10-)Metern verbunden sind, können Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-/Talwindssysteme in Abhängigkeit der Reliefenergie tal-/hangabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich > 2 m/s sowie Kaltluftpakete von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata. Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, so dass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind. Speziell für Lüdenscheid sind Berg-/Talwindssysteme jedoch nicht relevant.

Diese komplexen Prozesse können in ihrer z.T. räumlichen und zeitlichen Überlagerung ausschließlich mit numerischen Modellen hinreichend gut abgebildet werden. Dies ist auch vor dem Hintergrund entscheidend, dass alle geschilderten Prozesse bzw. Klimafunktionen durch planerische Entscheidungen sowohl unterstützt als auch gestört oder sogar zerstört werden können.

Mit Blick auf die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels ist von entscheidender Bedeutung, dass konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, bisher nicht eingeführt sind (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 auch für die aus den Größen abgeleiteten zentralen Elemente wie Kaltluftleitbahnen. Selbstverständlich ist die Kaltluft im Klimawandel aber tendenziell wärmer als gegenwärtig und trägt damit auch weniger zur Reduktion der nächtlichen Wärmebelastungen bei. Es wird die Aufgabe der gesamten Fachdisziplin sein, diesem Umstand durch die Entwicklung neuer Auswerteverfahren Rechnungen 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 festzumachen.

2.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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



/Schutzniveau in der betrachteten Kommune erreicht oder vermieden werden soll, das Ergebnis eines planerisch-politischen Abwägungsprozesses, der durch fachgutachterliche Entscheidungsgrundlagen unterstützt wird.

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

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

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; 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
Klimatope		
Gewässer-, Seenklima		0/127/255 dunkelblau
Freilandklima		190/232/255 hellblau
Waldklima		115/178/115 dunkelgrün
Klima innerstädtischer Grünflächen		174/241/176 hellgrün
Vorstadtklima		255/255/225 hellgelb
Stadttrandklima		254/220/0 hellorange
Stadtklima		255/165/0 orange
Innenstadtklima		255/127/127 hellrot
Gewerbe-, Industrieklima		210/210/210 hellgrau

Klimaeigenschaft	Farbe/ auflagernde Signatur	RGB, subjektiver Farbeindruck
Luftaustausch		
Luftleitbahn, unbelastet		43/75/155 blau
Luftleitbahn, klimatisch und/oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Kaltluftabfluss, unbelastet		43/75/155 blau
Kaltluftabfluss, lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Talabwind, unbelastet		18/79/158 blau
Talabwind, klimatisch und/ oder lufthygienisch belastet		229/38/32 rot
Hindernis für den Kalt- luftabfluss (Barriere)		34/74/126 blau
Kaltlufteinzugsgebiet		43/75/155 hellblau

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



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 klima- relevanter Funktion		255/255/225 gelb
Bebautes Gebiet mit klimarelevanter Funktion		246/197/103 orange
Bebautes Gebiet mit bedeutender klima- relevanter Funktion		255/127/127 rot
Bebautes Gebiet mit klimatisch-lufthygieni- schen 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, <i>DTV</i> > 10000		255/0/0 rot

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

Insbesondere bei der Neuentwicklung von Stadtquartieren und Gebäuden treten neben die VDI-Richtlinien noch weitere Normen, die es im Einzelfall bei etwaigen Detailbegutachtungen zu berücksichtigen gilt. Hierzu zählen beispielsweise Zertifizierungsverfahren wie das DGNB-System, 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 zum einen auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt im Übrigen keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um eben dieser Herausforderung zu begegnen).

Darüber hinaus stellen selbstverständlich auch die in der Übersicht des HLNUG gänzlich fehlenden Messkampagnen (Messfahrten, Vertikalsondierungen, stationäre Messungen) weiterhin eine wichtige methodische Grundlage für Stadtklimaanalysen dar – zumeist in Ergänzung (bzw. zur Validierung) der anderen Methoden, bis Weilen aber auch als reine messbasierte Stadtklimaanalysen. Perspektivisch werden auch KI-basierte Lösungen das Methodenset ergänzen, indem Sie von Ergebnissen der anderen Methoden lernen und diese mit deutlich geringerem Aufwand auf andere Untersuchungsräume übertragen.



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

Abbildung 9: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLUNG 2022)

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

Auf dem deutschsprachigen Markt und in der internationalen Wissenschaft sind eine ganze Reihe von numerischen Modellen zum Einsatz im Rahmen von Stadtklimaanalysen verfügbar. Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht über solche Modelle, die gegenwärtig vorrangig im Einsatz sind. 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, gleichzeitig aber auch die Komplexität der Nutzung und der Rechenaufwand. Bspw. werden Modelle der Kategorie 3 zurzeit hauptsächlich im wissenschaftlichen Kontext verwendet und für ihre Verwendung wird aufgrund ihres hohen Rechenaufwandes ein Zugang zu einem Hochleistungsrechner benötigt.

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

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

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	2	5 m – 1.000 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
KALM	1	20 m – 200 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
KLAM_21	1	20 m – 50 m	vereinfachter Kaltlufthaushalt
MUKLIMO_3	2	20 m – 100 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder
PALM-4U	3	15 m – 50 m	Kaltlufthaushalt, humanbioklimatische Indizes, Temperatur- und Windfelder



3. Bearbeitungs- und Beteiligungsprozess

Die Erstellung der Stadtklimaanalyse gliederte sich in einen dreistufigen Bearbeitungsprozess aus 1. Analyse, 2. Synthese und 3. Planerische Bewertung (Abbildung 10). Die Bearbeitungszeit lag zwischen Januar 2022 und Juni 2023. 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 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 Projektleitung beim Fachdienst Klima- und Umweltschutz gelöst.

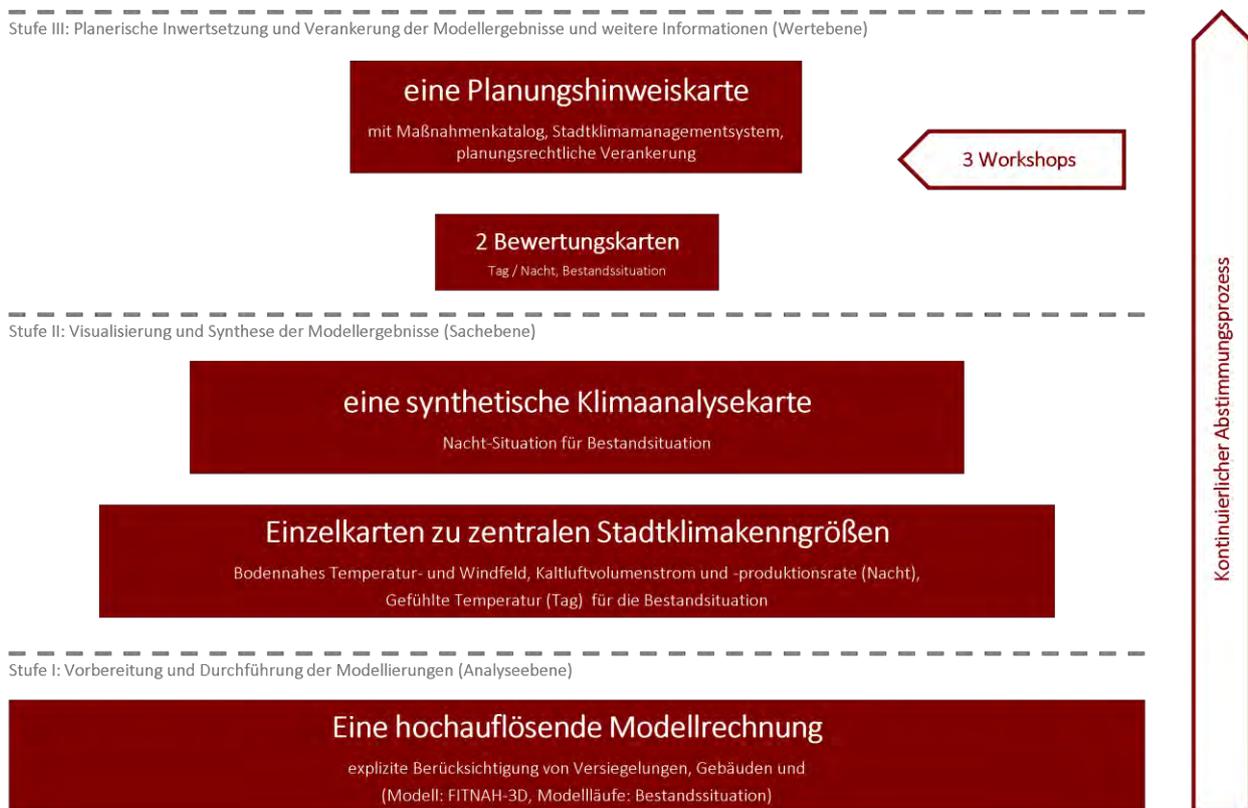


Abbildung 10: Die drei Bearbeitungsstufen der Stadtklimaanalyse

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 Rahmen 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 Bearbeitungsprozess 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 3787 Bl. 1 ab, ohne sich dabei von den dort definierten Grundgedanken zu lösen.



Folgende Institutionen, die alle relevanten verwaltungsinternen Dienststellen repräsentieren, waren regelmäßiges Mitglied der PAG:

- **Fachdienst Klima- und Umweltschutz**
- **Fachdienst Bauleitplanung und Städtebau**
- **Fachdienst Wirtschaftsförderung, Projektsteuerung und Liegenschaften**
- **Fachdienst Verkehrsplanung und -lenkung**
- **Fachdienst Schule und Sport**
- **Stabstelle Demografie und Sozialplanung**
- **Stadtentwässerungsbetrieb Lüdenscheid Herscheid AöR**
- **Zentrale Gebäudewirtschaft – ZGW**
- **Stadtreinigungs-, Transport- und Baubetrieb Lüdenscheid**
- **Lüdenscheider Wohnstätten AG**
- **Wald und Holz NRW**
- **ENERVIE - Südwestfalen Energie und Wasser AG**

Insgesamt fanden außer einem Kickoff-Termin, einer Online-Präsentation zu Zwischenergebnissen und einer Abstimmung zur Zukunftsperspektive drei Sitzungen der PAG in Form von Workshops zu folgenden Themenschwerpunkten statt:

- Kickoff (Online-Termin) am 11.01.2022
- Ergebnispräsentation und -diskussion (Online-Termin) am 25.05.2022 nach Fertigstellung der Modellrechnung
- Abstimmung zur Zukunftsperspektive (Online-Termin) am 07.06.2022
- Workshop I (Vor-Ort-Termin) am 10.08.2022 zur Klimaanalysekarte und den Vorbereitungen zur Bewertung der Ergebnisse
- Workshop II (Vor-Ort-Termin) am 24.10.2022 zu den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte
- Workshop III (Vor-Ort-Termin) am 08.02.2023 zur Finalisierung der Karten und Verknüpfungen zur Maßnahmenebene



4. Klima und Klimawandel im Raum Lüdenscheid

4.1 DATENGRUNDLAGE UND ANALYSEMETHODEN

Die folgende Beschreibung **der vergangenen klimatischen Entwicklung** in Lüdenscheid 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.

Anhand der Stadtgrenze Lüdenscheids 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 eines jüngeren Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Die Analyse **zukünftiger klimatischer Änderungen** stützt sich auf Daten numerischer, regionaler Klimamodelle der EURO-CORDEX-Initiative. EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX-Initiative, die regionale Projektionen des Klimawandels für alle terrestrischen Gebiete der Erde im Rahmen des Zeitplanes des fünften IPCC Assessment Reports (AR5) und darüber hinaus erstellt (Giorgi et al. 2009, IPCC 2013). EURO-CORDEX-Daten sind für die wissenschaftliche und kommerzielle Nutzung frei verfügbar und werden im Internet über mehrere Knoten der Earth System Grid Federation (ESGF) bereitgestellt.

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

Diesem Ansatz folgend, wurde für die Analyse der zukünftigen klimatischen Entwicklung von Lüdenscheid ein Modellensemble bestehend aus 19 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tab. A 1 im Anhang). Da EURO-CORDEX ein fortlaufendes Projekt ist und die Datenbanken mit den Modellergebnissen permanent aktualisiert werden, können bis zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Berichtes weitere Modellläufe für Europa hinzugekommen sein, die in der Auswertung nicht enthalten sind.



Die Mitglieder des Ensembles werden als gleichberechtigt angesehen und die Unterschiede in den Ergebnissen als Modellvariabilität betrachtet. Alle nachfolgenden Auswertungen wurden in enger Anlehnung an die Leitlinien zur Interpretation von Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgesprächs „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“ durchgeführt (Linke et al. 2016).

Räumliche und Zeitliche Auflöserung

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflöserung von einem Tag und einer räumlichen Auflöserung von ca. 12,5 km (0,11 °) verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl des dem Mittelpunkt von Lüdenscheid am nächsten gelegenen Gitterpunkts sowie der acht umliegenden Gitterpunkte. Die an diesen Gitterpunkten vorliegenden Zeitreihen der betrachteten meteorologischen Variablen wurden für jeden Zeitschritt (ein Tag) räumlich aggregiert, um auf diese Weise einheitliche, repräsentative Zeitreihen zu erhalten (vgl. DWD 2020a).

RCP-Szenarien

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = Representative Concentration Pathways), die seit dem fünften IPCC-Bericht die SRES-Szenarien abgelöst haben (Special Report on Emission Scenarios). 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; Abbildung 11):

- Das RCP-Szenario 2.6 beschreibt einen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis zum Jahr 2040 auf ca. 3 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 RCP 2.6 als „Klimaschutzszenario“ bezeichnet wird.
- RCP 4.5 zeigt einen steilen Anstieg des anthropogenen Strahlungsantriebes bis etwa zur Mitte des 21. Jahrhunderts, der danach bis ca. 2075 nur noch geringfügig steigt und in der Folge stagniert.
- Das RCP-Szenario 8.5 weist den stärksten Anstieg des Strahlungsantriebes auf, der sich bis zum Ende des Jahrhunderts nicht abschwächt und eine Zunahme der globalen Mitteltemperatur um ca. 4,8 °C gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde. Das RCP 8.5 wird auch als „Weiter wie bisher-Szenario“ bezeichnet.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. Aktuell befinden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen CO₂-Emissionen auf dem „Pfad“ des RCP-Szenarios 8.5 (Boden 2017, Peters et al. 2013). Selbst ein abrupter weltweiter Rückgang des CO₂-Ausstoßes würde, aufgrund der Trägheit des Klimasystems, in Kürze keine signifikante Änderung herbeiführen. Im vorliegenden Bericht sind aus diesem Grund vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert, die Auswertungen der RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 finden sich jeweils im Anhang.

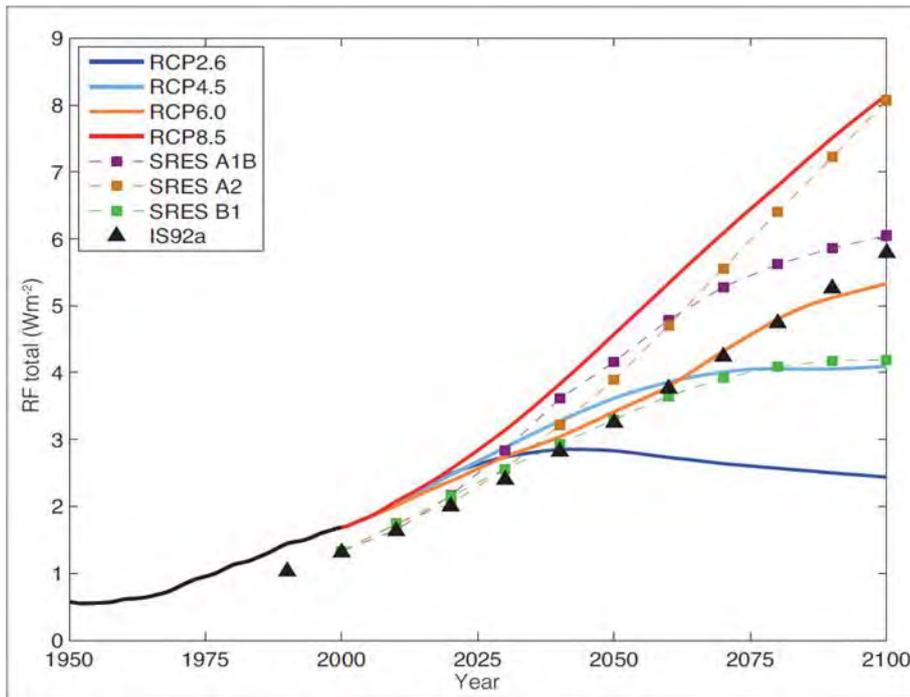


Abbildung 11: Anthropogener Strahlungsantrieb (RF = Radiative Forcing) der verschiedenen IPCC-Klimaszenarien (die schwarze Linie repräsentiert Messwerte; Cubasch et al. 2013).

Meteorologische Kenntage

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

Einige Modellläufe der regionalen Klimamodelle zeigen bei bestimmten meteorologischen Variablen teilweise systematische Abweichungen (Bias) von den realen Gegebenheiten. Es wird davon ausgegangen, dass der Wertebereich der Abweichungen für den Referenzzeitraum in etwa genauso groß ist wie für die Zukunftszeiträume. Bei einer ausschließlichen Betrachtung der Unterschiede zwischen Zukunft und Referenz haben die Abweichungen, also deren Differenz, daher keinen Einfluss auf die Aussage.

Bei der schwellenwertbasierten Berechnung von Kenntagen können die benannten systematischen Abweichungen jedoch zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Schwellenwerte im Vergleich zu den beobachteten Werten führen. „Ist ein Modell z.B. im Mittel etwas zu warm, so werden in diesem Modell möglicherweise auch besonders viele warme und/oder besonders wenige kalte Kenntage identifiziert“ (ReKliEs-De 2017). Aus diesem Grund wurden für jede Modellsimulation die Schwellenwerte mit der Methode des Quantile-Mappings adjustiert (Piani et al. 2010, Themeßl et al. 2011). Für jeden Kenntag wurde dementsprechend aus den Beobachtungsdaten das jeweilige Perzentil der statistischen Verteilung berechnet und anhand dieses Perzentilwertes aus dem Referenzlauf jeder Modellsimulation der adjustierte Schwellenwert bestimmt (vgl. Abb. A 1 im Anhang). Die Auswertung der Regionalmodellsimulationen wurde dann mit den adjustierten Kenntagen durchgeführt, um systematische Verzerrungen der Ergebnisse weitgehend zu vermeiden.



Statistische Auswertung

Die Analyse des zukünftigen Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1991 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (vgl. Tab. A 2 im Anhang).

Für die Beschreibung des zukünftigen Klimawandels werden klimatische Beobachtungen einer sogenannten Referenzperiode benötigt. Diese sollte einen Zeitraum umfassen, in dem die klimatischen Auswirkungen der globalen Erwärmung noch nicht so stark in Erscheinung getreten sind. Die World Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten 30-jährigen Klimanormalperiode von 1961 – 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt und der Zeitraum bereits mehrere Jahrzehnte zurückliegt, wurde hier der Zeitraum von 1991 – 2020 als Referenzperiode festgelegt.

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

- Referenzperiode: 1991 – 2020
- 1. Zukunftsperiode (nahe Zukunft): 2021 – 2050
- 2. Zukunftsperiode (mittelfristige Zukunft): 2041 – 2070
- 3. Zukunftsperiode (ferne Zukunft): 2071 – 2100

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

Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (vgl. Abbildung 12).

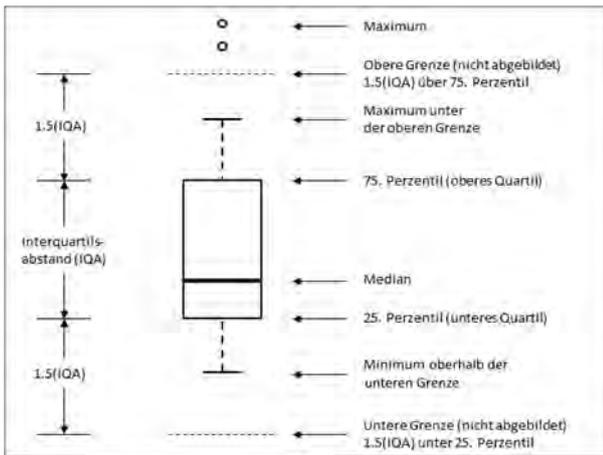


Abbildung 12: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

4.2 KLIMA IN GEGENWART UND VERGANGENHEIT

Das Stadtgebiet von Lüdenscheid liegt im Nordwesten des Sauerlandes und geografischen gesehen in der sogenannten Lüdenscheider Mulde. Das warm-gemäßigte Klima in Lüdenscheid spiegelt sich in einer **Jahresmitteltemperatur** von 8,8 °C und einer **jährlichen Niederschlagssumme** von 1216 mm in der Referenzperiode 1991 – 2020 wider. Das Klimadiagramm ist in Abbildung 13 aufgetragen. Damit ist das Gebiet als Ganzes 0,5 °C kälter als im deutschlandweiten Durchschnitt von 9,3 °C. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt deutlich über dem gesamtdeutschen Mittelwert von ca. 790 mm/Jahr (DWD 2020).

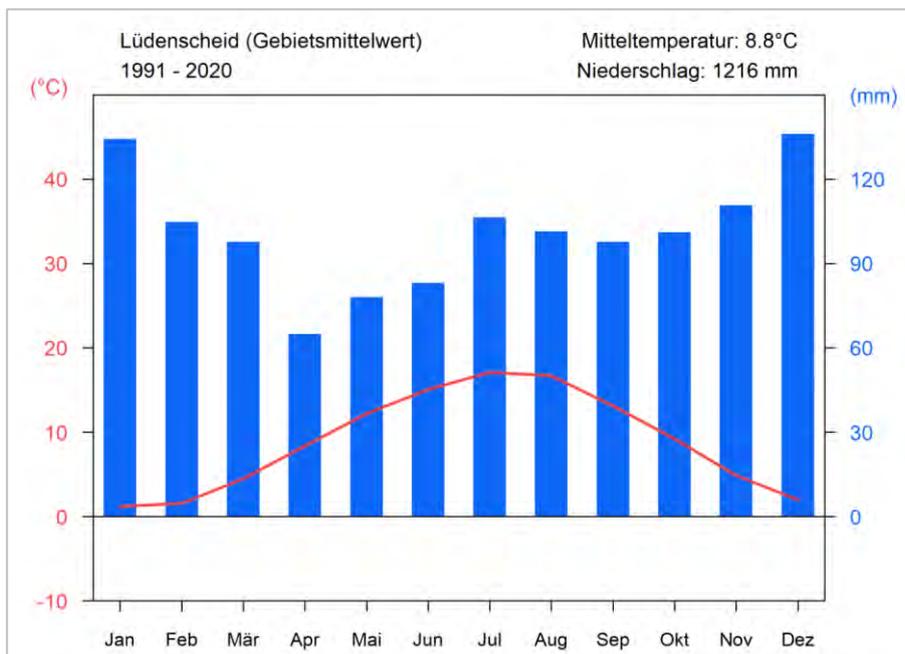


Abbildung 13: Klimadiagramm der Stadt Lüdenscheid für den Referenzzeitraum 1991 – 2020 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).

Beim Blick in die Vergangenheit wird deutlich, dass in Lüdenscheid – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine Erwärmung stattgefunden hat. So ist die **Temperatur** seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um ca. 1,5 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind



die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in den letzten zwei Dekaden aufgetreten – darunter die Top 4 Jahreswerte allein in den letzten zehn Jahren (Abbildung 14).

Die beobachtete Erwärmung geht mit einer deutlichen Veränderung der Anzahl meteorologischer Kenntage einher. So ist die Anzahl an Sommertagen in Lüdenscheid um 9 Tage auf durchschnittlich 26 Tage pro Jahr im Vergleich der Perioden 1961 – 1990 zu 1991 – 2020 gestiegen. Ebenso ist die Auftrittshäufigkeit der als besonders belastend geltenden Heißen Tage gestiegen (Tabelle 2). Eine entgegengesetzte Entwicklung zeigen Frost- bzw. Eistage, deren Anzahl im selben Zeitraum um 4 bzw. 6 Tage pro Jahr zurückgegangen ist. Da die Auswertungen der DWD-Grids (DWD 2022b) keine Aussagen zu Tropennächten zulassen, können zu dieser Kennzahl keine statistisch belastbaren Erkenntnisse gewonnen werden. Als Referenz kann nur die Messung der nächstgelegenen DWD-Station Lüdenscheid herangezogen werden, nach der Tropennächte gegenwärtig statistisch gesehen weniger als einmal pro Jahr auftreten.

In Bezug auf den **Niederschlag** sind in der Vergangenheit kaum eindeutige Auswirkungen durch den Klimawandel festzustellen. Seit Beginn der systematischen Messungen Ende des 19. Jahrhunderts zeigt sich ein leicht signifikanter Trend steigender Jahresniederschläge (Abbildung A 2 im Anhang) mit einem Peak rund um die 1960er Jahre. Im Vergleich der Klimanormalperioden 1961-1990, 1971-2000 und 1991-2020 zeigt sich dann eher wieder ein abnehmender Trend (Tabelle 2).

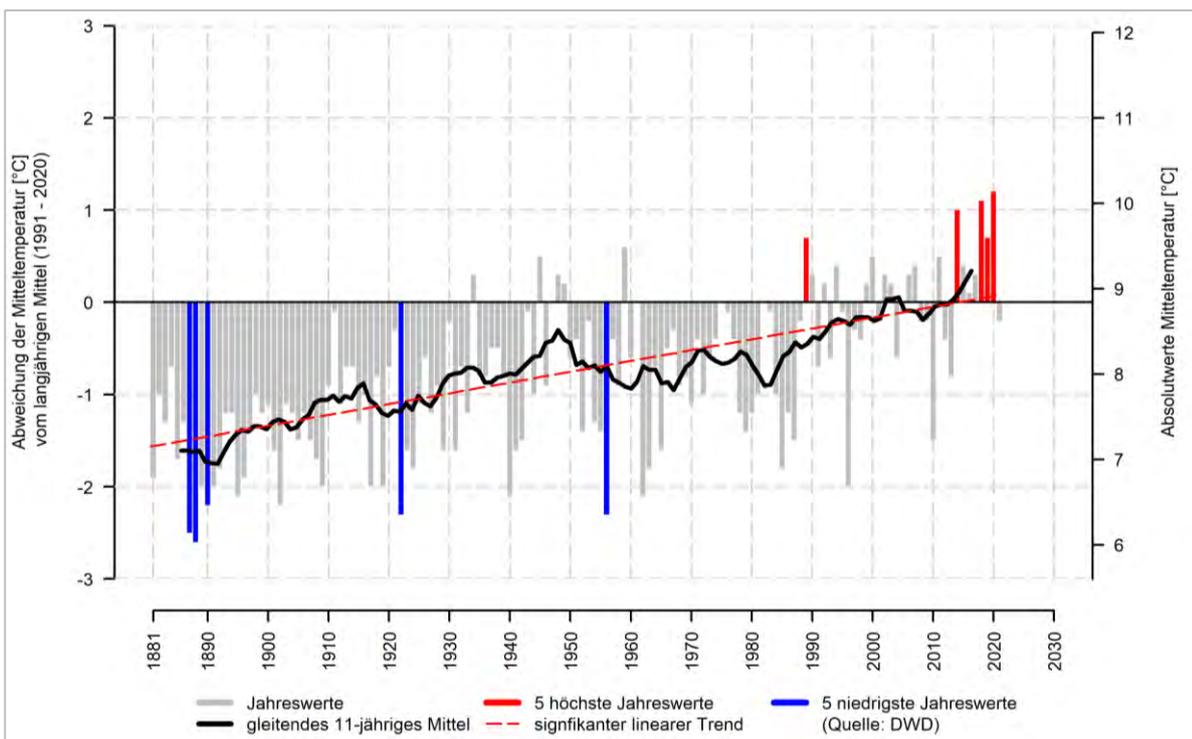


Abbildung 14: Entwicklung der Mitteltemperatur in Lüdenscheid im Zeitraum von 1881 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2022b).



Tabelle 2: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorolog. Kenntagen in Lüdenscheid in der Vergangenheit (nach DWD 2022a bzw. DWD 2022b).

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
tägliches Maximum der Lufttemperatur [°C]	11,6	11,9	12,8
Mittelwert der Lufttemperatur [°C]	8,1	8,3	8,8
tägliches Minimum der Lufttemperatur [°C]	5	5,2	5,1
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	17	20	26
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	2	3	5
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr] ²	keine Angabe	Keine Angabe	0
Frosttage ($T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	80	75	76
Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	23	19	17
<hr/>			
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	1246	1230	1215
Tage mit Niederschlag > 10 mm [n/Jahr]	39	39	39
Tage mit Niederschlag > 20 mm [n/Jahr]	11	11	10
Tage mit Niederschlag > 30 mm [n/Jahr]	3	3	3

Mit der zunehmenden Erwärmung steigt das Potenzial für Starkniederschläge, die statistisch schwer zu erfassen sind, da sie eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität besitzen und oftmals nur lokal auftreten. Eine flächendeckende Erfassung solcher Ereignisse mittels Radar ist erst seit Beginn des 21. Jahrhunderts möglich (Radar-Online-Aneichung; vgl. DWD 2022c). Diese Zeitreihen sind jedoch noch zu kurz, um gesicherte klimatische Aussagen treffen zu können. Längere Zeitreihen liegen für Tageswerte des Niederschlags vor. Dabei können nur Häufigkeiten von Niederschlägen über einem bestimmten Schwellenwert ausgewertet werden (bspw. Tage > 10 mm Niederschlag), eine Kombination mit der Dauer des zugehörigen Ereignisses ist nicht möglich.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts sind in Lüdenscheid keine signifikanten Änderungen an Tagesniederschlägen von mehr als 10, 20 bzw. 30 mm zu erkennen (Tabelle 2). Für die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 30 mm deutet sich eine leicht abnehmende Häufigkeit an (vgl. Abbildung 15), die aufgrund ihrer Seltenheit jedoch statistisch nicht abschließend belegt werden kann.

Die Messungen zur Windrichtung und Windgeschwindigkeit an der DWD-Station Lüdenscheid dienen als Referenz für die Beurteilung der Windverhältnisse in der Stadt Lüdenscheid. Die langjährige mittlere Windgeschwindigkeit liegt bei 3,1 m/s, wobei Windgeschwindigkeiten zwischen 1,6 – 5,4 m/s am häufigsten auftreten (leichte Brise bis schwacher Wind). In den Nachtstunden und auch am Tage dominieren Winde aus westlicher oder südwestlicher Richtung, mit einem zweiten kleinen Maximum bei (nord)östlichen Richtungen (Abbildung 16).

² Abgeleitet aus Messungen an der DWD Station Lüdenscheid (DWD 2022a).

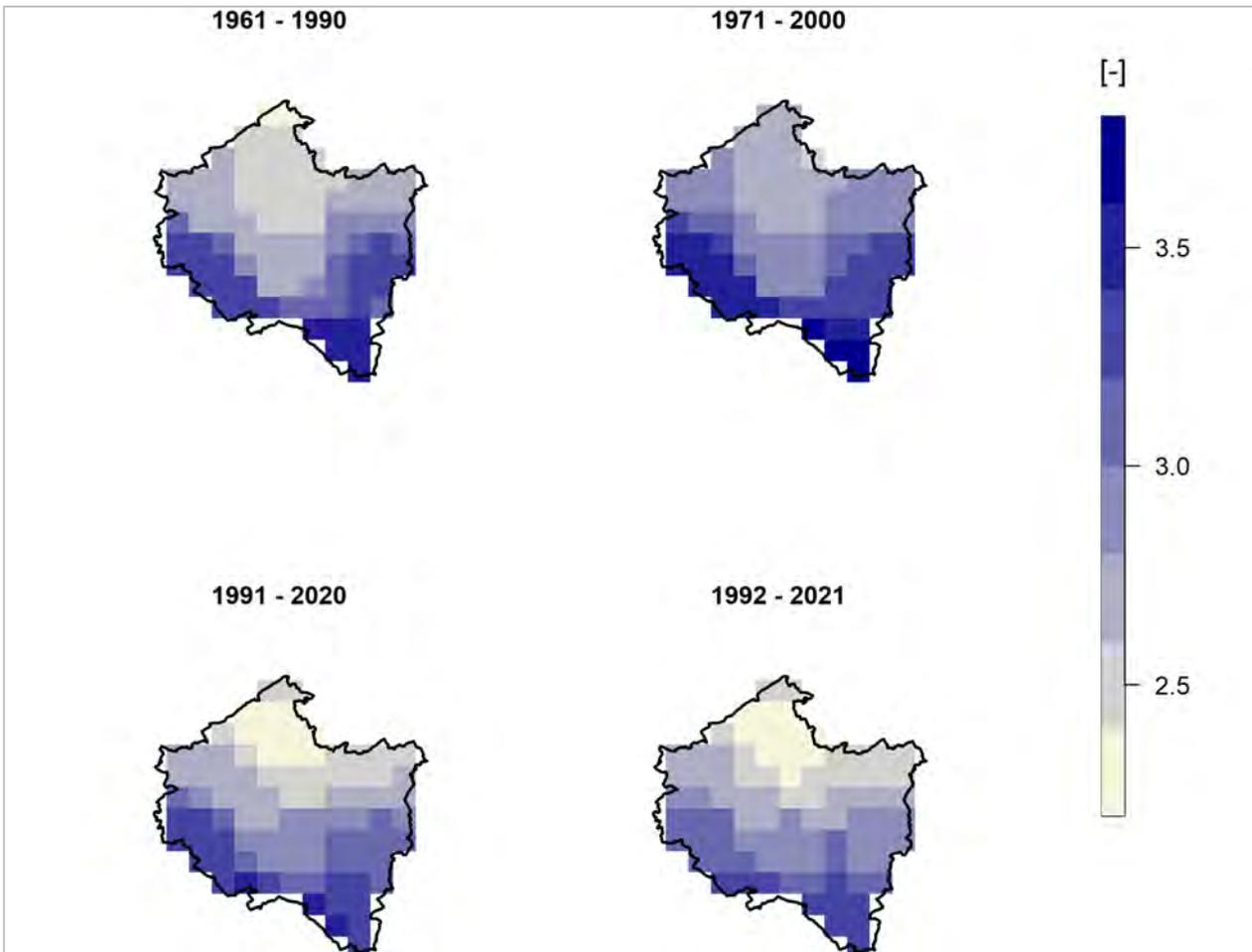


Abbildung 15: Langjährige Entwicklung der jährlichen Anzahl an Tagen mit einem Niederschlag > 30 mm in Lüdenscheid (nach DWD 2022b).

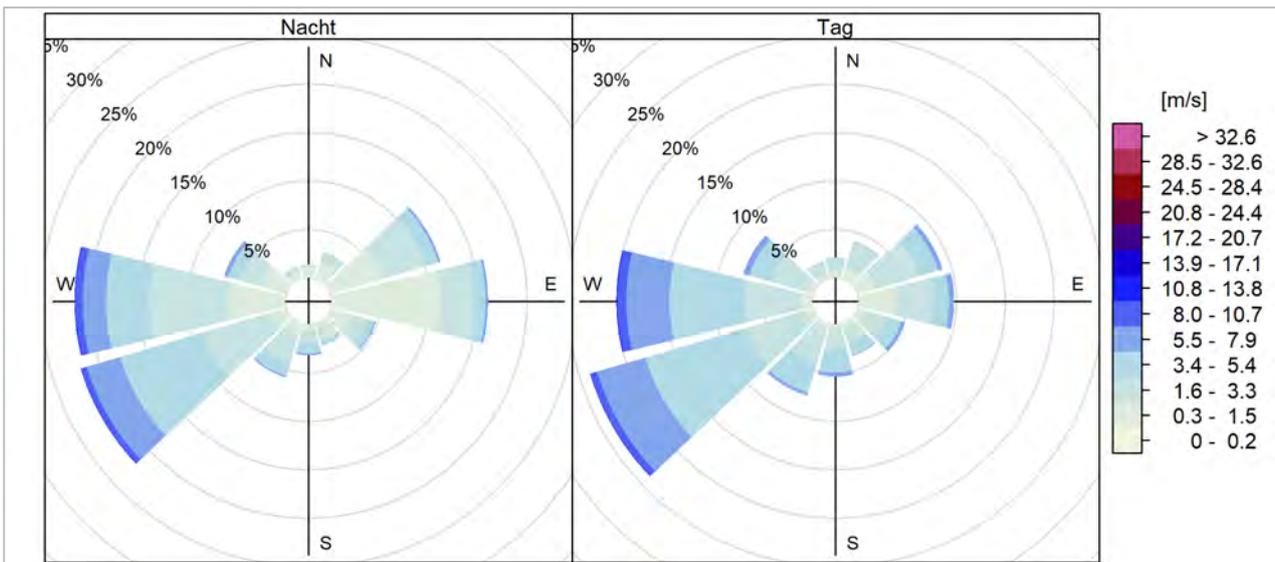


Abbildung 16: Windrichtungsverteilung in der Nacht (links) und am Tag (rechts) in Lüdenscheid für den Zeitraum 1994 – 2020, basierend auf der nächstgelegenen DWD-Station Lüdenscheid (DWD 2022a).



4.3 AUTOCHTHONE WETTERLAGEN

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

An der für Lüdenscheid repräsentativen Station in Düsseldorf traten im langjährigen Mittel der letzten 30 Jahre 58,4 windschwache Strahlungs-nächte pro Jahr auf, wobei saisonale Unterschiede mit einer höheren Anzahl im Sommerhalbjahr zu verzeichnen sind (Abbildung 17). In den drei Sommermonaten Juni, Juli und August wurden im monatlichen Mittel rund 7 windschwache Strahlungs-nächte beobachtet, was einem Anteil von 22,9 % pro Monat entspricht –ca. jede fünfte Sommernacht steht folglich unter autochthonen Bedingungen.

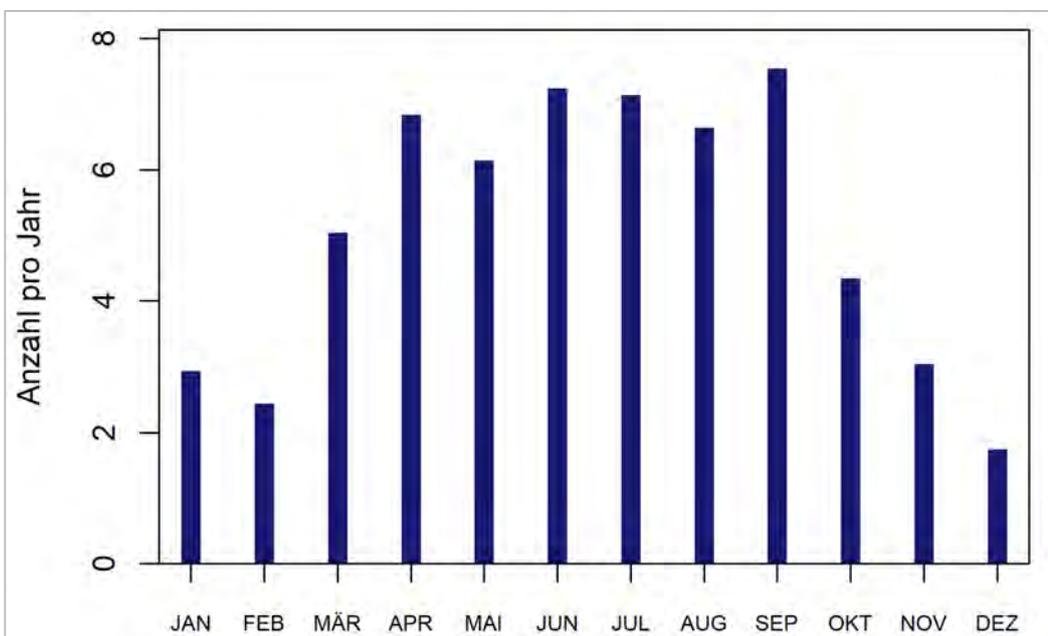


Abbildung 17: Langjährige mittlere monatliche Anzahl an windschwachen Strahlungs-nächten in Lüdenscheid (58,4 pro Jahr) für den Zeitraum 1995 - 2021, basierend auf der nächstgelegenen repräsentativen DWD-Station Lüdenscheid (DWD 2022a).

4.4 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN

4.4.1 TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

Die zwei RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 projizieren ein Ansteigen der **Jahresmitteltemperatur** in Lüdenscheid bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 18 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen in diesen Szenarien auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen in diesen Szenarien (Tabelle 3). Der Temperaturanstieg fällt im RCP-Szenario 8.5 am höchsten aus, wobei die stärksten Zunahmen am Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen sind. Nur im Klimaschutzszenario 2.6 kann eine gegenteilige Entwicklung zum Ende des Jahrhunderts angenommen werden. Nach einem moderaten Temperaturanstieg und einer



Stagnation ungefähr ab Mitte des Jahrhunderts wird eine leichte Abnahme zum Ende des Jahrhunderts erwartet, da sich dann die positiven Auswirkungen der im RCP 2.6 angenommenen globalen Klimaschutzmaßnahmen bemerkbar machen.

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglichkeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). Der Erwartungsbereich zeigt die Bandbreite zwischen dem 15. und 85. Perzentil des Modellensembles. Ferner sei darauf hingewiesen, dass der in Abbildung 18 abgebildete, bereits vergangene Zeitraum ab 2006 durch Modelldaten und nicht durch Beobachtungsdaten repräsentiert wird (dies gilt für alle Diagramme mit Zeitreihen von Modelldaten in diesem Kapitel).

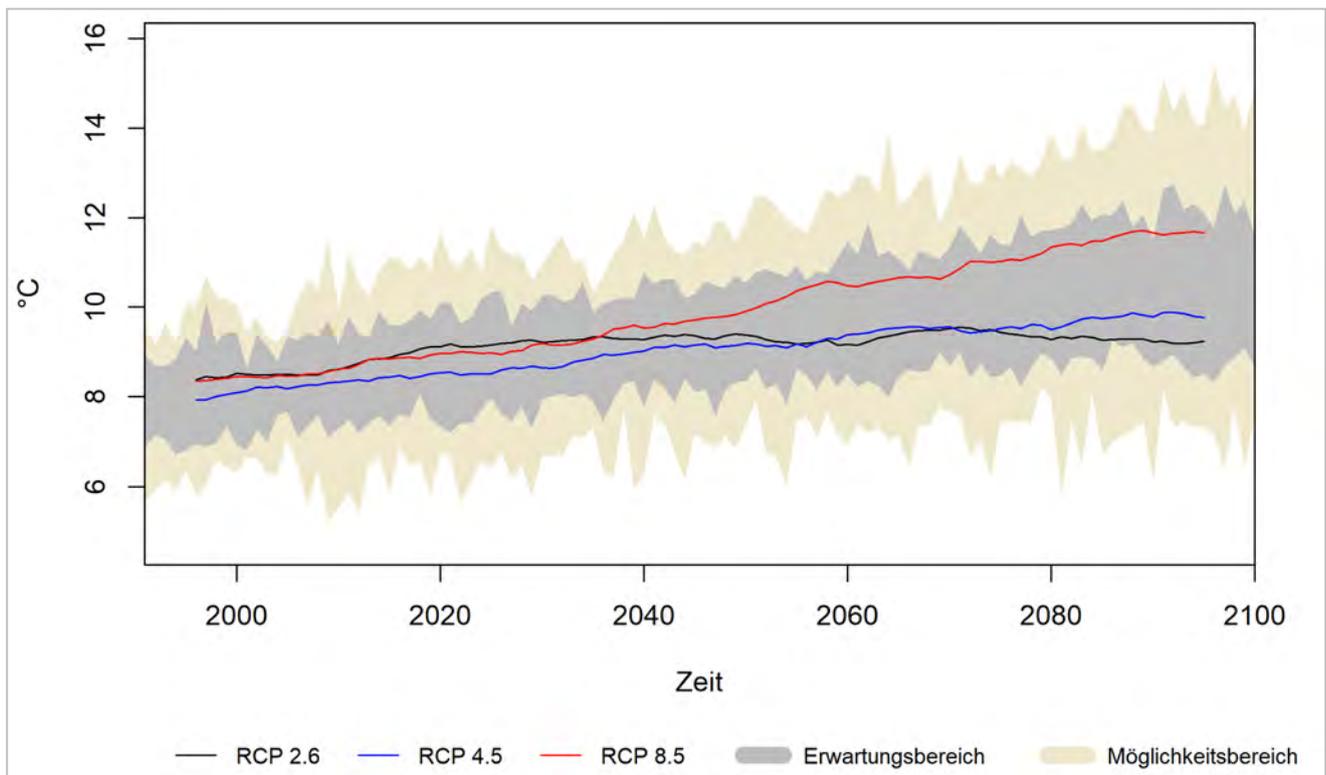


Abbildung 18: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Lüdenscheid (alle RCP-Szenarien).

Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Sommer und Herbst größere Temperaturänderungen auf als im Frühjahr und Winter (Abbildung 19). Dieses Muster zeigen alle drei RCP-Szenarien (vgl. Abbildung A 3 im Anhang), wobei die Zunahmen im RCP 8.5 am höchsten ausfallen und sich generell zum Ende des Jahrhunderts verstärken (rote Boxen in Abbildung 19).



Tabelle 3: Langjährige Änderung der Temperatur in Lüdenscheid (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P15	P50	P85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Jahresmitteltemperatur [°C]	RCP 2.6	0,4	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,6	0,7	0,9
	RCP 4.5	0,5	0,7	0,9	0,7	1,1	1,5	1,2	1,6	1,9
	RCP 8.5	0,5	0,8	1,2	1,3	1,7	2	2,6	2,9	3,9
Mittleres Tagesminimum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0	0,8	4,6	0,7	1	2,6	0,6	1,5	4,7
	RCP 4.5	1,4	1,9	3,3	2,1	3,5	5	3	3,9	5,2
	RCP 8.5	0,9	2	2,6	1,6	3,3	5,1	5	6,9	10,2
Mittleres Tagesmaximum der Temperatur [°C]	RCP 2.6	0	1,1	1,7	0,1	1	1,8	0,2	1	1,6
	RCP 4.5	0,6	0,8	1,8	0,9	1,5	2,3	1,2	2	3,1
	RCP 8.5	0,4	0,8	1,8	1,6	2,5	3,6	3,4	4,1	6,5

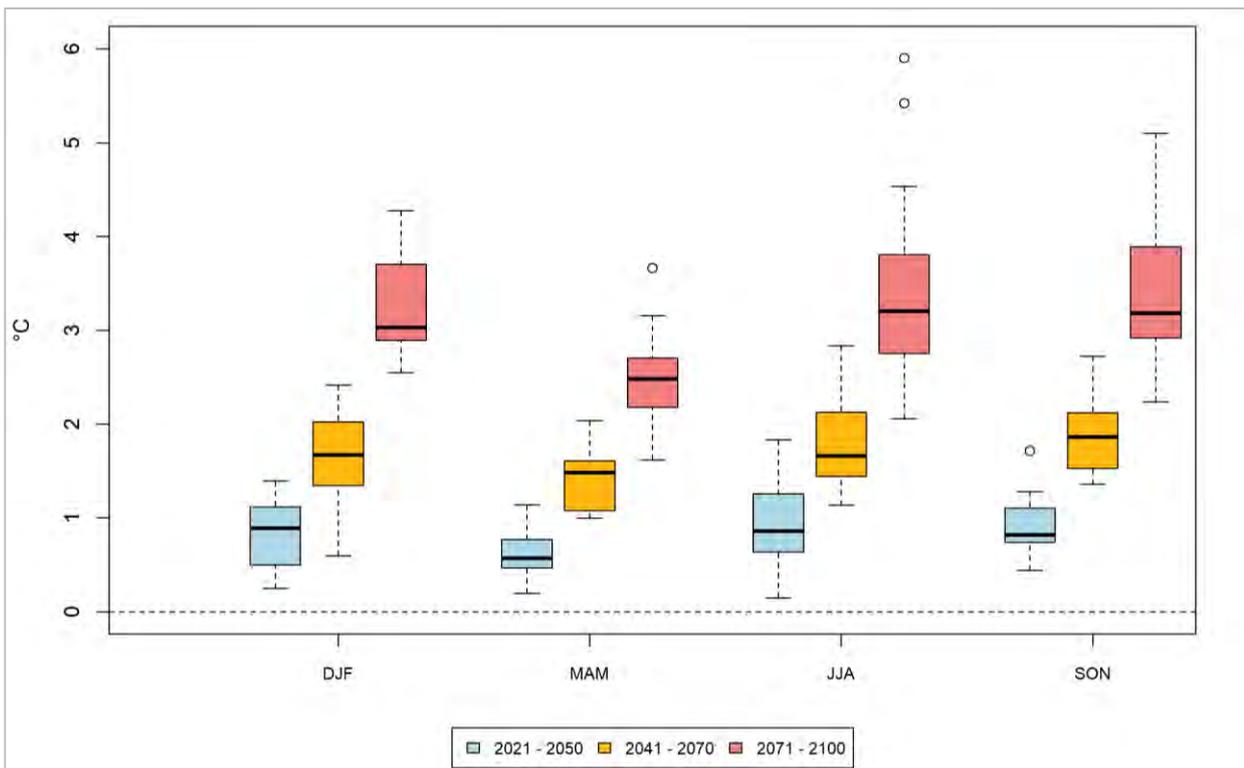


Abbildung 19: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen in Lüdenscheid (RCP 8.5).

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die eine anschaulichere Sicht auf klimatische Änderungen zulassen. So nimmt die durchschnittliche jährliche Anzahl an **Sommertagen** und **Heißen Tagen** zukünftig deutlich zu (Tabelle 4). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhunderts im Mittel mit ca. 13 Heißen Tagen mehr pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1991 – 2020) nur 5-mal jährlich auftraten (s. Tabelle 2).



Tropennächte treten in Lüdenscheid derzeit so gut wie nie auf (im Mittel weniger als eine Tropennacht pro Jahr). In der nahen Zukunft (2021 – 2050) erhöht sich die Zahl der Tropennächte pro Jahr wenig (Tabelle 4), wobei die statistische Signifikanz aufgrund des seltenen Auftretens eingeschränkt ist. Erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts wird die Entwicklung stark vom zugrunde gelegten Szenario beeinflusst. Während die Häufigkeit von Tropennächten im RCP 2.6 weiter stagniert, prognostiziert das RCP 8.5 für den Zeitraum bis 2070 eine Zunahme um 2 Nächte dieser Art. In der 3. Zukunftsperiode steigt die Änderung im stärksten Szenario gar bis auf ca. 7 zusätzliche Tropennächte pro Jahr in Lüdenscheid an. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in innerstädtischen Bereichen ist eine noch höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für **Hitzeperioden** gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindestens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden in Lüdenscheid zukünftig länger andauern (Abbildung A 4 im Anhang). Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um bis zu 5 Tage.

Tabelle 4: Langjährige Änderung thermischer Kenntage in Lüdenscheid (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2021 – 2050			2041 – 2070			2071 – 2100		
		P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85	P 15	P 50	P 85
Sommertage (T _{max} ≥ 25°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,4	5,3	10,4	1,7	5,3	11,3	2,3	7	9,7
	RCP 4.5	0,5	4,5	8,3	3,3	10,6	15	8,8	10,6	17,2
	RCP 8.5	3,6	6	15,4	12,9	14,3	26,8	26,4	32,2	48,3
Heiße Tage (T _{max} ≥ 30°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0,4	1,8	4,9	-0,1	1,3	4,9	1,3	2,9	4,5
	RCP 4.5	0,9	2,1	3,7	2,3	3,6	5,6	3,7	4,8	6,7
	RCP 8.5	1,2	2,5	5,9	4,8	5,7	10,5	10,2	13,4	19,9
Tropennächte (T _{min} ≥ 20°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0,2	0,5	0,1	0,2	0,6	0,1	0,4	1
	RCP 4.5	0,2	0,4	0,7	0,5	0,8	1,3	0,9	1,4	2
	RCP 8.5	0	0,5	0,9	1,3	2,2	2,7	4,3	6,5	12,3
Frosttage (T _{min} < 0°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	-4,5	-11,5	-18,7	-11,8	-14	-17,6	-8	-12	-15,5
	RCP 4.5	-11,2	-14,7	-16,4	-15,2	-18,8	-29,2	-26,4	-30,5	-32,7
	RCP 8.5	-11,3	-14,7	-16,5	-23,1	-26,3	-30,2	-43,3	-46,6	-49,5
Eistage (T _{max} < 0°C) [n/Jahr]	RCP 2.6	-2,4	-3,3	-7	-2,5	-4	-6,6	-2,6	-5,4	-7,6
	RCP 4.5	-4,1	-5,1	-7,2	-5	-7,6	-10,2	-8,5	-9,8	-10,2
	RCP 8.5	-2,4	-4,8	-7	-4,7	-8,5	-10,3	-12,1	-13	-14,1



Neben den auf die hohen Temperaturen abzielenden Kenntagen führt die eingangs beschriebene deutliche Zunahme der Minimumtemperaturen zu einer Abnahme an **Frost- und Eistagen**. In Lüdenscheid werden im langjährigen Mittel 76 Frosttage bzw. 17 Eistage pro Jahr beobachtet (Referenzperiode 1991 – 2020). Gemäß des RCP-Szenarios 8.5 würden zum Ende des Jahrhunderts im Mittel jährlich nur noch 29 Frosttage bzw. 4 Eistage auftreten. Dieser Trend lässt ein häufigeres Auftreten milderer Winter erwarten, die eine geringere Zahl an Tagen mit Frost- und Tauwechselln und eine verlängerte Vegetationsperiode nach sich ziehen.

4.4.2 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG UND TROCKENHEIT

4.4.2.1 NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

In Bezug auf die **Jahresniederschlagssumme** sind in Lüdenscheid keine eindeutigen Auswirkungen durch den Klimawandel auszumachen. Wird der Median aller Modellrechnungen herangezogen, zeigen die RCP-Szenarien 4.5 und 8.5 leicht steigende Jahresniederschläge über das 21. Jahrhundert, während infolge des RCP 2.6 langfristig eventuell sinkende Jahresniederschläge zu erwarten sind (Tabelle 5, auch Abbildung A 5 im Anhang). 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 Lüdenscheid 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 und August, teils noch für September, deutlich geringere Niederschlagssummen projiziert (Abbildung 20). Die RCP-Szenarien 2.6 und RCP 4.5 weisen, wenn auch in geringerer Ausprägung, dieselben Änderungsmuster auf (Abbildung A 6 im Anhang). Die in den Abbildungen wahrnehmbare **Niederschlagsverschiebung** mit Abnahmen im Sommer und Zunahmen vornehmlich im Winter beinhaltet statistische Unsicherheiten, sollte jedoch als auffallende Tendenz mindestens Erwähnung finden.

Tabelle 5: Langjährige Änderung der mittl. Niederschlagssumme in Lüdenscheid (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Variable	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
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	RCP 2.6	-61,9	6,8	75,3	-82,2	-19,6	36,9	-53,5	-22,3	27,9
	RCP 4.5	3,6	28,6	57,5	-6,6	25,1	49,2	-3,6	26,9	85
	RCP 8.5	-23,7	19,7	62,4	-12,3	16,5	37,9	-21,8	38	119,2

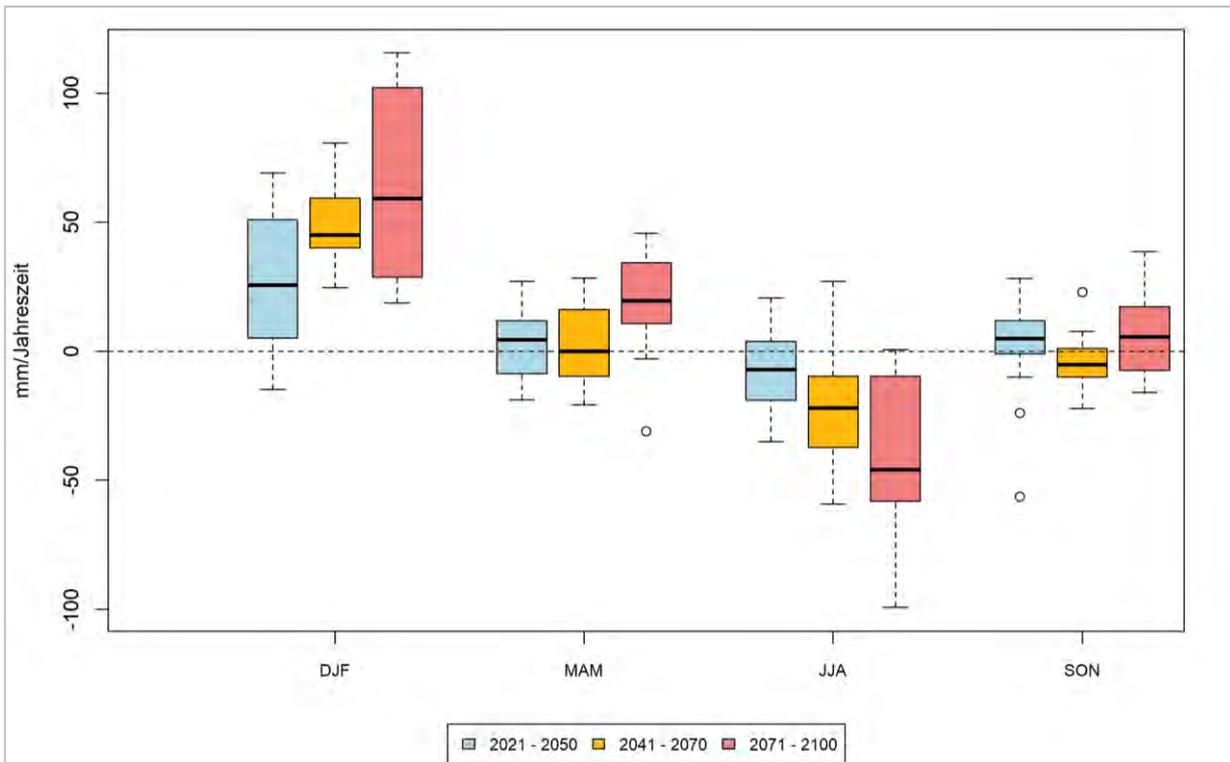


Abbildung 20: Änderung der langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen in Lüdenscheid (RCP 8.5).

4.4.2.2 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 (Wasserdargebot) zu potenzieller Verdunstung (Wasserverlust).

In der Jahressumme sind keine relevanten Änderungen der klimatischen Wasserbilanz in Lüdenscheid feststellbar. Die erwarteten saisonalen 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 im Sommer deutliche und in Herbst leichte 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 (Abbildung A 7 im Anhang). Genau wie beim Niederschlag zeigt die Entwicklung in den RCP-Szenarien 2.6 und 4.5 vergleichbare Muster, doch muss 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. längere anhaltende Trockenperioden vermuten, jedoch sind die in den Modellen projizierten Änderungen zu gering, um valide Aussagen treffen zu können (vgl. exemplarisch die Häufigkeit extremer Trockenperioden in Abbildung A 8 im Anhang).

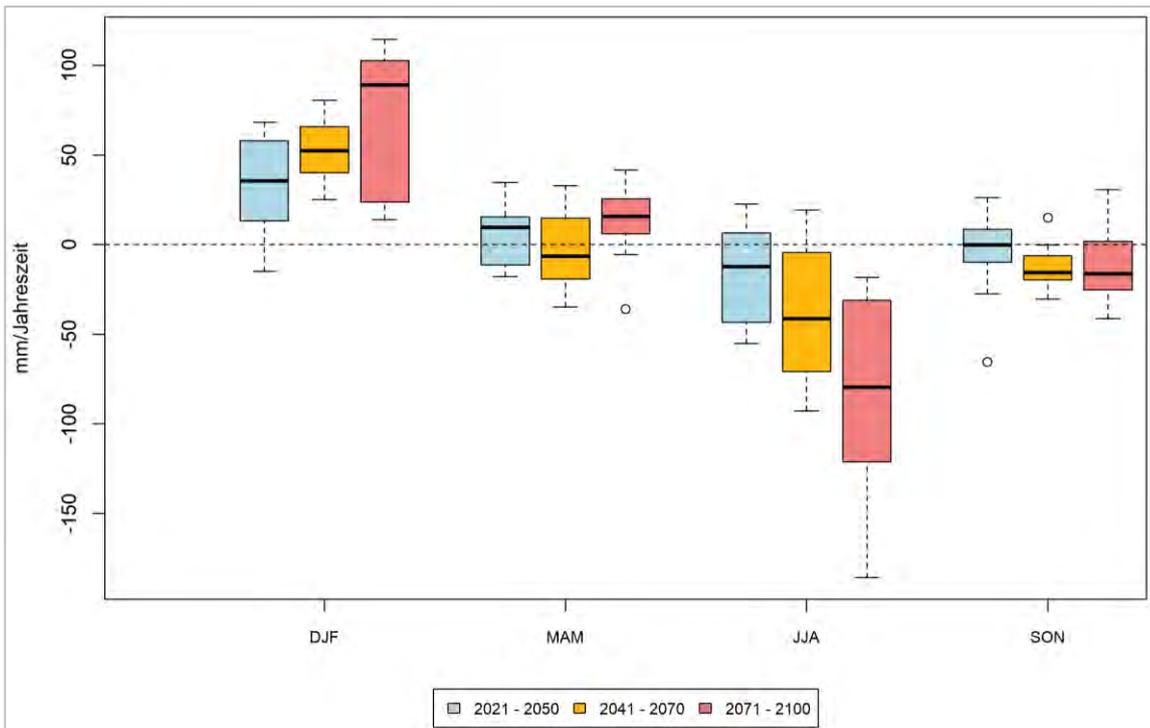


Abbildung 21: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Lüdenscheid (RCP 8.5)

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 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 folgende Schwellenwerte der täglichen Niederschlagssumme zur Identifizierung von Starkregenereignissen festgelegt:

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

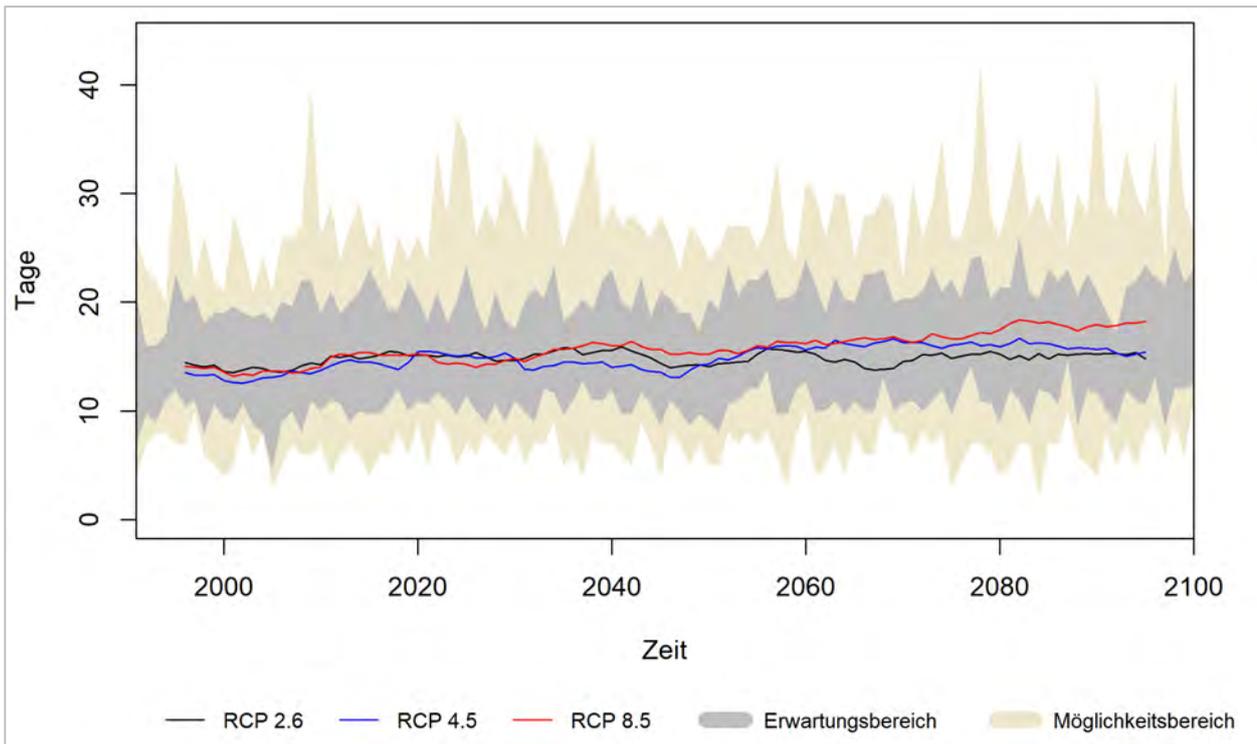


Abbildung 22: Zeitlicher Trend der Anzahl an Tagen pro Jahr mit stärkerem Niederschlag ($N \geq 20$ mm/d) in Lüdenscheid (alle Szenarien).

Starkregenereignisse treten relativ selten auf, sodass auch die mittleren jährlichen Änderungen der Häufigkeit solcher Ereignisse äußerst gering ausfallen und statistische Auswertungen nur bedingt möglich sind. Dies wird bspw. bei der langjährigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit stärkerer Niederschläge ($N \geq 20$ mm/d) deutlich, die keinen eindeutigen Trend zulässt (siehe Tabelle 6).

Aufgrund des enormen Schadenspotenzials sollten jedoch (in absolute Zahlen) geringe Änderungen nicht außer Acht gelassen werden. So projizieren die regionalen Klimamodelle für die Ereignisse $N \geq 10$ mm/d und $N \geq 20$ mm/d überwiegend steigende Häufigkeiten, wobei die Zunahmen zum Ende des Jahrhunderts hin am größten sind (Tabelle 6). Bei diesen Zahlen sind die genannten Unsicherheiten zu beachten, doch zumindest im RCP-Szenario 8.5 liefert knapp die Hälfte der Modelle signifikante Zunahmen um 1-3 Ereignisse in den jeweiligen Zukunftszeiträumen.

Starkniederschläge ≥ 30 mm/d treten momentan sehr selten auf (im Mittel 3 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 6 und Abbildung 23).

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 2022). 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.

Tabelle 6: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen (Anzahl Tage pro Jahr) sowie des maximalen Tagesniederschlags in Lüdenscheid (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1991 – 2020								
		2021 – 2050			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	-3,5	-0,4	3,8	-4,1	-1,1	1,4	-4	-1,1	2,1
	RCP 4.5	0,9	2,2	2,6	0,7	1,9	3,4	-0,7	0,6	5,1
	RCP 8.5	-1,2	2,1	3,9	0,9	1,7	2,3	0,5	3	5,8
Stärkerer Niederschlag (N ≥ 20mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,7	0,2	2,2	-0,8	-0,2	0,9	-0,8	0,2	1,1
	RCP 4.5	-0,3	0,5	1,7	0,5	1,8	2,5	0,7	1,9	2,4
	RCP 8.5	0	0,8	1,6	0,4	1,3	2,8	2,5	3,8	4,3
Starkniederschlag (N ≥ 30mm/d) [n/Jahr]	RCP 2.6	-0,5	0,5	1	-0,4	0	0,4	-0,1	0,3	0,7
	RCP 4.5	-0,2	0,4	1,2	0	0,6	1,1	0,3	0,7	1,1
	RCP 8.5	-0,5	0,1	0,7	-0,1	0,4	1,6	0,9	1,9	2,7
Maximaler Tagesniederschlag [mm/d]	RCP 2.6	-0,2	2,4	5,5	-3,1	1,6	4,2	-2,6	2,5	5,9
	RCP 4.5	0,7	2,6	6	1,5	2	5,2	0,2	3,5	8,3
	RCP 8.5	-3,8	1,1	4,6	-1,7	1,8	8,2	2	7	12,4

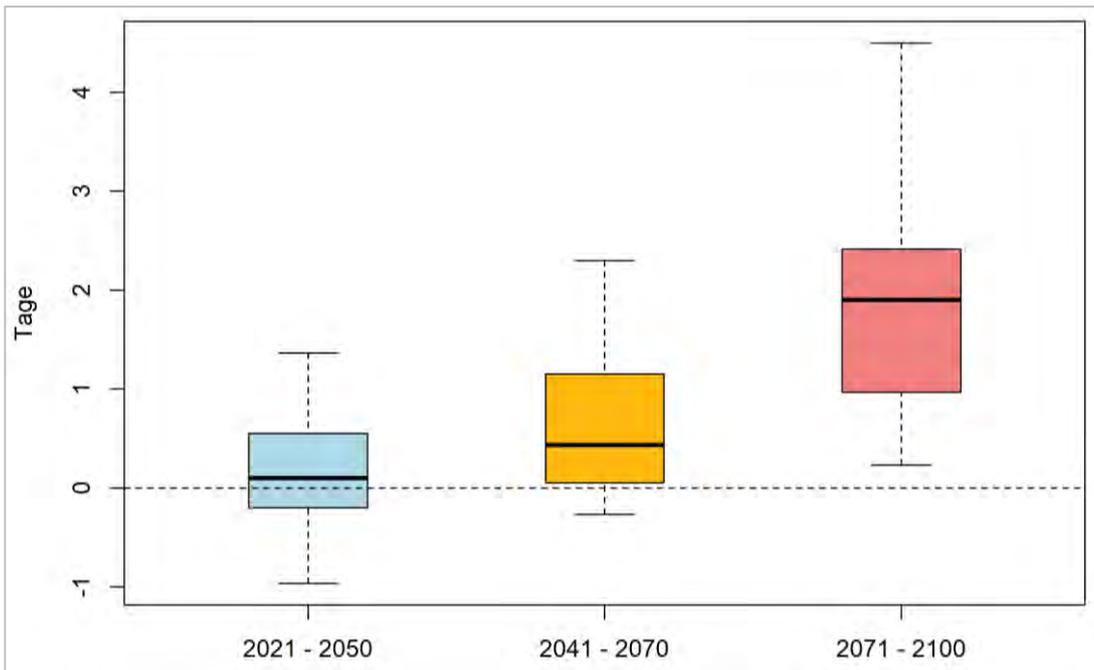


Abbildung 23: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Starkniederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Lüdenscheid (RCP 8.5).

4.4.3 WIND UND STURM

Ein Sturm wird als „Wind von großer Heftigkeit, nach der Beaufort-Skala der Stärke 9 bis 11 [...], der erhebliche Schäden und Zerstörungen anrichten kann“ definiert (DWD 2020d). Folgende Sturmklassen werden dabei gemäß DWD an-hand ihrer Windstärke eingeteilt:

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

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

Die Analyse zur Häufigkeit von **Sturmereignissen** ergab für Lüdenscheid in allen drei Klimaszenarien keinen eindeutigen Trend bis zum Jahr 2100 (weder Zu- noch Abnahmen; ohne Abbildung). Dementsprechend weist kaum ein Modell des Ensembles signifikante Trends auf, sodass sich keine validen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Auftrittshäufigkeit von Stürmen ableiten lassen.



5. Analysemethoden – Numerische Modellierung

5.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

Die Modellrechnungen für das vorliegende Projekt wurden mit dem etablierten hochaufgelösten Stadtklimamodell FITNAH-3D durchgeführt. 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 2017, Gross 2013, Gross 2012, Gross 2012a, Gross 2002, Gross et al. 2002).

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

Die Erwärmungs- und Abkühlungsraten in der Atmosphäre aufgrund der Divergenz der langwelligen Strahlungsflüsse werden über ein Verfahren berechnet, bei dem die Emissivität des Wasserdampfes in der Luft berücksichtigt wird. Bei detaillierten Simulationen in realem Gelände müssen neben der Orographie insbesondere auch 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- und Überbauungsgrad und anthropogene Abwärme kann die typische Ausbildung der städtischen Wärmeinsel bei verringerter mittlerer Strömung simuliert werden (vgl. Groß 1989).

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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

Grundsätzlich gilt dabei, dass je höher die horizontale räumliche Auflösung ist, desto mehr Details der Erdoberfläche können im Modell berücksichtigt werden und desto hochwertiger sind auch 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 Lüdenscheid und angrenzendes Umland rund 6 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 7 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.



Tabelle 7: in FITNAH implementierte Landnutzungsklassen bei einer horizontalen Modellauflösung von 10 m

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
20	Gebäude	individuell
22	unbebaut versiegelt	0
14	Gewässer / Wasser	0
7	Gleis	0
9	niedrige Vegetation / Freiland, Rasen	0,5
23	niedrige Vegetation auf naturfernem Boden*	0,5
24	Baum über Versiegelung	individuell
25	Baum über Freiland, Rasen	individuell
26	Baum über niedriger Vegetation auf naturfernem Boden	individuell
28	Sand, Geröll	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. Alle drei ausgewählten Nutzungsklassen 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, so dass die Temperatur mehrere Kelvin über der ebenerdig grünen Freifläche und nur wenige Kelvin unter der unbebaut versiegelten Oberfläche liegt. Diese idealtypischen Muster werden im gesamtstädtischen Kontext durch komplexe lokalklimatische Effekte (nachbarschaftliche Wirkungen, horizontale und vertikale Strömungsprozesse) überprägt und können sich somit im konkreten räumlichen Fall auch (ganz) anders darstellen. Dennoch sind die skizzierten Phänomene grundlegend für das Verständnis des Modells und seiner Ergebnisse.

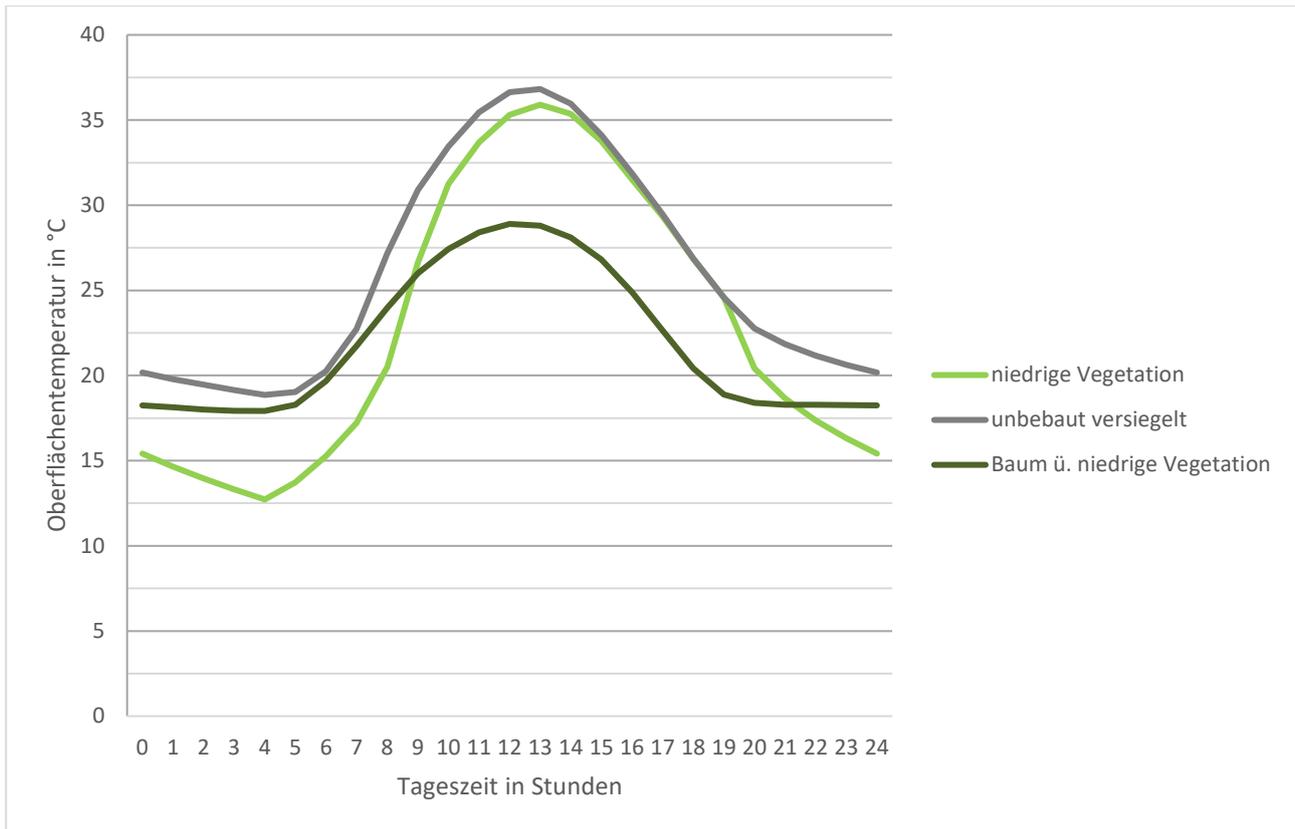


Abbildung 24: Typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D.

Analog gilt dies auch mit Blick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten. Diese stellen sich in der Realität über längere Zeiträume ein, reagieren also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher träger auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen als dies für die Lufttemperatur gilt. 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 macht aber auch deutlich, 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 6-7 K. Die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der grasbewachsenen Flächen.

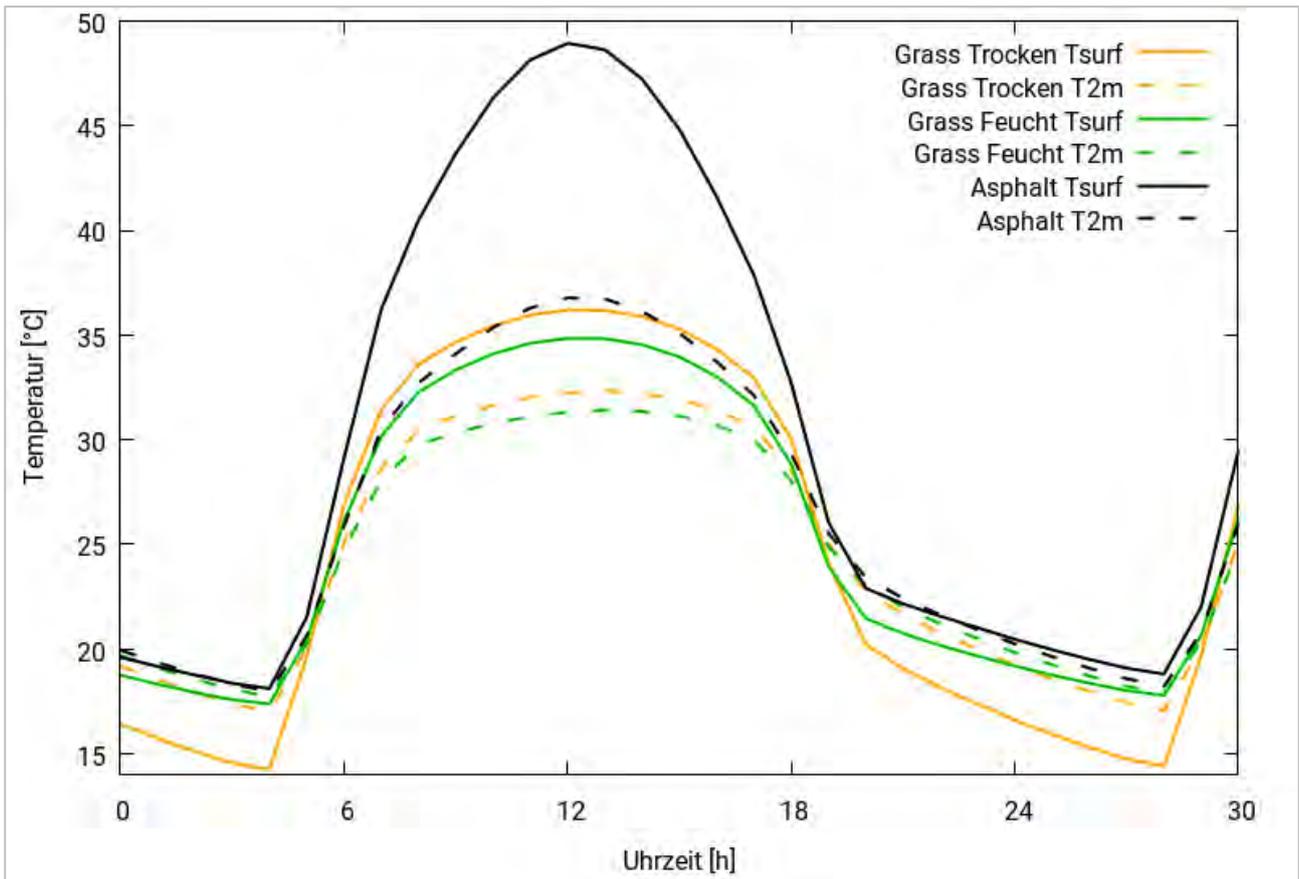


Abbildung 25: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur (tsurf = „surface temperature“) sowie der bodennahen Lufttemperatur (T2m = Temperatur auf 2 m ü. Gr.) von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume/bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzwelligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

5.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für den Modelllauf. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus den vom GEOportal NRW in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten bezogenen Geoinformationen und aus den ergänzenden Daten von der Stadt, gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 10 m zu erzeugen. Wie in Kap. 5.1 beschrieben, benötigt das Modell flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

- Gelände / Orographie
- Landnutzung
- Strukturhöhe



Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadtgebiet sowie das angrenzende Lüdenscheider Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers (Abbildung 26).



Abbildung 26: Modellgebiet (schwarzer Rahmen) und Stadtgrenze (pinke Linie) (Quelle des Luftbildes: Geobasis NRW).

Im Folgenden werden die verwendeten Datensätze erläutert. Ein numerisches Modell wie FITNAH 3D benötigt spezifische Eingangsdaten, die charakteristisch für die Landschaft des Untersuchungsgebiets sind. Dabei müssen für jede Rasterzelle folgende Daten vorliegen, die jeweils online zugänglich waren bzw. teilweise von der Stadt zur Verfügung gestellt wurden:

- Geländehöhe
 - ↳ Digitales Geländemodell in 1 m Auflösung (2021)
- Landnutzung



- ↳ RGBI-Luftbilder³ (Sommer 2021)
- ↳ ALKIS Nutzungen (Dezember 2021)
- ↳ Gebäudeflächen (LOD1 September 2021)
- ↳ Städtisches Baumkataster (2017 - 2019)
- ↳ Lärmschutzwände (2021)
- ↳ Bebauungspläne (in Absprache mit der Stadt, bis 2021)
- ↳ Versiegelungskataster (Januar 2022)
- Strukturhöhe
 - ↳ Digitales Geländemodell (DGM) in 1 m Auflösung (2021)
 - ↳ Digitales Oberflächenmodell (DOM) in 1 m Auflösung (Winter 2020/Frühjahr 2021)

Die Klimaanalyse kann den Zustand des Stadtgebiets immer nur in einer bestimmten Situation abbilden. Die aktuelle Situation Lüdenscheids wird demnach aus einer Sammlung von Daten repräsentiert, die einen Stand von mindestens 2017 aufweisen. Aufgrund der Notwendigkeit der Kombination von verschiedenen Geodaten ist es jedoch nicht möglich, ein feststehendes Jahr als „Ist-Zustand“ anzunehmen. Die Datengrundlagen zu Gebäuden stammen jedoch mindestens aus dem Jahr 2021 und waren zum Zeitpunkt der Eingangsdatabereitstellung (Anfang 2022) demnach sehr aktuell. Alle Eingangsdaten wurden zudem hinsichtlich ihrer Plausibilität mittels Orthophotos abgeglichen und auch vom Auftraggeber gegengeprüft. Die Auswirkungen sehr neuer Planvorhaben wurden zum Teil über aktuelle Bebauungspläne berücksichtigt. Andere zukünftige Landnutzungsänderungen werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Um die klimatischen Prozesse zwischen Stadt und Umland zu erfassen (insb. bezogen auf den Luftaustausch), geht das Untersuchungsgebiet über die Stadtgrenze hinaus. Im Umland von Lüdenscheid sind die Eingangsdaten weniger detailgetreu aufbereitet, aber grundsätzlich ausreichend, um das Prozessgeschehen zwischen Lüdenscheid und seinen Nachbarorten hinreichend genau zu erfassen. Darüber hinaus wurde bei der Modellrechnung ein Nesting-Verfahren angewandt, um weitergehende regionale Einflüsse zu berücksichtigen (siehe [Kap. 5.2](#)). Das Stadtgebiet Lüdenscheids erstreckt sich bei einer Ausdehnung von ca. 12 km in Ost-West- bzw. ca. 13 km in Nord-Süd-Richtung über eine Fläche von etwa 87 km². Das für die Modellrechnung verwendete rechteckige Untersuchungsgebiet spannt eine Fläche von ca. 220 km² auf (14,4 km x 15,3 km). Insgesamt wird das Modellgebiet mit ca. 2,2 Mio. Rasterzellen beschrieben, wobei für jede Rasterzelle jeweils eine Information zur Geländehöhe, Landnutzung und Strukturhöhe hinterlegt ist.

Die Geländehöhe des Modellgebiets wird in einem digitalen Geländemodell (DGM) dargestellt, welches von einer ursprünglichen 1m-Auflösung in die für die Modellierung notwendige 10 m-Rasterauflösung gemittelt wurde (Abbildung 27). Im Untersuchungsgebiet treten Höhenunterschiede von ca. 450 Metern auf.

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

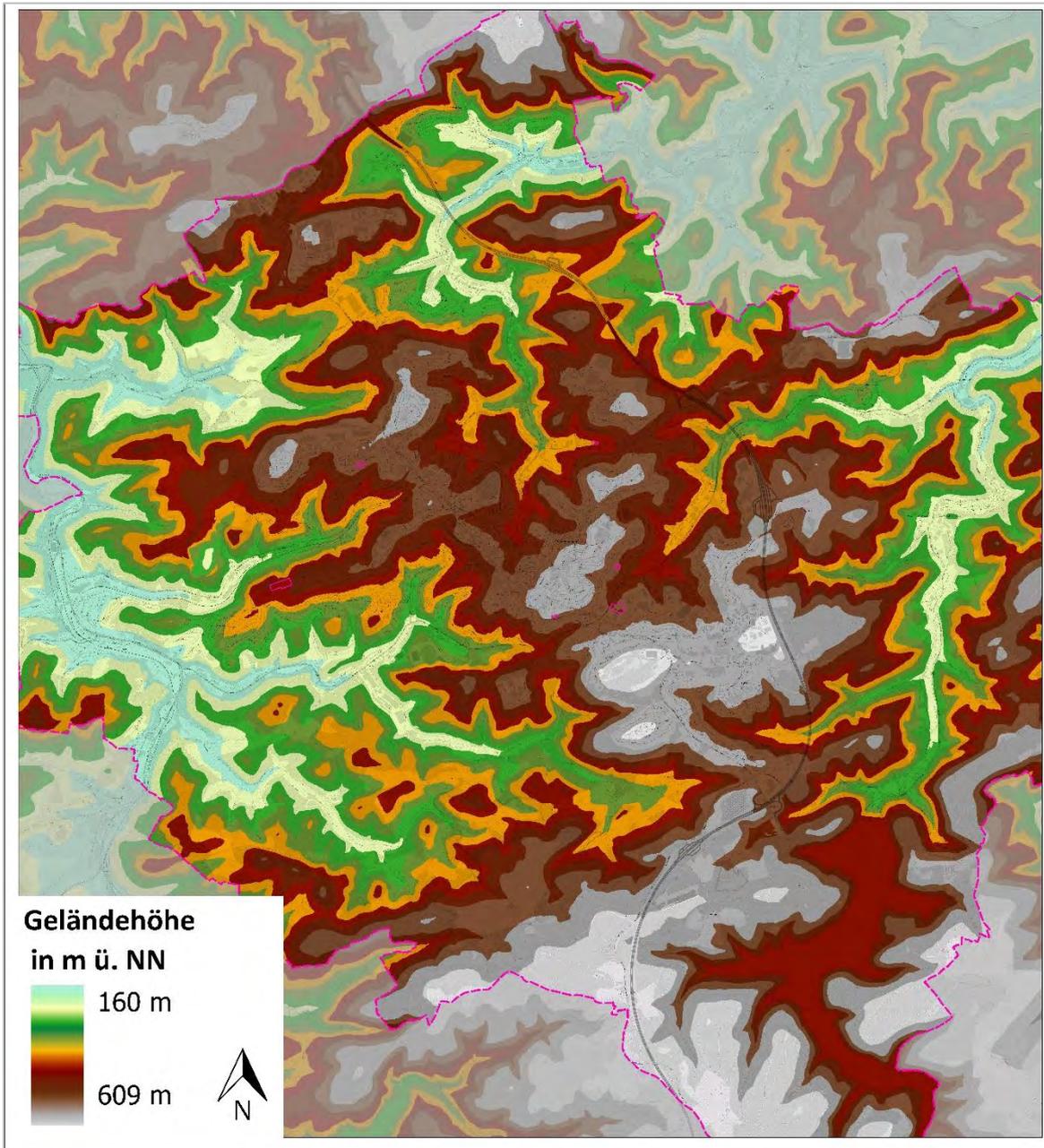


Abbildung 27: Digitales Geländemodell für Lüdenscheid und Umgebung (Referenzsituation auf Rasterebene).

Die Lüdenscheider Landnutzung wird über 10 verschiedene Nutzungsklassen (Tabelle 7&Abbildung 28) definiert, welche jeweils unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen. Bei der vorliegenden Rasterzellenbreite von 10 m war es möglich, einzelne Gebäude und Bäume in der Landnutzungs-klassifizierung aufzulösen. Bei den Bäumen bzw. hoher Vegetation über 2,5 m werden drei verschiedene Untergründe unterschieden. So werden also Bäume über Versiegelung (z.B. Straßenbäume), Bäume über Rasen (z.B. Bäume in Parks) und Bäume über naturfernem Boden (z.B. Bäume neben Gleisanlagen oder Sportplätzen) ausdifferenziert. Für die Stadt Lüdenscheid lag teilweise ein Baumkartierung für den städtischen Bereich vor, für die flächendeckende Beurteilung auch des privaten Raumes wurde anhand der weiteren vorliegenden Datengrundlagen ein Baumraster erstellt und mit dem Baumkataster abgeglichen. Es lagen hochaufgelöste RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2021 in einer Auflösung von 50 cm x 50 cm vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von -0,01 war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Prinzip siehe Abbildung 29). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch



die ermittelte Strukturhöhe während der automatisierten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert wurden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 10 m x 10 m-Rasterauflösung nicht möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 6 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

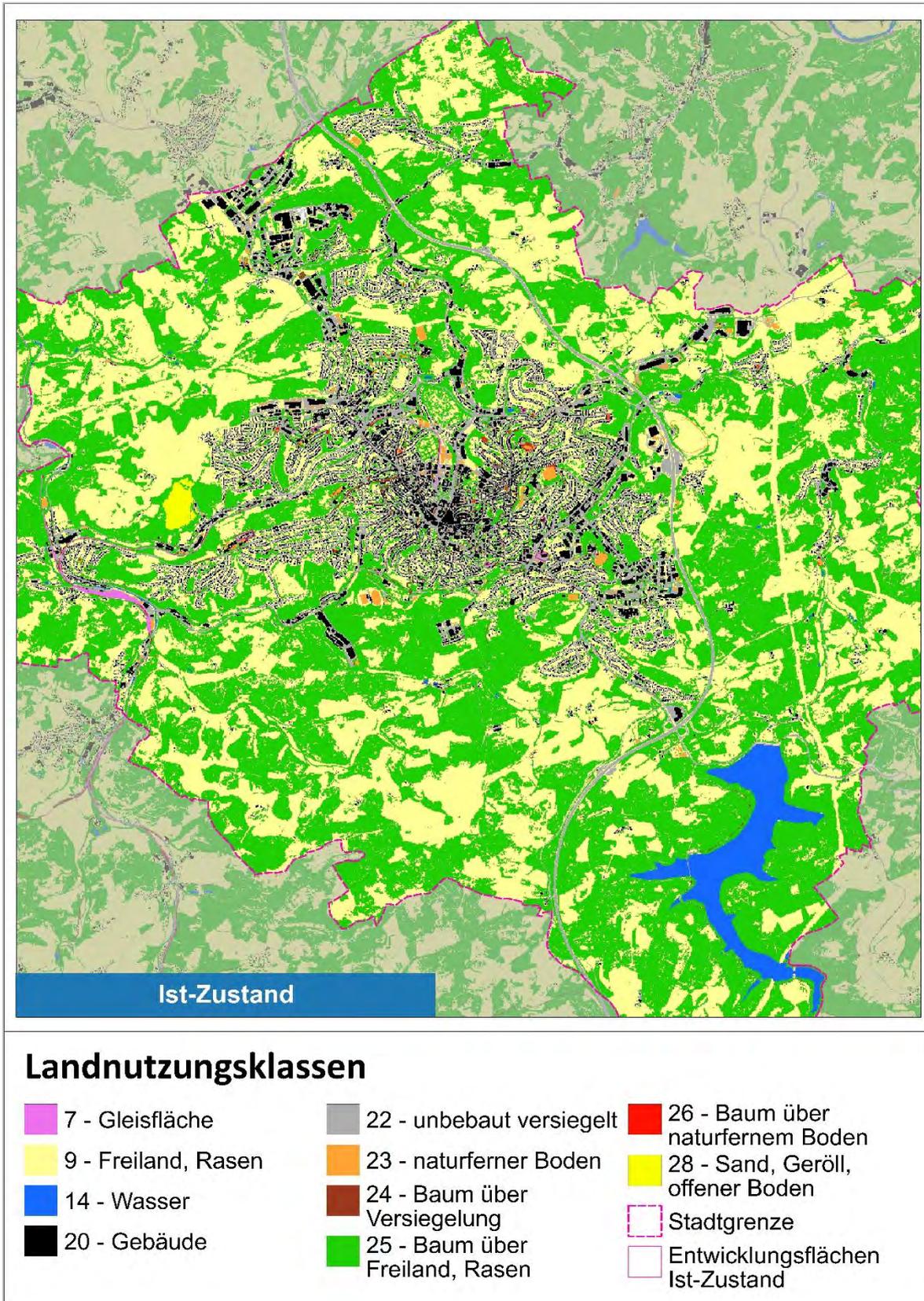


Abbildung 28: Klassifizierte Landnutzung / Stadtstruktur der Bestandssituation in Lüdenscheid und Umgebung (Referenzsituation auf Rasterebene).

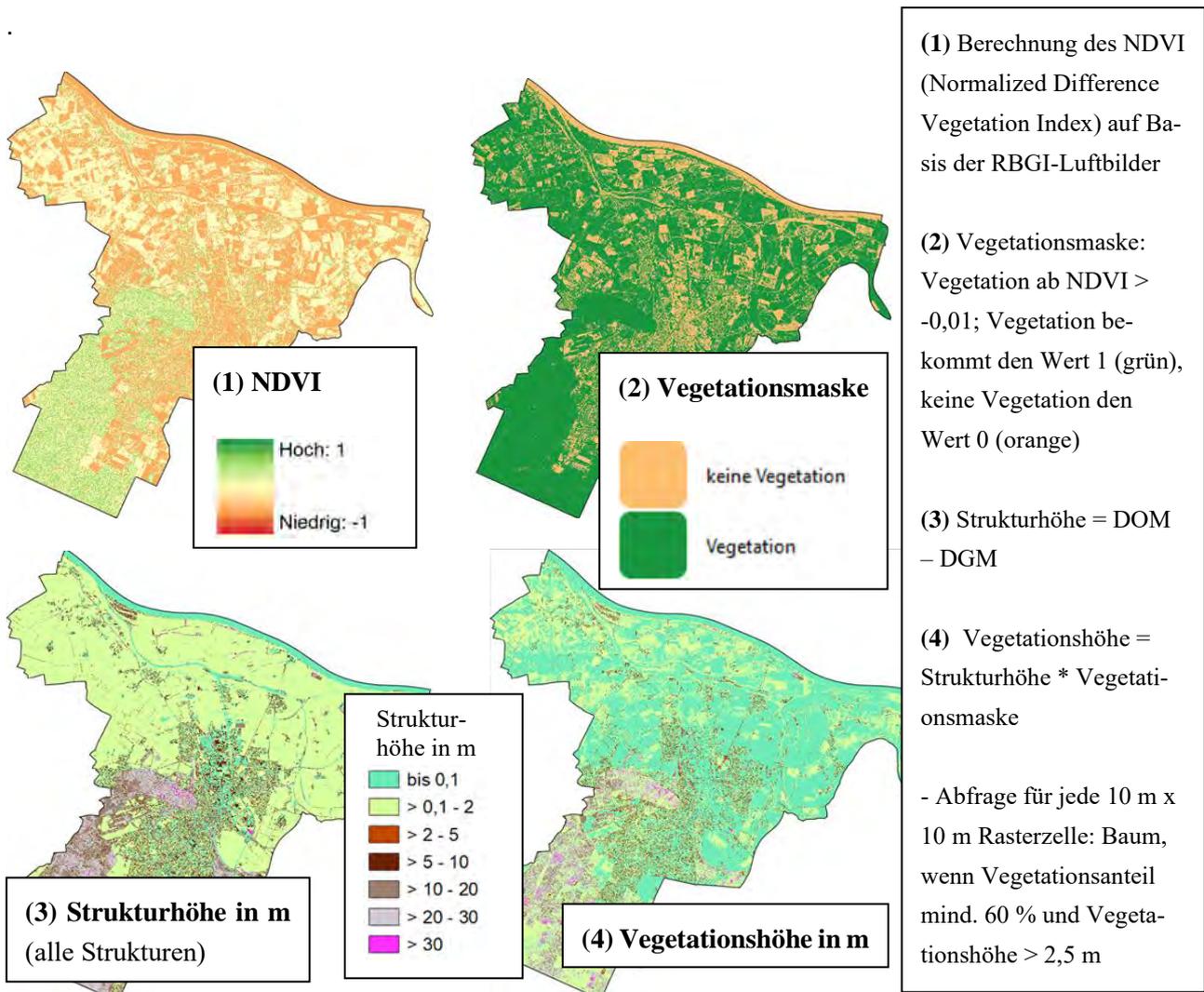


Abbildung 29: Beispielhafte Arbeitsschritte zur Identifikation von Baumstandorten anhand von NDVI-Werten und Strukturhöhen.

Da zur Zeit der Bearbeitung der Eingangsdaten dieser Klimaanalyse zunächst ein etwas älteres Luftbild vorlag wurden 6 Bereiche anhand von Bebauungsplänen (BP) oder sonstigen Planunterlagen (Bauzeichnungen) in die FITNAH-Landnutzung eingearbeitet (Tabelle 8 & Prinzip in Abbildung 30).

Tabelle 8: Planflächen, die im Rahmen des Ist-Zustands der Klimaanalyse Lüdenscheid bereits Berücksichtigung fanden.

	Rechtliche Grundlage	Standort
1	BP 558	Schlittenbach
2	BP 568	Hintere Parkstrasse
3	BP 765	Ehemaliger Schlachthof
4	BP 838	Kindertagesstätte Lenneteich
5	§34 BauGB	Kindergarten Hochstraße
6	§34 BauGB	Bucklesfelder Straße

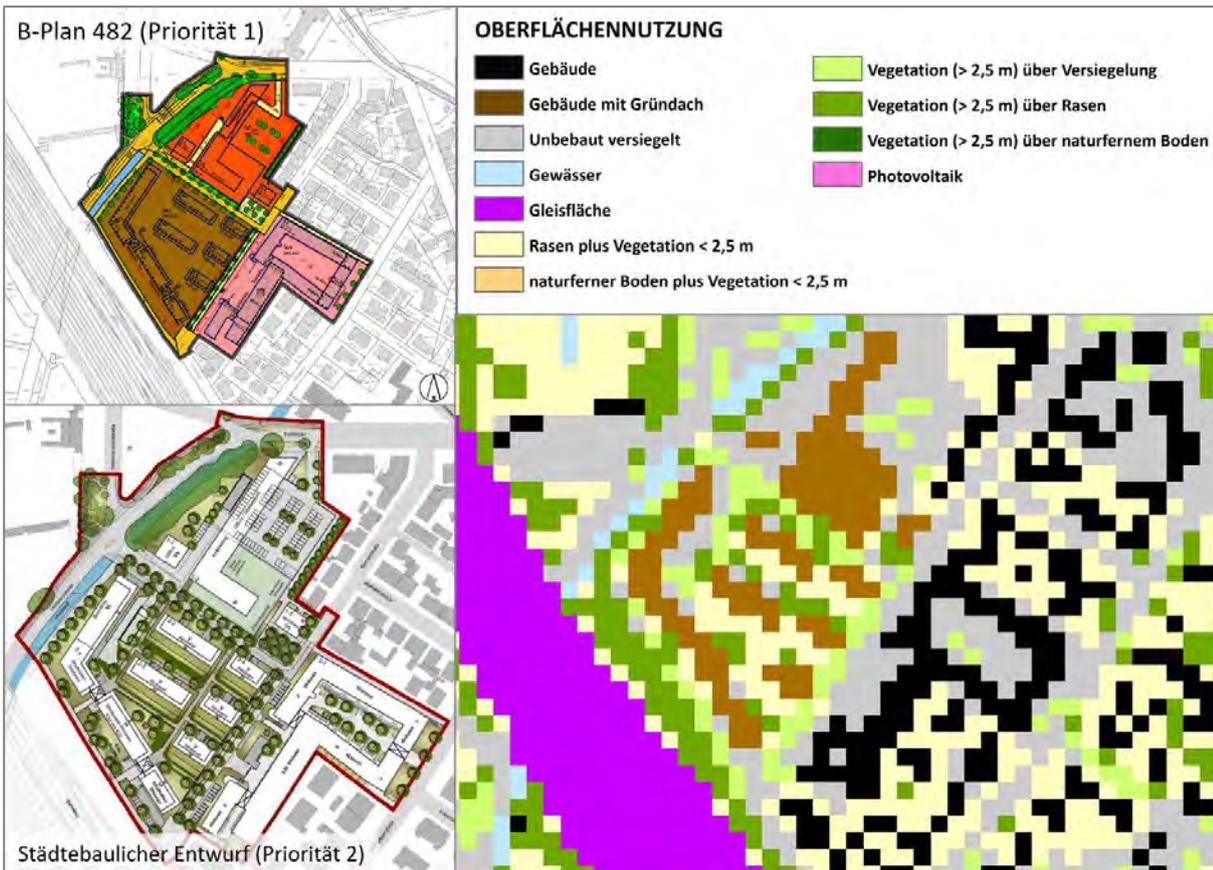


Abbildung 30: Beispielhafte Überführung der Informationen eines B-Plans und eines Städtebaulichen Entwurfs in das FITNAH-Nutzungsraaster.

5.3 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 Lüdenscheid regelmäßig und jeden Sommer mehrfach auf (s. Kapitel 4.3). Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis um 14:00 des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes. Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Lüdenscheid 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.

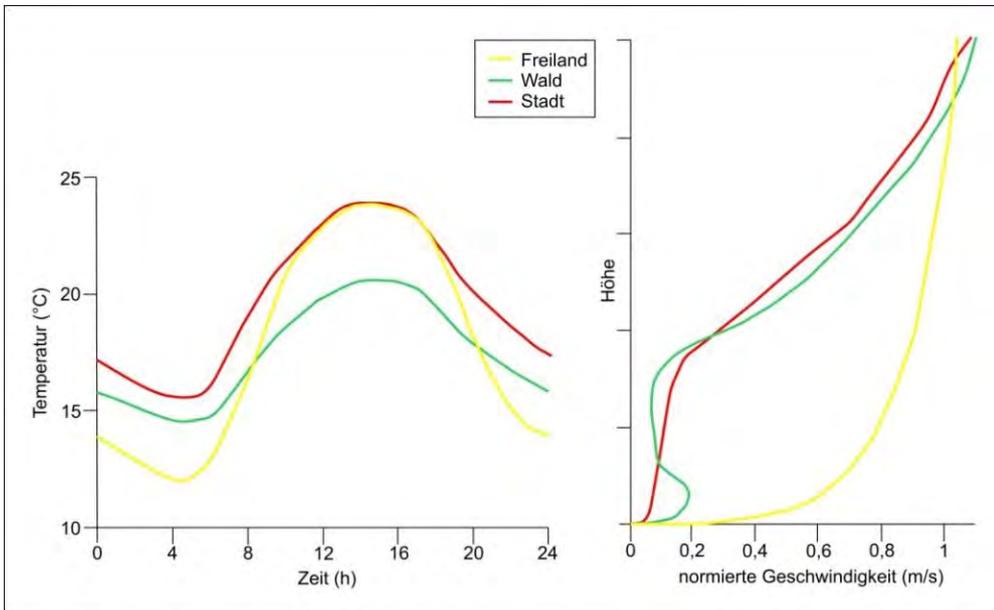


Abbildung 31: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)



Um die regionalen Winde im Großraum berücksichtigen zu können, wurde ein Nesting-Verfahren eingesetzt (s. Kapitel 2.3). Datengrundlage für das Nesting war das Strömungsfeld aus einer Modellrechnung in 1000 m Auflösung für ganz Deutschland. Beim Nesting werden die Informationen zum großräumigen Strömungsge-
schehen an das kleinere Untersuchungsgebiet der Lüdenscheider Klimaanalyse weitergegeben.

Die vorgesehenen Startbedingungen repräsentieren ganz bewusst eine zumindest für Teile der Stadt ther-
misch belastende Situation, nicht aber ein Extremereignis. Dieses Vorgehen wird gewählt, weil sich solche
Lastfälle durch eine nachhaltige Stadtentwicklung und entsprechende Maßnahmen im Außenraum noch po-
sitiv beeinflussen lassen (s. Kapitel 8.5). Extremereignisse hingegen sind zu selten und zu intensiv, um allein
auf Basis, der in klassischen Stadtklimaanalysen betrachteten Maßnahmensets entschärft werden, zu kön-
nen.

5.4 MODELLAUSGABEGRÖßEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physika-
lisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf auch
für noch kürzere - Zeitschnitte aus (Tabelle 9). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl
an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses
Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte (GB). Zu den wesentlichsten Parametern
zählen Strömungsparameter (U/V/W Komponenten des Windes) sowie die bodennahe Lufttemperatur be-
einflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.

Tabelle 9: von FITNAH zum Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt berechnete Parameter.

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

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 Parame-
ter etabliert. In diesem sog. post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardi-
sierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden
Grundkenntnissen und Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorge-
hen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch
allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set
aus zwölf abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteneiveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt,
von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 10).



In der Maximalvariante handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatische Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte und der Kaltluftmächtigkeit existieren hier zwei Ausnahmen, bei denen bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertzeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesganges als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung. Im vorliegenden Projekt lag der Schwerpunkt auf den thermischen Parametern für die Tag- und Nachtsituation als Grundlage des Zwischenprodukts Klimaanalysekarte (Kapitel 7), aus welchem die Bewertungskarten (Kapitel 8.3) und die Planungshinweiskarte (Kapitel 8.4) erarbeitet wurden.

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

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	nein
Kaltluftproduktionsrate	m ³ /m ² h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftvolumenstromdichte	m ³ /(s*m)	Integral bis 50 m ü. Gr.	04:00 Uhr	ja
Kaltluftmächtigkeit	[m]	Individuell ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Abkühlungsrate	K/h	2 m ü. Gr.	04:00 Uhr	nein
Strahlungstemperatur	K	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Physiologisch Äquivalente Temperatur	[°C]	1,1 m ü. Gr.	14:00 Uhr	ja
Universal Thermal Comfort Index (UTCI)	keine	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein
Gefühlte Temperatur (GT)	[°C]	2 m ü. Gr.	14:00 Uhr	nein

5.5 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.



5.6 UNSICHERHEITEN UND HERAUSFORDERUNGEN

Die numerische Stadtklimamodellierung ist anderen analytischen Ansätzen 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 gewährleisten sind, aus denen sich aber dennoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sog. RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der aber im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E⁴-Vorhaben ist.

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

⁴ Forschung und Entwicklung



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

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

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 100 m² repräsentiert. Hierbei handelt es sich um die höchste Auflösung, die gegenwärtig für Städte in der Größenordnung Lüdenscheids modelliert werden kann. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von mesoskaligen Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 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, so dass 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 u.a. auf die Gebäude. Auf Basis der für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Daten sind Gebäude in der vorliegenden Analyse als Klötzchenmodell (LOD 1) abgebildet – also mit ihrer exakten Lage im Raum und ihrer gemittelten Dachhöhe. Damit sind flächendeckend alle Informationen vorhanden, um die Gebäude im Modell als Strömungshindernis definieren zu können. Auch bzgl. ihres Wärmeemissionsgrades können Gebäude hinreichend gut im Modell abgebildet werden. Allerdings bestehen hier Unsicherheiten, die sich aus fehlenden (gesamtstädtischen) Informationen zu z.B. Baumaterialien, Oberflächenalbedo und Fensteranteilen ergeben. Der Wärmeemissionsgrad der Gebäude kann gegenwärtig somit im Modell ausschließlich über das Bauvolumen abgebildet werden.

Vergleichbares gilt auch für flächendeckende, kleinräumige Informationen zu Bodeneigenschaften wie der Wärmeleitfähigkeit oder der Bodenfeuchte. Diese könnten aus einer flächendeckenden Stadtbodenkartierung abgeleitet werden und mit ihren speziellen Eigenschaften im Modell berücksichtigt werden. Da für Lüdenscheid kein hochaufgelöster, städtischer Geodatensatz verfügbar war, wird folglich im Modell mit einem einheitlichen Bodenprofil gearbeitet, dessen Oberflächeneigenschaften über die flächendeckend vorliegende Zusatzinformation „naturferner Boden“ über das Nutzungsraster modifiziert wird.

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



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

Je aktueller die Daten, desto geringer sind die Unsicherheiten. Kapitel 5.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Mit Blick auf die Referenzsituation kann eine überwiegend aktuelle Datengrundlage aus den Jahren 2020 oder 2021 und folglich eine geringe Unsicherheit attestiert werden. Diese Unsicherheiten im Bestand (also der bereits gebauten Stadt) können nicht vollumfänglich aufgelöst werden. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang das Bemühen, stets die besten zum jeweiligen Zeitpunkt verfügbaren Daten zu verwenden, was im Projekt erfolgt ist.

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

6. Analyseergebnisse – Numerische Modellierung

Die projektrelevanten Modellausgabegrößen zum Themenkomplex Thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt wurden in gelayouteten Karten als QGIS Kartenpaket visualisiert und als Geodaten sowie als hochauflösende .pdf- und .jpg-Dokumente übergeben. Es handelt sich um georeferenzierte Rasterdaten im .tif Format mit dem Raumbezug ETRS 1989 UTM Zone 32N. Die einzelnen Karten rasterbasierter Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) werden im Folgenden inhaltlich anhand von Beispielen beschrieben. Alle Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 10 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (Kapitel 5.3). Sie gelten für den Aufenthaltsbereich des Menschen in 2 m ü. Gr. (Lufttemperatur, Windfeld) bzw. 1,1 m ü. Gr. (PET) und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Klassenschritte in der Farblegende wurden so gewählt, dass die Unterschiede innerhalb der Stadt möglichst gut zur Geltung kommen.

6.1 NACHTSITUATION

NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD

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

Je nach meteorologischen Verhältnissen, Lage bzw. Höhe des Standorts und den Boden- bzw. Oberflächeneigenschaften kann die nächtliche Abkühlung merkliche Unterschiede aufweisen, was bei Betrachtung des gesamten Untersuchungsgebiets auch für den Lüdenscheider Raum mit seinen verschiedenen Flächennutzungen deutlich wird. So umfasst die nächtliche bodennahe Lufttemperatur bei Minimalwerten von ca. 11,5 °C über (sandigen) Freiflächen und Maximalwerten bis etwa 20 °C über Gewässern wie der Jubach Tal Sperre eine Spannweite von 8,5 °C. Die mittlere Temperatur der Stadt liegt unter den angenommenen meteorologischen Rahmenbedingungen bei 15,7 °C. Die Modellrechnung bestätigt folglich den bereits in den Grundlagen benannten Wärmeinseleffekt (Kapitel 2.2) und erlaubt darüber hinaus eine genauere räumliche Abgrenzung belasteter Bereiche.

Das Ausmaß der Temperaturabweichung im Siedlungsbereich ist vor allem von der Größe der Stadt und Dichte der Überbauung abhängig. In der Innenstadt Lüdenscheids sind die höchsten Bebauungsdichten und –insbesondere auch in den gewerblich geprägten Bereichen – hohe Versiegelungsgrade vorzufinden, was sich in der nächtlichen Überwärmung an diesen Orten widerspiegelt (s. Abbildung 32, z.B. beim HUECK Werk

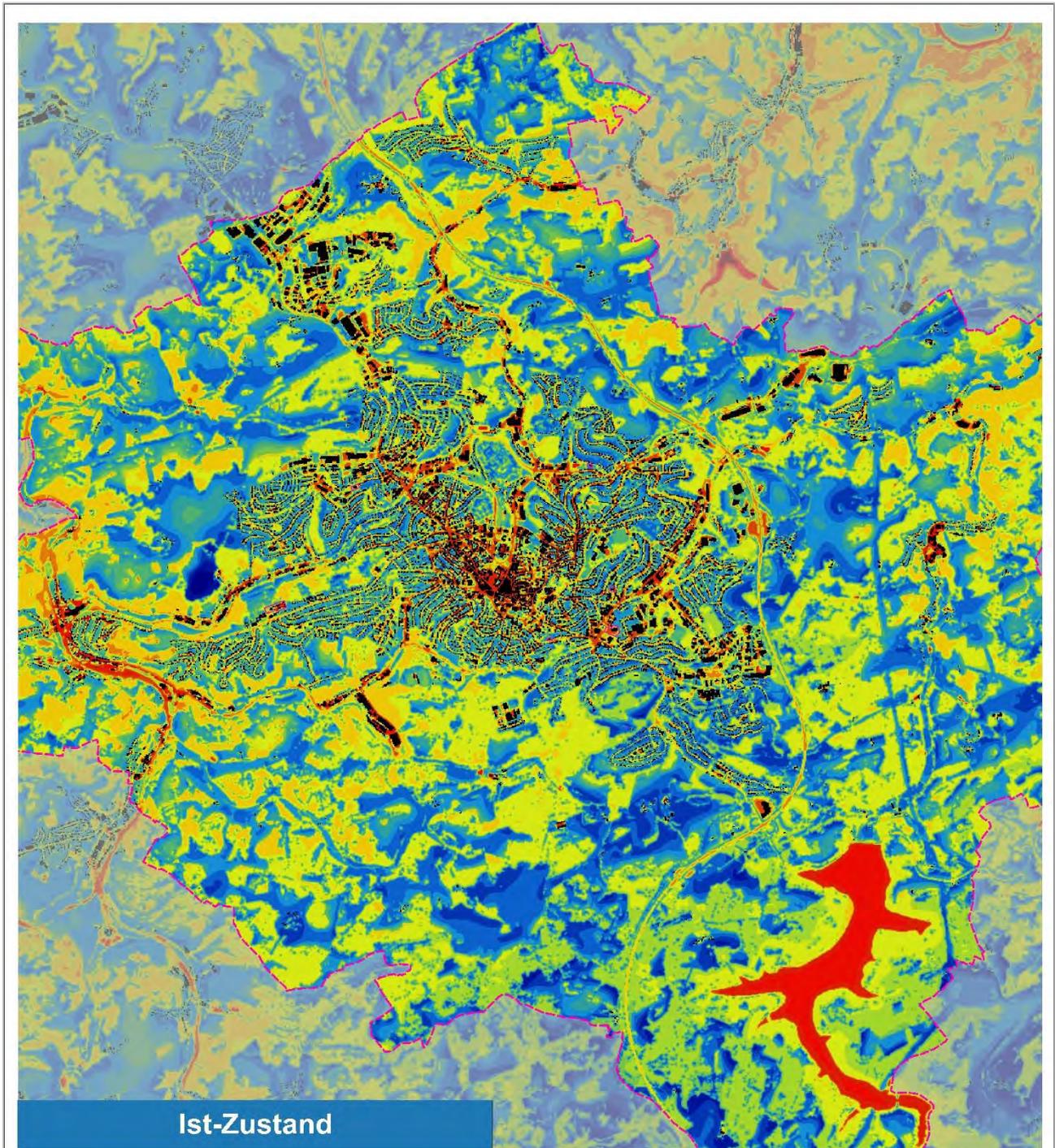


Elspe). Die größten Überwärmungen zeigen sich im Umfeld von Straßen und Plätzen (z.B. am Rathausplatz und am Sternplatz). Rund um die Lüdenscheider Innenstadt liegt die Temperatur im Bereich von 17 bis 19 °C. Die niedrigsten Siedlungstemperaturen werden mit Spannen zwischen 13 und 16°C in den sehr locker bebauten Stadtteilen (z.B. Worthhagen) erreicht.

Unter den Grün- und Freiflächen zählt der Steinbruch bei Losenbach mit teils unter 12 °C zu den kältesten Bereichen der Stadt. Acker- und auch Rasenflächen kühlen sich nachts ebenfalls stark ab, weshalb diese Orte in der Regel Temperaturen unterhalb von 15,5 °C aufzeigen und auch eine Gunstwirkung auf umliegende Bebauung bedingen können. Verglichen mit den grünen Außenbereichen weisen innerstädtische Grünflächen mit ca. 14,5 bis 17 °C ein etwas höheres Wertespektrum auf, wobei aufgrund der lockeren Siedlungsstruktur von Lüdenscheids Stadtteilen ein relativ geringer Unterschied zu den Außenbereichen besteht.

In Wäldern aber auch flächig baumbestandenen parkähnlichen Arealen dämpft das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und verhindert damit eine stärkere Abnahme der bodennahen Lufttemperatur, sodass in 2 m ü. Gr. Werte um 16 - 18 °C erreicht werden (z.B. Stadtpark, Wälder im Lennebergland). Nachts fällt hier daher die Kaltluftproduktion geringer aus als über unversiegelten Freiflächen, jedoch nehmen größere Waldgebiete eine wichtige Funktion als Frischluftproduzenten ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen geringen Tagesgang der Wassertemperatur. Dieser beeinflusst folglich auch die darüberliegende 2 m-Lufttemperatur des Modells die sich am Tage und in der Nacht vergleichsweise konstant verhält. So erscheinen die Wasserflächen wie oben beschrieben nachts bei Temperaturen von 18,5 °C bis 20 °C ähnlich überwärmt wie Teile des Siedlungsraumes oder sogar noch wärmer (z.B. Versetalsperre, Fuelbecketalsperre, Volme und Lenne).



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

bis 12,0	> 14,0 bis 14,5	> 16,5 bis 17,0	> 19,5 bis 20,0
> 12,0 bis 12,5	> 14,5 bis 15,0	> 17,0 bis 17,5	> 20,0
> 12,5 bis 13,0	> 15,0 bis 15,5	> 17,5 bis 18,0	Stadtgrenze
> 13,0 bis 13,5	> 15,5 bis 16,0	> 18,0 bis 18,5	Entwicklungsflächen Ist-Zustand
> 13,5 bis 14,0	> 16,0 bis 16,5	> 18,5 bis 19,0	Gebäude

Abbildung 32: Nächtliches bodennahes Temperaturfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.



KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD

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

Weil die Ausgleichsleistung einer grünbestimmten Fläche nicht allein aus der Geschwindigkeit der Kaltluftströmung resultiert, sondern zu einem wesentlichen Teil durch ihre Mächtigkeit mitbestimmt wird (d.h. durch die Höhe der Kaltluftschicht), muss zur Bewertung der Grünflächen ein umfassenderer Klimaparameter herangezogen werden: der Kaltluftvolumenstrom. Vereinfacht ausgedrückt stellt er das Produkt aus der Fließgeschwindigkeit der Kaltluft, ihrer vertikalen Ausdehnung (Schichthöhe) und der horizontalen Ausdehnung des durchflossenen Querschnitts dar. Er beschreibt somit diejenige Menge an Kaltluft in der Einheit m^3 , die in jeder Sekunde durch den Querschnitt bspw. eines Hanges oder einer Leitbahn fließt (Abbildung 33).

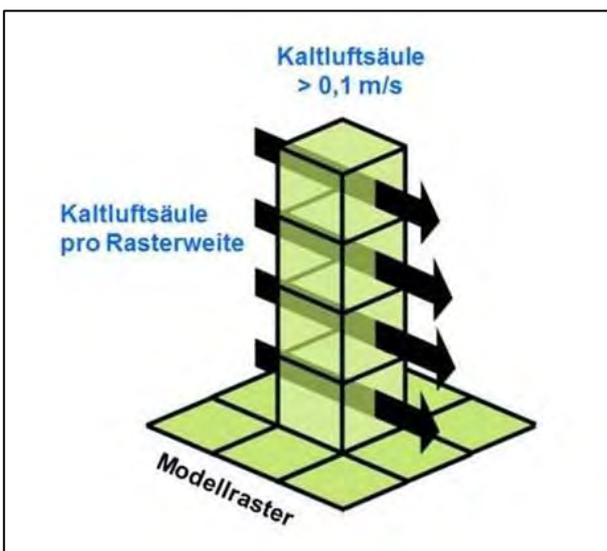


Abbildung 33: Prinzipskizze Kaltluftvolumenstrom.

Der modellierte Kaltluftvolumenstrom (Einheit m^3/s) bezieht sich in dieser Arbeit auf einen 1 m breiten Querschnitt und repräsentiert damit streng genommen eine Kaltluftvolumenstromdichte (Einheit $m^3/(s*m)$). Zur Vereinfachung wurde in diesem Bericht jedoch auch für die Kaltluftvolumenstromdichte der Begriff „Kaltluftvolumenstrom“ synonym verwendet.⁵

⁵ Der Kaltluftvolumenstrom in m^3/s beschreibt die Menge an Kaltluft, die in jeder Sekunde durch den Querschnitt der Rasterzelle (hier: 10 m breit) fließt. Um Ergebnisse verschiedener Modellauflösungen miteinander vergleichbar zu machen, bietet sich der Kaltluftvolumenstrom als Dichte (in $m^3/(s*m)$) an, da seine Intensität nicht von der Rasterzellenbreite abhängt.



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

Strömungshindernisse wie Straßendämme oder Gebäude können luvseitig⁶ markante Kaltluftstaus auslösen. Werden die Hindernisse von größeren Luftvolumina über- oder umströmt, kommt es im Lee⁷ zu bodennahen Geschwindigkeitsreduktionen, die in Verbindung mit vertikalen oder horizontalen Verlagerungen der Strömungsmaxima stehen kann. Die Eindringtiefe von Kaltluft in bebauten Gebiet hängt folglich von der Siedlungsgröße und -struktur sowie Bebauungsdichte und zudem von der anthropogenen Wärmefreisetzung und Menge einströmender Kaltluft ab.

Der Kaltluftvolumenstrom zeigt im Untersuchungsgebiet eine hohe Variabilität und reicht von „nicht vorhanden“ bis zu maximalen Werten von knapp $60 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$. Der Mittelwert im Lüdenscheider Stadtgebiet liegt bei $17,4 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ (Abbildung 34). Über den Grünflächen zwischen Höh und Bierbaum entsteht Kaltluft, die aufgrund der Geländeneigung in Richtung des umliegenden Siedlungsraumes abfließt. Aus stadtklimatischer Sicht sind vor allem solche, auf das Stadtgebiet ausgerichtete Strömungen von Interesse. Kaltluftvolumenströme sind dabei jedoch nicht ausschließlich geländeorientiert. Solche Kaltluftbewegungen entstehen durch Temperaturunterschiede zwischen kühlem Ausgleichsraum und warmen Siedlungskörper. Über letzterem steigt die warme Luft auf, wodurch ein Vakuum entsteht, das durch vergleichsweise kühlere Luft vom umgebenen Umland ausgeglichen wird. Diese Art thermisch bedingter Winde werden Flurwinde genannt. Die eher lockere Bebauung der verschiedenen Wohnsiedlungen Lüdenscheids begünstigt ein relativ weites Vordringen der durch Hangab- und Flurwinde induzierten Kaltluft. In den eher gewerblich genutzten Gebieten nimmt der Kaltluftvolumenstrom aufgrund der Hinderniswirkung der Bebauung in der Folge leicht ab.

Rauigkeitsarme Strukturen wie Bahntrassen oder breite Straßen sind teilweise durch hohe Volumenströme gekennzeichnet, transportieren in der Regel aber wärmere Luft als grüngerprägte Strukturen (die Kaltluft erwärmt sich während des Transports über diesen Flächen).

Abbildung 35 zeigt flächenhaft die Windgeschwindigkeit (farbig dargestellt) sowie Windrichtung (Pfeilsignatur⁸) der bodennahen nächtlichen Kaltluftströmung. Eine potenzielle klimaökologische Wirksamkeit wird dabei ab einer Windgeschwindigkeit von $0,1 \text{ m/s}$ angenommen. Die räumliche Ausprägung des bodennahen Kaltluftströmungsfeld folgt nur zum Teil dem Muster des Kaltluftvolumenstroms. Im Lüdenscheider Stadtgebiet treten die höchsten Strömungsgeschwindigkeiten bis ca. 1 m/s an einigen Hängen z. B. im Bereich des Naturschutzgebietes Stilleking auf. Vergleichbar gut durchströmt zeigen sich zudem erneut die bereits bei der Betrachtung der KVSD genannten rauigkeitsarmen Ausgleichsflächen (z. B. Freiflächen nördlich von Rathmecke & Dünnebrett). In 2 m ü. Gr. tritt jedoch die Hinderniswirkung von Gebäuden oder Lärmschutz-

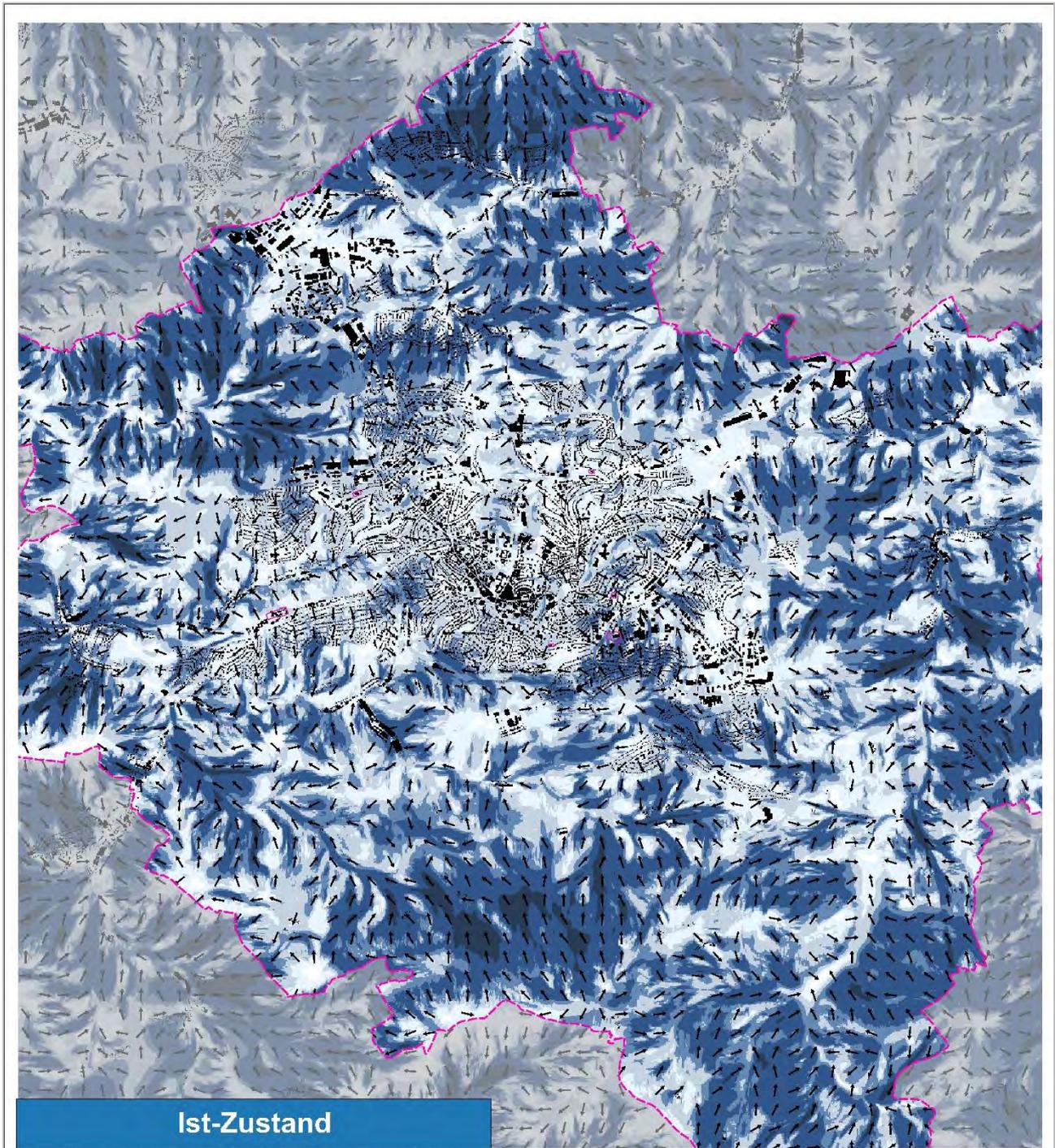
⁶ dem Wind zugewandte Seite

⁷ dem Wind abgewandte Seite

⁸ Die Pfeile wurden in einer höheren räumlichen Auflösung von 200 m abgebildet, um eine übersichtlichere Darstellung zu erhalten.



wänden stärker hervor, sodass manche Bereiche des Stadtkerns bodennah keine wirksame Durchlüftung erfahren. Der mittlere Wind beträgt insgesamt innerhalb der Stadtgrenze 0,3 m/s. Das Kaltluftströmungsfeld verdeutlicht, dass neben Grünzügen auch der Straßenraum (aufgrund der geringen Hinderniswirkung) zur Durchlüftung des Stadtgebiets beitragen kann – unter Umständen handelt es sich dabei nur noch um Kaltluft, nicht mehr um Frischlufttransport (insb. in den frühen Morgenstunden je nach Verkehrslage möglich).



Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom [m³/s pro 10 m Rasterzelle um 04:00 Uhr]

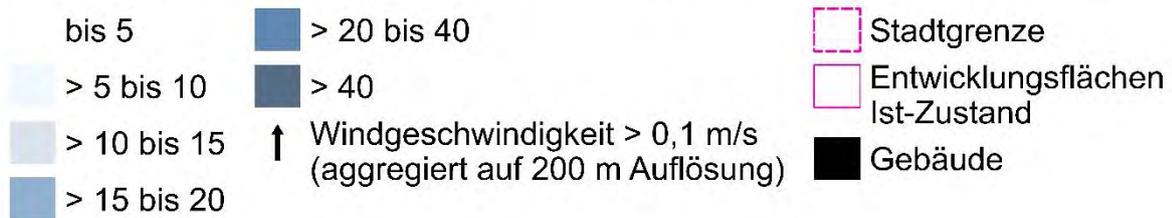


Abbildung 34: Nächtliche Kaltluftvolumenstromdichte von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.

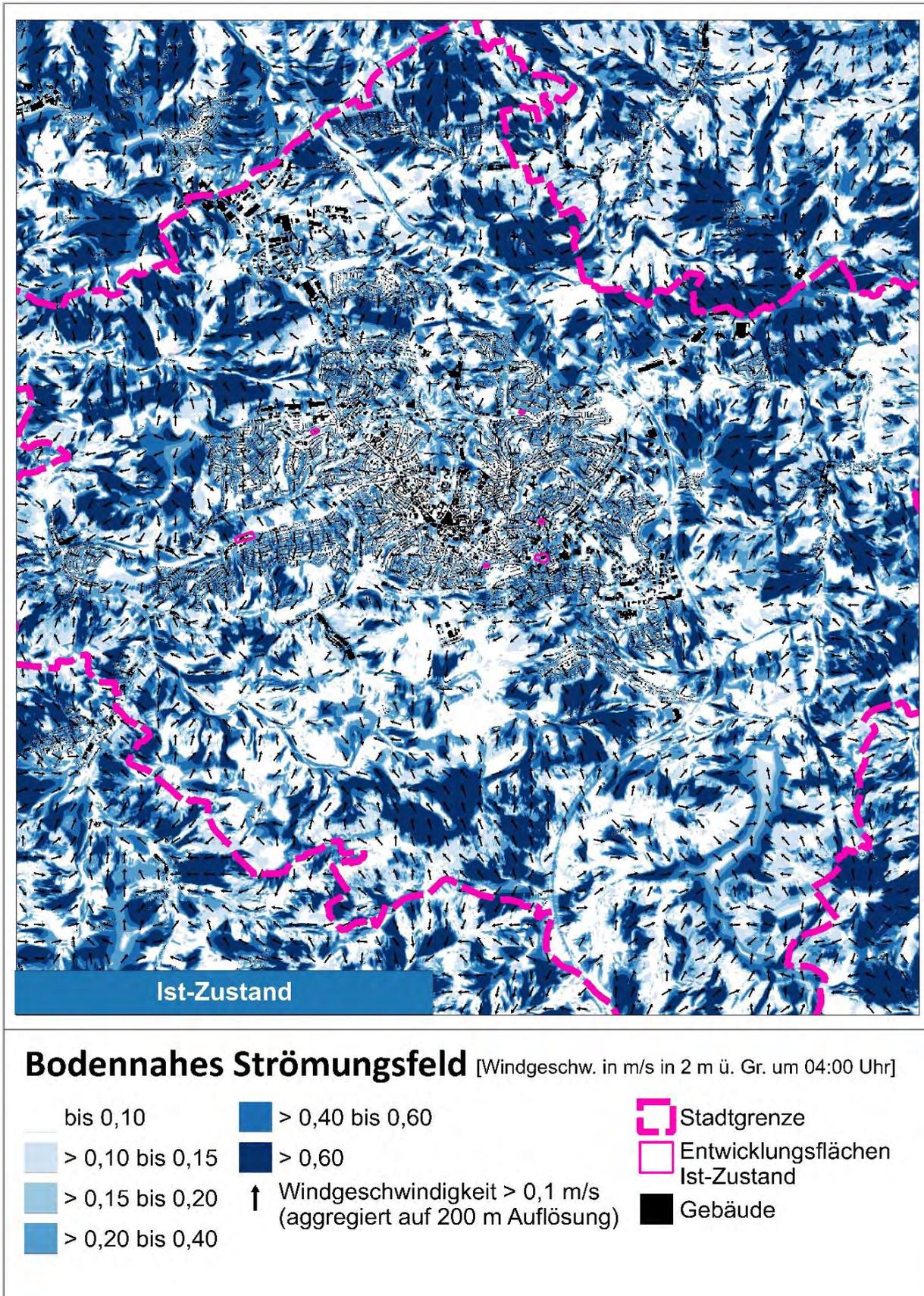


Abbildung 35: Nächtliches bodennahes Windfeld von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.



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

Anhand der kleinteiligen Flächen hoher Kaltluftproduktionsrate z. B. nördlich der Gemeinde Schalksmühle wird bei KPR-Werten über $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ (Maximum des Stadtgebietes) ersichtlich, dass die Geländeneigung die bestimmende Größe für Kaltluftentstehung darstellt (Mittelwert innerhalb der Stadtgrenze: $30,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$). Zusätzlich ist die Landnutzung die zweite entscheidende Größe zur Beeinflussung der Kaltluftproduktion – je versiegelungsärmer der Untergrund, desto größer die Kaltluftproduktionsrate. So weisen die geneigten Freiflächen oftmals überdurchschnittlich hohe Werte zwischen 40 und $60 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ auf. Auch im Siedlungsbereich sind Grünflächen auszumachen, die mit KPR-Werten zwischen 20 und $40 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ einen wichtigen innerstädtischen Abkühlungsfaktor darstellen. Dies gilt z. B. für viele der Gärten. Stark versiegelte Areale wie große Teile des Straßenraums oder die Gleisflächen im Bereich des Bahnhofes Lüdenscheid sind hingegen mit Werten unter $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ nicht mit Kaltluftproduktionsprozessen assoziiert.

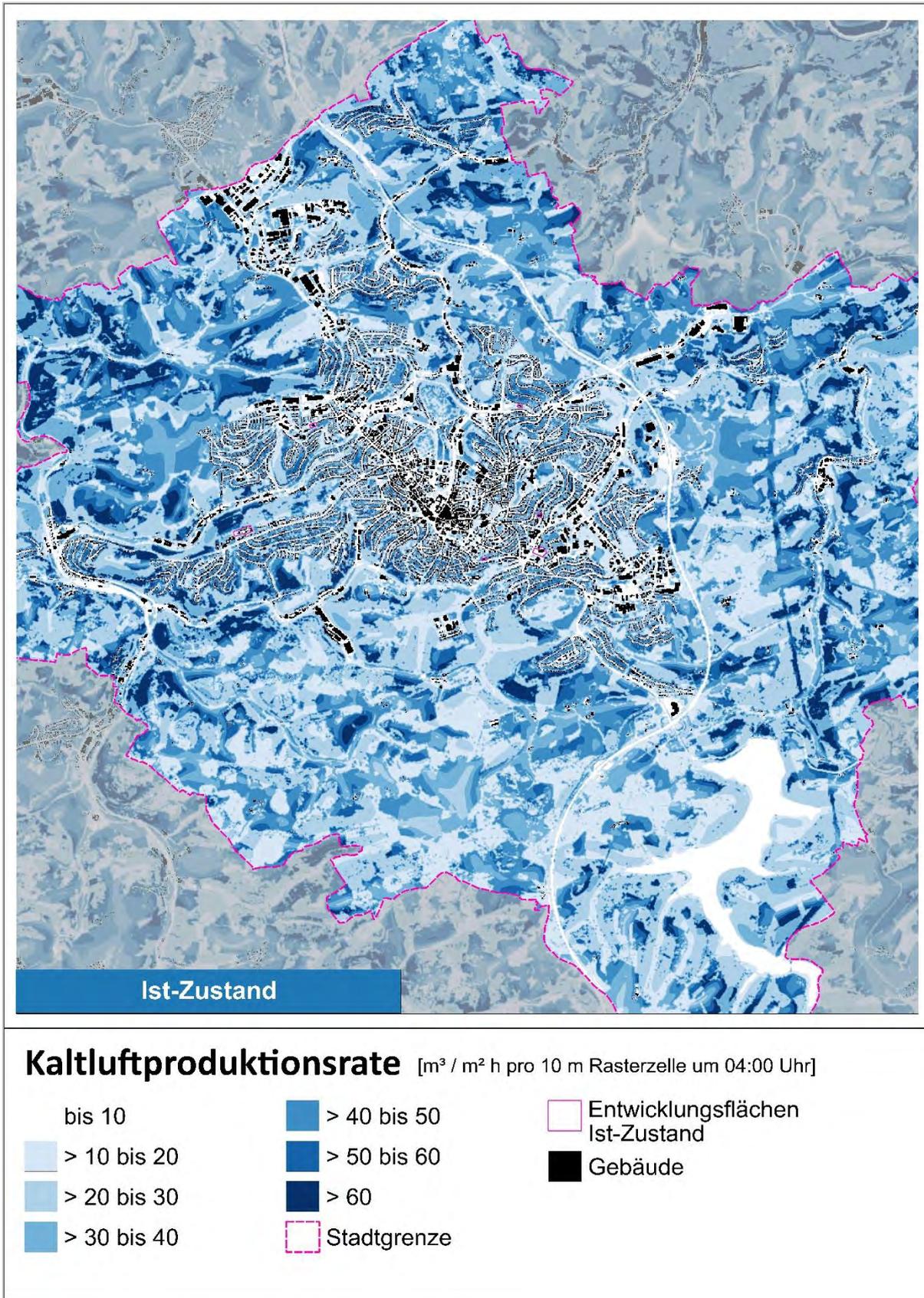


Abbildung 36: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate von 04 Uhr des Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.



6.2 TAGSITUATION

Meteorologische Parameter wirken nicht unabhängig voneinander, sondern in biometeorologischen Wirkungskomplexen auf das Wohlbefinden des Menschen ein. Zur Bewertung werden Indizes verwendet (Kenngrößen), die Aussagen zur Lufttemperatur und Luftfeuchte, zur Windgeschwindigkeit sowie zu kurz- und langwelligen Strahlungsflüssen kombinieren. Wärmehaushaltsmodelle berechnen den Wärmeaustausch einer „Norm-Person“ mit seiner Umgebung und können so die Wärmebelastung eines Menschen abschätzen⁹.

Tabelle 11: 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

In der vorliegenden Analyse wird zur Bewertung der Tagsituation der humanbioklimatische Index PET um 14:00 Uhr herangezogen (Physiologisch Äquivalente Temperatur; MATZARAKIS & MAYER 1996). Gegenüber vergleichbaren Indizes hat die PET den Vorteil, aufgrund der °C-Einheit intuitiver nachvollzogen werden zu können¹⁰. Darüber hinaus hat sich die PET in der Fachwelt zu einer Art „Quasi-Standard“ entwickelt, sodass sich die Ergebnisse mit denen anderer Städte vergleichen lassen. Wie die übrigen human-biometeorologischen Indizes bezieht sich die PET auf außenklimatische Bedingungen und zeigt eine starke Abhängigkeit von der Strahlungstemperatur (KUTTLER 1999). Mit Blick auf die Wärmebelastung ist sie damit vor allem für die Bewertung des Aufenthalts im Freien und am Tage einsetzbar. Für die PET existiert in der VDI-Richtlinie 3787, Blatt 9 eine absolute Bewertungsskala, die das thermische Empfinden und die physiologische Belastungsstufen quantifizieren (z.B. Starke Wärmebelastung ab PET 35 °C; Tabelle 11).

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die PET mit einer Spannbreite von 29 °C größere Unterschiede im Untersuchungsgebiet auf und reicht von 16,4 bis 45,4 °C. Die geringsten Werte sind in den Uferbereichen der Versetalsperre, dem Lenneteich sowie in Waldgebieten (z.B. nordwestlich von Lüdenscheid Heerwiese) zu finden, die tagsüber mit PET-Werten von meist unter 26 °C, oftmals gar unter 23 °C, (keine bis schwache Wärmebelastung) eine kühlende Wirkung auf ihre Umgebung induzieren (Abbildung 37).

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

¹⁰ Beispiele für weitere Kenngrößen sind der PMV (Predicted Mean Vote) und UTCI (Universeller thermischer Klimaindex).

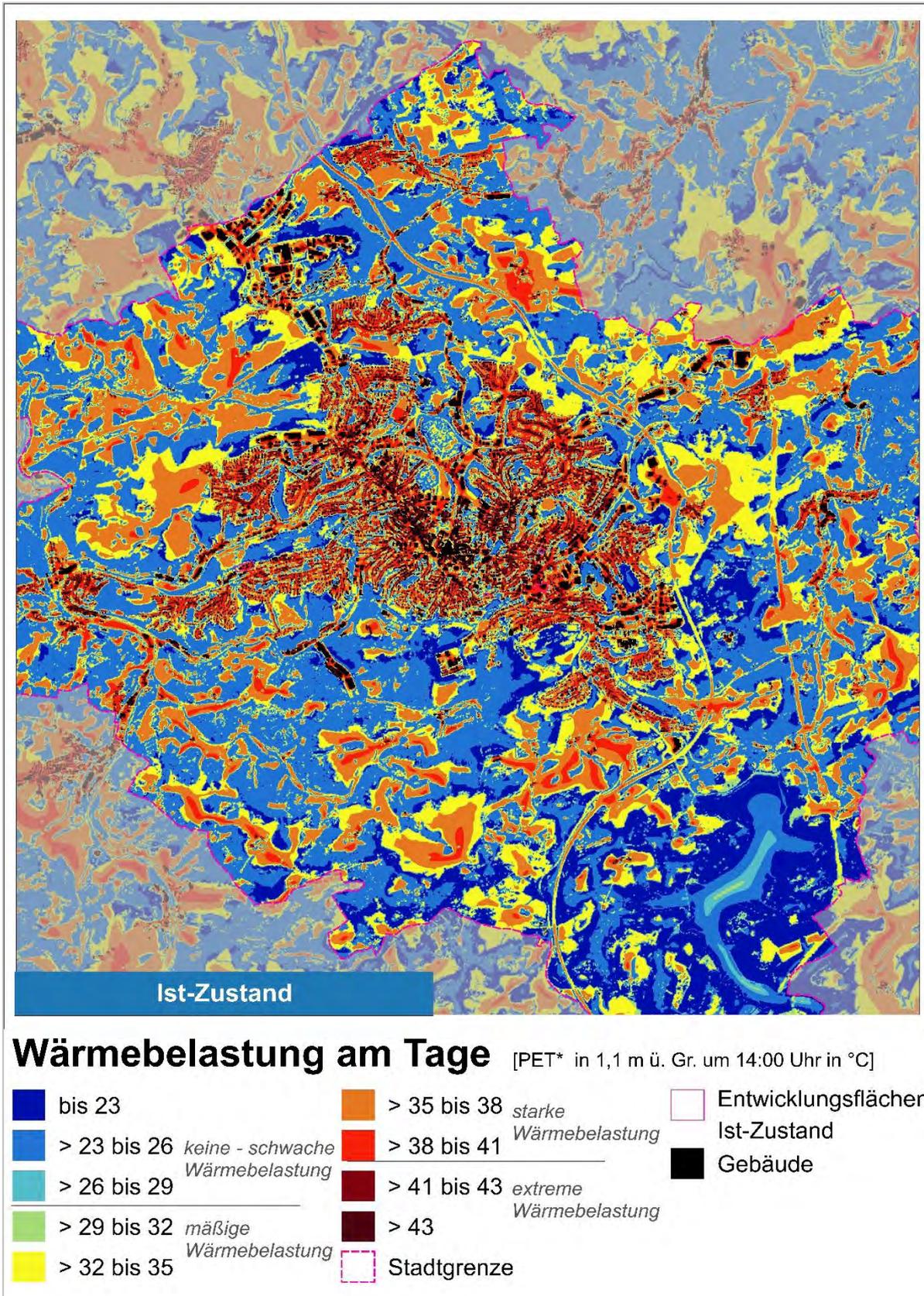


Abbildung 37: Wärmebelastung um 14 Uhr am Tage im Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.



Auch in Parks (z.B. Stadtpark) oder auf Friedhöfen (z.B. Evangelischer Friedhof Lüdenscheid-Mathildenstraße) herrschen unter größeren Baumgruppen größtenteils PET-Werte von unter 26 °C vor. Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass Wälder und Baumbestände allgemein als Rückzugsorte für die Bevölkerung dienen können. Zudem vermögen stadtnahe Wälder und Baumgruppen auch am Tage Kaltluft zugunsten des angrenzenden Siedlungsraumes zu erzeugen (hier nicht dargestellt). Besonders wertvoll zeigen sich all jene Flächen, die die Schattenwirkung von Bäumen und die an Gewässern stattfindenden Verdunstungsprozesse kombinieren. Hierfür ist beispielhaft der Weg entlang der Verse zum Hammerteich am Schmiedemuseum an der Brüninghauser Straße zu nennen, wo baumbestandenen Bereiche bei PET-Werten von um 24 °C einen besonderen humanbioklimatischen Stellenwert besitzen.

Alle weiteren Flächen weisen unter den gegebenen Annahmen eines autochthonen Sommertags (keine Bewölkung, d.h. ungehinderte Einstrahlung) mindestens eine mäßige Wärmebelastung auf, wobei der Siedlungsraum größtenteils von einer starken oder auch extremen Wärmebelastung betroffen ist. Die höchsten Werte sind über versiegelten Gewerbegebieten (z.B. HUECK-Werk Elspe) und im versiegelten und unverschatteten Straßenraum zu finden (mehr als 38 °C PET; starke bis extreme Wärmebelastung). Auch Teile der Innenstadt sind mit einer extremen Wärmebelastung assoziiert. Teilweise profitieren diese Flächen zum Modellausgabezeitpunkt jedoch bereits von der gen Osten sichtbaren Schattenwirkung der westlich des Straßenraums gelegenen Gebäude, die die PET hier auf teils 32 °C absenken kann. Damit ergibt sich auf der Westseite der Straßen eine mäßige, auf der Ostseite eine starke Wärmebelastung. Die Schattenwirkung als vornehmlich PET-steuernder Parameter wird auch auf den Ackerflächen im Außenbereich deutlich. Durch die ungehinderte Sonneneinstrahlung erreicht die thermische Belastung über unversiegelten Freiflächen fast ähnlich hohe Werte wie in der unverschatteten Siedlungsräumen. Beispielhaft sind hier die Agrarflächen zwischen Ober- und Niederhunscheid zu nennen, in welchen bis zu 41 °C auftreten. Dass Schatten spendende Bäume die Klimasituation am Tag wesentlich verbessern können, wird u. a. in den Straßenräumen sichtbar. So erscheinen baumbestandene Straßen, wie z. B. die Parkstraße östlich des Frankenplatzes mit PET-Werten um 25 °C kühler als die stark versiegelten und nur geringfügig verschatteten Siedlungsbereiche.

7. Klimaanalysekarte

Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 hat die Klimaanalysekarte die Aufgabe, „...die räumlichen Klimaeigenschaften wie thermische, dynamische sowie lufthygienische Verhältnisse einer Bezugsfläche darzustellen, die sich aufgrund der Flächennutzung und Topografie einstellen“ (VDI 2015, 4). Die Klimaanalysekarte synthetisiert demnach die wesentlichen Aussagen der Analyseergebnisse – im vorliegenden Fall die Modellausgabegrößen – für die Nachtsituation in einer Karte und präzisiert bzw. pointiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten zu den Themenfeldern 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 2015,13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht eine ganz wesentliche Charaktereigenschaft der Klimaanalysekarte. Sie gehören demnach bewertungstheoretisch der Sachebene an. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten allein noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen, um nicht in die Falle eines „Naturalistischen Fehlschlusses“ (Moore 1903) zu tappen. Der „Sprung“ auf die zweifelsohne benötigte Wertebene erfolgt im Rahmen der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte. Auf dieser zwar theoretischen, aber hochgradig praxisrelevanten fachlichen Basis wurden im vorliegenden Projekt folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation

Da das optionale Themenfeld „Luftqualität“ von der Auftraggeberin nicht beauftragt wurde, ist dieses aus dem Kartenwerk herausgelöst. Damit wurde in Teilen von den in der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 definierten Vorschlägen für die Inhalte der Klimaanalysekarte abgewichen.

Die Legende gliedert sich in die Elemente Wirkraum, Ausgleichsraum und Kaltluftprozessgeschehen (Abbildung 38). 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 unmittelbar der Modellausgabe. Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier nahegelegensten Eingabezellen 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 aus einzelnen Rasterzellenwerten im Wirkraum für das 2 m Niveau von 04:00 Uhr flächenhaft und ebenfalls bilinear interpoliert dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich, je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt.



Abbildung 38: Legende der Klimaanalysekarte.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch zwei Elemente des Kaltluftprozessgeschehens grafisch überlagert, die mit individuellen Methoden abgeleitet worden sind (Tabelle 12). Das Strömungsfeld bzw. die Fließrichtung der Kaltluft wurde für eine bessere Lesbarkeit der Karte auf eine Auflösung von 100 m aggregiert und ab einer als klimaökologisch wirksam angesehenen Windgeschwindigkeit von 0,1 m/s mit einer Pfeilsignatur visualisiert. Kleinräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können aber aus den rasterbasierten Einzelkarten zu den bodennahen Windfeldern in Kombination mit dem mitgelieferten GIS-basierten Ergebnisdaten in Originalauflösung entnommen werden.

Die als Kaltluftentstehungsgebiete gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Grün- und Freiflächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 41,61 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$ (Mittelwert über den gesamten Ausgleichsraum).



Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in den Karten einige Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Lüdenscheid von besonderer Bedeutung sind. Flächenhafte Kaltluftabflussbereiche, egal ob inner- oder außerhalb, sind von einer gewissen 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 Stadt Lüdenscheid gibt es zudem eine Reihe von innerstädtischen Grünflächen, welche in der Nacht ihre kühle Luft in die bebaute Umgebung transportieren. Breite Straßenzüge bzw. raugkeitsarme Strukturen und eine strömungsparelle Ausrichtung der Gebäudekörper begünstigen ein weites Eindringen von kühlerer Luft in den Siedlungsbereich.

Tabelle 12: Legendenelemente und ihre Ableitungsmethoden zum Kaltluftprozessgeschehen in den Klimaanalysekarten

Legendenelement	Ableitungsmethode
Windgeschwindigkeit und -richtung	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von > 0,1 m/s
Kaltluftentstehungsgebiete	Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von > 41,61 m ³ /(m ² h)
Kaltluftabfluss (flächenhaft, auch innerorts)	gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Abflussbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Abbildung 39 zeigt zur Verdeutlichung des Vorgehens einen Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte einmal mit und einmal ohne Darstellung der zentralen Elemente des Prozessgeschehens. 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 alle Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können vergleichsweise geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Austauschbereiche (Abflüsse) angewiesen sein. Eine Akzentuierung des Kaltluftprozessgeschehens fand vornehmlich im Bereich von Siedlungsräumen statt. Besonders prägnante Kaltluftprozesse wurden auch im Bereich von Gewerbegebieten einbezogen. Eine Berücksichtigung verschiedener Nutzungsstrukturen im Wirk- und Ausgleichsraum erfolgte nachfolgend im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte.

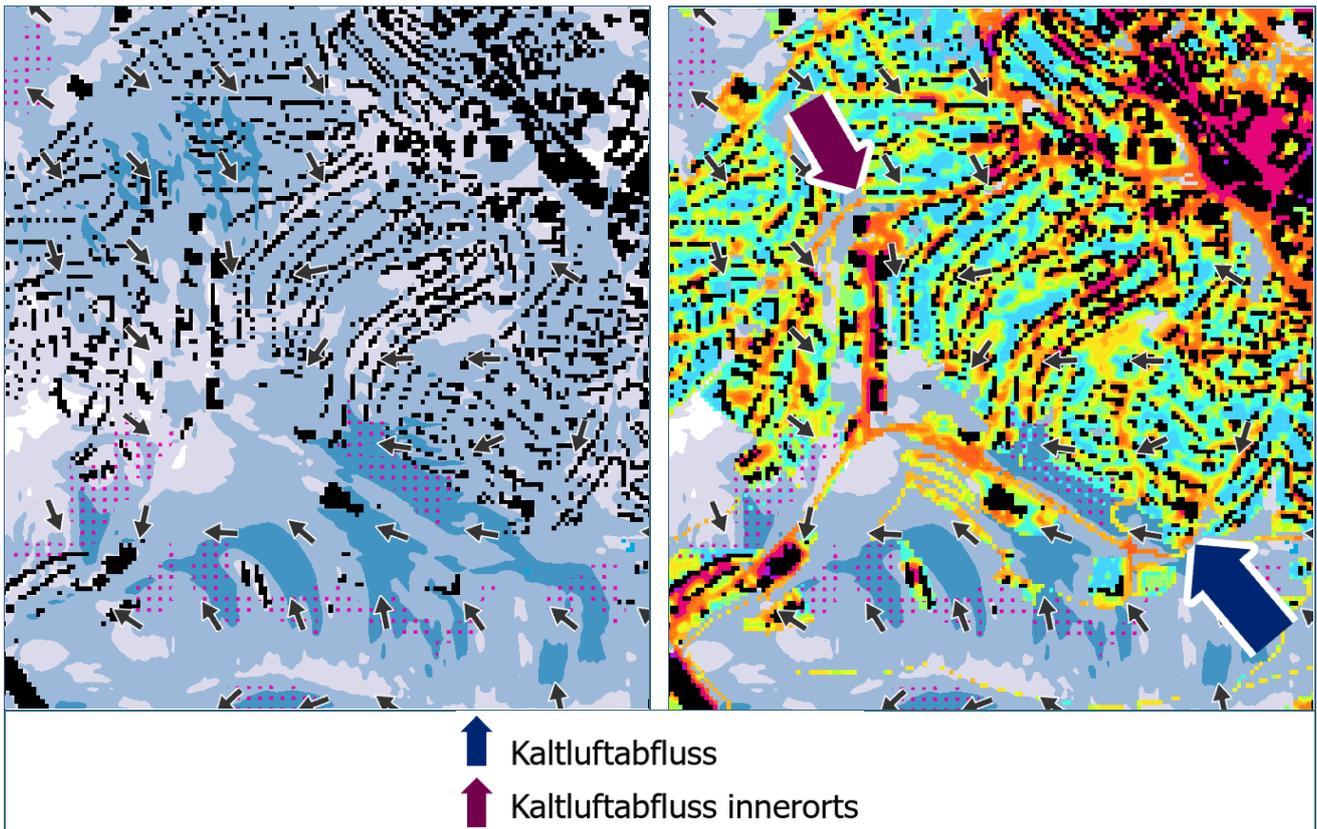


Abbildung 39: Zwei Ausschnitte aus der Klimaanalysekarte zur Verdeutlichung der gutachterlichen Ableitung von flächenhaften Kaltluftaustauschbereichen (links ohne und rechts mit entsprechender Ausweisung).

Im Folgenden werden die Inhalte der Klimaanalysekarte (Abbildung 41) anhand von Beispielen beschrieben. Sie fassen die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisieren das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Für die Situation um 14 Uhr ist die PET der einzige ausschlaggebende Parameter (vgl. Kapitel 6.2), sodass auf die Erstellung einer Klimaanalysekarte für die Tagsituation verzichtet wurde. Die Karte der PET (Abbildung 37) kann jedoch auch als „Klimaanalysekarte für die Tagsituation“ verstanden werden.

Die Abbildung 40 zeigt die Klimaanalysekarte des Status Quo für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebietes, welcher die für die Stadt wichtigsten Kaltluftprozesse allesamt enthält. Die auf Siedlungs-, Gewerbe- und Verkehrsflächen (Wirkraum) durch die nächtliche Überwärmung dargestellte thermische Belastungssituation zeigt sich insbesondere im Bereich der Lüdenscheider Innenstadt. Auch auf Industrie- und Gewerbeflächen (z.B. am Stahlwerk Brüninghausen) und entlang von Verkehrsachsen (z.B. an der Heedfelder Straße) wird eine hohe Betroffenheit bei ähnlichen Temperaturdifferenzen zwischen Wirk- und Ausgleichsraum ersichtlich.

Die über den Grün- und Freiflächen (Ausgleichsraum) hinterlegte Kaltluftvolumenstromdichte deckt sich mit jener aus Abbildung 34 und ist gemeinsam mit dem Strömungsfeld und den Kaltluftentstehungsgebieten essenzieller Bestandteil der gutachterlich festgelegten Kaltluftleitbahnen und -abflüsse. In Lüdenscheid gibt es heutzutage 16 Orte mit **Kaltluftabflüssen**, welche flächenhaft über unbebauten Hangbereichen oder rein thermisch in Form von Flurwinden auftreten (Abbildung 41). Aufgrund der vergleichsweise höheren Dichte von Kaltluft setzt sich, dem Gefälle folgend, hangabwärts in Bewegung. Durch diese „Beschleunigung“ weisen Kaltluftabflüsse meist höhere Strömungsgeschwindigkeiten auf als Flurwinde, die sich aufgrund des



Temperaturunterschiedes zwischen kühlen Freiflächen und überwärmter Bebauung einstellen. Flächenhafte, orografiebedingte Kaltluftabflüsse sind durch eine überdurchschnittliche Kaltluftvolumenstromdichte gekennzeichnet und treten z. B. südlich von Gevelindorf auf.

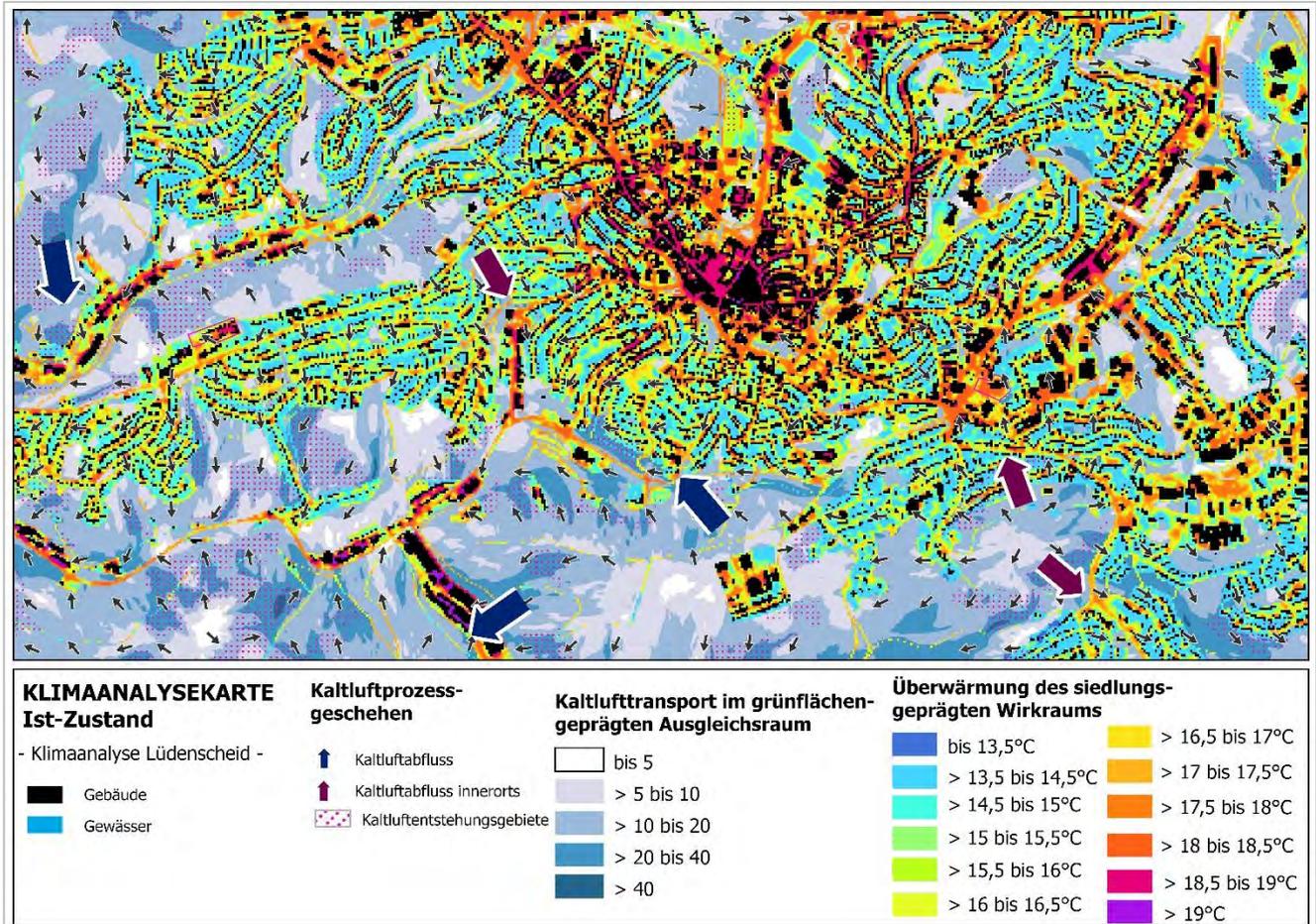
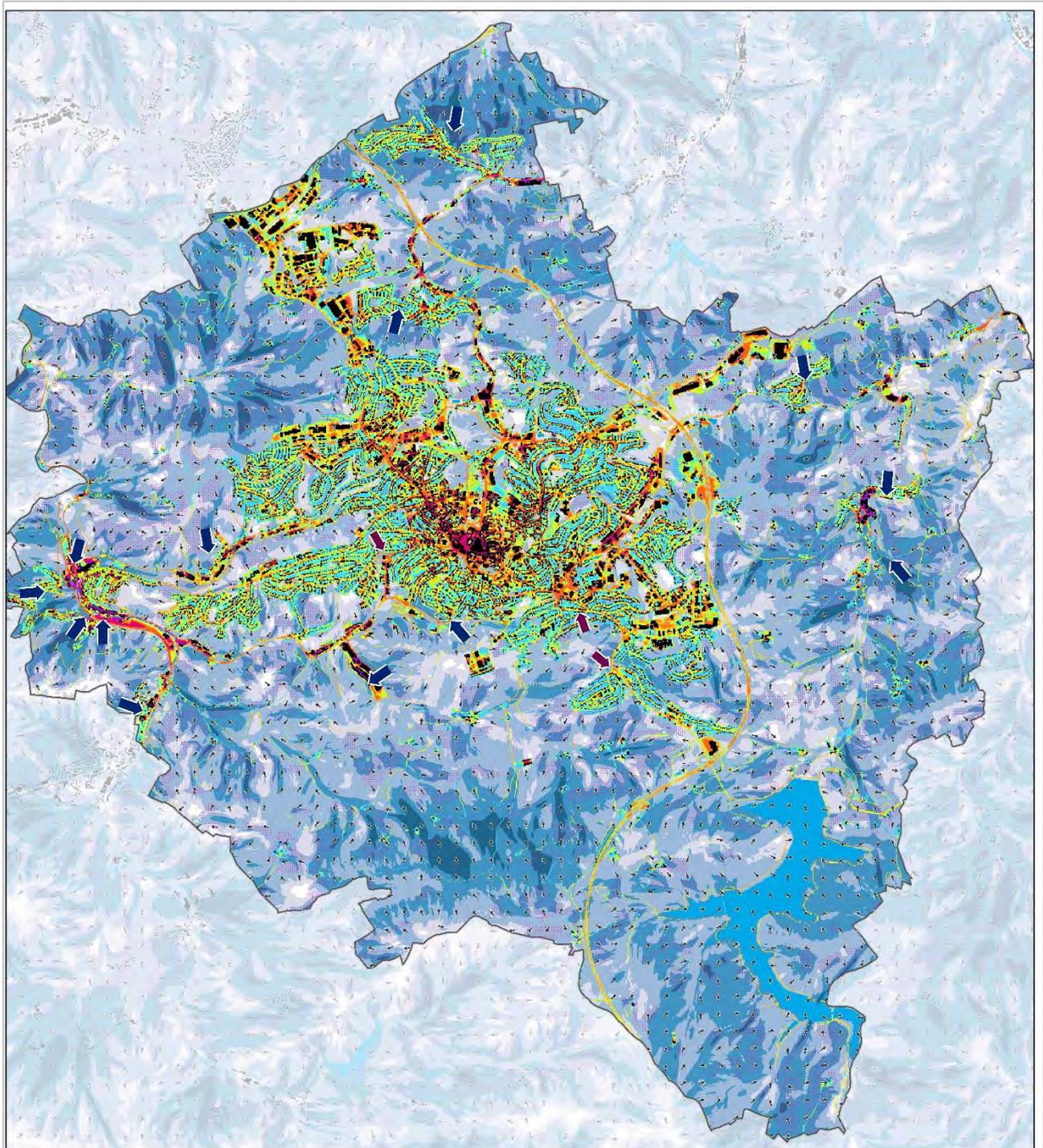


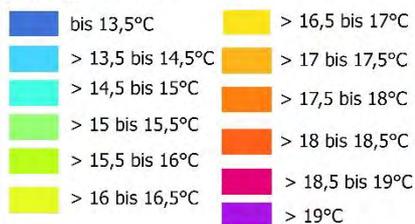
Abbildung 40: Klimaanalysekarte der Nacht im Ist-Zustandes für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.



KLIMAANALYSEKARTE Ist-Zustand

Stadt Lüdenscheid

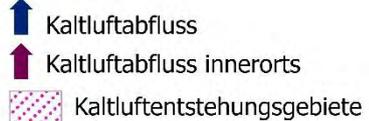
Überwärmung des siedlungs- geprägten Wirkraums



Kaltlufttransport im grünflächen- geprägten Ausgleichsraum



Kaltluftprozessgeschehen



Entwicklungsflächen
Ist-Zustand

Gebäude

Gewässer

Abbildung 41: Klimaanalysekarte der Nacht im Ist-Zustandes für Lüdenscheid.



8. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

8.1 GRUNDLAGEN

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 potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum 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- als auch zur Nachtsituation in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, gemäß der Produktpyramide (Abbildung 10) vorgelagert sog. Bewertungskarten auszugeben. Die zwei Bewertungskarten („Nacht Ist“, „Tag Ist“) bauen auf der zugehörigen nächtlichen Klimaanalysekarte bzw. PET-Karte des Tages auf und sind der Planungshinweiskarte hierarchisch untergeordnet. Der Erstellung dieses Kartenwerks liegt ein mit beteiligten Akteuren abgestimmter Aushandlungsprozess zugrunde (s. Kapitel 3).



8.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap. 6) erlauben eine detaillierte Darstellung der wichtigsten klimaökologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Bewertungen und daraus abgeleitete planerische Aussagen (z.B. zum Grad der thermischen Belastung innerhalb der Wirkräume sowie die humanbioklimatische Bedeutung bestimmter Areale im Ausgleichsraum) müssen sich hingegen auf eindeutig im Stadtraum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

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

Ein entsprechender Datensatz existiert auf kommunaler Ebene nicht per se. 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 übertragen¹¹. 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 bis auf wenige Ausnahmen alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 400 m² (also die Flächen von vier Rasterzellen 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 (Prinzip siehe Abbildung 42). Die in der Skala erkennbaren Minima und Maxima von um die 12 °C auf sandigen oder grasbewachsenen Freiflächen bzw. bis zu 20 °C auf asphaltierten Wegen, heben sich in Flächen mit gemischten Nutzungen (z. B. Parks und Gärten) gegenseitig auf und der Mittelwert dieser Flächen liegt häufig in der Mitte der Skala bei um 16 °C.

¹¹ „nicht gewichtet“ bedeutet, dass alle Rasterpunkte gleichen Einfluss auf die Mittelwertbildung hatten, egal, ob sie am Rand der Fläche oder in der Flächenmitte lagen, und auch egal welcher Nutzungsklasse sie zugeordnet waren.

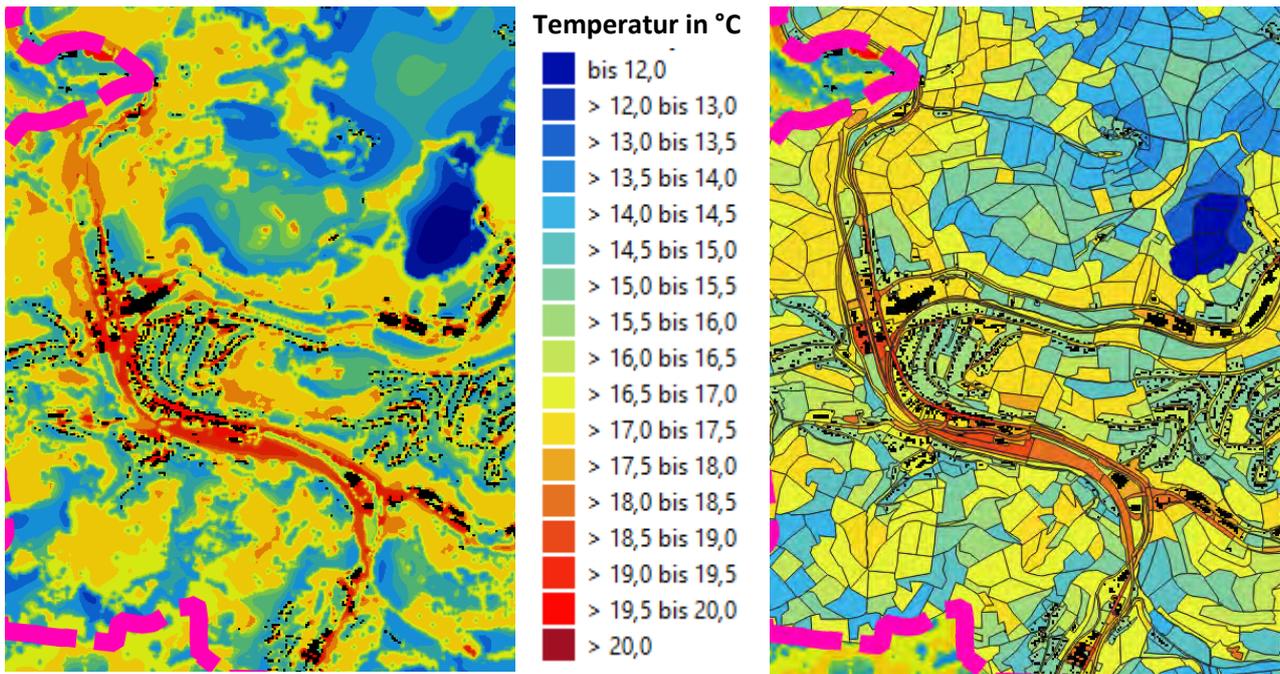


Abbildung 42: Links das Ausgangsraster der nächtlichen Lufttemperatur und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie für Lüdenscheid.

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 zwischen den Flächen, um die Belastungen losgelöst von bestimmten Wetterlagen beschreiben zu können.

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

8.3.1 WIRKRAUM - METHODIK

Wertgebend für die Wirkraumklassen sind die PET um 14:00 für die Belastungssituation am Tage sowie die bodennahe Lufttemperatur um 04:00 als starker Indikator für den nächtlichen Schlafkomfort in den Gebäuden (vgl. die Ausführungen in Kap. 5.4). Bei den der modifizierten ALKIS-Basisgeometrie mithilfe der in Kapitel 8.2 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 Werte definiert. Bei dieser sog. z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in standardmäßig vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 43).

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

Dabei ist

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

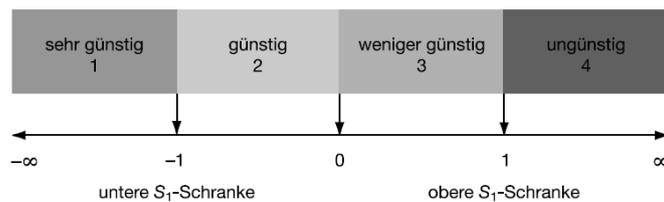


Abbildung 43: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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 Vorliegen von (hier: thermischen) Belastungen muss dabei als Prämisse zuvor abgeleitet worden sein (vgl. hierzu Kap.4). Andernfalls bestünde die Gefahr, Situationen als ungünstig zu bewerten, die eigentlich unkritisch sind (beispielsweise würde eine analoge Anwendung der Methode in den Wintermonaten oder in kalten Klimaten keine sinnvollen Ergebnisse liefern).

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Bewertungsverfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum. Die Methode ist optimiert zur vergleichenden Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb einer einzigen zeitlich-räumlichen Dimension. Die Statistiken wurden jeweils für die Tag- und Nachtsituation des Ist-Zustandes erstellt, wodurch sich Wertebereiche der z-Transformation für zwei verschiedene Bewertungskarten ergaben. Zur Erzeugung dieser Werte wurden jeweils ausschließlich solche Gitterpunkte verwendet, die innerhalb des Wirkraums lagen – die Werte im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt. Auf dieser Basis können, die von der VDI definierten Bewertungsstufen erzeugt und jede Fläche des Wirkraums für beide Bewertungskarten mit einer entsprechenden Bewertung versehen werden. Für Lüdenscheid 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 13). 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, deshalb wurden größere eher gewerblich genutzte Gebiete, die in weiterer Entfernung zum Wohnsiedlungsraum lagen, nicht bewertet (im folgenden „Industriegebiete“ genannt). Gleis- und Gewässerflächen blieben sowohl tags als auch nachts unbewertet.



Tabelle 13: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Situation im Wirkraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

Tageszeit	Bewertungsstufen	Mittlerer z-Wert	Ausgewertete Strukturtypen
Tagsituation Wirkraum 1	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i> 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	<i>PET 14:00 Uhr (Ist)</i> bis -1 > -1 bis ≤ -0,33 > -0,33 bis ≤ 0,33 > 0,33 bis ≤ 1 > 1	Wohnen, Industrie/Gewerbe
Tagsituation Wirkraum 2	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i> 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	<i>PET 14:00 Uhr (Ist)</i> bis -1 > -1 bis ≤ -0,33 > -0,33 bis ≤ 0,33 > 0,33 bis ≤ 1 > 1	Öffentlichen Straßen, Wege und Plätze
Nachtsituation Wirkraum	<i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl. 1</i> 1= sehr günstig 2= günstig 3= mittel 4= ungünstig 5= sehr ungünstig	<i>T 04:00 Uhr (Ist)</i> bis -1 > -1 bis ≤ -0,33 > -0,33 bis ≤ 0,33 > 0,33 bis ≤ 1 > 1	Wohnen, Gewerbe ohne ausgewählte Industriegebiete



8.3.2 AUSGLEICHSPAUM - METHODIK

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

Für die Bewertung von Grünflächen in der Nacht rückt der Kaltlufthaushalt in den Fokus. So erhielten in Verbindung mit Kaltluftleitbahnen und Kaltluftabflüssen 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 44 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischer Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- Klimafunktion:
 - Überdurchschnittlich hoher Kaltluftvolumenstrom $\geq 18,7 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Windgeschwindigkeit von $0,35 \text{ m/s}$ *oder*
 - überdurchschnittlich hohe Kaltluftproduktionsrate¹² $\geq 45 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- Angrenzend an Wohngebiete: Entfernung max. 30 m Luftlinie
- Siedlungsbezug: Entfernung bis 500 m Luftlinie
- Ausschließliche Betrachtung von Ausgleichsraum-Wirkraum-Wechselwirkungen zu Agglomerationen¹³

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

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

¹² Mittelwert plus die 0,75-fache Standardabweichung

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

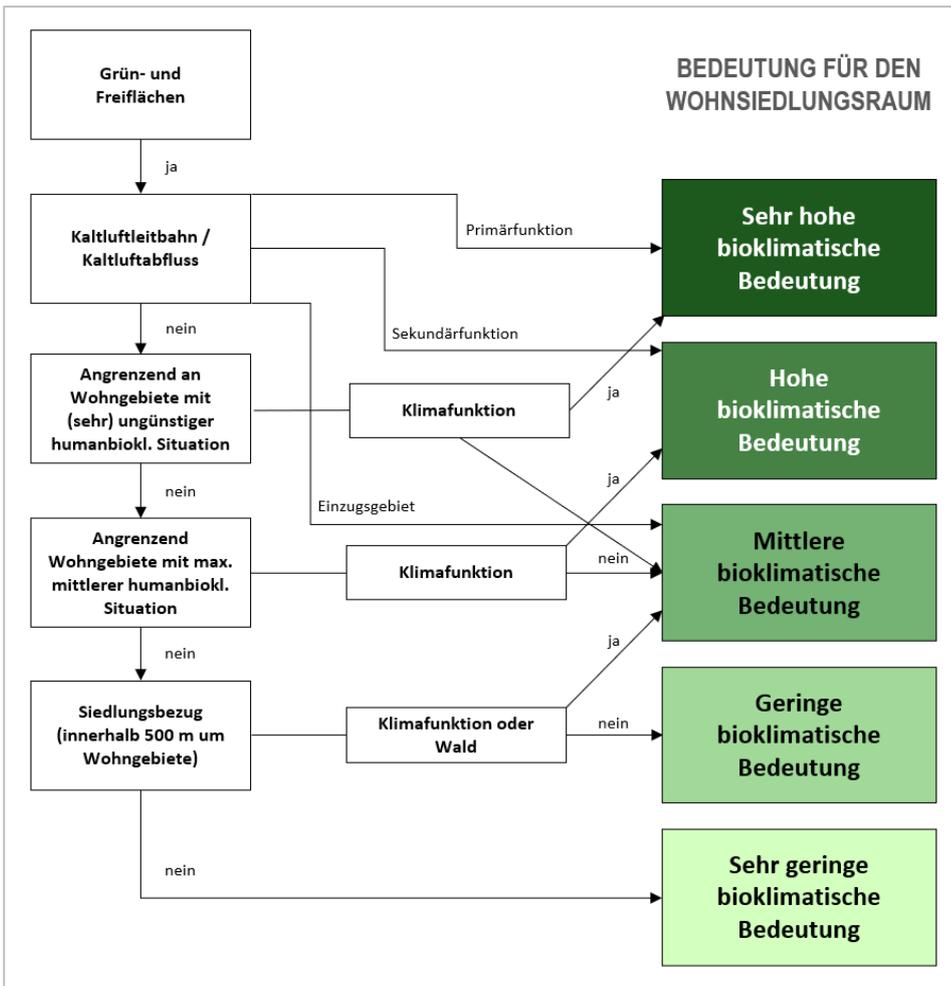


Abbildung 44: Bewertungsschema für die Bedeutung von Grünflächen in der Nachtsituation.

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

Tabelle 14: Bewertungsstufen für die humanbioklimatische Bedeutung im Ausgleichsraum nach Szenario, Tageszeit und Strukturtyp.

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

8.3.3 ZUSÄTZLICHE KARTENINHALTE ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN – METHODIK

Analog zur Darstellung in den Klimaanalysekarte (Abbildung 41) ist auch in den nächtlichen Bewertungskarten das Kaltluftprozessgeschehen in Form von Pfeilsignaturen für Kaltluftleitbahnen und -abflüssen 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 der nächtlichen Bewertungskarte auch für den Wirkraum weitere Information zum Thema Kaltluft bereitgestellt. Der Kaltlufteinwirkbereich in blauer, rasterbasierter Schraffur zeigt an, wie weit Kaltluft in die Siedlungs- und Gewerberäume eindringen kann (s. Abbildung 45). Kaltlufteinwirkbereiche sind all jene Gebiete im Wirkraum, die den Wirkraummittelwert des Kaltluftvolumenstroms von $14,04 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ oder die entsprechende mittlere Windgeschwindigkeit von $0,25 \text{ m/s}$ erreichen oder überschreiten. Wenn mehr als 50 % der Fläche eines Baublocks im Kaltlufteinwirkbereich liegt, wird dieser als Siedlungsbereich mit „Klimafunktion“ markiert. Diese Flächen verfügen häufig über einen geringen Versiegelungsgrad und wirken daher oftmals durch eigene lokale Kaltluftproduktion als Trittsteine für Ausgleichströmungen in den Siedlungskörper hinein.

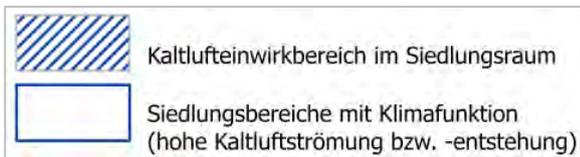


Abbildung 45: Symbologie der Kaltluftprozesse im Wirkraum.

8.3.4 ERGEBNISSE BEWERTUNGSKARTEN

8.3.4.1 NACHTSITUATION

Abbildung 46 zeigt die Bewertungskarte der Nachtsituation für Lüdenscheid im Status Quo, in welcher u.a. die **Wirkräume** hinsichtlich ihrer thermischen Situation bewertet wurden. Etwa 1,2 % der Siedlungsflächen ohne Industrie der Stadt sind durch eine sehr günstige und 30,7 % durch eine günstige thermische Situation gekennzeichnet. Unter den Wohnbauflächen gehören vorrangig mit Einzel- und Reihenhäusern bestandene Blockflächen am Siedlungsrand, dieser Kategorie an. Diese weisen einen hohen Schlafkomfort auf, da eine lockere Bebauung die nächtliche Durchlüftung begünstigt. Weiterhin sorgen hier der geringe Versiegelungsgrad und der hohe Baumbestand durch Verschattungseffekte bereits am Tage dafür, dass allgemein weniger solare Strahlung aufgenommen und anschließend in Wärme umgewandelt werden kann. 39,0 % der Wirkraumflächen, also mehr als ein Drittel aller Flächen, weisen mittlere thermische Bedingungen auf. Hierbei handelt es sich vor allem um Wohngebiete mit einem mittleren Versiegelungsgrad. 16,7 % der Wirkraumflächen Lüdenscheids gehören der Klasse der ungünstigen thermischen Situation an. Flächen dieser Kategorie sind oftmals stark versiegelt, verfügen aufgrund größerer Überbauung über eine erhöhte Rauigkeit, was Kaltluftströme von außerhalb abschwächt. Oftmals stehen in unmittelbarer Umgebung darüber hinaus nur wenige Grün- und Freiflächen zur Verfügung, die Kaltluft produzieren und zur Verfügung stellen könnten. Abschließend sind ca. 12,4 % der Flächen durch eine sehr ungünstige thermische Situation charakterisiert. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper und zum Teil auch eine geringe Kaltluftzufuhr, was sich in Lüdenscheid vorrangig im Innen-/Altstadtbereich und die den bewerteten Gewerbegebieten einstellt.



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 1,3 % aller Ausgleichsflächen im Stadtgebiet als Grünflächen mit „sehr hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung in der Nacht statt. Entsprechend der hierarchischen Zuweisung entfällt ein großer Teil dieser Flächen auf die Kernbereiche der Kaltluftabflüsse. Zusätzlich gehören einige weitere innerstädtische Ausgleichsflächen nahe dem belasteten Siedlungsraum dieser Klasse an. Ausgleichsflächen von noch immer „hoher“ humanbioklimatischer Bedeutung finden sich zu 5,5 % innerhalb der Lüdenscheider Stadtgrenzen wieder. Mit 46,9 % entfällt ein Großteil aller Ausgleichflächen auf die „mittlere“ Bewertungskategorie. Flächen, die in diese Kategorie eingeordnet wurden, befanden sich vorrangig im Einzugsgebiet von Kaltluftabflüssen und speisen diese. So ist z.B. der Großteil der mit Kaltluftentstehung assoziierten Agrarflächen in der mittleren Klasseneinordnung zu finden, aber auch weitere Grün- und Freiflächen, die Siedlungsbezug haben und überwiegend eine Klimafunktion aufweisen. Den letzten Anteil der Ausgleichsflächen bilden mit 43,1 % bzw. 3,2 % all jene Grün- und Freiflächen, die nur einen geringen bzw. keinen nennenswerten Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen in der Nacht leisten.

Tabelle 15: Prozentuale Flächenanteile der Bewertungsräume im Ist-Zustand.

Tageszeit	Bewertungsraum	Bewertungsstufen <i>In Anlehnung an VDI 3785, Bl.1</i>	Flächenanteil im Ist-Zustand [%]
Nachtsituation	Wirkraum (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	1,2%
		2= günstig	30,7%
		3= mittel	39,0%
		4= ungünstig	16,7%
		5= sehr ungünstig	12,4%
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	1,3%
		4= hoch	5,5%
		3= mittel	46,9%
		2= gering	43,1%
		1= sehr gering	3,2%
Tagsituation	Wirkraum 1 – Wohn- und Gewerbe (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	3,1%
		2= günstig	19,4%
		3= mittel	48,2%
		4= ungünstig	28,5%
		5= sehr ungünstig	0,8%
	Wirkraum 2 – Straßen und Plätze (humanbioklimatische Belastung)	1= sehr günstig	12,4%
		2= günstig	15,3%
		3= mittel	31,9%
		4= ungünstig	34,0%
		5= sehr ungünstig	6,5%
	Ausgleichsraum (humanbioklimatische Bedeutung)	5= sehr hoch	1,6%
		4= hoch	48,8%
		3= mittel	11,1%
		2= gering	20,2%
		1= sehr gering	18,3%

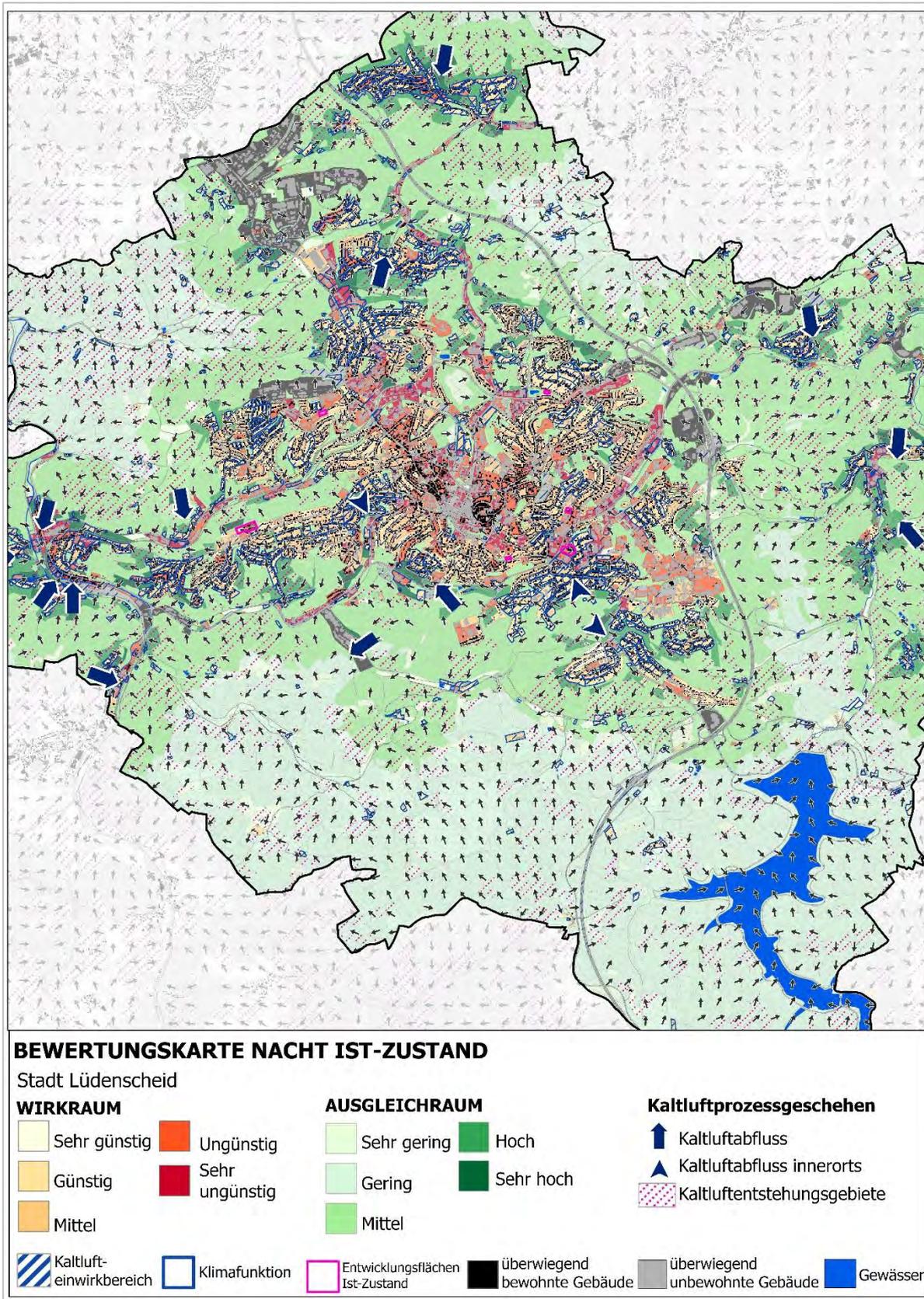


Abbildung 46: Bewertungskarte der Nachtsituation des Lüdenscheider Stadtgebiets.



8.3.4.2 TAGSITUATION

Auch in der Bewertungskarte der Tagsituation für Lüdenscheid, die im Ist-Zustand in Abbildung 47 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.

In Lüdenscheid sind 3,1 % der Wohn- und Gewerbeflächen sowie 12,4 % der durch den Langsamverkehr wie Fußgänger oder Radfahrer nutzbaren Verkehrsflächen und Plätze durch eine sehr günstige thermische Situation gekennzeichnet. Vor allem die durchgrünten, zumeist wald- oder gewässernahen Siedlungsteile mit Einzel- und Reihenhausbauung 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. 19,4 % der Wohn- und Gewerbeflächen der Stadt Lüdenscheid wurden der Kategorie der günstigen human-bioklimatischen Situation zugeordnet. Diese vergleichsweise noch immer locker bebauten und wenig versiegelten Gebiete verfügen über einen hohen Grünanteil. Bei den Verkehrsflächen weisen 15,3 % der Flächen eine günstige thermische Situation auf. Mit 48,2 % ist fast die Hälfte der Wohn- und Gewerbeflächen, aber auch etwa ein Drittel der Verkehrsflächen (31,9 %) heutzutage mit mittleren thermischen Bedingungen assoziiert. Diese Klasse beschreibt vorrangig Wohngebiete, bei denen sich Versiegelungsgrad und verschattende Elemente die Waage halten.

Mit 28,5 % der Lüdenscheider Wohn- und Gewerbeflächen und 34,0 % der Verkehrsflächen sind am Tage große Teile der Wirkraumflächenkulisse durch eine ungünstige thermische Situation charakterisiert. Bei den Wohnbauflächen zählen hierzu vornehmlich die nur mit flacher Einzelhausbebauung und allgemein niedrigerer Vegetation bestandenen Stadtbereiche. Oft fehlen in diesen Gebieten großkronige, schattenspendende Bäume, teils war vorhandene Vegetation zu kleinräumig, um innerhalb des horizontalen Rechengitters von 10 m Einzug in die Modellrechnung zu erhalten. Bei den Industrie- und Gewerbeareale ist gleichermaßen eine oftmals mindestens ungünstige Aufenthaltsqualität im Freien festzustellen, ebenfalls aus Gründen zu geringer Verschattung, aber auch aufgrund eines sehr hohen Versiegelungsgrades. Zu den ungünstigen Straßenzügen gehören am Tage z.B. Teile der Heedfelder und der Bahnhofsstraße, die durch fehlende Verschattung eine enorme Wärmebelastung für den Langsamverkehr mit sich bringen.

Der restliche, aber sehr kleine Teil der Wohn- und Gewerbeflächen (0,8 %) sowie der Verkehrsflächen (6,5 %) fällt in die Klasse der sehr ungünstigen thermischen Situation. Gründe für diese ungünstigen Bedingungen sind insbesondere ein hoher Versiegelungsgrad, große Baukörper mit hoher Wärmekapazität und / oder eine mangelnde Verschattung. Überwiegend ist der an hoch belastete Wohn- und Gewerbeflächen angrenzende Verkehrsraum durch diese thermische Situation charakterisiert – u.a. Teile der Corneluis-, Luisen- und Grabenstraße in der Nähe des Kirchplatzes in Lüdenscheid fallen in diese Kategorie.

Die Bewertungskarte des Tages beleuchtet den **Ausgleichsraum** analog zur Nachtsituation hinsichtlich seiner klimaökologischen Bedeutung, legt statt des Kaltluftthaushaltes aber andere Kriterien in den Fokus, insbesondere die Aufenthaltsqualität im Freien. Ausgleichsraumflächen mit sehr hoher oder hoher Aufenthaltsqualität (1,6 % bzw. 48,8 %) sind am Tage vorzugsweise diejenigen, die durch eine hohe Schattenwirkung vor solarer Einstrahlung und daraus resultierendem Hitzestress abschirmen. In diese zwei höchsten Bewertungsklassen fallen die zahlreichen Waldareale im gesamten Stadtgebiet. Auch innenstadtnah gibt es sehr hoch



bewertete Ausgleichsflächen (z.B. das Loher Wäldchen in Lüdenscheid), die einen idealen Rückzugsort für die Bewohner der belasteten Zentrumsbereiche darstellen.

Ca. 11,1 % der Ausgleichsflächen ist einer mittleren Aufenthaltsqualität am Tage zuzuordnen. Wie bereits Flächen sehr hoher Einstufung sind auch die Flächen dieser Kategorie überwiegend in den genannten 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. Friedhof Lüdenscheid-Mathildenstraße) und wirken ähnlich wie die Waldareale dieser Einordnung als wichtige, teils fußläufig erreichbare Klimakomforträume.

Ausgleichsräume ungünstiger Aufenthaltsqualität (20,2 % der Grünflächen) sind überall über das Stadtgebiet verteilt und kennzeichnen Bereiche mit Wärmebelastung. Diese Areale könnten durch eine klimaökologische Aufwertung an Bedeutung gewinnen, indem beispielsweise durch das Pflanzen von Bäumen entlang von Wegebeziehungen, die Aufenthaltsqualität am Tage verbessert wird. Gleiches gilt für die Ausgleichsräume mit sehr geringer (18,3 %) Aufenthaltsqualität, welche aufgrund der geringen Verschattung die Großzahl der Ackerflächen überall im Lüdenscheider Stadtgebiet ausmachen.

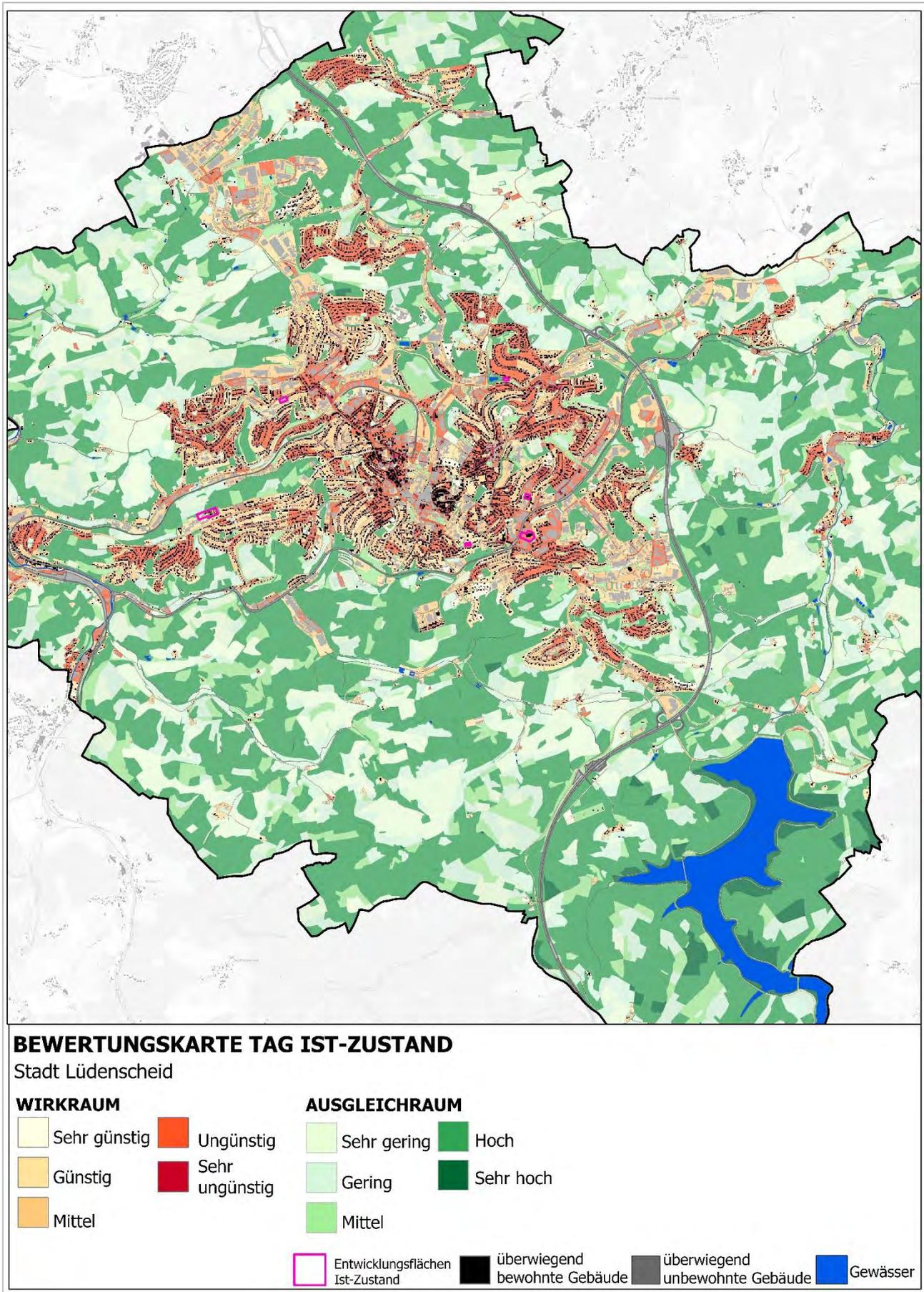


Abbildung 47: Bewertungskarte der Tagsituation des Lüdenscheider Stadtgebiets.



8.4 PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Die Planungshinweiskarte Stadtklima (PHK) fasst die Ergebnisse der zwei Bewertungskarten „Ist-Zustand Nacht“ und „Ist-Zustand Tag“ (s. Kapitel 8.3) in einer einzigen Karte zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Grün- und Freiflächen eine hohe stadtklimatische Bedeutung innehaben und auf welchen Siedlungs- und Gewerbeflächen oder in welchen Verkehrsräumen ein stadtklimatischer Handlungsbedarf vorherrscht.

8.4.1 METHODIK

Im Wirkraum (Wohn- und Gewerbeflächen sowie öffentlicher Verkehrsraum) wird der **stadtklimatische Handlungsbedarf** dargestellt. Die Bewertung beruht in bewohnten Gebieten hauptsächlich auf den Schlafbedingungen (nächtliche Überwärmung und Kaltluftfunktion), in unbewohnten Gebieten auf der Aufenthaltsqualität im Außenraum. Diese Bewertungsunterschiede wurden aus den Klassenzuweisungen der Bewertungskarten des Tages und der Nacht extrahiert und jeweils im Rahmen von Bewertungsmatrizen für den Wohn- und den Gewerbebereich gegenübergestellt. Als Ergebnis entstand eine neue gesamthafte Tag-Nacht-Wirkraumbewertung der Klassenstufen 1 bis 5 für den Status Quo (s. Tabelle 16)

Tabelle 16: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für Wohnraum und Gewerbe.

Wohnsiedlung: (Nacht stärker gewichtet)						
		Bewertung Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	2	3	3	4
	2	1	2	3	4	4
	3	2	2	3	4	5
	4	2	3	3	4	5
	5	3	3	4	5	5
Belastung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						
Gewerbe: (Tag stärker gewichtet, ohne ausgewählte						
		Bewertung Nacht				
		1	2	3	4	5
Bewertung am Tag	1	1	1	1	2	2
	2	2	2	2	2	3
	3	3	3	3	3	4
	4	3	4	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Belastung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						

Je nachdem, ob bereits heutzutage eine für die Tag-Nacht-Kombination ermittelte Wirkraumbelastung vorherrscht, wurden stadtklimatische Handlungsbedarfe vergeben. Da der Verkehrsraum und die ausgewählten Industrieflächen nur für die Tagsituation ausgewertet wurden, konnten die Bewertungskennzahlen hier direkt in stadtklimatische Handlungsbedarfe überführt werden (s. Tabelle 17).



Tabelle 17: Aus Bewertungskarten abgeleitete stadtklimatische Handlungsbedarfe für den Wirkraum.

Wirkraumbewertung aus der Matrix Wohnen (Bewertungskarten)	Wirkraumbewertung des Industrie- & Verkehrsraums (Bewertungskarten)	Stadtklimatischer Handlungsbedarf in der PHK im Wirkraum
5= höchste	5= sehr ungünstig	sehr hoher
4= sehr hoch	4= ungünstig	hoher
3= hoch	3= mittel	erhöhter
2= mittel oder 1= gering	2= günstig oder 1= sehr günstig	Kein

Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wälder werden als stadtklimatischer Ausgleichsraum bezeichnet. Die Planungshinweiskarte gibt die **stadtklimatische Bedeutung** dieser Flächen anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Analog zum Wirkraum, wurde auch für den Ausgleichsraum eine Bewertungsmatrix erstellt, die Tag- und Nachtsituation gegenüberstellt (s. Tabelle 18).

Tabelle 18: Bewertungsmatrizen der Informationen der Bewertungskarten für den Ausgleichsraum.

Grünflächen						
Schritt 1	Bewertung Nacht					
		1	2	3	4	5
Aufenthaltsqualität Tag	3	3	3	4	4	5
	4	4	4	4	5	5
Entlastungsraum	5	5	5	5	5	5
Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						
Grünflächen						
Schritt 2	Bewertung Nacht					
		1	2	3	4	5
Aufenthaltsqualität Tag	1	1	2	3	4	5
	2	1	2	3	4	5
kein	3	2	2	3	4	5
Entlastungsraum	4	3	3	4	4	5
	5	4	4	5	5	5
Bedeutung: 1 = gering, 2 = mittel, 3 = hoch, 4 = sehr hoch, 5 = höchste						

Der Durchlauf der Matrix findet in zwei Schritten statt, je nachdem, ob die betrachtete Fläche einen Entlastungsraum darstellt oder nicht. Entlastungsräume sind vom tagsüber belasteten Siedlungsraum (Wirkraumklasse der Bewertungskarte ≥ 4) fußläufig gut erreichbare (Luftlinie 300 m), öffentlich zugängliche Grünflächen und Wälder von mindestens hoher Bedeutung am Tage (Ausgleichsraumklasse der Bewertungskarte ≥ 3). Nach der Gegenüberstellung der Bewertung von Entlastungsräumen am Tage und der nächtlichen Bewertung wird letztere in einem zweiten Schritt den restlichen Ausgleichsraumflächenbewertungen des Tages gegenübergestellt. Die daraus resultierenden bioklimatischen Ausgleichsraumbewertungen und stadtklimatischen Bedeutungen sind in Tabelle 19 aufgeführt. In Abhängigkeit von der stadtklimatische Bedeutung der Flächen ist deren stadtklimatische Funktion bei geplanten Entwicklungen zu prüfen.



Tabelle 19: Aus Bewertungskarten abgeleitete stadtklimatische Bedeutung für den Ausgleichsraum.

Ausgleichsraumbewertung aus der Matrix Grünflächen (Bewertungskarten)	Stadtklimatische Bedeutung in der PHK im Ausgleichsraum
5= höchste	Sehr hohe
4= sehr hoch	hohe
3= hoch	erhöhte
2= mittel oder 1= gering	keine

Weitere Karteninhalte sind das aus der Klimaanalysekarte übernommene nächtliche Kaltluftprozessgeschehen in Form von Kaltluftabflüssen, Kaltlufteinwirkungsbereichen und Siedlungsräumen mit Klimafunktion. Darüber hinaus enthält die Karte Lüdenscheider Raumstrukturinformationen zu Gewässern, Gebäuden, Gleisflächen und Schnellstraßen im Außenraum (nicht bewertet), sowie den Entwicklungsflächen (vgl. Kapitel 5.2).

8.4.2 ERGEBNIS PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Das finale Produkt der Klimaanalyse Lüdenscheid, die Planungshinweiskarte Stadtklima, ist in Abbildung 48 (ausschnittweise) und Abbildung 49 aufgetragen und weist die wichtigsten Wirk- und Ausgleichsräume mit ihren jeweiligen stadtklimatischen Handlungsbedarfen und Bedeutungen aus.

Die **stadtklimatischen Handlungsbedarfe des Wirkraums** sollen mittels verknüpfter Planungshinweise eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird (s. Tabelle 20).

Tabelle 20: Flächenanteile der stadtklimatischen Handlungsbedarfe im Wirkraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Stadtklimatischer Handlungsbedarf in der PHK im Wirkraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
sehr hoher	5,1	Maßnahmen zur Verbesserung der klimat. Situation sind möglichst bei allen baulichen Entwicklungen und Sanierungen umzusetzen. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen sowie einer (klimagerechten) Gebäudekühlung zu prüfen.
hoher	18,0	Bei Nachverdichtungen, baulichen Entwicklungen und im Zuge von Straßensanierungen sind über den klimaökologischen Standard ¹⁴ hinausgehende, optimierende Maßnahmen so weit wie möglich zu prüfen.
erhöhter	49,6	Klimaökologische Standards* zur baulichen Entwicklung sind bei allen Vorhaben zu prüfen.
Keine	27,3	Klimaökologische Standards* zur baulichen Entwicklung sind im Sinne der Klimaanpassung bei größeren Vorhaben zu prüfen.

¹⁴ "Mindeststandards" gemäß BauGB; siehe "Förderung des Klimaschutzes und der Klimaanpassung"; beinhaltet aktuell wirksame Maßnahmen: z. B. die Reduzierung der baulichen Flächeninanspruchnahme, die vorsorgeorientierte Planung gegenüber dem Klimawandel (z.B. mittels Durchgrünung, Verschattung) oder die allgemeine "Förderung einer klimaschonenden Siedlungsstruktur"



Die Tabelle 20 zeigt zudem die Flächenanteile der verschiedenen stadtklimatischen Handlungsbedarfe auf. Mit 5,1 % ist der höchste stadtklimatische Handlungsbedarf zuvorderst im hoch versiegelten und oftmals sowohl tagsüber als auch nachts überwärmten Siedlungs- und Gewerberaum zu finden. Aber auch in den stärker versiegelten bzw. schlechter durchlüfteten Innenstadtbereichen sind solche sehr hohen Handlungsbedarfe verzeichnet. Immer noch hoher stadtklimatischer Handlungsbedarf (18,0%) tritt vorwiegend im Gewerberaum (z.B. in Freisenberg) auf. Der erhöhte stadtklimatische Handlungsbedarf macht mit insgesamt 49,6% der Wirkraumbereiche knapp die Hälfte des Wirkraumes aus. Die in den Planungshinweisen genannten „klimaökologische Standards“ meinen u.a. eine geringe Versiegelung, das Einplanen von Bäumen mit ausreichend Wurzelraum und eine Dachbegrünung (vgl. Fußnote 13 unten). Eine Auswahl der wichtigsten Maßnahmen verschiedener Funktionsziele ist in Kapitel 8.5 zusammengefasst. Diese sind im Sinne der Klimaanpassung bei größeren Vorhaben auch zu prüfen, wenn heute noch kein stadtklimatischer Handlungsbedarf besteht (27,3 % der Flächen).

Grün- und Freiflächen, die nachts einen großen Beitrag zum Kaltluftprozessgeschehen leisten und/oder durch schattenspendende Vegetation tagsüber einen wertvollen human-bioklimatischen Rückzugsort an heißen Tagen darstellen, sind in der PHK durch entsprechende **stadtklimatische Bedeutungen** ausgewiesen. Tabelle 21 stellt den stadtklimatischen Bedeutungen planerische Handlungsempfehlungen gegenüber und beziffert darüber hinaus den prozentualen Flächenanteil der jeweiligen Bedeutungskategorie. Mit einem Anteil von 4,0 % ist ein kleiner Teil des Lüdenscheider Ausgleichsraums als besonders schutzbedürftig anzusehen. Hierzu zählen etwa Wald- und Uferbereiche rund um die Versetalsperre. Während die Waldareale besonders tagsüber als wertvolle Ausgleichsräume wirken, entfalten die Leitbahn- und Abflussbereiche mit ihren jeweils hohen bioklimatischen Ausgleichsfunktionen vornehmlich nachts ihre dem Siedlungsraum zugutekommende Kühlwirkung. Unabhängig von der Tageszeit, an dem die Flächen ihre Funktion entfalten, ist deren Fortbestand in der sehr hohen Kategorie bei geplanten Flächenentwicklungen stets nachzuweisen. Auch auf den Erhalt der Klimafunktionen von Flächen der Klasse der hohen stadtklimatischen Bedeutung, die die Hälfte aller Ausgleichsflächen betrifft, ist zu achten (51,7 %). Diese Klasse ist in Lüdenscheid aufgrund der zahlreichen Waldflächen so stark vertreten. Etwa ein Fünftel (21,6 %) der Grün- und Freiflächen weisen eine erhöhte stadtklimatische Bedeutung auf. Hierzu zählt z.B. der Großteil der siedlungsnahen Agrarflächen. Deren Klimafunktionen, insb. Kaltluftentstehung, sollten durch kleinere Vorhaben tendenziell weitgehend unbeeinträchtigt bleiben. Allgemein ist dennoch, insbesondere bei größeren Entwicklungsvorhaben (z.B. bei Gewerbeparks/Hochhäusern) eine Planungsoptimierung zum Erhalt der klimatischen Funktionen zu erarbeiten. Abschließend besitzen 22,7 % der Flächen keine besondere stadtklimatische Funktion für den derzeitigen Siedlungsraum.



Tabelle 21: Flächenanteile der bioklimatischen Ausgleichsfunktion im Ausgleichsraum der PHK und abgeleitete Planungshinweise.

Stadtklimatische Bedeutung in der PHK im Ausgleichsraum	Flächenanteil [%]	Planungshinweise
Sehr hohe	4,0	Bei Eingriffen in die Flächen wird empfohlen, die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion nachzuweisen (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann der Nachweis über eine klimafachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
hohe	51,7	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Stellungnahme sinnvoll, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
erhöhte	21,6	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die Erhaltung der jeweiligen stadtklimat. Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Stellungnahme anzustreben.
Keine	22,7	Keine besondere stadtklimatische Funktion für den derzeitigen Siedlungsraum.

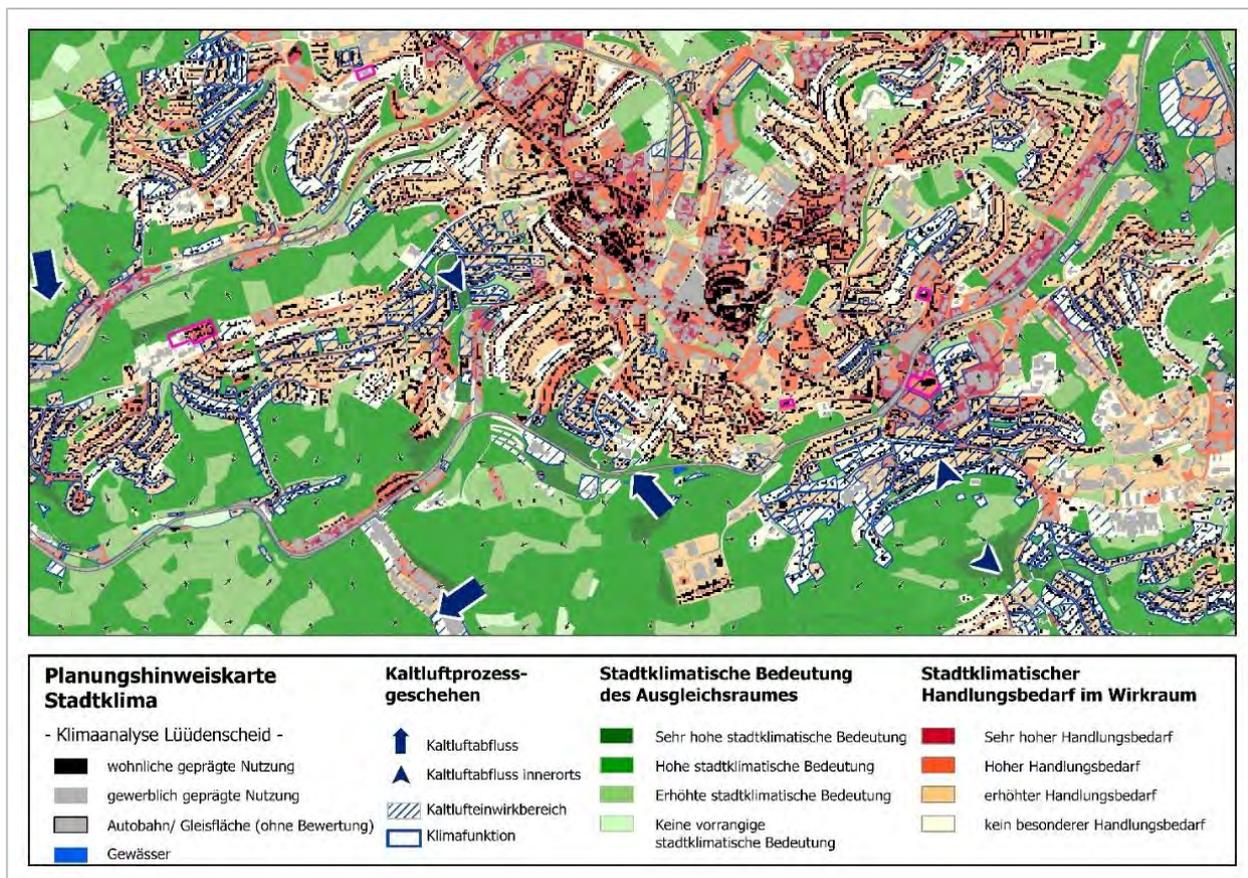
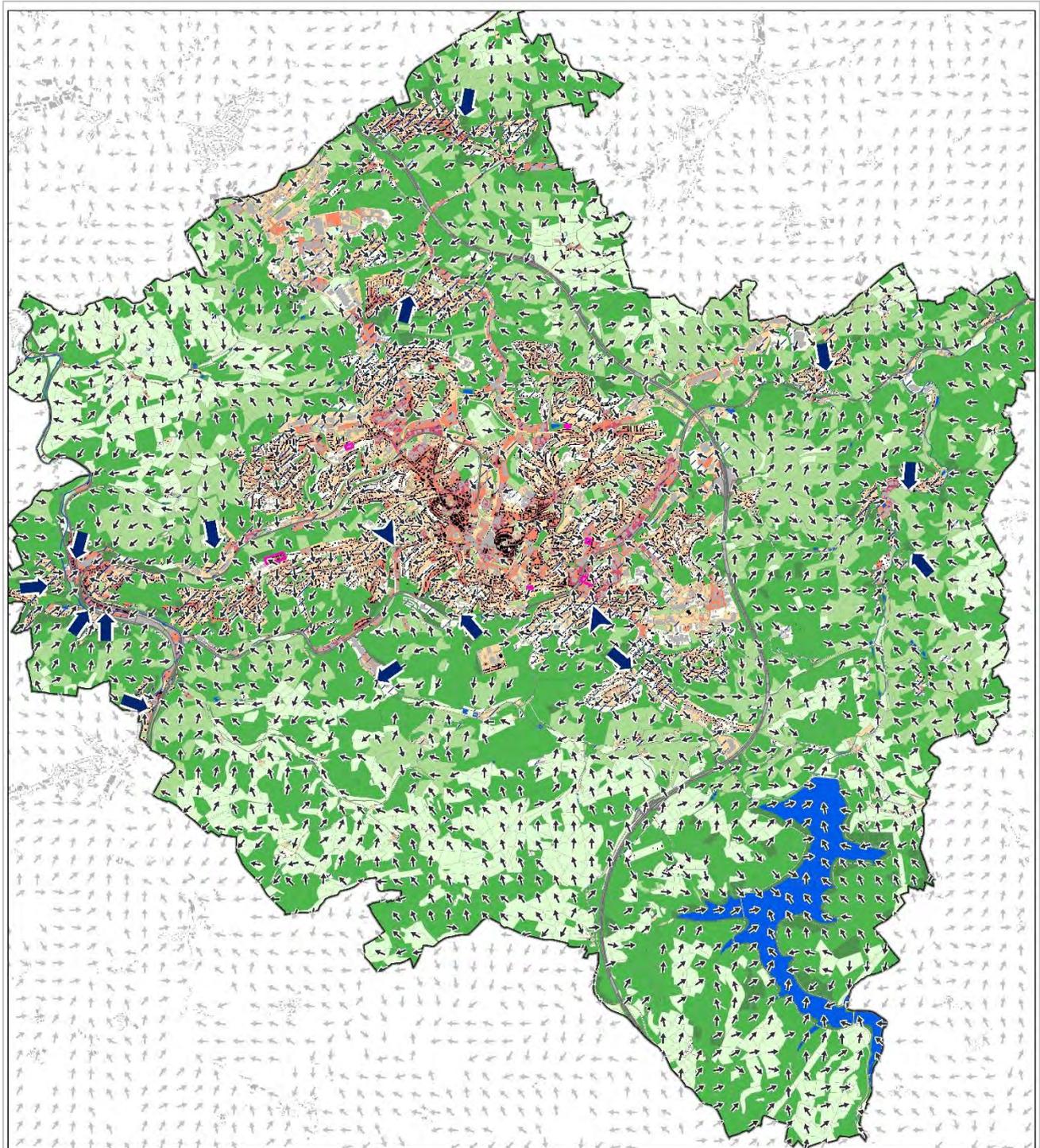


Abbildung 48: Planungshinweiskarte Stadtklima für einen Ausschnitt des Lüdenscheider Stadtgebiets.



PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA

Stadt Lüdenscheid

Stadtklimatischer Handlungsbedarf

- sehr hoher
- erhöhter
- hoher
- kein besonderer

Stadtklimatische Bedeutung des Ausgleichsraumes

- sehr hohe
- erhöhte
- hohe
- keine

- Kaltluft-einwirkungsbereich
- Klimafunktion

- Entwicklungsflächen Ist-Zustand

Kaltluftprozessgeschehen

- Kaltluftabfluss
- Kaltluftabfluss innerorts
- Kaltluftentstehungsgebiete

- überwiegend bewohnte Gebäude
- überwiegend unbewohnte Gebäude
- Gewässer

Abbildung 49: Planungshinweiskarte Stadtklima für Lüdenscheid.



8.5 MAßNAHMEN UND IHRE WIRKUNGEN

8.5.1 MAßNAHMENKATALOG STADTKLIMA

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 Lüdenscheid 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. stadtklimatischer Handlungsbedarf in der Nacht und/oder am Tage, Bedeutung für den Kaltfluthaushalt, Aufenthaltsqualität). Die Maßnahmen sind stickpunktartig und durch Bilder illustriert in Tabelle 22 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 Lüdenscheider Stadtklimas beizutragen – werden die Maßnahmen kombiniert, verstärken sich in der Regel die positiven stadtklimatischen Effekte der einzelnen Maßnahmen.

Der Grünanteil im Stadtgebiet sollte erhalten und insbesondere in thermisch belasteten Bereichen möglichst erhöht werden (→ M01: Innen-/Hinterhof-Begrünung, → M02: Öffentliche Grünräume schaffen, → M04: Entsiegelung / Versiegelungsanteil minimieren). Wasserversorgte strukturreiche Grünflächen (mit Bäumen, Sträuchern) wirken sich durch ihre Verdunstung positiv auf das Umgebungsklima aus und erhöhen durch ihren Schattenwurf die Aufenthaltsqualität (→ M07: Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren). Im Vergleich zu wärmespeichernden städtischen Baumaterialien kühlen Grünflächen nachts deutlich schneller ab und können, ab einer gewissen Größe, als Kaltluftentstehungsgebiete auf ihr (nahes) Umfeld wirken. Gleichzeitig erfüllen sie viele weitere Funktionen wie die Möglichkeit zur Erholung, die Erhöhung der Biodiversität und Synergieeffekte zum Niederschlagsmanagement (Versickerung) und zur Luftreinhaltung (Deposition von Luftschadstoffen). Insbesondere die Waldgebiete Lüdenscheids (z.B. östlich von Hellersen) oder die Uferbereiche der Versetalsperre stellen für die Stadt wichtige und schützenswerte Naherholungsräume dar (→ M08 Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen). Darüber hinaus sind aber auch kleinere Parkanlagen schützenswert und neu zu entwickeln, da diese neben ihrer humanbioklimatischen Gunstwirkung am Tage auch als „Trittsteine“ für Kaltluft dienen, die ein weiteres Eindringen dieser Ausgleichsströmungen bis weit in den Siedlungsraum hinein begünstigen (→ M15: Schutz und Vernetzung für den Kaltfluthaushalt relevanter Flächen).

Neben ihrem Potential zur Verringerung der thermischen Belastung am Tage und in der Nacht (Schattenwurf, Verdunstung, etc.), übernehmen Bäume (und Sträucher) im Straßenraum die Funktion der Deposition und Filterung von Luftschadstoffen und verbessern dadurch die Luftqualität. Bei der Umsetzung entsprechender



Maßnahmen sollte darauf geachtet werden, dass der (vertikale) Luftaustausch erhalten bleibt, um Schadstoffe abzutransportieren und die nächtliche Ausstrahlung zu gewährleisten. Geschlossene Kronendächer sind daher insbesondere bei kleinen Straßenquerschnitten und hohem motorisierten Verkehrsaufkommen zu vermeiden. Bei mehrspurigen Straßen bieten sich begrünte Mittelstreifen zur Baumpflanzung an (→ M05: Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben). Im Bereich von Leitbahnen sollten Verschattungselemente zudem keine Barriere für Kalt- und Frischluftströmungen darstellen und daher möglichst nicht quer zur Fließrichtung angelegt werden (→ M12: Optimierung des großskaligen Kaltlufttransports, von Strömung und Durchlüftung). Dabei sind solche Gehölze zu bevorzugen, die keine hohen Emissionen an flüchtigen organischen Stoffen, die zur Bildung von Ozon beitragen, aufweisen. Bei Standorten unmittelbar an Gebäuden sind großkronige Laubbäume Nadelbäumen vorzuziehen, da sie im Winter geringeren Einfluss auf die Einstrahlung ausüben und dadurch zu einer Reduktion von Heizenergie und damit von Heizkosten und Treibhausgasemissionen führen können. Mit Blick auf den Klimawandel sollte bei der Artenauswahl von Neu- oder Ersatzpflanzungen auf deren Hitze- und Trockenheitstoleranz geachtet werden (vgl. Stadt Jena 2016).

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

Gewässer wirken sich überwiegend positiv auf die thermische Situation aus. Die am Tage stattfindende Verdunstung bezieht Energie aus der umgebenden Luft und kühlt diese ab (Verdunstungskühlung). Je größer die Wasseroberfläche und je höher ihre Temperaturdifferenz zur 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 allochthonen¹⁵ 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 eingeauster 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.

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

¹⁵ "Fremdbürtige", durch großräumige Luftströmungen bestimmte Witterung (=Gegenteil von autochthon)



bzw. Berücksichtigung stadtklimatischer Belange möglich. Im Neubau bietet sich die Chance, die Gebäudeausrichtung zu optimieren und damit den direkten Hitzeeintrag zu reduzieren. Unter Berücksichtigung der Sonnen- und Windexposition sollten Gebäude so ausgerichtet werden, dass in sensiblen Räumen wie z.B. Schlafzimmern (oder auch Arbeitszimmer/Büroräume) der sommerliche Hitzeeintrag minimiert wird (→ 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 Nachverdichtungsvorhaben 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 22: Empfehlungen allgemeiner stadtklimatisch wirksamer Maßnahmen für die Stadt Lüdenscheid.

MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM		
<p>01 Begrünung im privaten Raum fördern</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Erhöhung des Vegetationsanteils und der Durchlässigkeit 	
<p>Wirkung</p> <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 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Gärten Innen- und Hinterhöfe 	
<p>02 Öffentliche Grünräume im Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> Kleine Parks und gärtnerisch gestaltete Grünflächen im innerstädtischen Raum, die auch Erholung bieten 	
<p>Wirkung</p> <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 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <ul style="list-style-type: none"> Baulücken, größere Hinterhöfe (insb. in thermisch belasteten Wohngebieten) 	

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

Bild: Sheridan Park (Quelle: © Pascal Cormont)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

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



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

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



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



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>05</p> <p>Klimaangepasste und zukunftsgerichtete Verkehrsraumgestaltung vorantreiben</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Blaue und/oder grüne Maßnahmen für den Verkehrsraum ▪ Erhöhung des Vegetationsanteils im Verkehrsraum (Bäume, Alleen, Begleitgrün, Rasengitter, etc.) ▪ Schaffung von offenen Wasserflächen (z.B. Brunnenanlagen auf Plätzen) ▪ Im Innenstadtbereich: Teilverschattete Fußgängerzonen etablieren und Parkplatzangebot zugunsten von (baumbestandenen) Grünflächen minimieren ▪ s. auch Forschungsprojekt „BlueGreenStreets: Multifunktionale 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 	<p>Bild: Straßenbegrünung in Amsterdam (Quelle: © Janko Löbig, GEO-NET, 2021)</p>
<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 	<p>Bild: Königsplatz in Augsburg (Quelle: © Ruth Plössel/Stadt Augsburg)</p>



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

07	Öffentliche Grünflächen entwickeln und optimieren	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mikroklimatische Vielfalt von Grünflächen (offene Wiesenflächen, Bäume, Wasserflächen, Pflanzungen)

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<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"> ▪ Grün- und Freiflächen ▪ Straßen, Wege, Plätze, Parkplätze



Bild: Kräutergarten im Park am Roten Tor in Augsburg (Quelle: © Gregor Meusel, GEO-NET)

08	Schutz bestehender Parks, Grün- und Waldflächen	Kurzerläuterung
		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schutz von Parks, Grün- und Waldflächen aufgrund ihrer Bedeutung für das Stadtklima und vieler weiterer Funktionen (siehe unten)

Wirkung	Räumliche Umsetzung
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedeutung für den städtischen Kaltfluthaushalt, 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"> ▪ Grün- und Freiflächen (insb. im Umfeld hoher Einwohnerdichten)



Bild: Schlosspark Charlottenburg in Berlin (Quelle: © Mirian Lübbecke)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>09 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
--	---



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

<p>10 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
--	--

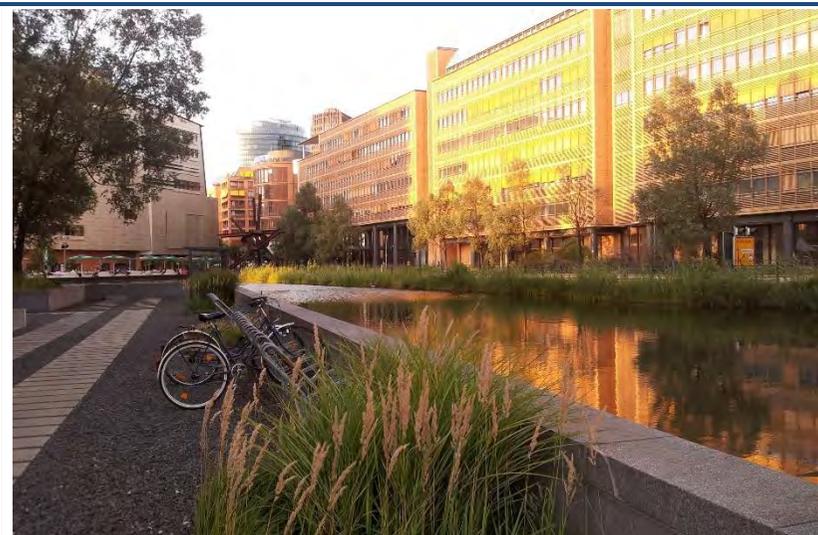


Bild: Regenwasserteich am Potsdamer Platz in Berlin (Quelle: © Miriam Lübbecke)



MAßNAHMENCLUSTER: THERMISCHES WOHLBEFINDEN IM AUSSENRAUM

<p>11 (Temporäre) Saisonale klimaangepasste 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 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

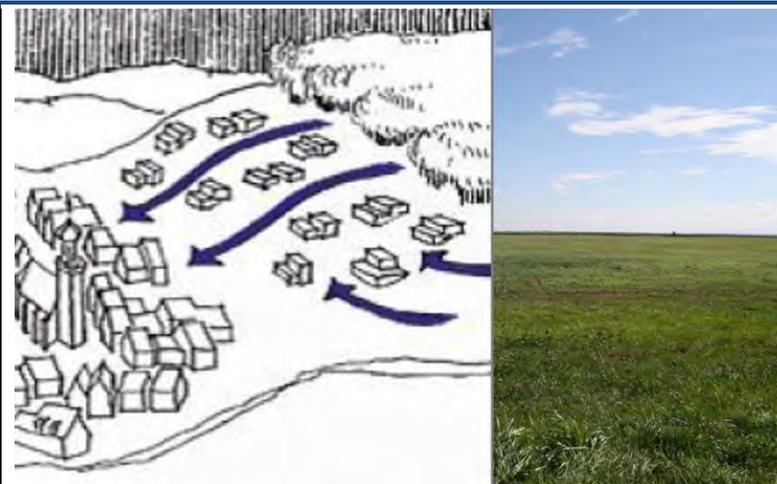


Bild: Symbolcollage Baukörperstellung- und Durchlüftung (Quelle: © GEO-NET)



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

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



MAßNAHMENCLUSTER: VERBESSERUNG DER DURCHLÜFTUNG

<p>15 Schutz und Vernetzung für den Kaltlufthaushalt relevanter Flächen</p>	<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: Rudolph-Wilde-Park in Berlin (Quelle: © Dominika Leßmann, GEO-NET)

MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>16 Dachbegrünung</p>	<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), blaugüne 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)



MAßNAHMENCLUSTER: 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)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

19 Gebäude energetisch sanieren und klimagerecht kühlen

Kurzerläuterung

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

Wirkung

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

Räumliche Umsetzung

- Gebäude (Bestand)



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

20 Technische Gebäudekühlung

Kurzerläuterung

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

Wirkung

- Kühlung des Innenraums von Gebäuden durch eine möglichst nachhaltige Gebäudeklimatisierung
- **Achtung:** bei dieser Maßnahme kann es einen Zielkonflikt zu Belangen des Klimaschutzes geben; negative Auswirkungen auf den Klimaschutz sind möglich

Räumliche Umsetzung

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

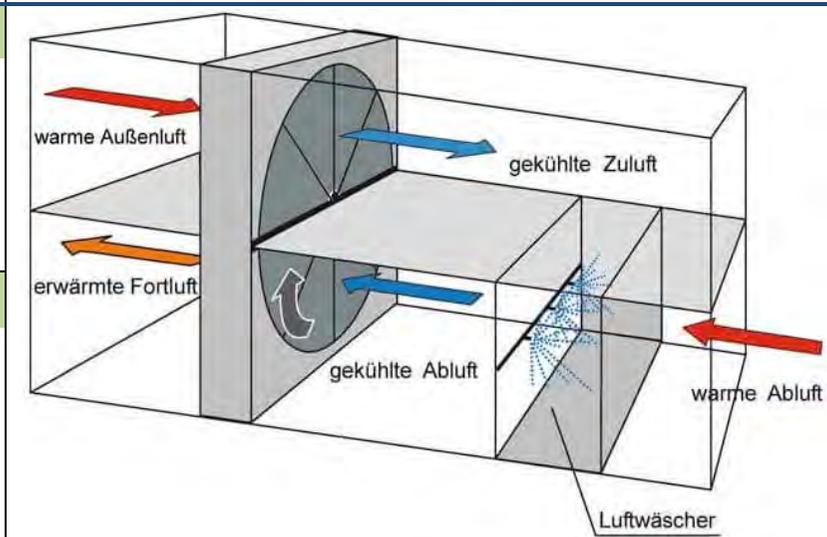


Bild: Schematische Darstellung der adiabaten Abluftkühlung (Quelle: Deutsches Architektenblatt: <https://www.dabonline.de/2012/06/01/coole-sache/>)



MAßNAHMENCLUSTER: REDUKTION DER WÄRMEBELASTUNG IM INNENRAUM

<p>21 Anpassung des Raumnutzungskonzeptes</p>	<p>Kurzerläuterung</p> <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)
<p>Wirkung</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Innenraumklimas (in sensiblen Räumen) 	<p>Räumliche Umsetzung</p> <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)



8.6 STADTKLIMAMANAGEMENTSYSTEM

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

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

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

Kernelement des Stadtklimamangementssystems ist die digitale Planungshinweiskarte. Deren flächenhafte Darstellungen basieren auf einem sog „Super-Shape“, in dem alle relevanten Informationen zu jeder der knapp 13.400 Teilflächen enthalten sind. Insgesamt umfasst das Super-Shape mehr als 30 Einzelinformationen zu den Kategorien Eingangsdaten für die Modellrechnungen für Status Quo (u.a. Nutzung und Strukturhöhe), Ergebnisse der Modellrechnungen (u.a. Wind- und Temperaturdaten), Bewertungsstufen aus den Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte und sonstige Sachdaten, wie z.B. Zugang zu Grünflächen oder Informationen zu Flächen mit Leitbahnfunktionen (vgl. Abbildung 50).

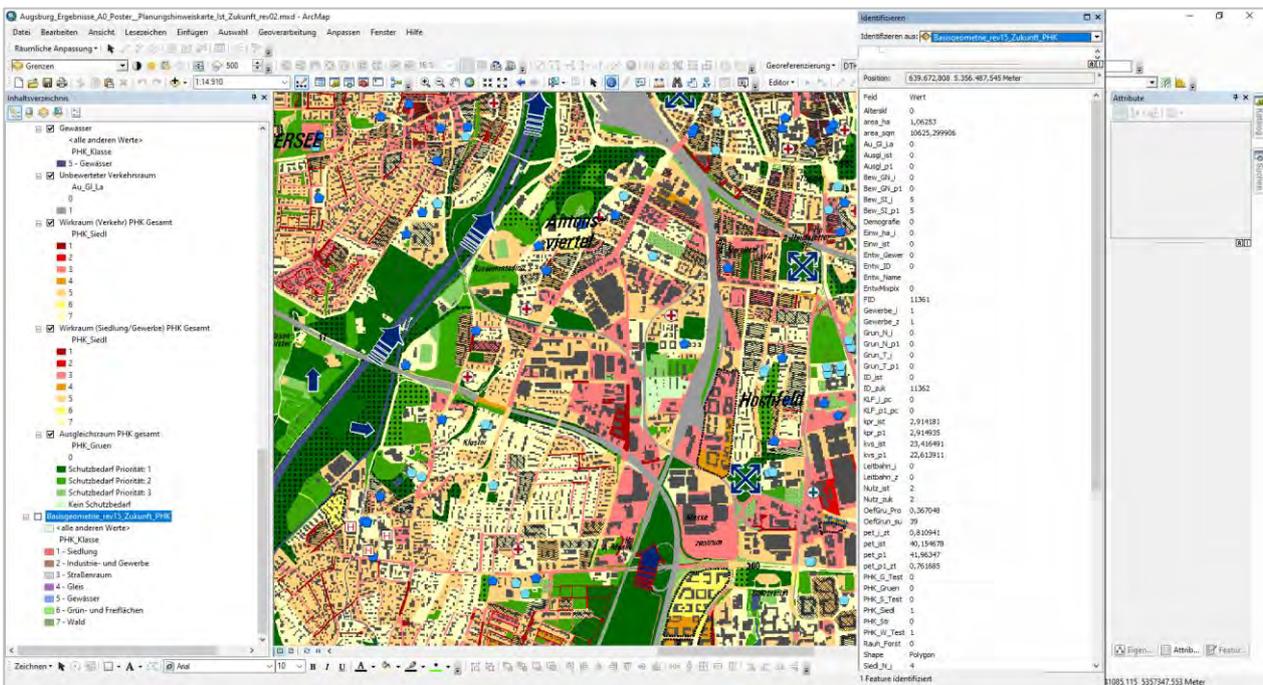


Abbildung 50: Beispielbild aus einer digitalen Planungshinweiskarte innerhalb eines Stadtklimamangementssystems mit Auszug aus dem „Super Shape“.



Quellenverzeichnis

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.

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](https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286)

BfN (2016) – BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (HRSG.): URBANES GRÜN IN DER DOPPELTEN INNENENTWICKLUNG. BfN-SKRIP-TEN 444.

BODEN T.A., MARLAND G., ANDRES R.J. (2017): GLOBAL, RE-GIONAL, AND NATIONAL FOSSIL-FUEL CO2 EMISSIONS. CARBON DIOXIDE INFORMATION ANALYSIS CENTER, OAK RIDGE NATION-AL LABORATORY, U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, OAK RIDGE, TENN., U.S.A.

BUNDESREGIERUNG (2004): ARBEITSSTÄTTENVERORDNUNG (ARBSTÄTTV).

BUNDESREGIERUNG (2008): DEUTSCHE ANPASSUNGSSTRATEGIE AN DEN KLIMAWANDEL.

DGNB (2020): DGNB SYSTEM – KRITERIENKATALOG QUARTIERE VERSION2020. DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHAL-TIGES BAUEN.

DONAT M. G., LECKEBUSCH G. C., PINTO J. G., ULBRICH U. (2010): EUROPEAN STORMINESS AND ASSOCIATED CIRCULATION WEATHER TYPES: FUTURE CHANGES DEDUCED FROM A MULTI-MODEL ENSEMBLE OF GCM SIMULATIONS. CLIMATE RESEARCH 42:27–43.

DWD (2014): MUKLIMO_3 MODELL.

DWD (2020): NATIONALER KLIMAREPORT, KLIMA – GESTERN, HEUTE UND IN DER ZUKUNFT.

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2020A): NATIONALER KLIMA-REPORT. 4. KORRIGIERTE AUFLAGE. STAND ERRATA 8. JUNI 2020.

DWD (2022A): DATENBASIS: DEUTSCHER WETTERDIENST, BEOBACHTUNGSDATEN. FREIER ONLINE-ZUGANG ZU KLIMADATEN: [FTP://OPENDATA.DWD.DE/CLIMATE_ENVIRONMENT/CDC/OBSERVATIONS_GERMANY/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/cdc/observations_germany/)

DWD (2022B): DATENBASIS: DEUTSCHER WETTERDIENST, RASTERDATEN. [FTP://OPENDATA.DWD.DE/CLIMATE_ENVIRON-MENT/CDC/GRIDS_GERMANY/](ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/cdc/grids_germany/)

DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2022C): ANALYSEN RADARBASIERTER STÜNDLICHER (RW) UND TÄGLICHER (SF) NIEDER-SCHLAGSHÖHEN (HOMEPAGE).

ONLINE: [HTTPS://WWW.DWD.DE/DE/LEISTUNGEN/RADOLAN/RADOLAN.HTML](https://www.dwd.de/de/leistungen/radolan/radolan.html) (ABRUF 22.11.2022).



- DWD – DEUTSCHER WETTERDIENST (2022D): WETTERLEXIKON (HOMEPAGE).
 ONLINE: WWW.DWD.DE/DE/SERVICE/LEXIKON/LEXIKON_NODE.HTML (ABRUF 22.11.2022).
- FANGER, P.O. (1972): THERMAL COMFORT, ANALYSIS AND APPLICATION IN ENVIRONMENT ENGINEERING. NEW YORK: MCGRAW HILL.
- FINK A. H., POHLE S., PINTO J. G., KNIPPERTZ P. (2012): DIAG-NOSING THE INFLUENCE OF DIABATIC PROCESSES ON THE EXPLOSIVE DEEPENING OF EXTRATROPICAL CYCLONES. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS 39:L07803.
- 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.
- GIORGI F., JONES C., ASRAR G. R. (2009): ADDRESSING CLIMATE INFORMATION NEEDS AT THE REGIONAL LEVEL: THE CORDEX FRAMEWORK, WMO BULLETIN, 58(3):175-183.
- 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: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0295.
- GROSS, G. (2012): EFFECTS OF DIFFERENT VEGETATION ON TEMPERATURE IN AN URBAN BUILDING ENVIRONMENT. MICROSCALE NUMERICAL EXPERIMENTS, METEOROLOGISCHE ZEITSCHRIFT, VOL. 21, No. 4, 399-412.
- GROSS, G. (2012): 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.



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.

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](http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-ABSTRACT_UTCI_JENDRITZKY.PDF)

KASPAR F., MÜLLER-WESTERMEIER G. PENDA E., MÄCHEL H., ZIMMERMANN K., KAISER-WEISS A., DEUTSCHLÄNDER T. (2013): MONITORING OF CLIMATE CHANGE IN GERMANY – DATA, PRODUCTS AND SERVICES OF GERMANY’S NATIONAL CLIMATE DATA CENTRE. ADV. SCI. RES., 10, 99–106

KUTTLER, W. (2013): KLIMATOLOGIE. PADERBORN: UTB, 2. AUFLAGE.

LINKE C. ET AL. (2016): LEITLINIEN ZUR INTERPRETATION REGIONALER KLIMAMODELLDATEN DES BUND-LÄNDER-FACHGESPRÄCHES „INTERPRETATION REGIONALER KLIMAMODELLDATEN“, POTSDAM.

LANUV (2018): KLIMAAANALYSE NORDRHEIN-WESTFALEN. SCHRIFTENREIHE: LANUV-FACHBERICHT 86.

LAUREANT 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.

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.

MOSS R. H., EDMONDS J. A., HIBBARD K. A., MANNING M. R., ROSE S. K., VAN VUUREN D. P., CARTER T. R., EMORI S., KAINUMA M., KRAM T., MEEHL G. A., MITCHELL J. F. B., NAKICENOVIC N., RIAHI K., SMITH S. J., STOUFFER R. J., THOMSON A. M., WEYANT J. P., WILBANKS T. J. (2010): THE NEXT GENERATION OF SCENARIOS FOR CLIMATE CHANGE RE-SEARCH AND ASSESSMENT. NATURE 463, 747–756.

PETERS G.P., ANDREW R.M., BODEN T., CANADELL J.G., CIAIS P., LE QUÉRE C., MARLAND G., RAUPACH M.R., WILSON C. (2012): THE CHALLENGE TO KEEP GLOBAL WARMING BELOW 2 °C. NAT. CLIM. CHANGE 3, 4–6.

PIANI C., HAERTER J.O., COPPOLA E. (2010): STATISTICAL BIAS CORRECTION FOR DAILY PRECIPITATION IN REGIONAL CLIMATE MODELS OVER EUROPE. THEOR APPL CLIMATOL 99:187–192

PINTO J. G., RYERS M. (2017): WINDE UND ZYKLONEN. IN: BRAS-SEUR G., JACOB D., SCHUCK-ZÖLLER S. (HRSG.) (2017): KLIMAWANDEL IN DEUTSCHLAND.

PINTO J. G., ZACHARIAS S., FINK A. H., LECKEBUSCH G. C., UL-BRICH U. (2009): FACTORS CONTRIBUTING TO THE DEVELOPMENT OF EXTREME NORTH ATLANTIC CYCLONES AND THEIR RELATIONSHIP WITH THE NAO. CLIMATE DYNAMICS 32:711–737

OKE (2017): URBAN CLIMATES. CAMBRIDGE: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

RAUTHE M., MALITZ G., GRATZKI A., BECKER A. (2014): STARKREGEN. IN: BECKER P., HÜTTL R. F. (HRSG.): FORSCHUNGSFELD NATURGEFAHREN. POTSDAM UND OFFENBACH, S. 112.

REKLIES-DE (2017): REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN ENSEMBLE FÜR DEUTSCHLAND - NUTZERHANDBUCH.

SANDHOLZ UND SETT (2019): ERFahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. ERGEBNISSE EINER HAUSHALTS-UMFRAGE ZUM HITZEEMPFINDEN IN BONN. UNU WORKING-PAPER.

STACHOWIAK, H. (1973): ALLGEMEINE MODELLTHEORIE. WIEN: SPRINGER.

STADT JENA (2016): BÄUME IN JENA. STADT- UND STRAßENBÄUME IM KLIMAWANDEL. SCHRIFTEN ZUR STADTENTWICKLUNG NR. 7.

STADT ZÜRICH (2020): FACHPLANUNG HITZEMINDERUNG. [HTTPS://WWW.STADT-ZUERICH.CH/TED/DE/INDEX/GSZ/PLANUNG-UND-BAU/FACHPLANUNG-HITZEMINDERUNG.HTML](https://www.stadt-zuerich.ch/ted/de/index/gsz/planung-und-bau/fachplanung-hitzeminderung.html)

THE COMET PROGRAM (2017): WILDFIRE SMOKE TRACING UP-VALLEY/DOWN-VALLEY WINDS. [HTTPS://SATELLITELIAISONBLOG.COM/2017/10/13/WILDFIRE-SMOKE-TRACING-UP-VALLEYDOWN-VALLEY-WINDS/](https://satelliteliaisonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/)

THEMEßL M.J., GOBIET A., LEUPRECHT A. (2011): EMPIRICAL-STATISTICAL DOWNSCALING AND ERROR CORRECTION OF DAILY PRECIPITATION FROM REGIONAL CLIMATE MODELS. INT J CLI-MATOL 31(10):1530–1544.



UBA (2005): GESÜNDER WOHNEN — ABER WIE? PRAKTISCHE TIPPS FÜR DEN ALLTAG. UMWELTBUNDEAMT.

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#GESUNDHEITSRI-SIKO-HITZE](https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze)

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 (2008A) VDI-RICHTLINIE 3785, BL.2: UMWELTMETEOROLOGIE. METHODEN ZUR HUMAN-BIOMETEOROLOGISCHEN BEWERTUNG VON KLIMA UND LUFTHYGIENE FÜR DIE STADT- UND REGIONALPLANUNG - TEIL I: KLIMA.

VDI (2015): VDI-RICHTLINIE 3787, BL.1: UMWELTMETEOROLOGIE. KLIMA- UND LUFTHYGIENEKARTEN FÜR STÄDTE UND REGIONEN.

VDI (2017): VDI-RICHTLINIE 3783, BL.7: UMWELTMETEOROLOGIE. PROGNOSTISCHE MESOSKALIGE WINDFELDMODELLE - EVALUIERUNG FÜR DYNAMISCH UND THERMISCH BEDINGTE STRÖMUNGSFELDER.

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.

ZAMG — ZENTRALANSTALT FÜR METEOROLOGIE UND GEODYNAMIK (2022): STARKNIEDERSCHLAG. ONLINE: [HTTPS://WWW.ZAMG.AC.AT/CMS/DE/KLIMA/INFORMATIONSPORTAL-KLIMAWANDEL/KLIMAVERGANGENHEIT/NE-OKLIMA/STARKNIEDERSCHLAG](https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimavergangenheit/ne-oklima/starkniederschlag) (ABRUF 22.11.2022)



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 25.08.2023

Erstellt von: -----
Janine Könitz (M. Sc. Umweltnaturwissenschaften)

Geprüft von: -----

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



Anhang I: Klimawandel in Lüdenscheid

METHODIK

Tabelle A 1: 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	✓	✓	✓	✓



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

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

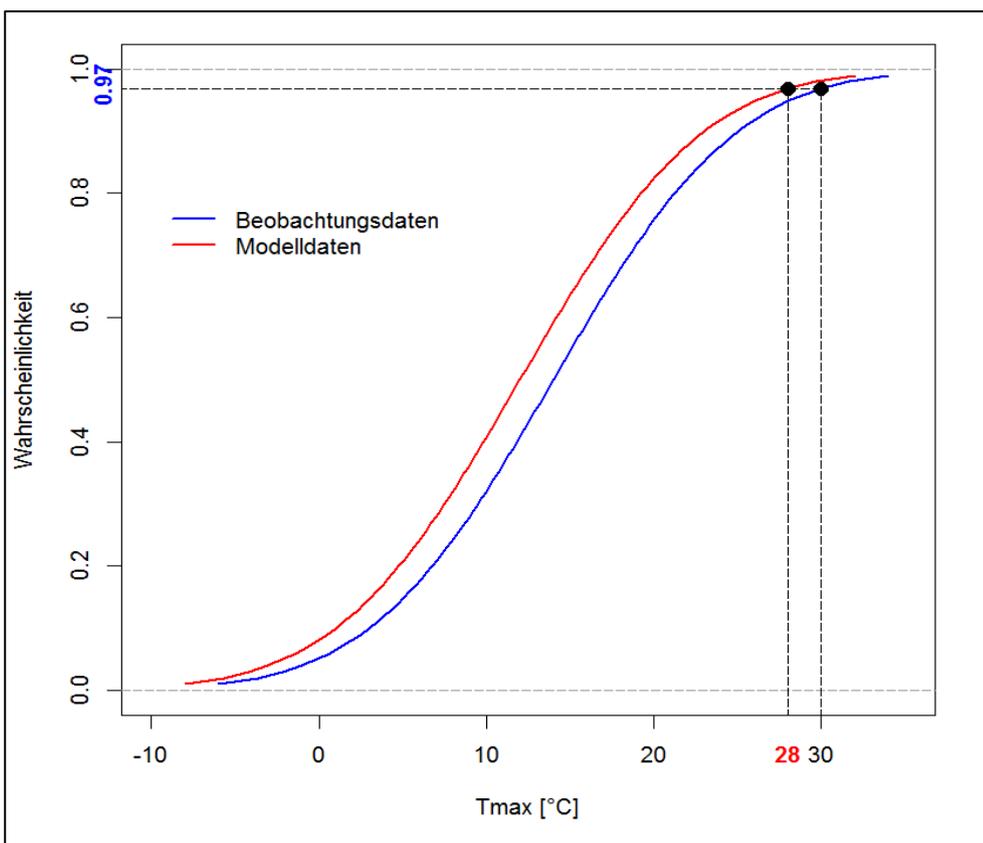


Abbildung A 1: Methode der Adjustierung von Schwellenwerten für Kenntage. Die blaue Zahl auf der y-Achse zeigt das berechnete Perzentil des Schwellenwertes und die rote Zahl auf der x-Achse zeigt den adjustierten Schwellenwert

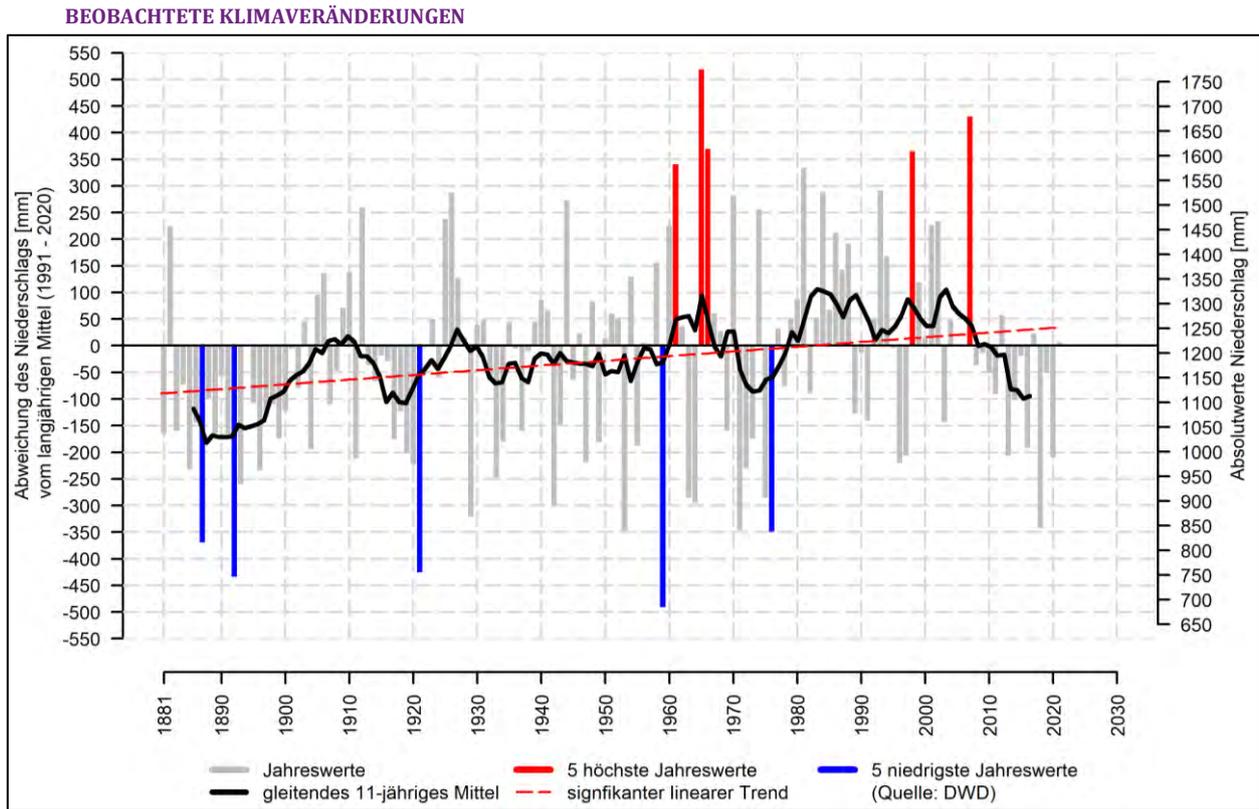


Abbildung A 2: Entwicklung des Niederschlags in Lüdenscheid 1881 -2021 (Quelle: nach DWD 2022b).



TEMPERATURZUNAHME UND HITZE

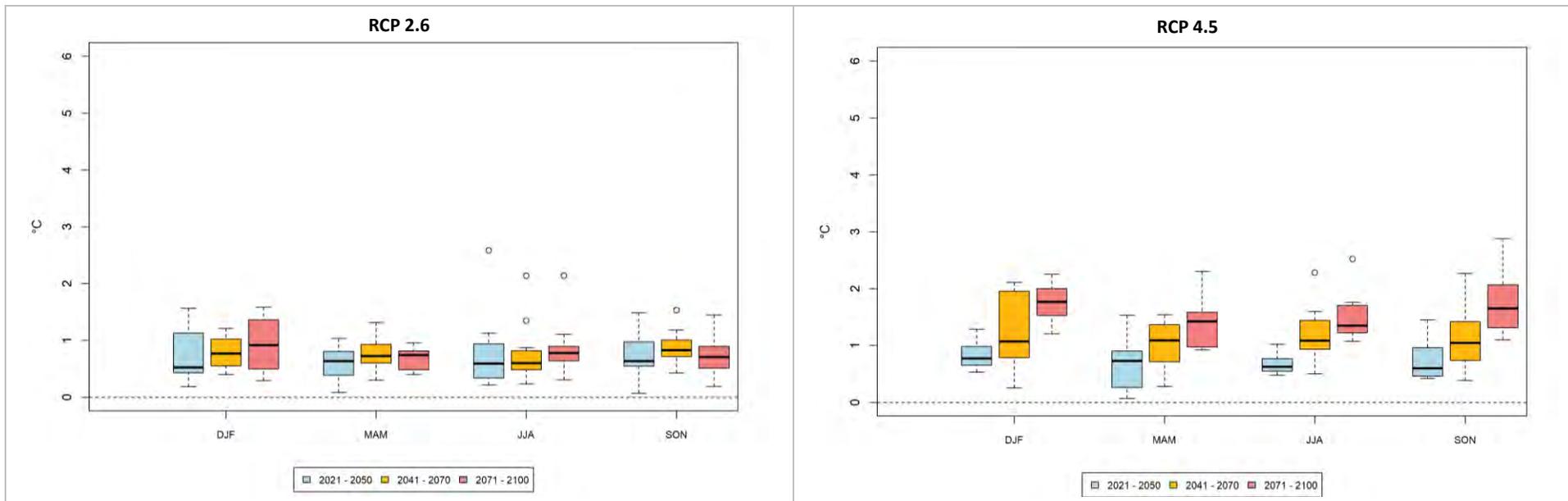


Abbildung A 3: Änderung der langjährigen saisonalen Mitteltemperaturen in Lüdenschheid für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

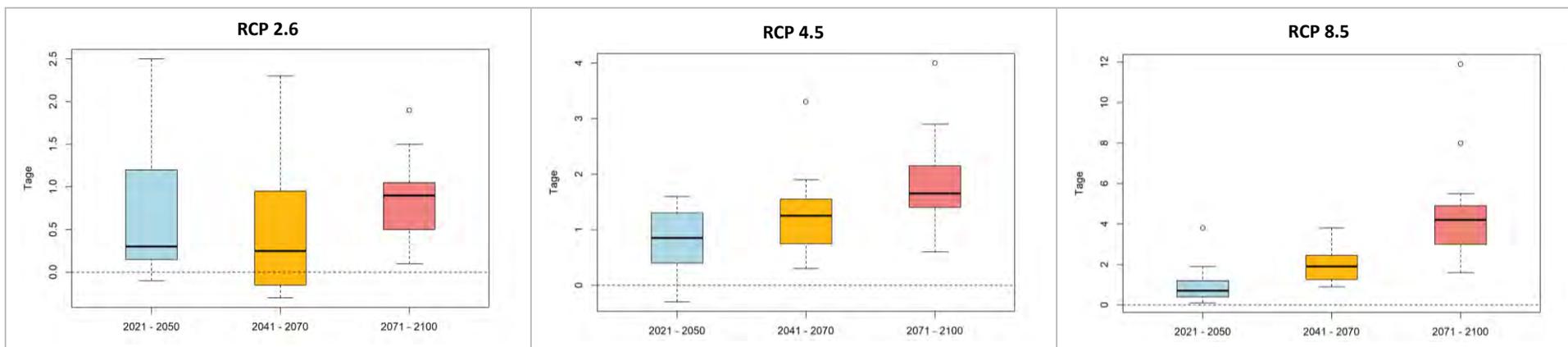


Abbildung A 4: Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Tage mit $T_{max} \geq 30 \text{ °C}$) in Lüdenschheid in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



NIEDERSCHLAGSVERSCHIEBUNG

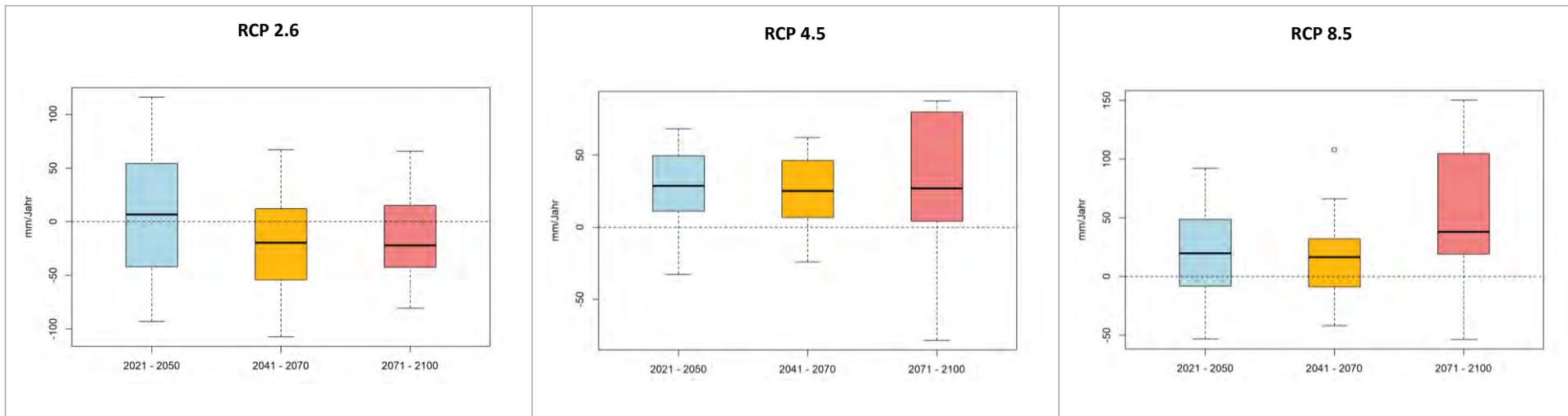


Abbildung A 5: Änderung der langjährigen mittleren jährlichen Niederschlagssumme in Lüdenschoid in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

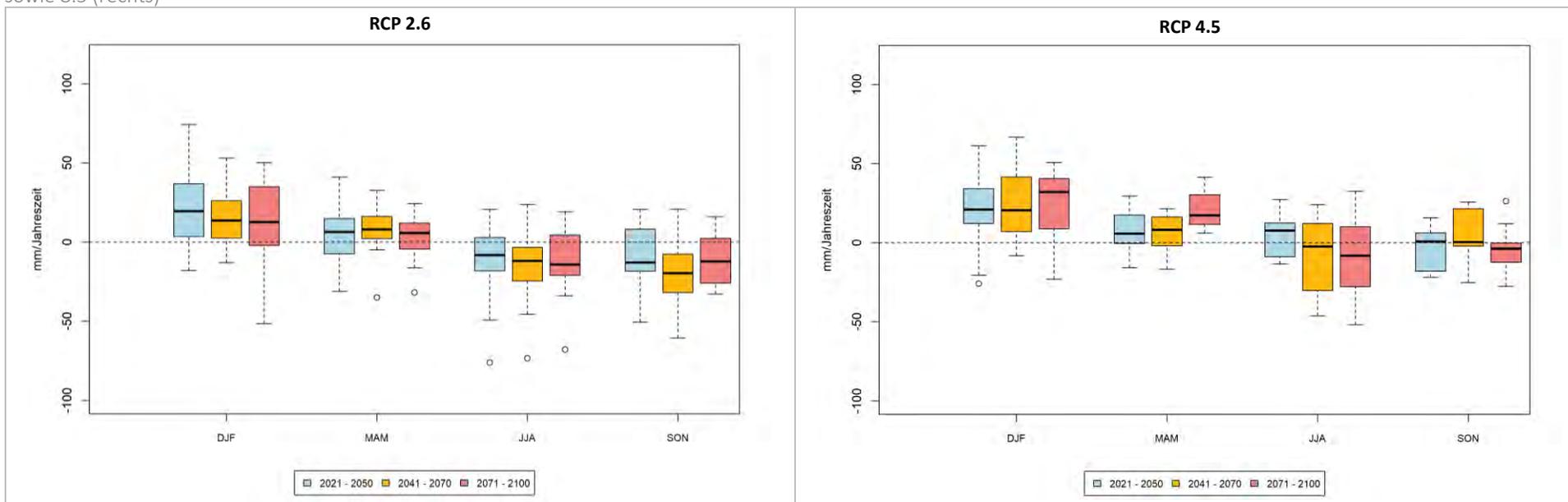


Abbildung A 6: Änderung der langjährigen mittleren saisonalen Niederschlagssummen in Lüdenschoid für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)



TROCKENHEIT

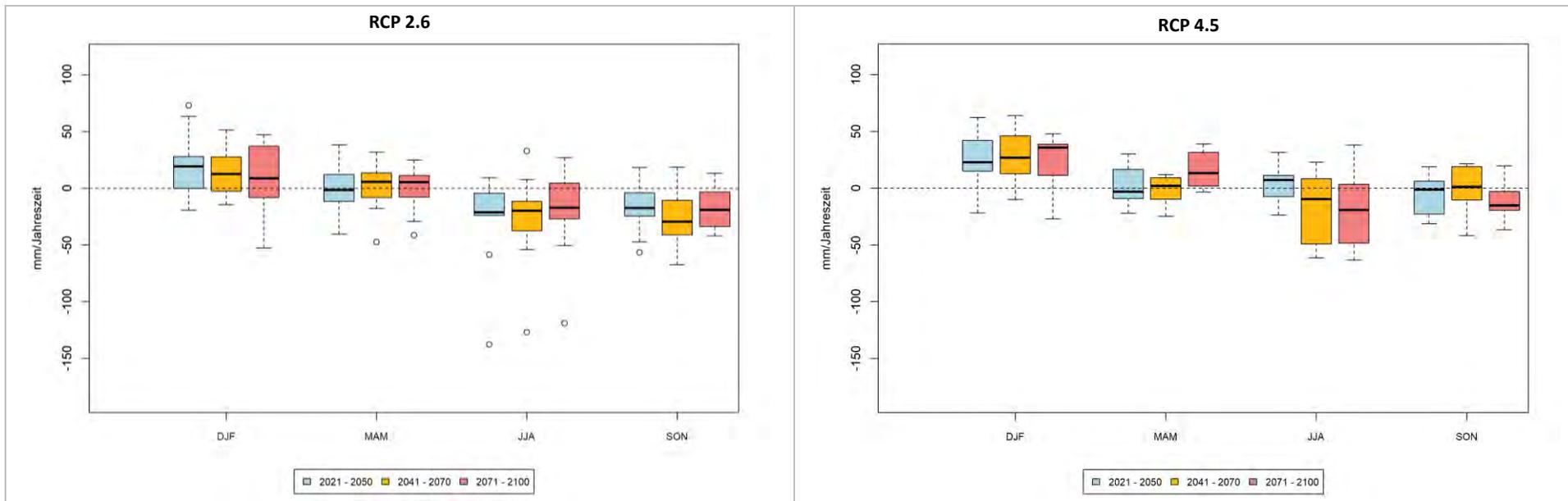


Abbildung A 7: Änderung der langjährigen mittleren monatlichen klimatischen Wasserbilanz in Lüdenschoid für das RCP 2.6 (links) sowie RCP 4.5 (rechts)

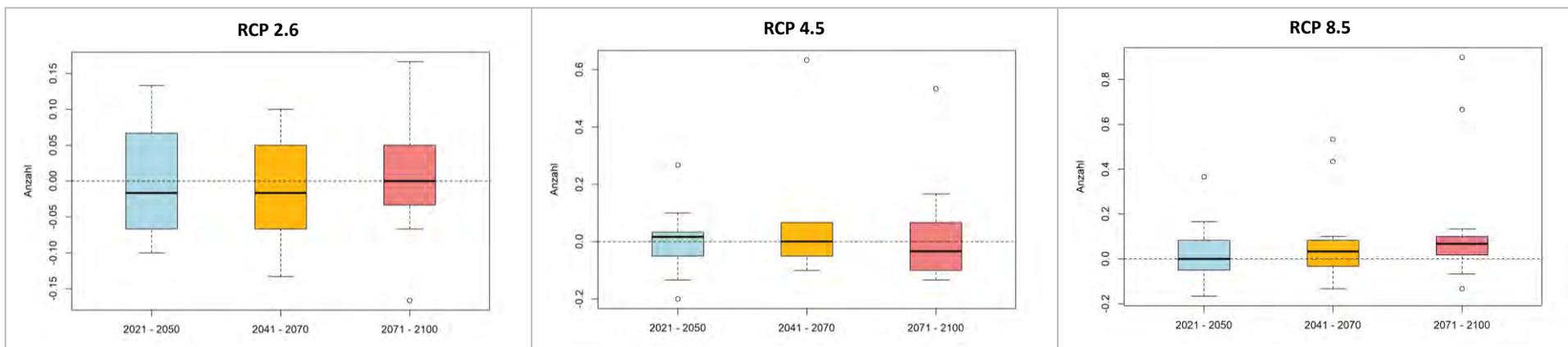


Abbildung A 8: Änderung der langjährigen mittl.. Anzahl extremer Trockenperioden (mehr als 28 aufeinanderfolgende Tage mit < 1 mm Niederschlag) innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Lüdenschoid (der Wert 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis im Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKER NIEDERSCHLAG ($N \geq 10 \text{ mm/D}$)

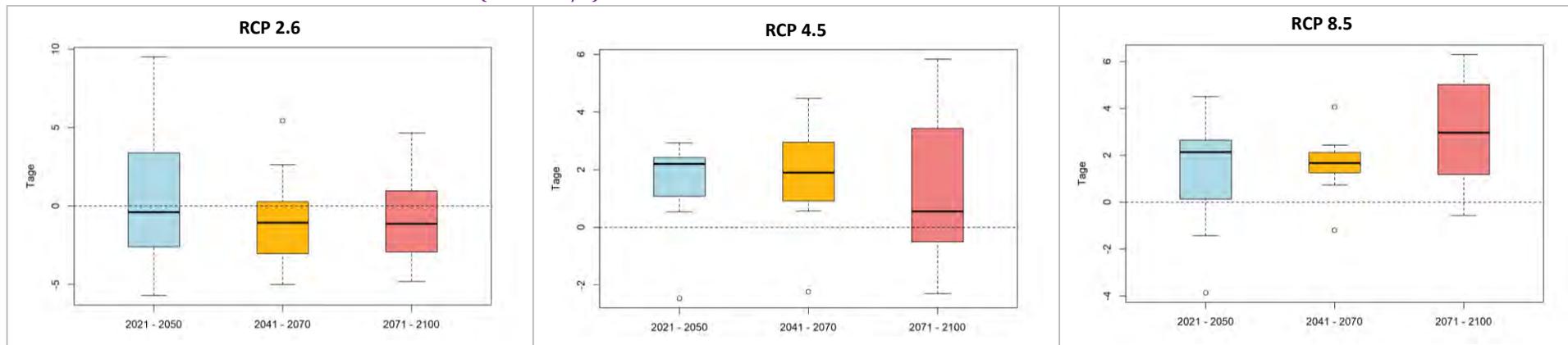


Abbildung A 9: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 10 \text{ mm/d}$ innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Lüdenschoid (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)

STARKNIEDERSCHLÄGE: STÄRKERER NIEDERSCHLAG ($N \geq 20 \text{ mm/D}$)

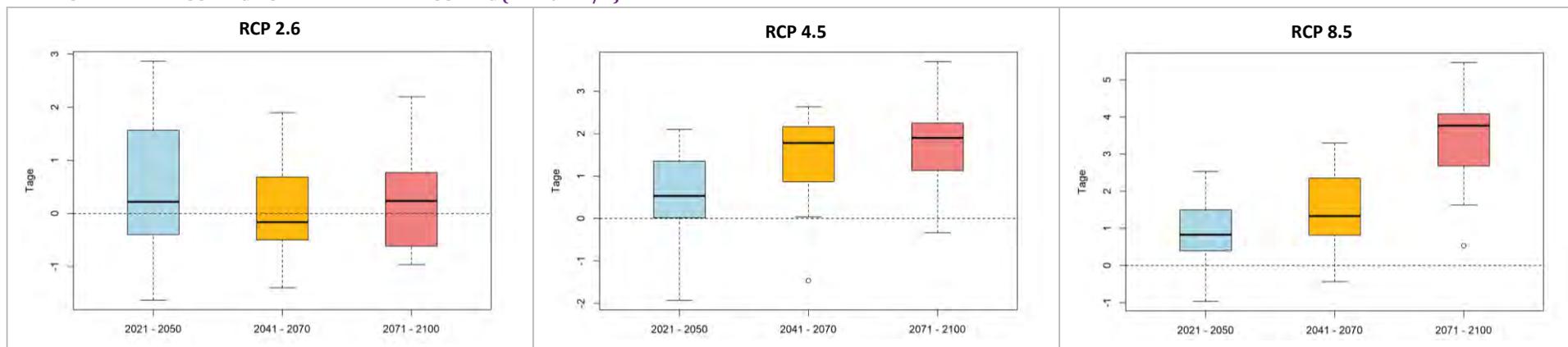


Abbildung A 10: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 20 \text{ mm/d}$ innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Lüdenschoid (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links), 4.5 (Mitte) sowie 8.5 (rechts)



STARKNIEDERSCHLÄGE: STARKNIEDERSCHLAG ($N \geq 30$ MM/D)

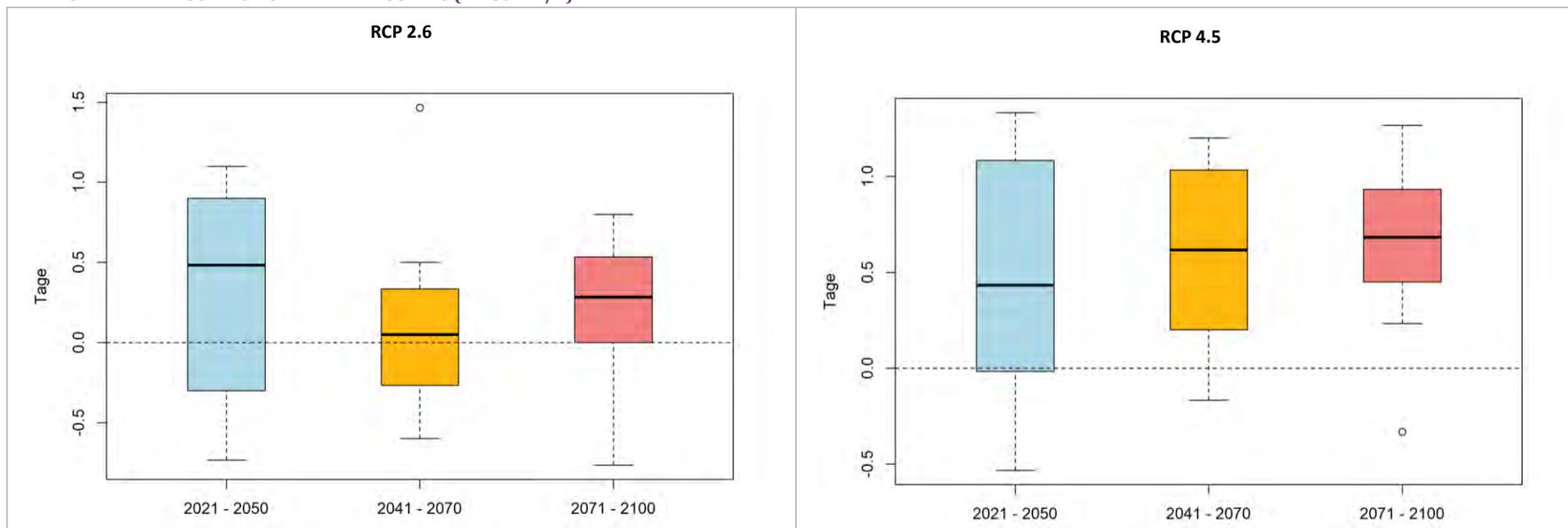


Abbildung A 11: Änderung der Auftrittshäufigkeit von Niederschlagsereignissen mit $N \geq 30$ mm/d innerhalb der jeweiligen 30-jährigen Periode in Lüdenscheid (ein Wert von 30 entspricht also im Mittel einem zusätzlichen Ereignis pro Jahr) in den drei Zukunftsperioden für die RCP-Szenarien 2.6 (links) sowie 4.5 (rechts)

STURM

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