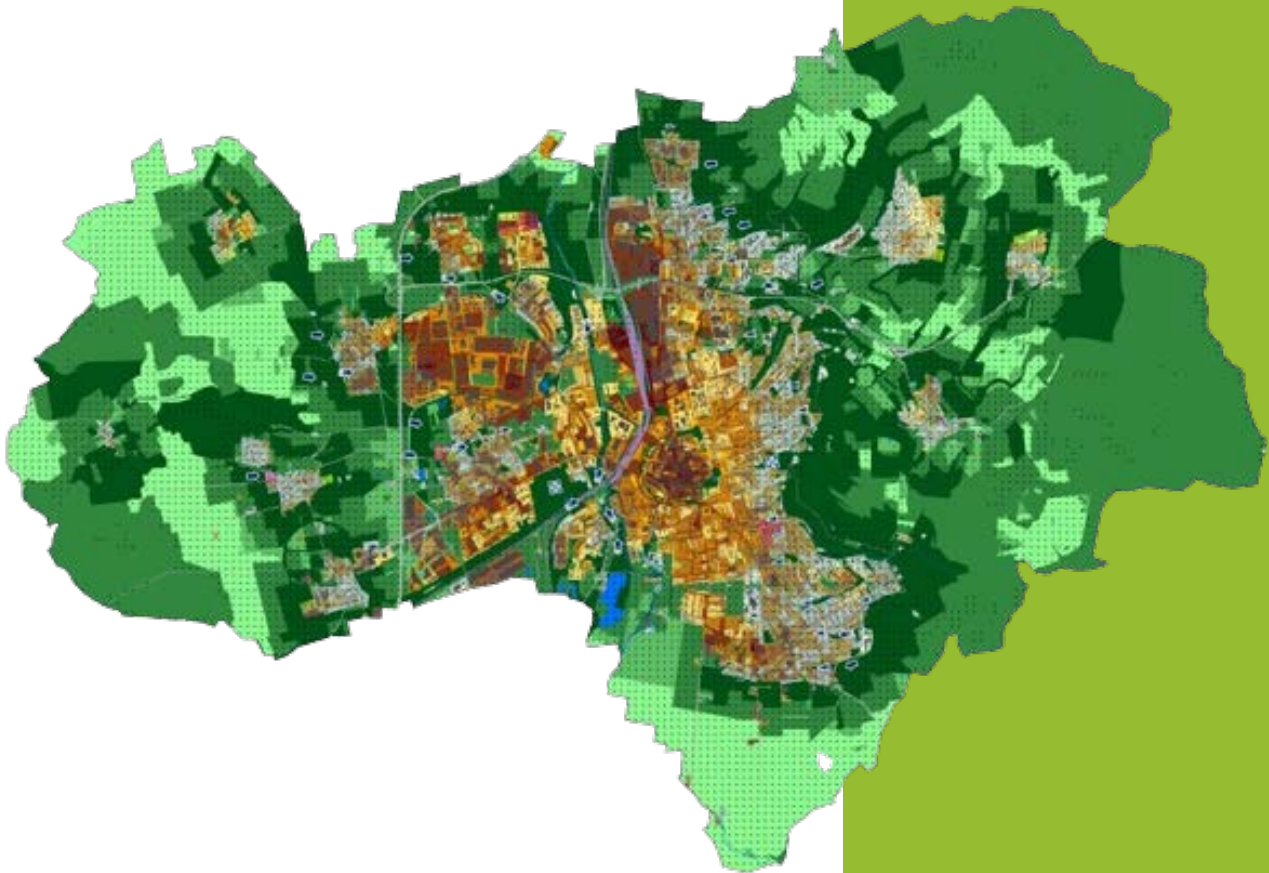


Stadtklimaanalyse für Göttingen

Im Rahmen des Stadtwasserhitzeplans – Arbeitspaket „Hitze“



Erstellt von:

GEO-NET Umweltconsulting GmbH

Große Pfahlstraße 5a

30161 Hannover



August 2024



Auftraggeber

Stadt Göttingen
Referat für Nachhaltige Stadtentwicklung
Hiroshimaplatz 1 - 4
37085 Göttingen

Auftragnehmer

GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Große Pfahlstraße 5a
30161 Hannover
Tel: (0511) 388 7200
www.geo-net.de



August 2024



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Glossar	1
Einleitung und Zusammenfassung der Methodik	3
1. Fachliche Grundlagen	7
1.1 Thermischer Komfort und Menschliche Gesundheit	7
1.2 Wärmeinseleffekt und Kaltluftprozesse	11
1.3 Stadtklimaanalysen und der Stand der Technik	14
2. Klima und Klimawandel im Raum Göttingen	18
2.1 Datengrundlage und Methodik	18
2.2 Das vergangene und Gegenwärtige Klima in Göttingen (Temperatur und Hitze)	21
2.3 Zukünftige Klimaveränderungen in Göttingen	24
3. Analysemethoden	29
3.1 Das Stadtklimamodell FITNAH-3D	29
3.2 Aufbereitung der Modelleingangsdaten	36
4. Ergebnisse der numerischen Modellierungen	47
4.1 Nächtliches Temperaturfeld und Kaltluftproduktion	47
4.2 Kaltluftströmungsfeld in der Nacht	50
4.3 Klimaanalysekarten	51
4.4 Wärmebelastung am Tage	55
5. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte	58
5.1 Grundlagen	58
5.2 Geometrische Basis	59
5.3 Bewertungskarten	60
5.4 Planungshinweiskarte	68
Quellenverzeichnis	77
Anhang	82



Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: KLIMAKOMFORT UND -DISKOMFORT IN VERSCHIEDENEN LUFTTEMPERATUR- UND WINDGESCHWINDIGKEITSBEREICHEN (VERÄNDERT NACH VDI 3787, BL.4 (2020))	7
ABBILDUNG 2: KLIMA-MICHEL-MODELL UND GEFÜHLTE TEMPERATUR (DWD 2023A)	8
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)	9
ABBILDUNG 4: GESUNDHEITLICHE BELASTUNG VERSCHIEDENER GRUPPEN BEI HITZE IN BONN (N=688) (SANTHOLZ UND SETT 2019)	10
ABBILDUNG 5: HITZEBEDINGTE MORTALITÄTSRATE NACH ALTERSGRUPPE UND REGION VON 2001 - 2015 (AN DER HEIDEN ET AL. 2019)	11
ABBILDUNG 6: STADTKLIMATISCH RELEVANTE PROZESSE (EIGENE DARSTELLUNG AUF BASIS DER QUELLEN: THE COMET PROGRAM 2017(OBEN), MVI 2012 (MITTE), DWD 2023B (UNTEN))	12
ABBILDUNG 7: STRAHLUNGSANTRIEB DER VERSCHIEDENEN RCP-SZENARIEN UND IHRE ENTWICKLUNG BIS 2100 (RCP3-PD IST VERGLEICHBAR MIT DEM IM TEXT GENANNTEN RCP-SZENARIO 2.6; QUELLE: IPCC 2013).....	20
ABBILDUNG 8: KONVENTIONEN UND BEDEUTUNG DER GRAFISCHEN DARSTELLUNG EINES BOX-WHISKER PLOTS.....	21
ABBILDUNG 9: KLIMADIAGRAMM DER STADT GÖTTINGEN FÜR DEN ZEITRAUM 1971 – 2000, BASIEREND AUF DEN GEBIETSMITTELWERTEN DER DWD DATEN (NACH DWD 2022B)	22
ABBILDUNG 10: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER JAHRESMITTELTEMPERATUR IN GÖTTINGEN IM ZEITRAUM VON 1881 BIS 2022 (QUELLE: EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B)	22
ABBILDUNG 11: RÄUMLICHE DARSTELLUNG DER ANZAHL HEIßER TAGE ($T_{\text{MAX}} \geq 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) IN VERSCHIEDENEN PERIODEN IN GÖTTINGEN (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B)	23
ABBILDUNG 12: LANGJÄHRIGE ENTWICKLUNG DER SAISONALEN MITTELWERTE DER BODENFEUCHTE IN GÖTTINGEN IM ZEITRAUM 1991 BIS 2021 (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2022B)	24
ABBILDUNG 13: ZEITLICHER TREND DER JÄHRLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN GÖTTINGEN (ALLE RCP-SZENARIEN)	25
ABBILDUNG 14: ÄNDERUNG DER LANGJÄHRIGEN MONATLICHEN MITTELTEMPERATUREN IN GÖTTINGEN (RCP 8.5) IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 - 2000	26
ABBILDUNG 15: ÄNDERUNG DER SAISONALEN KLIMATISCHEN WASSERBILANZ IN ZWEI ZUKUNFTSPERIODEN FÜR GÖTTINGEN (RCP 8.5). DIE X-ACHSE GIBT DIE ABKÜRZUNGEN FÜR DIE MONATE BZW. JAHRESZEITEN AUS (BSPW. JJA = JUNI-JULI-AUGUST).....	28
ABBILDUNG 16: TYPISCHE TAGESGÄNGE DER OBERFLÄCHENTEMPERATUREN ('TSURF') FÜR AUSGEWÄHLTE NUTZUNGSKLASSEN VON FITNAH-3D	31
ABBILDUNG 17: IDEALISierter TAGESGANG DER OBERFLÄCHENTEMPERATUR ('TSURF') SOWIE DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR ('T2M') VON BZW. ÜBER ASPHALT SOWIE VON BZW. ÜBER EINEM FEUCHTEN UND EINEM TROCKENEN GRASBEWACHSENEN BODEN WÄHREND EINES HOCHSOMMERLICHEN STRAHLUNGSTAGES.....	33
ABBILDUNG 18: DER SZENARIO-TRICHTER (QUELLE: BUSINESS WISSEN 2023)	34
ABBILDUNG 19: DGM IM UNTERSUCHUNGSGEBIET MIT GEBÄUDEKULISSE.....	36
ABBILDUNG 20: ABLEITUNG DER VEGETATIONSHÖHEN AUS DEM NDVI IN KOMBINATION MIT DEM NORMALISIERTEN OBERFLÄCHENMODELL.....	38
ABBILDUNG 21: AUSSCHNITT DER KLASSIFIZIERTEN LANDNUTZUNG IM 5 M MODELL-RASTER	38
ABBILDUNG 22: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES TAGESGANGS DER BODENNAHEN LUFTTEMPERATUR UND VERTIKALPROFIL DER WINDGESCHWINDIGKEIT ZUR MITTAGSZEIT ÜBER VERSCHIEDENEN LANDNUTZUNGEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH GROß 1992)	40
ABBILDUNG 23: BODENNAHE NÄCHTLICHE LUFTTEMPERATUR IN EINEM AUSSCHNITT DES ZENTRALEN GÖTTINGER STADTGEBIETS. OBEN: IST-SITUATION, MITTE: ZUKUNFTSSZENARIO „MITTELSTARKER KLIMAWANDEL“, UNTEN: ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“. KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE).....	48



ABBILDUNG 24: NÄCHTLICHE KALTLUFTPRODUKTIONSRATE IM UMFELD DER KERNSTADT, IST-SITUATION.	49
ABBILDUNG 25: NÄCHTLICHER KALTLUFTVOLUMENSTROM IM UMFELD DER KERNSTADT, IST-SITUATION.	50
ABBILDUNG 26: AUSSCHNITT AUS DEM BODENNAHEN NÄCHTLICHEN STRÖMUNGSFELD. KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE)	51
ABBILDUNG 27: LEGENDE DER KLIMAANALYSEKARTEN.....	52
ABBILDUNG 28: AUSSCHNITT AUS DER KLIMAANALYSEKARTE FÜR DIE IST-SITUATION (LEGENDE: SIEHE ABBILDUNG 27)	55
ABBILDUNG 29: WÄRMEBELASTUNG AM TAG (PET) IN DER KERNSTADT VON GÖTTINGEN. OBEN: IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO „MITTELSTARKER KLIMAWANDEL“, UNTEN RECHTS: ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“. KARTENHINTERGRUND: TOPPLUSOPEN (WMS-DIENST DES BUNDESAMTS FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE).....	57
ABBILDUNG 30: LINKS DAS AUSGANGSRASTER UND RECHTS DAS ERGEBNIS DER RÄUMLICHEN MITTELWERTBILDUNG AUF EBENE DER BASISGEOMETRIE	59
ABBILDUNG 31: VERFAHREN DER Z-TRANSFORMATION ZUR STATISTISCHEN STANDARDISIERUNG VON PARAMETERN UND SICH DARAUS ERGEBENDE WERTSTUFEN (QUELLE: VDI 2008)	60
ABBILDUNG 32: SCHEMA DER STADTKLIMATISCHEN BEWERTUNG VON FLÄCHEN IM AUSGLEICHsRAUM IN DER NACHT	63
ABBILDUNG 33: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE NACHTSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO „MITTELSTARKER KLIMAWANDEL“, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“). VERKÜRZTE LEGENDE	65
ABBILDUNG 34: AUSSCHNITT AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN FÜR DIE TAGSITUATION (OBEN LINKS IST-SITUATION, UNTEN LINKS ZUKUNFTSSZENARIO „MITTELSTARKER KLIMAWANDEL“, UNTEN RECHTS ZUKUNFTSSZENARIO „STARKER KLIMAWANDEL“). VERKÜRZTE LEGENDE	67
ABBILDUNG 35: AUSSCHNITT AUS DER PLANUNGSHINWEISKARTE STADTKLIMA. VERKÜRZTE LEGENDE	72



Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: VERGLEICH DER DREI METHODEN ZUR STADTKLIMAANALYSE (HLNUG 2022, 18).....	15
TABELLE 2: AUSWAHL AN NUMERISCHEN MODELLEN FÜR DEN EINSATZ IM RAHMEN VON STADTKLIMAANALYSEN... 17	17
TABELLE 3: LANGJÄHRIGE MITTLERE ENTWICKLUNG DER TEMPERATUREN, DES NIEDERSCHLAGS SOWIE VON METEOROLOGISCHEN KENNTAGEN IN GÖTTINGEN IN DER VERGANGENHEIT (EIGENE BERECHNUNG NACH DWD 2024).	23
TABELLE 4: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG DER TEMPERATUR IN GÖTTINGEN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	25
TABELLE 5: LANGJÄHRIGE ÄNDERUNG (ZUNAHMEN) THERMISCHER KENNTAGE SOWIE DER LÄNGE VON HITZEPERIODEN IN GÖTTINGEN (P 15 / 85 = 15. / 85. PERZENTIL, P 50 = MEDIAN).	27
TABELLE 6: IN FITNAH IMPLEMENTIERTE LANDNUTZUNGSKLASSEN BEI EINER HORIZONTALEN MODELLAUFLÖSUNG VON 5-10 M.	30
TABELLE 7: ENTWICKELTE SZENARIEN UND IHRE ZENTRALEN MERKMALE.....	35
TABELLE 8: DATENQUELLEN ZUR ERSTELLUNG DES NUTZUNGSRASTERS.....	37
TABELLE 9: IN DIE MODELLEINGANGSDATEN EINGEFLOSSENE B-PLÄNE.....	39
TABELLE 10: VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT BERECHNETE PARAMETER.	42
TABELLE 11: ABGELEITETE AUSGABEGRÖßEN VON FITNAH ZUM THEMENKOMPLEX THERMISCHER KOMFORT UND KALTLUFTHAUSHALT.....	43
TABELLE 12: LEGENDENELEMENTE UND IHRE ABLEITUNGSMETHODEN ZUM KALTLUFTPROZESSGESCHEHEN IN DEN KLIMAANALYSEKARTEN.	54
TABELLE 13: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	61
TABELLE 14: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE LUFTTEMPERATUREN FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION IN DER NACHT.....	62
TABELLE 15: GRENZEN DER Z-TRANSFORMATION UND ZUGEHÖRIGE PET-WERTE FÜR DIE KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AM TAG.	64
TABELLE 16: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	66
TABELLE 17: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE WOHNSIEDLUNG IN DER NACHT, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	66
TABELLE 18: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BELASTUNG AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	67
TABELLE 19: FLÄCHENANTEILE DER KLASSIFIZIERUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEDEUTUNG IN BEZUG AUF DIE POTENZIELLE ERHOLUNGSFUNKTION AM TAGE, NACH MODELLIERUNGSSZENARIO.....	68
TABELLE 20: KOMBINIERTER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN SITUATION AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG IN WOHN- UND UNBEWOHNTE GEBIETEN.....	69
TABELLE 21: METHODISCHE HERLEITUNG DER STADTKLIMATISCHEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES WIRKRAUMS.....	70
TABELLE 22: MIT DEN HANDLUNGSPRIORITÄTEN STADTKLIMA IM WIRKRAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	71
TABELLE 23: KOMBINIERTER BEWERTUNG DER BIOKLIMATISCHEN BEWERTUNG AUS DEN BEWERTUNGSKARTEN NACHT UND TAG FÜR DIE FLÄCHEN IM AUSGLEICHRAUM, UNTERTEILT IN FUßLÄUFIGE (POTENZIELLE) ERHOLUNGSRÄUME UND WEITERE GRÜN- UND FREIFLÄCHEN.....	73
TABELLE 24: METHODISCHE HERLEITUNG DES STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF UND DER ANTEIL AN DEN FLÄCHEN DES AUSGLEICHRAUMS.	74



TABELLE 25: MIT DEM STADTKLIMATISCHEN SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM VERBUNDENE ALLGEMEINE PLANUNGSHINWEISE.	74
TABELLE 26: BEWERTUNGSGRUNDLAGEN DER STADTKLIMATISCHEN VERTRÄGLICHKEIT DER STÄDTEBAULICHEN ERWEITERUNGSFLÄCHEN	75

Glossar

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

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

Ausgleichsraum: Grüngestaltete, relativ unbelastete Freifläche, die an einen *→Wirkungsraum* angrenzt oder mit diesem über *→Kaltluftleitbahnen* bzw. Strukturen mit geringer Rauigkeit verbunden ist. Durch die Bildung kühlerer Luft sowie über 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.

Kaltluft: Luftmasse, die im Vergleich zu ihrer Umgebung bzw. zur Obergrenze der entsprechenden Bodeninversion eine geringere Temperatur aufweist und sich als Ergebnis des nächtlichen Abkühlungsprozesses der bodennahen Atmosphäre ergibt. Der ausstrahlungsbedingte Abkühlungsprozess der bodennahen Luft ist umso stärker, je geringer die Wärmekapazität des Untergrundes ist, und über Wiesen, Acker- und Brachflächen am höchsten. Konkrete Festlegungen über die Mindesttemperaturdifferenz zwischen Kaltluft und Umgebung oder etwa die Mindestgröße des Kaltluftvolumens, die das Phänomen quantitativ charakterisieren, gibt es bisher nicht (VDI 2003).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Strahlungswetterlage $\rightarrow$ 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 $\rightarrow$ *autochthonen Wetterlage*.

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

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

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

Einleitung und Zusammenfassung der Methodik

In Zeiten des Klimawandels lassen sich die Folgen insbesondere in Form von häufigeren Extremwetterereignissen oder Hitzeperioden bereits deutlich erkennen. Neben dem Klimaschutz durch Treibhausgasreduktion weist besonders die Klimaanpassung in Städten eine hohe Relevanz auf. Vor allem die Kernstadt Göttingens ist durch erhöhte Hitzebelastung, geringe natürliche Versickerung und hohe Emissionen besonders betroffen. Gleichzeitig weisen Städte im Vergleich zum peripheren Umland eine höhere Bevölkerungsdichte und damit eine hohe Anzahl vulnerabler Bevölkerungsgruppen auf. Diese gilt es vor belastenden Umwelteinflüssen wie Hitze zu schützen und nach § 1 Absatz 5 Satz 2 BauGB eine „menschenwürdige Umwelt“ zu gewährleisten. Das Schutzgut Klima ist demnach ein wichtiger Aspekt der räumlichen Planung. Vor dem Hintergrund der Flächenkonkurrenz sind flächenbezogene Fachinformationen ein wichtiges Hilfsmittel, um Planungen sachgerecht zu beurteilen. 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.

Die vorliegende stadtklimatische Analyse soll sowohl den Ist-Zustand der klimatischen Verhältnisse im Stadtgebiet von Göttingen sowie die prognostizierten Verhältnisse für die Periode 2031 - 2060 abbilden und abschließend bewerten. Die Ergebnisse werden in den Stadtwasserhitzeplan (SHP) überführt, welcher ein räumliches, anwendungsbezogenes Konzept für die Umsetzung einer wassersensiblen Stadtentwicklung bietet. Die Stadtklimaanalyse stellt dabei die Grundlage für das Arbeitspaket „Hitze“ des SHP dar, in dem stadtklimatisch besonders belastete Bereiche in den Fokus genommen werden. Bereits im Jahre 2014 wurde von GEO-NET eine Stadtklimaanalyse für Göttingen erstellt. Die vorliegende Untersuchung stellt – unter Verwendung einer deutlich höheren Modellauflösung, aktuellen Eingangsdaten (vor allem der Bau- und Nutzungsstruktur im Stadtgebiet) sowie modelltechnischen Neuerungen – eine komplette Aktualisierung dar.

Dem Stand der Technik gemäß wurde eine mikroskalige Rechnung (Rasterauflösung in alle Raumrichtungen von 5 m) mit dem Stadtklimamodell FITNAH 3D durchgeführt, um hochaufgelöste, flächendeckende Ergebnisse für das gesamte Stadtgebiet zu erhalten. Die Verwendung der hohen Auflösung des 5 m x 5 m-Raster erlaubt die Berücksichtigung von Gebäuden als Strömungshindernisse. 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 insbesondere 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 Göttinger Stadtklimas.

Das zukünftige Stadtklima in Göttingen

Neben dem aktuellen Stadtklima wurde mittels der Modellrechnungen auch die zukünftige Situation im Jahr 2045 in zwei weiteren Klimawandel-Szenarien simuliert. In den Zukunfts-Modellierungen wird die Temperatur aller Höhenprofile zu Beginn der Modellrechnung um 0,8 °C (Szenario „mittelstarker Klimawandel“) bzw. 2,1 °C (Szenario „starker Klimawandel“) erhöht. Die Temperaturdifferenzen entsprechen den Differenzen für die Sommerperioden zwischen den meteorologischen Perioden 1971 – 2000 im Vergleich zu 2031 – 2060. Grundlage sind die Klimawandel-Szenarien RCP4.5 bzw. RCP8.5 für den Raum Göttingen. Zudem wird dem Modell

für das Szenario „starker Klimawandel“ eine geringere Bodenfeuchte infolge zunehmender sommerlicher Dürrephasen vorgegeben. Es gilt darüber hinaus zu beachten, dass im Zuge des Klimawandels nicht nur die absolute Zunahme der Temperaturen ausschlaggebend für die Hitzebelastung ist, sondern vielmehr auch die vermehrte Häufigkeit von Kenntagen wie „Heiße Tage“ (Maximaltemperaturen $> 30\text{ °C}$), „Sommertage“ (Maximaltemperaturen $> 25\text{ °C}$) und „Tropennächte“ (Temperaturen nicht unter 20 °C). So sind für Göttingen je nach Klimawandel-Szenario für die Referenzperiode 2031 bis 2060 bis zu 13 mehr „Heiße Tage“ prognostiziert.

Ein mögliches Szenario der zukünftigen städtebaulichen Entwicklung wurde in den Zukunftsszenarien insofern modelliert, als dass bereits rechtskräftige (aber größtenteils noch nicht umgesetzte) Bebauungspläne in die Eingangsdaten aufgenommen wurden. Somit können die stadtklimatischen Auswirkungen (bspw. auf das Temperaturfeld oder die Kaltluftströmung) der geplanten Bebauung in Kombination mit den zwei Klimawandelszenarien direkt beurteilt werden.

Modellergebnisse

Das Stadtklimamodell liefert für jede Rasterzelle Ergebnisse zur nächtlichen Lufttemperatur, der Kaltluftproduktion und dem Kaltluftströmungsfeld sowie zur Wärmebelastung am Tag. Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms (welche die Strömung über die komplette untere Luftschicht repräsentiert) gelten die Ergebnisse für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation (maximale Abkühlung) bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation (maximale Einstrahlung). Mit Hilfe der Modellergebnisse können nachts überwärmte städtische Bereiche identifiziert (sogenannte städtische Wärmeinseln) und die räumliche Wirksamkeit von Kaltluftströmungen abgeschätzt werden. Für die Tagsituation wird die Hitzebelastung anhand der PET definiert. Als weitere Parameter werden die Kaltluftvolumenstromdichte, sowie die Strömungsrichtung und -geschwindigkeit sowie die Kaltluftproduktionsrate ausgegeben. Die aufgeführten Absolutwerte der Klimaparameter sind exemplarisch für eine sommerliche Strahlungswetterlage zu verstehen. Die relativen Temperatur-Unterschiede innerhalb der Stadt bzw. zwischen verschiedenen Landnutzungen gelten dagegen weitgehend auch während anderer Wetterlagen.

Klimaanalysekarte

Die Klimaanalysekarte fasst die wesentlichen Aussagen der meteorologischen Parameter für die Nachtsituation in einer Karte zusammen und präzisiert das Kaltluftprozessgeschehen mit zusätzlichen Legendeninhalten. Dabei gibt es eine Karte für die Ist-Situation sowie je eine Karte für die zwei Zukunftsszenarien 2045. In der Klimaanalysekarte sind für die Grün- und Freiflächen die Modellergebnisse des Kaltluftvolumenstroms in abgestufter Flächenfarbe dargestellt. Bei den Siedlungs- und Verkehrsflächen steht dagegen der Wärmeinseleffekt im Vordergrund (Überwärmung des Siedlungsraums gegenüber dem Umland). Weiterhin ist das bodennahe Strömungsfeld mit einer Pfeilsignatur abgebildet. Neben dem modellierten Strömungsfeld sind in der Karte besondere Kaltluftprozesse hervorgehoben, die in Göttingen eine wichtige Rolle spielen. So sind bedeutende flächenhafte Kaltluftabflüsse sowie Kaltluftleitbahnen hervorgehoben. Die Klimaanalysekarten geben zudem eine quantitative Abschätzung für den Status Quo und die Zukunftsszenarien: Wie hoch ist der Wärmeinseleffekt? Wie groß ist der Kaltluftvolumenstrom? Welche Strömungsgeschwindigkeit haben die Winde? In den rasterbasierten Karten treten kleinräumige Unterschiede deutlich hervor und Einzelgebäude und Baumgruppen sind gut erkennbar, weshalb sie sich für die Detailplanung eignet.

Bewertungskarten

Aufbauend auf den Modellergebnisse wurden sechs „Bewertungskarten“ erstellt, in denen getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien „Ist“ und „Mittlerer“ bzw. „Starker Klimawandel“ erfolgte. Für die Bewertung ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen) zu unterscheiden. In den Bewertungskarten zur Nacht-Situation orientiert sich die Bewertung der Grünflächen an ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt. Dabei bekommen Grün- und Freiflächen im Umfeld von Wohngebieten eine höhere Wertigkeit als im Umfeld von Gewerbegebieten, da in der Nacht die Möglichkeit eines erholsamen Schlafs im Vordergrund steht. Siedlungsferne Grünflächen ohne relevante Klimafunktionen sind aus stadtklimatischer Sicht von geringerer Bedeutung. Die Bewertung des Siedlungsraums für die Nachtsituation basiert auf der nächtlichen Überwärmung, so dass dicht bebaute (z.B. die Innenstadt) und/oder hochversiegelte Bereiche (z.B. Gewerbegebiete) die ungünstigsten Bedingungen aufweisen.

Planungshinweiskarte

Das zusammenfassende Hauptprodukt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte. Sie macht zum einen die abgestufte Handlungspriorität zur Verbesserung des thermischen Komforts im Sommer in allen Wohn-/Arbeits- und Aufenthaltsbereichen („Wirkraum“) in Göttingen sichtbar. Zum anderen weist die Planungshinweiskarte aber auch sämtlichen Grün- und Freiflächen im Stadtgebiet („Ausgleichsraum“) einen Schutzbedarf auf Grundlage der von ihnen bereitgestellten klimaökologischen Funktionen zu. Die städtebaulichen Entwicklungsflächen werden mit einer zusätzlichen Umrandung dargestellt, welche die stadtklimatische Verträglichkeit der beabsichtigten Bebauungsstruktur bewertet. Die Bewertungen der Planungshinweiskarte beruhen auf den stadtklimatischen Funktionen bzw. Hitzebelastungen der Flächen (ablesbar in den Bewertungskarten), ohne die Belange weiterer Fachplanungen zu berücksichtigen, d.h. die Planungshinweiskarte stellt aus klimafachlicher Sicht gewonnenes Abwägungsmaterial dar.

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

Primäres Anwendungsfeld der Stadtklimaanalyse ist die Bereitstellung von hochwertigem Abwägungsmaterial für Planungs- und Entscheidungsprozesse im Rahmen der Bauleitplanung. Aufgrund des erreichten Detaillierungsgrades der Analyse kann hier neben der vorbereitenden erstmalig auch die verbindliche Bauleitplanung hinreichend gut bedient werden. Damit sind valide Ersteinschätzungen z.B. hinsichtlich der Sensibilität einzelner Stadtentwicklungsvorhaben seitens der Verwaltung sowie bei Bedarf eines externen Gutachters möglich. Über dieses klassische Anwendungsfeld hinaus können die Ergebnisse der Klimaanalyse auch in weiteren formellen und informellen Planungen der Stadt zur Anwendung kommen. Hierzu zählen u.a. die Sanierung des öffentlichen Raums, die Verkehrswegeplanung, die Grünflächenentwicklung sowie teil- oder gesamtstädtische Leitbildprozesse oder auch Fragen der Sozialplanung bzw. der Umweltgerechtigkeit. Der Stadtwasserhitzeplan bietet für diese Anliegen ein umfassendes Konzept und zeigt Instrumente, Wege und Möglichkeiten für die verwaltungstechnische Umsetzung einer klimagerechten Stadtentwicklung auf.



Um dem beschriebenen Eigenanspruch der Stadtklimaanalyse sowie die insgesamt weiter steigende gesellschaftliche und damit politische Bedeutung eines gesunden Stadtklimas auch in der Zukunft adäquat bedienen zu können, ist ein regelmäßiger Fortschreibungsturnus für die Analyse von ca. 5 bis 10 Jahren anzustreben.

1. Fachliche Grundlagen

Zur zielgerichteten Anwendung der Stadtklimaanalyse und Ihrer Produkte ist – seinem Wesen als Fachgutachten entsprechend – ein breites fachliches Grundlagenwissen notwendig. Das Themenspektrum reicht dabei von den Zusammenhängen zwischen dem Thermischen Komfort und der Menschlichen Gesundheit (Kap. 1.1) im Kontext des lokalen Klimawandels (Kap. 2) bis hin zu stadtklimatisch relevante meteorologisch-physikalische Prozesse im urbanen Umfeld (Kap. 1.2). 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.

1.1 THERMISCHER KOMFORT UND MENSCHLICHE GESUNDHEIT

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

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

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

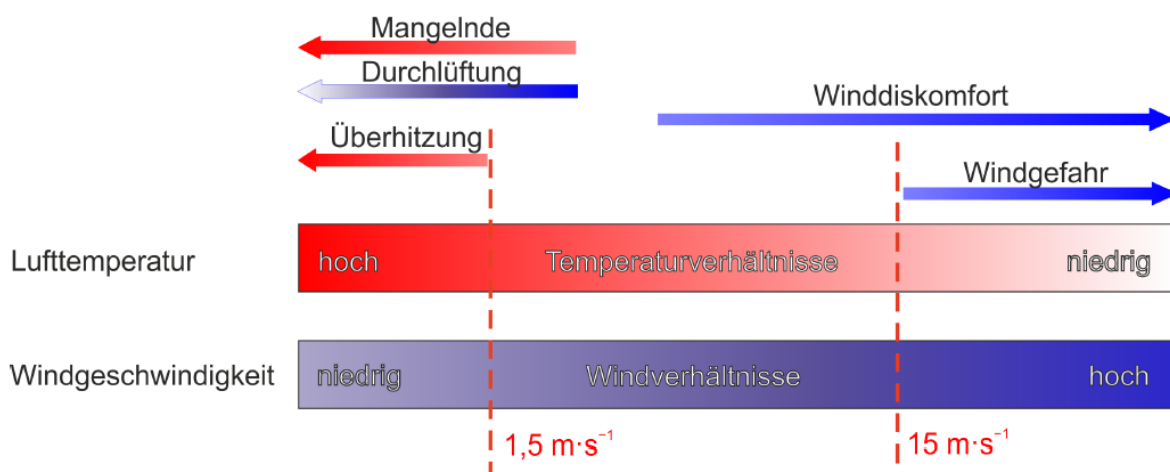


Abbildung 1: Klimakomfort und -diskomfort in verschiedenen Lufttemperatur- und Windgeschwindigkeitsbereichen (verändert nach VDI 3787, Bl.4 (2020))

Zur Quantifizierung der klimatischen Belastung auf den Menschen wurden in der Stadt- und Regionalklimatologie humanbiometeorologische Kenngrößen eingeführt, von denen sich insbesondere zwei in den letzten Jahrzehnten etabliert haben: 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. Die Bestimmung der humanbiometeorologischen Kenngrößen erfordern eine beträchtliche Anzahl von Eingangsgrößen, die teilweise nur mit erheblichem Mess- bzw. Modellierungsaufwand bestimmt werden können. Deshalb besitzen nach wie vor Auswerteroutinen wie die Auftrittshäufigkeit bestimmter Kenntage wie Heiße Tage (mit $T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) oder Tropennächte (mit $T_{\min} \geq 20^{\circ}$) eine hohe Praxisrelevanz (DWD 2020). Sie kommen insbesondere dann zum Einsatz, wenn für größere Räume (z.B. Staaten, Flächenbundesländer) auf der Basis von Zeitreihenanalysen eine Ersteinschätzung zu thermischen Belastungen vorgenommen werden soll.

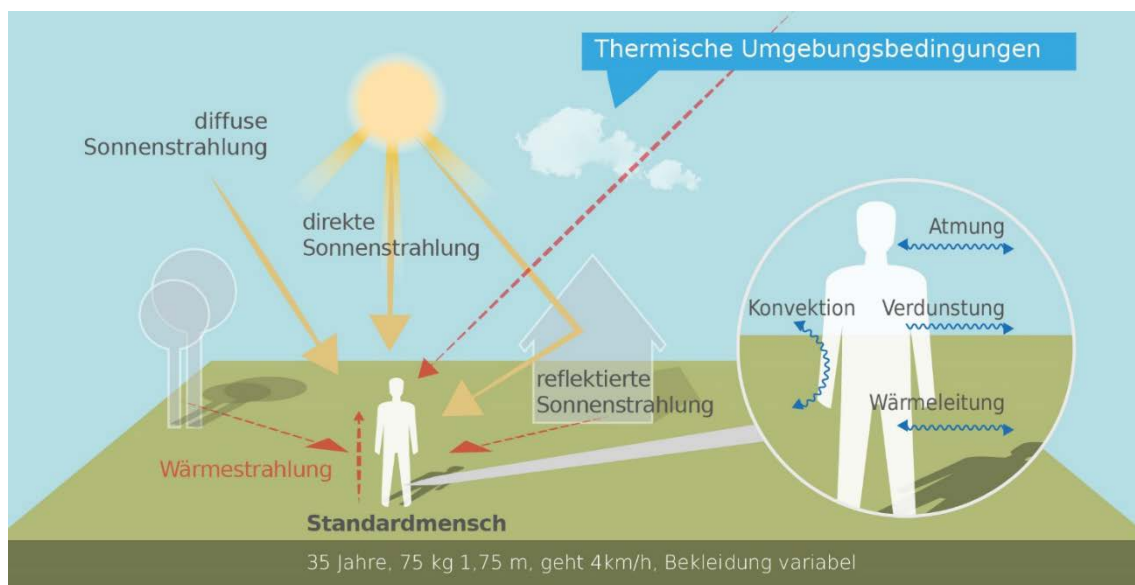


Abbildung 2: Klima-Michel-Modell und Gefühlte Temperatur (DWD 2023a)

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

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

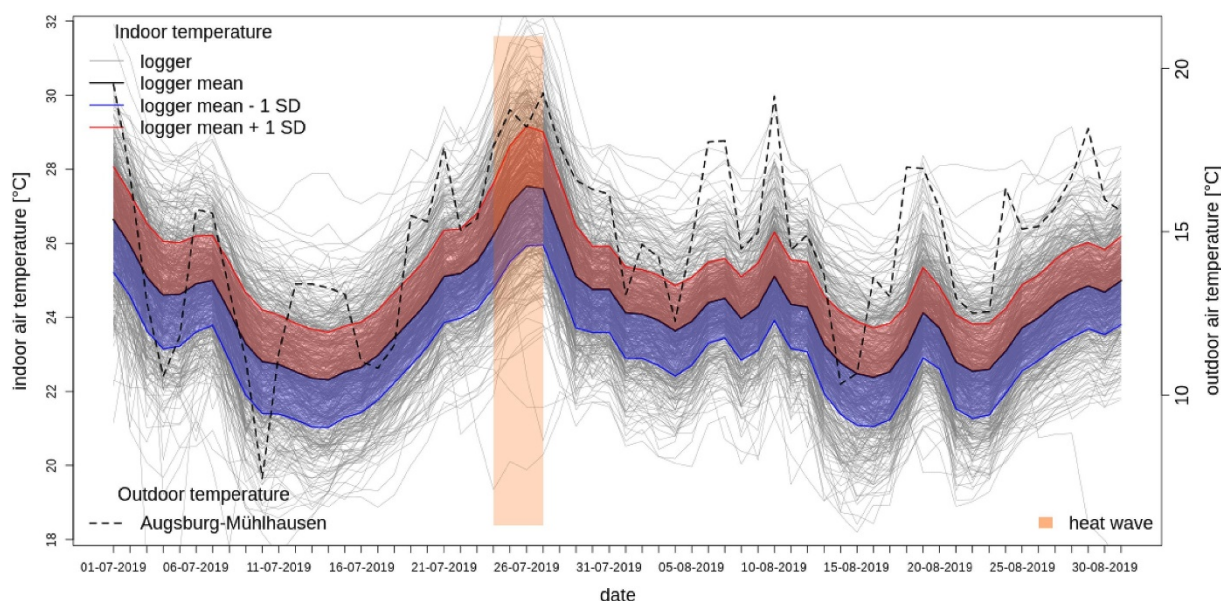


Abbildung 3: Nächtliche Innenraumtemperatur (22:00 – 06:00 Uhr) in 500 Augsburger Schlafzimmern in den Sommermonaten 2019 (Beckmann, S., Hiete, M. und Beck, C. 2021)

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

Außerhalb thermischer Komfortbereiche sinkt die Leistungsfähigkeit des Menschen ab (z.B. am Arbeitsplatz oder in der Schule und Hochschule). Das Ausmaß der Abnahme ist sehr individuell, kann aber an einigen Beispielen verdeutlicht werden. So nimmt die Leistungsfähigkeit bei moderater körperlicher Arbeit ab einem bestimmten Schwellenwert (z.B. bei 30 °C in Kombination mit 50 % Luftfeuchtigkeit) pro Grad Celsius Temperaturanstieg etwa um 15 % ab (ISO 1989). Andere Quellen gehen für Zeiten hoher Hitzebelastung in Mitteleuropa von einem Rückgang der Produktivität um 3 - 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 (Laureant et al. 2018).

Die humanbiometeorologische Umgebung beeinflusst nicht nur das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit des Menschen, sondern wirkt sich unmittelbar auf die Morbidität und Mortalität der Bevölkerung aus. Als besonders vulnerabel gelten in diesem Zusammenhang Säuglinge und Kleinkinder bis etwa 6 Jahre (aufgrund einer noch nicht vollständig ausgeprägten Fähigkeit zur Thermoregulation) sowie ältere Menschen ab 65 Jahren bzw. vor allem über 80 Jahren (aufgrund einer verminderten Leistungsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems). Santholz und Sett (2019) kommen auf der Basis einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in der Bundesstadt Bonn zu dem Schluss, dass verschiedene sozioökonomische Gruppen sehr unterschiedlich von Hitzebelastungen betroffen sein können. Während befragte Senior:innen angaben, bei Hitze vergleichsweise häufiger an Herz-Kreislauf-Problemen zu leiden, haben Studierende überdurchschnittlich häufig Konzentrationsprobleme und Kopfschmerzen genannt. Single-/Pärchen-Haushalte gaben an, hauptsächlich mit Schlafproblemen konfrontiert zu sein. Familien mit kleinen Kindern hingegen erwähnten seltener gesundheitliche Probleme (Abbildung 4).

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 $> 20^{\circ}\text{C}$ ermittelt worden. Die Mitte und vor allem der Süden Deutschlands wiesen dabei eine deutlich höhere hitzebedingte Mortalitätsrate auf als das nördliche Bundesgebiet (Abbildung 5). Die Jahre 2003, 2006 und 2015 zeigten bundesweit mit 6.000 – 7.000 zusätzlichen hitzebedingten Todesfällen die höchsten Übersterblichkeiten (An der Heiden et al. 2019). Modellrechnungen prognostizieren für Deutschland, dass zukünftig mit einem Anstieg hitzebedingter Mortalität von 1 bis 6 % pro 1 Grad Celsius Temperaturanstieg zu rechnen ist – dies entspräche über 5.000 zusätzlichen Sterbefällen pro Jahr durch Hitze bereits bis Mitte dieses Jahrhunderts (UBA 2020).

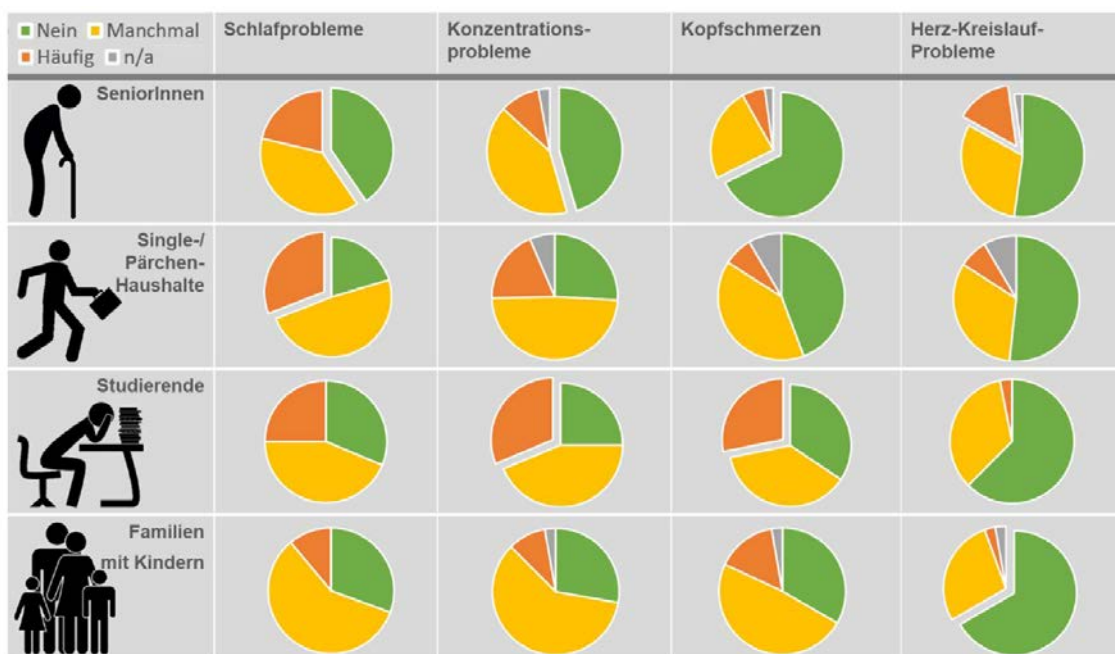


Abbildung 4: Gesundheitliche Belastung verschiedener Gruppen bei Hitze in Bonn (n=688) (Santholz und Sett 2019)

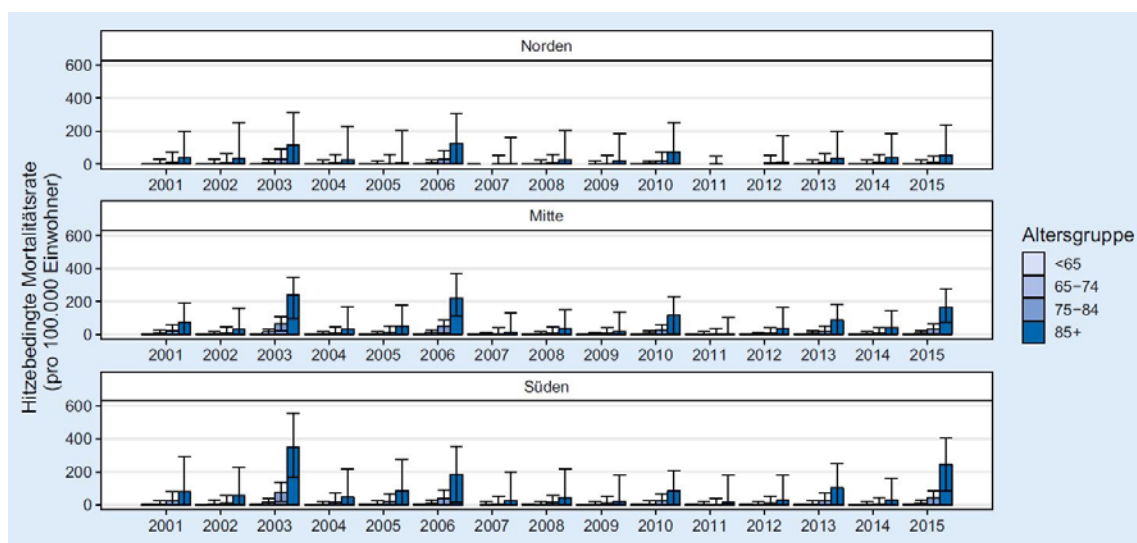


Abbildung 5: Hitzebedingte Mortalitätsrate nach Altersgruppe und Region von 2001 - 2015 (An der Heiden et al. 2019)

1.2 WÄRMEINSELEFFKT UND KALTLUFTPROZESSE

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

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



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

Durch den anthropogenen Einfluss herrschen in einer Stadt modifizierte Klimabedingungen vor, die tendenziell mit steigender Einwohnerzahl bzw. Stadtgröße stärker ausgeprägt sind (Oke et al. 2017). Gründe hierfür sind beispielsweise der hohe Versiegelungsgrad, in Kombination mit einem geringen Anteil an Vegetation und natürlicher Oberfläche. Die Oberflächenvergrößerung durch Gebäude (Beeinträchtigung der Strömung durch höhere Rauigkeit, Mehrfachreflexion durch die Gebäude) sowie Emissionen durch Verkehr, Industrie und Haushalte (anthropogener Wärmeffluss) verstärken die Ausprägung des Stadtklimas. Im Vergleich zum weitgehend natürlichen oder naturnahen, unbebauten Umland führen diese Effekte im Sommer zu höheren Temperaturen und bioklimatischen Belastungen. Das Phänomen der Überwärmung kommt vor allem nachts zum Tragen und wird als Städtische Wärmeinsel bezeichnet. Diese führt zu einem kleinräumigen, sehr fragilen System aus konvektivem Aufsteigen warmer Luft über dem überwärmten Stadtkörper und bodennahen Ausgleichsströmungen aus dem Umland in das Stadtgebiet hinein („Flurwindsystem“). Am Tag führen Flurwinde in der Regel nicht zum Abbau der Wärmebelastung in den Siedlungsflächen, da im Umland meist ein ähnliches Temperaturniveau vorherrscht. Sie können jedoch zur Durchmischung der bodennahen Luftschicht beitragen und eine Verdünnung von Luftschadstoffen bewirken. Nachts kann dagegen kühlere Umgebungsluft aus stadtnahen und innerstädtischen Grünflächen in die überwärmten Quartiere strömen und für Entlastung sorgen. Der bodennahe Zufluss dieser „Kaltluft“ erfolgt mit geringen Strömungsgeschwindigkeiten und reagiert sensibel auf Strömungshindernisse.

Während Flurwindssysteme in aller Regel mit geringen Kaltluftdynamiken von $< 1 \text{ m/s}$ und Kaltluftmächtigkeiten von wenigen (10er-)Metern verbunden sind, können orographisch bedingte Kaltluftabflüsse von Hängen und insbesondere Berg-Talwindssystemen hang- bzw. talabwärts gerichtete Windgeschwindigkeiten von deutlich $> 2 \text{ m/s}$ sowie Kaltluftmächtigkeiten von z.T. über 100 m hervorrufen. Bei beiden Systemen handelt es sich um tagesperiodische lokale Windsysteme und damit um eine typische Erscheinung für Gebirgsklimata (siehe Abbildung 6 oben). Der tagsüber aufwärts gerichtete Tal-/Hangwind wird angetrieben durch die infolge der



Sonneneinstrahlung gegenüber der freien Atmosphäre stärkeren Erwärmung der Hänge. Der Motor des vom späten Abend bis zum Morgen abwärts wehenden Berg-/Hangwinds ist die gegenüber dem Tal stärkere Ausstrahlung und Abkühlung der Luft über den Hochflächen und Hängen. Beim Berg-/Talwindssystem kann zusätzlich ein Zusammenfließen und eine talabwärts gerichtete Kanalisierung erfolgen, sodass hier bei optimalen Bedingungen gegenüber den reinen Hangwinden noch größere Kaltluftvolumina möglich sind.

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

1.3 STADTKLIMAANALYSEN UND DER STAND DER TECHNIK

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

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

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

Aktuell befinden sich einige zentrale Richtlinien in Fortschreibung (z.B. VDI 3787, Bl.5; seit März 2024 als Entwurf vorliegend) 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.

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“ (Tabelle 1). In der Praxis existieren auch Mischformen, wie z.B. Kombinationen aus dem Klimatopansatz (der anders als in der Übersicht des HLNUG dargestellt keine relevanten Rückschlüsse zur Kaltluftsituation zulässt) und einfachen Modellanwendungen zum Kaltlufthaushalt (um dieser Herausforderung zu begegnen).



Tabelle 1: Vergleich der drei Methoden zur Stadtklimaanalyse (HLNUG 2022, 18)

	M1 Abschätzung nach Versiegelung	M2 Klimatope nach VDI	M3 Stadtklimamodellierung
Was kann die Klimaanalyse-methode leisten?	• Qualitative Einschätzung der Verteilung der Wärmebelastung im Gebiet • Qualitative Einteilung von Belastungs- und Ausgleichsräumen	• Klimaeigenschaften der Flächen • Qualitative Einschätzung der Flächen als Belastungs- bzw. Ausgleichsräume • Ableitung relevanter Informationen zur Kaltluft	• Quantitative Ergebnisse (Temperatur, Anzahl Kenntage, Volumenstrom Kaltluft etc.) • Kaltluftentstehung und -abfluss
Rahmenbedingungen	• Kleine und mittlere Kommunen • Kommunen mit weniger komplexen Stadt- / Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen ersten Überblick zur Belastungssituation bekommen möchten	• Kommunen aller Größenklassen mit eher einfachem Relief / geringen Höhenunterschieden • Kommunen mit weniger komplexen Stadt-/Siedlungsstrukturen • Kommunen, die einen vertieften Überblick zur Belastungssituation inklusive Kaltluft bekommen möchten	• Mittlere / große Kommunen mit komplexen Herausforderungen durch den Klimawandel • Kommunen, die für städtebauliche Entwicklungen bzw. für ein Klimaanpassungskonzept konkrete Angaben zu Temperatur und Kaltluft benötigen
Erforderliche Daten	• Versiegelungsgrad, z. B. über Luftbildanalyse • Bebauungsstruktur/-typ • Flächennutzung	• Informationen zur tatsächlichen Flächennutzung (z. B. ATKIS, CORINE, Realnutzungskartierung) • Informationen zum Relief und zur Oberflächenstruktur (z. B. digitales Höhenmodell) • Fachkarten hinsichtlich Versiegelung oder Baudichte/-höhe und Bebauungsart	• Höhendaten, z. B. Digitales Geländemodell, Rasterdaten der Geländehöhe • Nutzungsdaten, z. B. ATKIS, Biotop-/Vegetationskartierung, Realnutzungskartierung • Fachkarten zur Versiegelung, Baudichte/-höhe, Bebauungsart, Rasterdaten zur Bebauungsstruktur • Messdaten zu physikalischen Größen z. B. Wind, Temperatur
Welche Informationen liefert die Klimaanalyse-methode?	• Einstufung der thermischen Belastung im Siedlungsbereich	• Klimatope • Klimaanalysekarte	• Zahlreiche Datensätze mit Aussagen zu Temperatur, Kenntage (Gegenwart und Zukunft), Analyse zur Kaltluft • Je nach Aufbereitung entsprechende Karten

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

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

Übersicht stadtklimatischer Modelle

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

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

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

Eine gute Möglichkeit, den Rechenaufwand der Modellierung so gering wie möglich zu halten ist das sogenannte Nesting. Dabei wird, je nach Umsetzungsart, im Modell entweder ein Kerngebiet im Untersuchungsbereich feiner aufgelöst als die Umgebung (Online-Nesting) oder ein kleinräumiges Untersuchungsgebiet mit



den Ergebnissen einer übergeordneten Modellierung angetrieben (Offline-Nesting). Beide Methoden sparen Rechenzeit dadurch ein, dass das Kerngebiet des Interesses ausreichend hochaufgelöst modelliert, aber auch kleingehalten werden kann und dennoch die beeinflussenden Prozesse aus dem Umfeld auf das Kerngebiet einwirken. Der Begriff Online-Nesting rührt daher, dass die Berechnung des Kerngebiets und des direkt anschließenden, gröber aufgelöstem umgebenden Gebiets direkt in einem Modelllauf durchgerechnet wird. Beim Offline-Nesting muss hingegen die übergeordnete, grobskaligere Modellierung vor dem hochaufgelösten Bereich gerechnet werden.

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

Modell	Kategorie	Mögliche horizontale Auflösung für großräumige Anwendungen	Ausgabegrößen
FITNAH-3D	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



2. Klima und Klimawandel im Raum Göttingen

2.1 DATENGRUNDLAGE UND METHODIK

Gegenwärtiges Klima

Die Beschreibung des gegenwärtigen Klimas in Göttingen basiert auf interpolierten Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2022a, DWD 2022b, Kaspar et al. 2013). Die Daten weisen eine räumliche Auflösung von 1 x 1 km und eine zeitliche Auflösung von jährlichen Mittelwerten auf. Teilweise reichen die Beobachtungsdaten bis in das Jahr 1881 zurück (Jahresmitteltemperatur und Niederschlagssumme). Minimum- bzw. Maximumtemperaturen sind seit 1901 verfügbar und Daten zu thermischen Kennwerten sowie Starkniederschlägen seit 1951.

Anhand der Stadtgrenze Göttingens 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 Messungenauigkeiten zu erwarten sind als bei Zeitreihen jüngerer Datums. Für die vorliegenden Auswertungen ist die Genauigkeit der Daten als vollkommen ausreichend anzusehen.

Zukünftige Klimaveränderungen

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). 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) bereitgestellt¹. Durch den DWD wurde aus diesem übergeordneten Prozess ein für Deutschland repräsentatives Referenzensemble ausgewiesen (DWD 2018). Zudem wurden diese Daten einer Bias-Adjustierung unterzogen und auf eine höhere Auflösung regionalisiert.

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 Göttingen ein Modellensemble bestehend aus 10 Mitgliedern verwendet, d.h. Kombinationen aus globalen und regionalen

¹ Homepage: www.euro-cordex.net



Klimamodellen, die mit jeweils unterschiedlichen Klimaszenarien angetrieben werden (Tabelle A1 im Anhang). Das Modellensemble basiert auf dem oben beschriebenen regionalisierten DWD-Referenzensemble, orientiert sich aber an der Modellauswahl der aktuellen Klimaprojektionsdaten für Niedersachsen und Bremen (AR5-NI v2.1, LBEG 2022).

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).

Für die Auswertung wurden bis zum Jahr 2100 projizierte Daten mit einer zeitlichen Auflösung von einem Tag und einer räumlichen Auflösung von 5 km verwendet. Die Auswahl der entsprechenden Daten aus dem Gitter der Modellsimulationen, das Europa flächendeckend überspannt, erfolgte durch die Identifikation und Auswahl passender Gitterpunkte entsprechend den Grenzen Göttingens. 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.

Hauptverantwortlich für den Anstieg der globalen Mitteltemperaturen sind anthropogen bedingte CO₂-Emissionen. Da heute noch nicht absehbar ist, wie sich die CO₂-Emissionen zukünftig entwickeln, werden diese in Klimamodellen in Form von Szenarien mit unterschiedlicher CO₂-Entwicklung über die Zeit berücksichtigt, die bis zum Ende des Jahrhunderts einen bestimmten Strahlungsantrieb hervorrufen. Für Europa stehen aktuell drei verschiedene Klimaszenarien zur Verfügung: RCP 2.6, 4.5 und 8.5 (RCP = *Representative Concentration Pathways*). Im 2022 veröffentlichten sechsten IPCC-Bericht wurden die RCP-Szenarien von SSP-Szenarien abgelöst, die soziökonomische Entwicklungspfade aufzeigen (SSP = *Shared Socioeconomic Pathways*; DKRZ 2023). Aktuell ist die Wissenschaft dabei, die SSP-Szenarien in die globalen und regionalen Klimamodelle zu integrieren (bspw. laufen im Projekt CMIP6 erste Modellrechnungen mit den neuen Szenarien²), sie sind jedoch noch nicht in den EURO-CORDEX-Daten und dem DWD-Referenzensemble enthalten. Die Zahl in der Bezeichnung der RCP-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 7):

- 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 °C gegenüber dem Zeitraum 1985 – 2005 bewirken würde.

Die weltweiten CO₂-Emissionen verzeichnen seit den 1950er-Jahren einen permanenten Anstieg. In den letzten Dekaden befanden wir uns, nach den Ergebnissen des Global Carbon Projektes, mit den globalen 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. Für die Einschätzung zukünftiger Klimarisiken wird das RCP 8.5 als geeignetes

² CMIP6 (*Coupled Model Intercomparison Project 6*) ist ein internationales Klimamodellvergleichsprojekt des Weltklimaforschungsprogramms (*World Climate Research Programme*)



Szenario angesehen (Schwalm et al. 2020). Aus diesem Grund und im Sinne des Vorsorgegedankens werden im vorliegenden Bericht vornehmlich Grafiken zu Klimaänderungen des RCP-Szenarios 8.5 platziert.

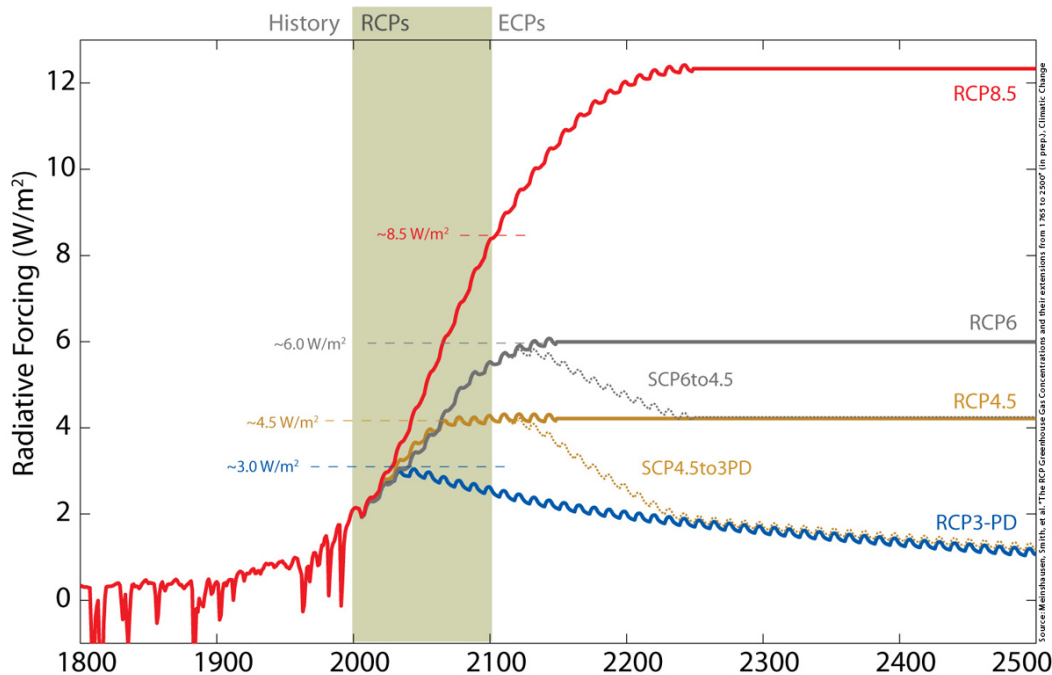


Abbildung 7: Strahlungsantrieb der verschiedenen RCP-Szenarien und ihre Entwicklung bis 2100³ (RCP3-PD ist vergleichbar mit dem im Text genannten RCP-Szenario 2.6; Quelle: IPCC 2013)

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. $T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$ 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 Göttingen wurden schwellenwertbasierte Kenntage verwendet.

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

Die Analyse des erwarteten Klimawandels wurde mit zwei methodisch unterschiedlichen Herangehensweisen durchgeführt. Im ersten Ansatz wurden die Daten des Modellensembles zu zusammenhängenden Zeitreihen von 1971 – 2100 zusammengeführt und für jede betrachtete Variable untersucht, ob ein zeitlicher linearer Trend vorliegt und die Trendentwicklung statistisch signifikant ist. Die statistische Signifikanz wurde anhand des Trend-/Rauschverhältnisses ermittelt (Tabelle A2 im Anhang).

Das Klima eines Raumes wird repräsentiert durch den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren. Für die Beschreibung des erwarteten 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

³ ECP = *Extended Concentration Pathways* sind ergänzende Szenarien bis zum Jahr 2300.

Meteorological Organisation (WMO) empfiehlt die Verwendung der sogenannten Klimanormalperiode von 1961 – 1990. Da jedoch bei einigen der verwendeten regionalen Klimamodelle der Zeitraum des Referenzlaufs erst 1971 beginnt, wurde hier der Zeitraum von 1971 – 2000 als Referenzperiode festgelegt. Dieser ist im Verhältnis zu den betrachteten Zukunftszeiträumen noch ausreichend wenig vom Klimawandel beeinflusst, sodass eine vergleichende Betrachtung die wesentlichen klimatischen Veränderungen aufzeigt. Die Referenzperiode 1971 – 2000 wird auch in der aktuellen bundesweiten Klimawirkungs- und Risikoanalyse verwendet (UBA 2021). In Bezug auf die Klimawandelfolgen betrachtet die Klimawirkungs- und Risikoanalyse zwei Zukunftspeperioden in der Mitte und zu Ende des Jahrhunderts, die hier übernommen wurden. Deshalb wurden im zweiten Ansatz für jede Variable zeitliche Mittelwerte über folgende Zeiträume berechnet:

- Referenzperiode: 1971 – 2000
- 1. Zukunftsperiode (Mitte des Jahrhunderts): 2031 – 2060
- 2. Zukunftsperiode (Ende des Jahrhunderts): 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 zu beachten, dass die Referenzläufe mit den Beobachtungsdaten des gleichen Zeitraumes nur in ihren klimatisch relevanten, statistischen Eigenschaften übereinstimmen. Sie sind auf kleineren Skalen (Jahre, Monate, Tage) nicht exakt miteinander vergleichbar. Die nachfolgenden Ausführungen enthalten eine Vielzahl von Grafiken in Form sogenannter Box-Whisker Plots. Diese haben den Vorteil, dass die Kennwerte statistischer Verteilungen schnell erfassbar und vergleichbar sind (Abbildung 8).

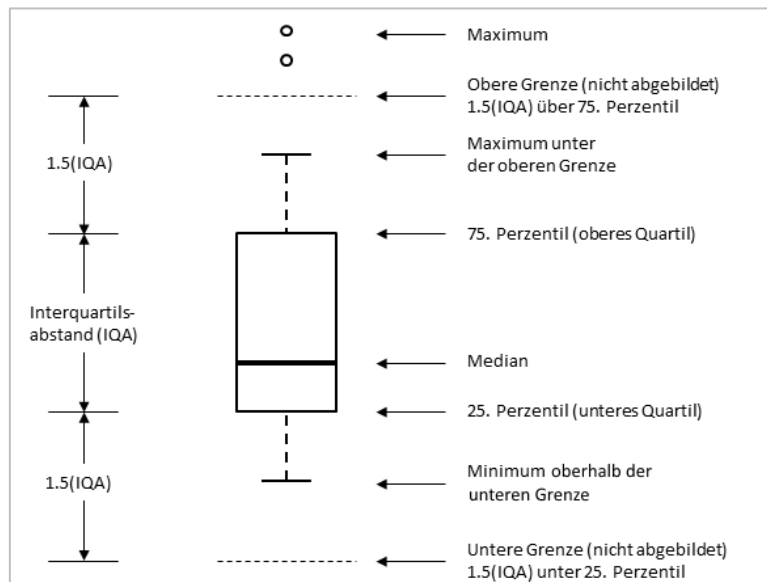


Abbildung 8: Konventionen und Bedeutung der grafischen Darstellung eines Box-Whisker Plots

2.2 DAS VERGANGENE UND GEGENWÄRTIGE KLIMA IN GÖTTINGEN (TEMPERATUR UND HITZE)

Bezogen auf die letzten 30 Jahre (1991 – 2020) ist Göttingen durch eine langjährige Mitteltemperatur von 9,1 °C und eine mittlere Niederschlagssumme von 727 mm/Jahr gekennzeichnet. Damit weist Göttingen im Mittel höhere Temperaturen und Niederschlagsmengen als im deutschlandweiten Durchschnitt auf (9,3 °C bzw. 790 mm/Jahr; UBA 2022a, 2022b).



Verglichen mit früheren Perioden wird deutlich, dass in Göttingen – dem nationalen und globalen Trend folgend – bereits eine deutliche Erwärmung stattgefunden hat. So ist die Temperatur seit Beginn der meteorologischen Aufzeichnungen um 1,3 °C gestiegen (Mittelwert 1991 – 2020 im Vergleich zu 1881 – 1910). Zudem sind die fünf wärmsten Jahre seit 1881 allesamt in der letzten Dekade aufgetreten (Abbildung 10).

Noch stärker als die „schleichende“ Änderung der Jahresmitteltemperatur wirken sich Hitzeperioden auf das Wohlbefinden und die Gesundheit der Bevölkerung aus. Die Anzahl an Sommertagen ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$) und insbesondere Heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30\text{ °C}$) kann als Indiz für die Häufigkeit belastender Phasen verstanden werden. In Göttingen zeigt sich jeweils ein Anstieg dieser Kenntage: Im Vergleich der Periode 1991 – 2020 zu 1971 – 2000 ist die Anzahl an Sommertagen im Mittel von 30 auf 37 pro Jahr und die Anzahl an Heißen Tagen von 5 auf 8 pro Jahr gestiegen (vgl. Abbildung 11).

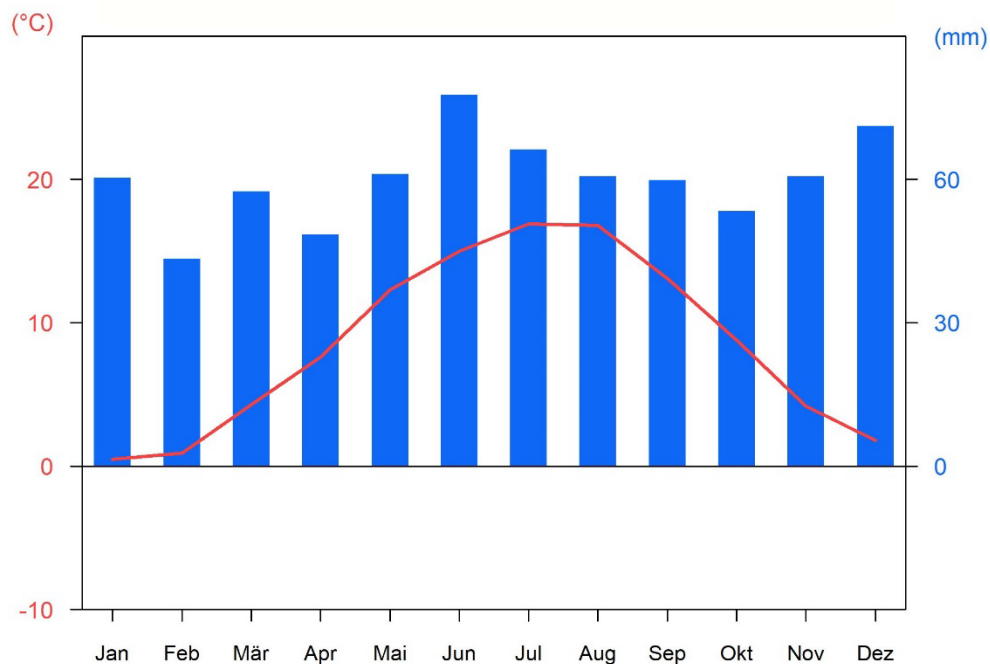


Abbildung 9: Klimadiagramm der Stadt Göttingen für den Zeitraum 1971 – 2000, basierend auf den Gebietsmittelwerten der DWD Daten (nach DWD 2022b)

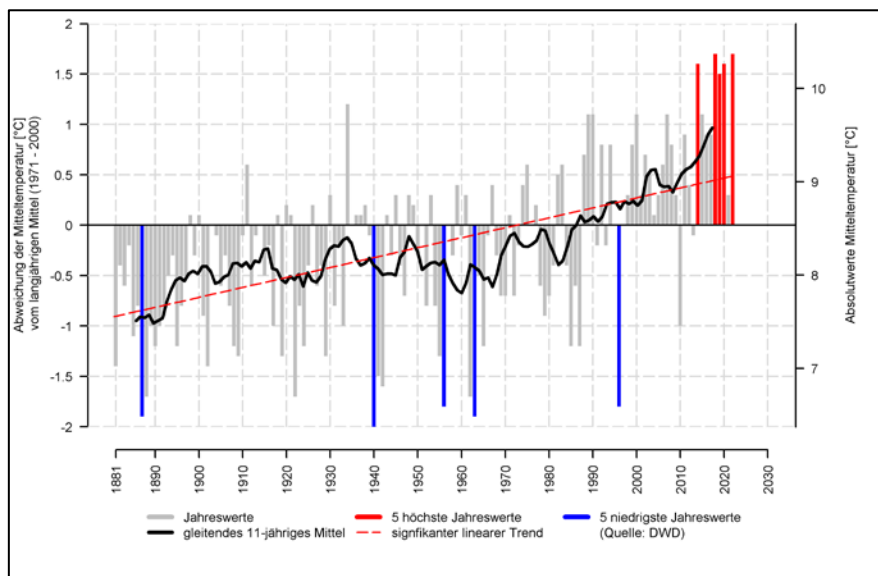


Abbildung 10: Langjährige Entwicklung der Jahresmitteltemperatur in Göttingen im Zeitraum von 1881 bis 2022 (Quelle: eigene Berechnung nach DWD 2022b)

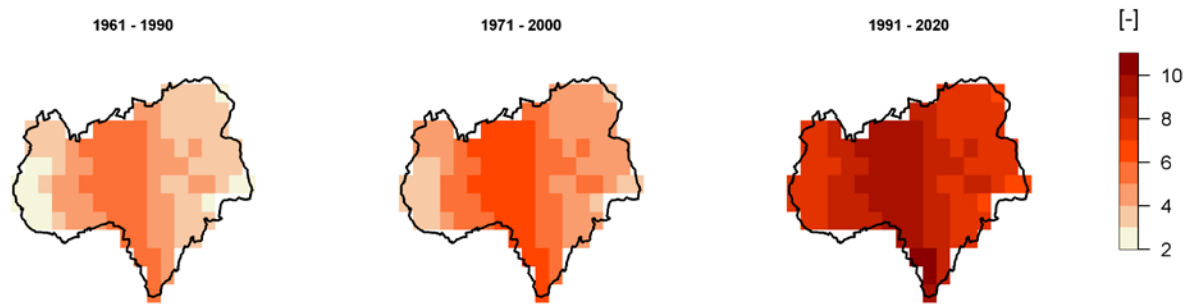


Abbildung 11: Räumliche Darstellung der Anzahl Heißer Tage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) in verschiedenen Perioden in Göttingen (eigene Berechnung nach DWD 2022b)

Tabelle 3: Langjährige mittlere Entwicklung der Temperaturen, des Niederschlags sowie von meteorologischen Kennzahlen in Göttingen in der Vergangenheit (eigene Berechnung nach DWD 2024).

	1961-1990	1971-2000	1991-2020
Mittelwert der Lufttemperatur [$^\circ\text{C}$]	8,5	8,5	9,1
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	30	30	37
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	5	5	8
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	keine Angabe	< 1	< 1
Frosttage ($T_{\min} < 0^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	79	80	82
Eistage ($T_{\max} < 0^\circ\text{C}$) [n/Jahr]	21	20	20
Jahresniederschlag [mm/Jahr]	718	720	727

Die thermischen Parameter wirken (zusammen mit der solaren Einstrahlung) unmittelbar auf das Stadtklima ein. Darüber hinaus üben Trockenperioden einen Einfluss auf das Stadtklima aus, indem sie die Bodenfeuchte und Vitalität des Stadtgrüns beeinflussen. Ein Maß für die Bodenfeuchte ist die nutzbare Feldkapazität. Sie unterliegt in Göttingen deutlichen Schwankungen, zeigt seit 1991 insgesamt jedoch einen signifikant abnehmenden Trend (Abbildung 12). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) wird das pflanzenverfügbare Wasser angezeigt. Im Rückblick auf die Periode 1991 bis 2021 ist klar zu erkennen, dass die nFK im Sommer (Juni, Juli, August / orangefarbene Balken in der Abbildung) deutlich niedriger liegt als zu anderen Jahreszeiten. Es ist sowohl insgesamt als auch besonders für die Sommersaison ein abwärts gerichteter linearer Trend zu erkennen (rot gestrichelte Linie). Die Werte der Sommermonate schwanken im Zeitraum 1991 bis 2000 um ca. 60 % nFK, während sie in den vergangenen 5 Jahren (seit 2017) im Mittel nur ca. 50 % nFK betrug. Es ist davon auszugehen, dass es im Stadtgebiet mindestens lokal Stellen gibt (abhängig von der Bodenart, dem Relief, etc.), auf denen die Pflanzen zeitweise unter Wasserstress stehen.

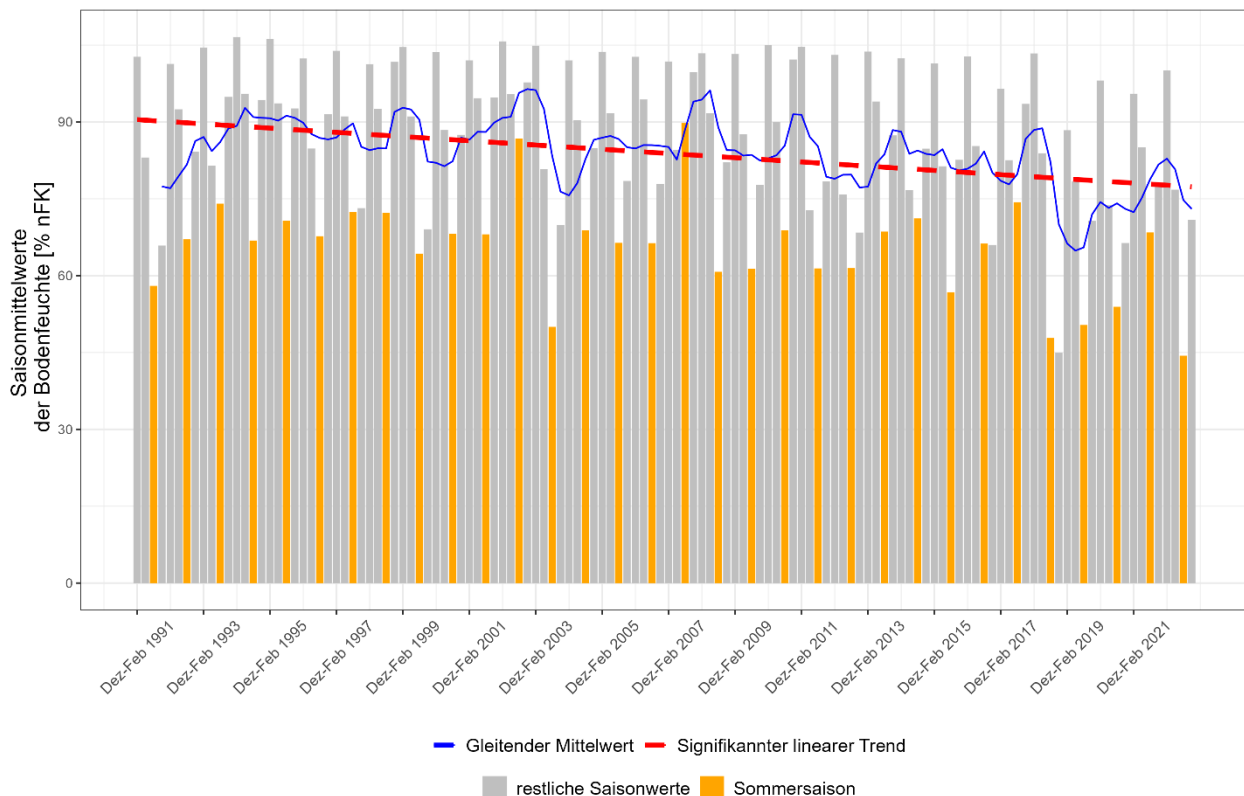


Abbildung 12: Langjährige Entwicklung der saisonalen Mittelwerte der Bodenfeuchte in Göttingen im Zeitraum 1991 bis 2021 (eigene Berechnung nach DWD 2022b)

2.3 ZUKÜNFTIGE KLIMAVERÄNDERUNGEN IN GÖTTINGEN

Alle drei RCP-Szenarien projizieren ein deutliches Ansteigen der Jahresmitteltemperatur in Göttingen bis zum Jahr 2100. Dies gilt nicht nur für den in Abbildung 13 gezeigten Median des Modellensembles, vielmehr weisen sämtliche Modellkombinationen des Ensembles einen Anstieg der jährlichen Mitteltemperaturen auf, sodass der Trend als äußerst robust einzuschätzen ist. Noch stärker als die Mitteltemperaturen steigen die Maximum- und insbesondere Minimumtemperaturen⁴ (Tabelle 4).

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

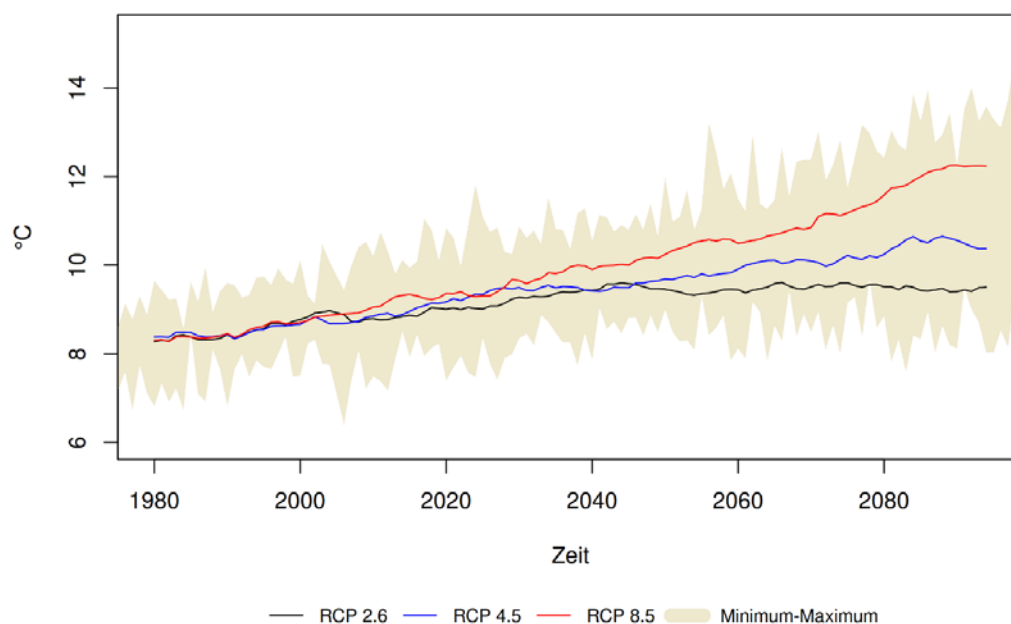
⁴ Minimum- bzw. Maximaltemperaturen beschreiben entweder den jährlichen oder 30-jährigen Mittelwert der täglichen Tiefst- bzw. Höchsttemperatur.



Tabelle 4: Langjährige Änderung der Temperatur in Göttingen (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

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

Zum Ende des Jahrhunderts nimmt die Unsicherheit und damit auch Variabilität der erwarteten Temperaturänderung zu, was durch den Möglickeitsbereich abgebildet wird (kleinster bis größter Wert in den Modellergebnissen). In Abbildung 13 wird die Bandbreite zwischen Minimum und Maximum des Modellensembles dargestellt.


Abbildung 13: Zeitlicher Trend der jährlichen Mitteltemperaturen in Göttingen (alle RCP-Szenarien)⁵

⁵ Die Werte der einzelnen Kurven beziehen sich jeweils komplett auf modellierte Daten (nicht nur für die Zukunft, sondern auch die den bereits vergangenen Zeitraum ab 1971)



Im Jahresgang ist ein Temperaturanstieg in allen Monaten erkennbar, jedoch treten im Spätsommer die größten Temperaturänderungen (Abbildung 14). Die Zunahmen fallen im RCP 8.5 am höchsten aus und verstärken sich generell zum Ende des Jahrhunderts (rote Boxen).

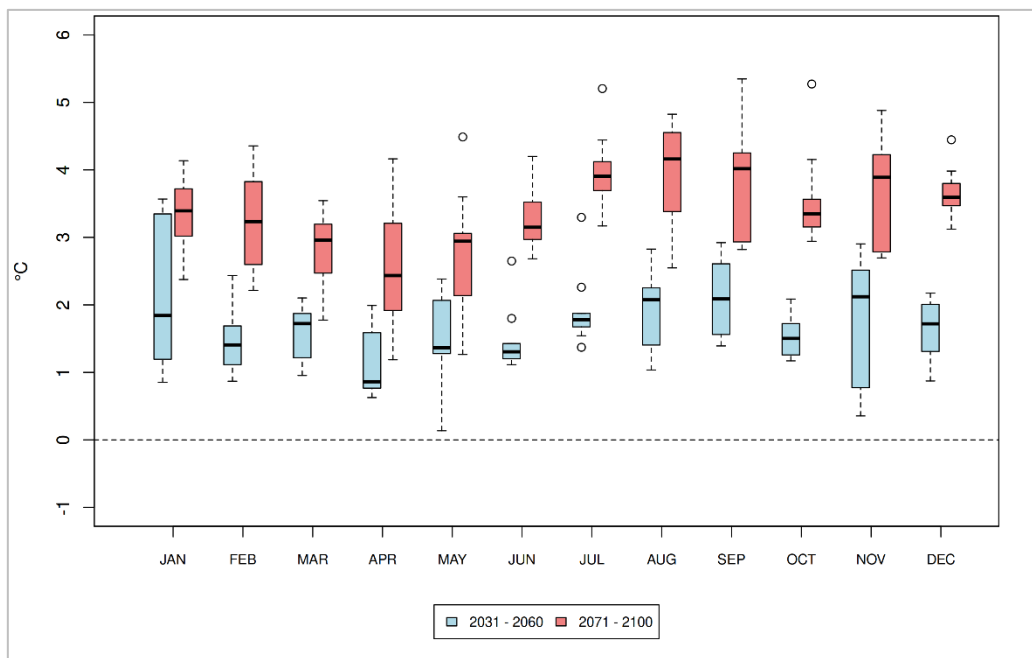


Abbildung 14: Änderung der langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen in Göttingen (RCP 8.5) im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000

Der projizierte Temperaturanstieg steht in direktem Zusammenhang mit der Entwicklung thermischer Kenn-tage, die für die Lebensqualität und Gesundheit der Bevölkerung noch relevanter sind als der allmähliche Tem-peraturanstieg. Die durchschnittliche jährliche Anzahl an Sommertagen und Heißen Tagen nimmt zukünftig deutlich zu. Tabelle 5 zeigt jeweils die Änderungen (Zunahmen). Bspw. ist im RCP 8.5 zum Ende des Jahrhun-derts hin im Mittel mit 28 Heißen Tagen pro Jahr zu rechnen, während diese in der Referenzperiode (1971 – 2000) nur fünf Mal jährlich auftraten (vgl. Tabelle 3).

Tropennächte sind derzeit in Göttingen die Ausnahme. Je nach Szenario treten sie zur Mitte des Jahrhunderts weiterhin sehr selten (im Median + 0,4 Tropennächte pro Jahr im RCP 2.6) bis selten, auf. Bis Ende des Jahr-hunderts ist die Entwicklung noch stärker vom jeweiligen Szenario abhängig. Während die Häufigkeit von Tro-pennächten im RCP 2.6 auf einem geringen Niveau verbleibt, projiziert das RCP 8.5 eine deutliche Zunahme. Demnach wären bis 2100 bis zu 6 Tropennächte pro Jahr in Göttingen möglich. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die Klimamodelle den Wärmeinseleffekt nicht erfassen, d.h. in (inner)städtischen Bereichen eine höhere Anzahl an Tropennächten anzunehmen ist.

Die Zunahme der Heißen Tage lässt auf eine künftig steigende Häufigkeit von Hitzeperioden und Hitzewellen schließen. Für Hitzeperioden gibt es keine eindeutige Definition. Es handelt sich dabei im Wesentlichen um einen Zeitraum mit länger anhaltenden ungewöhnlich hohen Temperaturen. Wird eine Tageshöchsttemper-tur von 30 °C verwendet und die Länge aufeinanderfolgender Tage betrachtet, die diesen Schwellenwert mindes-tens erreichen, zeigt sich, dass Hitzeperioden im Raum Göttingen zukünftig länger andauern. Je nach Szenario erhöht sich die Länge von Hitzeperioden bis Ende des Jahrhunderts um 1 - 4 Tage (Tabelle 5).



Tabelle 5: Langjährige Änderung (Zunahmen) thermischer Kenntage sowie der Länge von Hitzeperioden in Göttingen (P 15 / 85 = 15. / 85. Perzentil, P 50 = Median).

Kenntag	Szenario	Änderung im Zeitraum gegenüber 1971 – 2000								
		2031 – 2060			2041 – 2070			2071 – 2100		
		Min	P 50	Max	Min	P 50	Max	Min	P 50	Max
Sommertage ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	6	14	23	9	15	25	7	11	21
	RCP 4.5	8	14	19	10	19	25	14	18	21
	RCP 8.5	11	18	28	14	21	37	22	33	46
Heiße Tage ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	3	5	8	4	6	9	3	4	10
	RCP 4.5	4	5	10	4	7	13	5	7	12
	RCP 8.5	4	7	13	7	9	16	14	17	23
Tropennächte ($T_{\min} \geq 20^{\circ}\text{C}$) [n/Jahr]	RCP 2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	RCP 4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	RCP 8.5	0	0	1	0	0	1	0	2	6
Änderung der Länge von Hitzeperioden (aufeinanderfolgende Heiße Tage) [n]	RCP 2.6	0	1	3	1	2	2	0	1	3
	RCP 4.5	0	1	2	1	1	3	1	2	4
	RCP 8.5	0	2	3	1	2	4	3	4	6

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

Als geeigneter Indikator kann die klimatische Wasserbilanz als Differenz zwischen Niederschlag und potenzieller Verdunstung herangezogen werden. Bei einer saisonalen Betrachtung weist die klimatische Wasserbilanz im RCP-Szenario 8.5 einen Rückgang in den Sommermonaten auf, der zum Ende des Jahrhunderts am deutlichsten ausfällt (Abbildung 15).

In Bezug auf den Sommer zeichnet sich damit eine verschärfende Trockenheit ab, wobei davon auszugehen ist, dass sie sich auch auf die Bodenfeuchte auswirken wird.

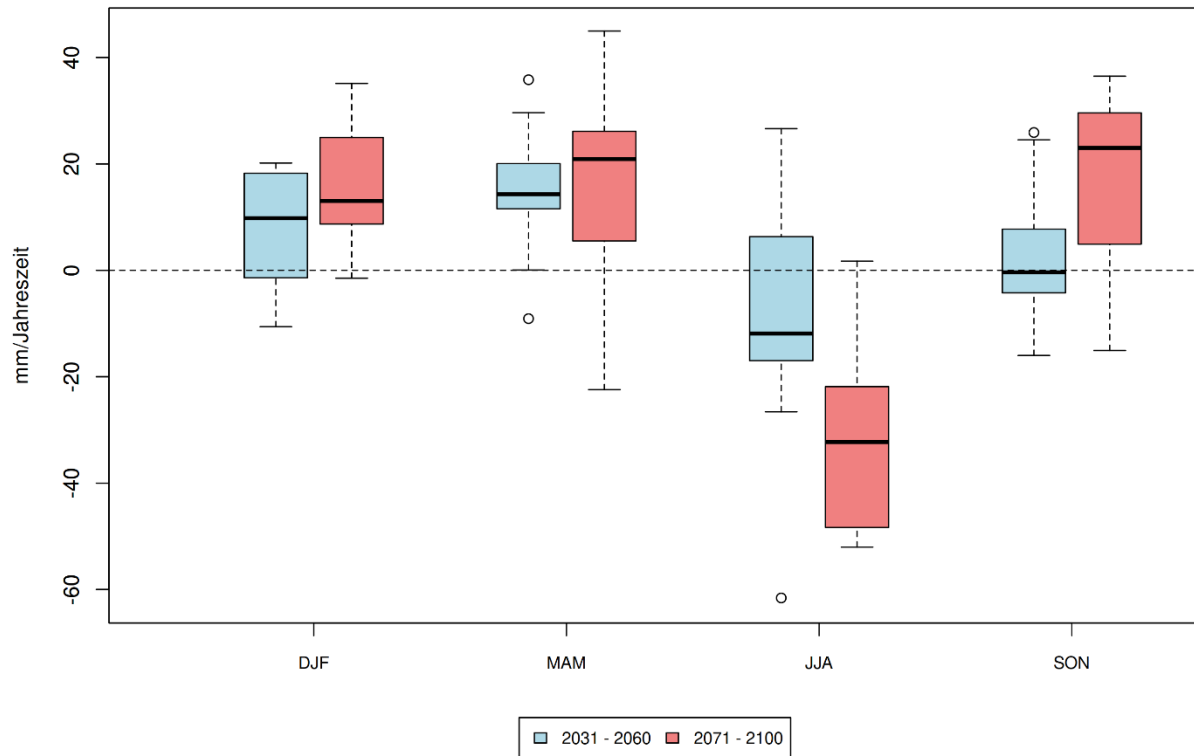


Abbildung 15: Änderung der saisonalen klimatischen Wasserbilanz in zwei Zukunftsperioden für Göttingen (RCP 8.5). Die X-Achse gibt die Abkürzungen für die Monate bzw. Jahreszeiten aus (bspw. JJA = Juni-Juli-August)



3. Analysemethoden

3.1 DAS STADTKLIMAMODELL FITNAH-3D

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

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

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

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

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

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

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



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

- Gelände / Orographie
- Landnutzung / Versiegelungsgrad
- Strukturhöhe

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

Für die Analysen im vorliegenden Projekt wurde eine horizontale Modellauflösung von 5 m gewählt, das entspricht für das gewählte Modellgebiet Göttingen und angrenzendes Umland rd. 11,3 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.

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

Nutzungsklasse	Beschreibung	Strukturhöhe [m]
1	Gebäude	individuell
2	unbebaut versiegelt	0
3	Gewässer	0
4	Gleisfläche	0
5	Freiland, niedrige Vegetation	0,5
6	Sand, Geröll	
7	Baum über Versiegelung	individuell
8	Baum über Freiland	individuell
9	naturferner Boden*	0,5
10	Baum auf naturfernem Boden	individuell

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

Mit Blick auf die benötigten Eingangsdaten besteht bei der gewählten hohen Auflösung erfahrungsgemäß die größte Herausforderung in der Erzeugung des Landnutzungsrasters und der Zuweisung einer individuellen Höheninformation. Das Raster sollte die reale Hauptnutzung innerhalb einer 25 m² großen Rasterzelle hinreichend gut abbilden. Im Modell können dabei die in Tabelle 6 aufgelisteten Realnutzungsklassen unterschieden



werden. Für Bäume besteht die Besonderheit, dass ihnen zusätzlich noch ein Attribut für den Untergrund, auf dem sie stehen, zugewiesen wird. Auf diese Weise können beispielsweise die Wirkungen von Parkbäumen über Rasenflächen von Effekten unterschieden werden, die sich unter Alleen im Straßenraum ergeben. Jede Nutzungsklasse ist im Modell mit diversen Eigenschaften (u.a. Rauigkeit, Wärmeleitfähigkeit) verbunden, auf deren Basis die notwendigen physikalischen Gleichungen gelöst werden.

Abbildung 16 zeigt zur Schaffung eines grundsätzlichen Modellverständnisses typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ausgewählter Nutzungsklassen während hochsommerlicher Strahlungswetterlagen, die in klimaökologischen Analysen dem Stand der Technik entsprechend regelmäßig als meteorologische Randbedingung verwendet werden. Die drei ausgewählten Nutzungsklassen – niedrige Vegetation, unbebaut versiegelt und Baum über niedriger Vegetation – zeigen grundsätzliche ähnliche Kurvenverläufe mit Minima in den (frühen) Nachtstunden sowie Maxima um den Zeitpunkt des Sonnenhöchststandes (modelliert wurde hier der 21.06.). Die höchsten Oberflächentemperaturen treten im Tagesgang durchgängig an unbebaut versiegelten Oberflächen auf. Sie haben die größte Wärmespeicherkapazität der ausgewählten Strukturen. Die geringsten Oberflächentemperaturen in der Nacht werden für die niedrige Vegetation um 04:00 morgens – also kurz vor Sonnenaufgang – modelliert. Hier zeigt sich die Wirkung einer ungehinderten nächtlichen Ausstrahlung bei wolkenlosem Himmel. Tagsüber zeigen sich die niedrigsten Temperaturen an den Bodenoberflächen unter dem Baum. Die relative Temperaturabsenkung ist insbesondere auf die verschattende Wirkung des Baumes sowie die Verdunstungskühlung zurückzuführen.

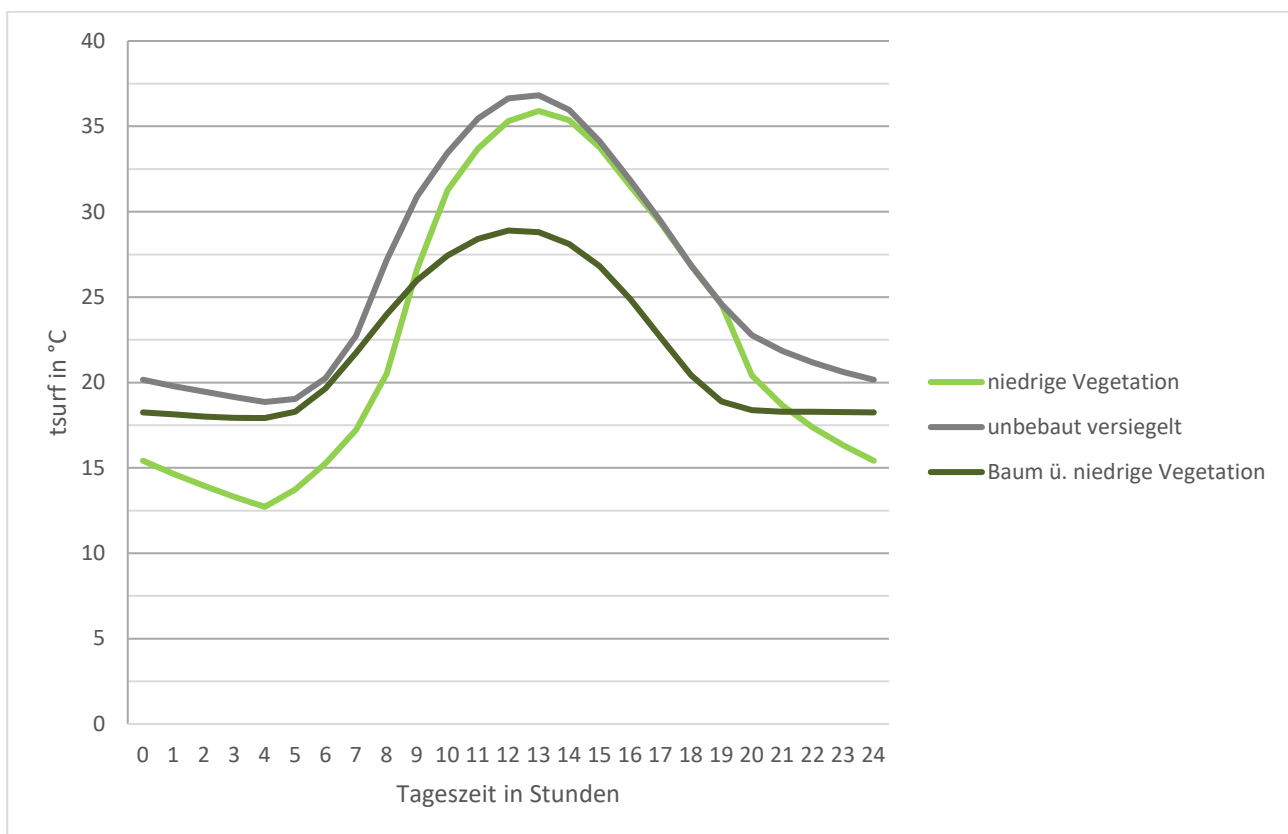


Abbildung 16: typische Tagesgänge der Oberflächentemperaturen ('Tsurf') für ausgewählte Nutzungsklassen von FITNAH-3D

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



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

Im Hinblick auf die stadtklimatischen Auswirkungen von verschiedenen Bodenfeuchten ist im Modell zu beachten, dass sich diese in der Realität über längere Zeiträume einstellen, also ähnlich wie größere Wasserkörper deutlicher langsamer auf Änderungen der meteorologischen Bedingungen reagieren als die Lufttemperatur. In Trockenzeiten sinkt die Bodenfeuchte je nach Ausgangsniveau also erst im Verlauf mehrerer Tage oder Wochen unter den Welkepunkt des Stadtgrüns ab, während sich spürbare Änderungen der Lufttemperatur innerhalb von Stunden ergeben. Daraus folgt, dass die Bodenfeuchte in einem modellierten Tagesgang nicht explizit berechnet werden kann, sondern vorgegeben werden muss. Standardmäßig liegt die Bodenfeuchte deutlich über dem Welkepunkt. Es wird also eine Situation vorgegeben, in der die Stadtvegetation weitgehend optimal verdunsten kann. Dies führt tagsüber dazu, dass die kurzweilige Einstrahlung zu einem Teil nicht in fühlbare Wärme (vereinfacht ausgedrückt also in eine Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur) umgewandelt wird, sondern für die Verdunstung aufgewendet wird und sich damit als latenter Energiefluss nicht temperaturerhöhend auswirkt. Wie Abbildung 17 am Beispiel eines idealisierten Tagesganges u.a. der bodennahen Lufttemperatur zeigt, führt diese Verdunstungskühlung tagsüber über einem mit Rasen bewachsenen Boden zu einer Reduktion von 1-2 K gegenüber einem ausgetrockneten Boden (Bodenfeuchte unter dem Welkepunkt) mit demselben Bewuchs. Nach Sonnenuntergang dreht sich dieser Effekt in deutlich abgeschwächter Form allmählich um. Der feuchte Boden verfügt gegenüber seinem trockenen Pendant über eine höhere Wärmespeicherkapazität und ist nachts folglich geringfügig (ca. 0,5 K) wärmer. Die Abbildung verdeutlicht aber auch, dass die Unterschiede zwischen einem trockenem und einem feuchten Boden mit demselben Bewuchs bei Weitem nicht so groß sind, wie die Unterschiede der beiden Bodenfeuchtevarianten zu asphaltierten Flächen. Hier ergeben sich im Maximum Abweichung von 6-7 K und die Kurve bleibt im gesamten Tagesgang über denen der rasenbewachsenen Flächen. In der Realität hat also eine Entsiegelung eine deutlich stärkere Wirkung auf die thermische Komponente als eine Erhöhung der Bodenfeuchte (z.B. durch Bewässerung). Die skizzierten Zusammenhänge und Prozesse spielen im Modell insbesondere für niedrige Vegetation und offenen Boden eine bedeutsame Rolle. Für Bäume bzw. Baumgruppen sind die Effekte der Verdunstungskühlung insbesondere im bodennahen Temperaturfeld deutlich geringer. Hier führen vorrangig Verschattungseffekte bzw. eine Reduktion der kurzweiligen Einstrahlung zu geringeren gefühlten Temperaturen im Vergleich zu nicht verschatteten Räumen.

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

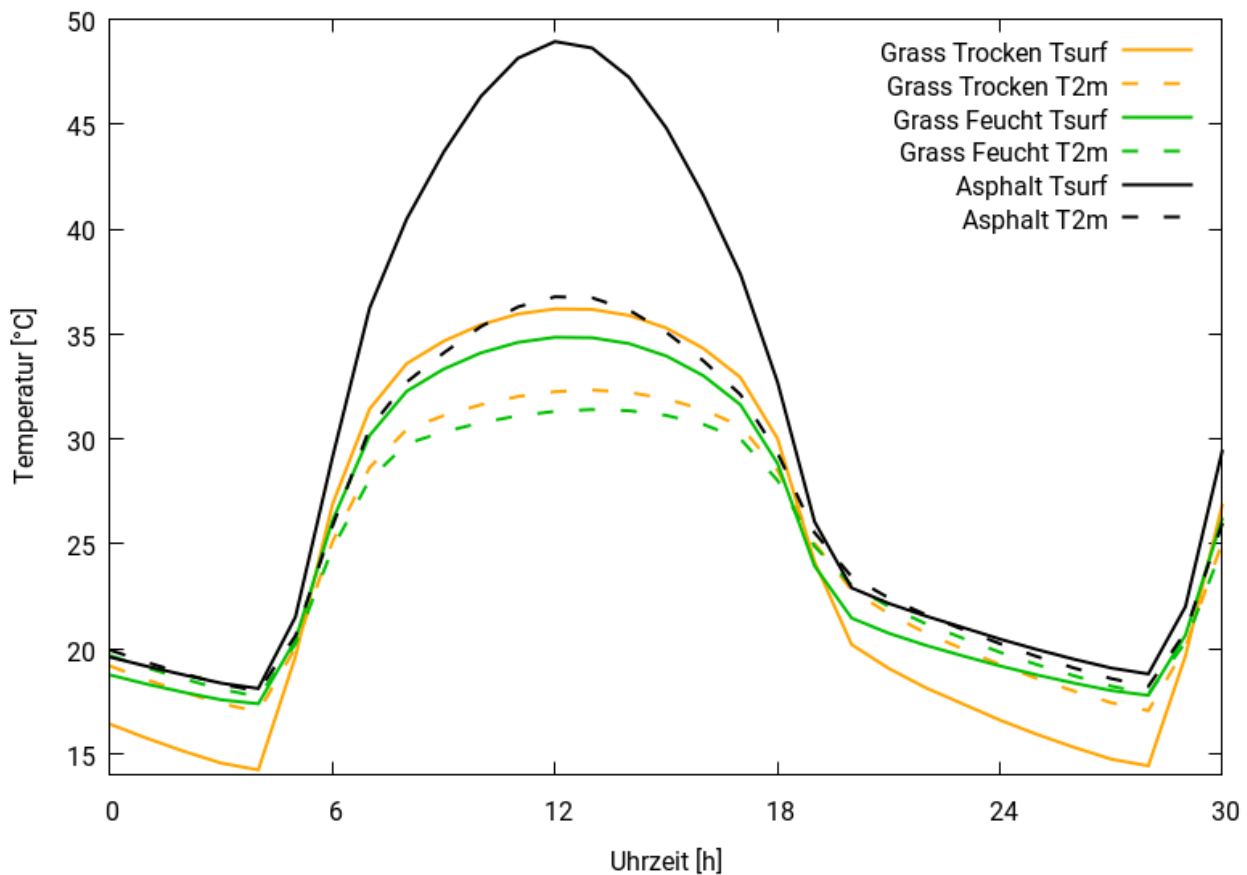


Abbildung 17: Idealisierter Tagesgang der Oberflächentemperatur ('Tsurf') sowie der bodennahen Lufttemperatur ('T2m') von bzw. über Asphalt sowie von bzw. über einem feuchten und einem trockenen grasbewachsenen Boden während eines hochsommerlichen Strahlungstages

3.1.1 SZENARIEN-ENTWICKLUNG

Das Grundgerüst des analytischen Vorgehens im Projekt bildet die sogenannte Delta-Methode. Die Delta-Methode ist ein von GEO-NET entwickeltes, ebenenunabhängiges Methodenpaket zur szenarienbasierten Untersuchung der Zukunftsperspektive in modellgestützten stadt- und regionalklimatischen Analysen. Der Einsatzbereich ist die Unterstützung formeller und informeller raumkonkreter Planungs- und Entscheidungsprozesse zur Klimafolgenanpassung in den Handlungsfeldern urbane Hitzevorsorge und urbaner Kaltlufthaushalt auf Landes- und Regionalebene sowie bei gesamt- und teilstädtischer Betrachtung.

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

In der angewandten Klimafolgenanpassung – und insbesondere beim Einsatz von sogenannten Wirkmodellen – hat sich die Fokussierung auf die Analyse von Extremszenarien etabliert. Dabei wird nicht die Gesamtheit aller denkbaren Zukünfte betrachtet, sondern eine Auswahl vorgenommen. Es werden die Szenarien gewählt, die den Analysezielen entsprechend Aussagen liefern. Dies sind oftmals besonders herausfordernde oder eine große Bandbreite aufweisende Szenarien, um mögliche Entwicklungspfade aufzuzeigen.

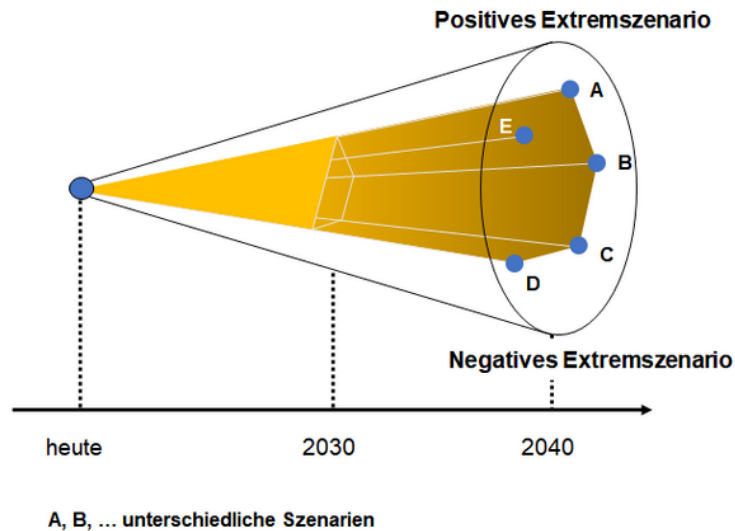


Abbildung 18: Der Szenario-Trichter (Quelle: Business Wissen 2023)

Im vorliegenden Fall wurden zwei Zukunftsszenarien festgelegt. Zielhorizont ist die Periode 2031 – 2060, mit Fokusjahr 2045. Das Szenario „mittelstarker Klimawandel“ basiert auf dem 15. Perzentil des RCP-Szenarios 4.5, während das Szenario „starker Klimawandel“ auf Basis des RCP-Szenarios 8.5 (85. Perzentil) erstellt wurde. Die Temperaturdifferenz für die Sommerperiode, zum Referenzzeitraum 1971 – 2000 wurde auf die Antriebs-temperatur der Modellläufe mit FITNAH-3D eingegeben (+0,8 K bzw. +2,1 K).

Für das Szenario „starker Klimawandel“ wurden zusätzlich die Auswirkungen einer zunehmenden abnehmen- den Bodenfeuchte berücksichtigt (vgl. Kap 2.2). In der Einheit % nFK (nutzbare Feldkapazität) bedeutet ein Wert < 30, dass Pflanzen unter Wasserstress stehen, und für niedrige Vegetation entsprechend am Tage der kühlende Effekt von Verdunstung ausfällt, während sie bei Werten > 50 % nFK optimal mit Wasser versorgt sind. Die nFK wurde im Szenario „starker Klimawandel“ auf 30 % gesetzt. Im Szenario „mittelstarker Klimawan- del“ wurde die Bodenfeuchte konstant gehalten, entspricht also derjenigen im Referenzszenario / Ist-Situa- tion, von 60 % nFK.

Für die Zukunftsszenarien wurden folgende städtebauliche Entwicklungsflächen, für die bereits eine konkrete Planung vorliegt, in die Modelleingangsdaten übernommen:

- Auf der Lieth
- Europaquartier Holtenser Berg
- Grüne Mitte Ebertal
- Kleehöfen
- Lange Rekesweg
- Menzelberg
- Nördlich Deneweg
- Wakenbreite
- Wiesental

Es wurden keine Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation modelliert. Ansatz ist hier, einzig die Auswirkungen des Klimawandels und der städtebaulichen Entwicklung (letztere begrenzt auf oben genann- ten Flächen) auf die zukünftige bioklimatische Situation zu untersuchen, um entsprechend Maßnahmen zu empfehlen. Die Entwicklung von Vegetation, besonders von Bäumen in der Stadt (Ausfall durch Hitzestress /



Schädlinge / Unwetter einerseits, jährliches Wachstum andererseits) kann aus informationstechnischen Gründen bisher nicht abgebildet werden. Tabelle 7 fasst die wichtigsten Merkmale der Szenarien und der Referenzsituation zusammen.

Tabelle 7: entwickelte Szenarien und ihre zentralen Merkmale

Szenario	Zentrale Merkmale
Status Quo, „Ist“	■ Modellierung mit aktueller FITNAH-3D Modellversion unter Verwendung einer Datenbasis von 2021, zusätzlich wurden 2 B-Pläne und Bauprojekte eingepflegt, die derzeit (ca. 2023) umgesetzt werden (vgl. Tabelle 9).
Szenario 1 „Mittelstarker Klimawandel“ 2045	■ Berücksichtigung eines relativ schwachen Temperaturänderungssignals von 0,8 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 4.5, 15. Perzentil) ■ Neun Städtebauliche Entwicklungsflächen (siehe oben)
Szenario 2 „Starker Klimawandel“ 2045	■ Berücksichtigung eines starken Temperaturänderungssignals von 2,1 K im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 (RCP 8.5, 85. Perzentil) ■ Berücksichtigung der Auswirkungen einer zunehmenden Sommer-trockenheit durch die Absenkung der Bodenfeuchte des Modells von 60 % auf 30 % nFK (nutzbare Feldkapazität) ■ Neun Städtebauliche Entwicklungsflächen (siehe oben)

3.2 AUFBEREITUNG DER MODELLEINGANGSDATEN

Nach Abschluss der Szenarien- und Methodenentwicklung erfolgte die eigentliche Aufbereitung der Eingangsdaten für die Modellläufe. Ziel der Eingangsdatenaufbereitung ist es, aus in unterschiedlichen Auflösungen und Datenformaten vorliegenden Geoinformationen gerasterte Modelleingangsdaten mit einem regelmäßigen Gitter mit einer Gitterweite von 5 m zu erzeugen. Das Modell benötigt flächendeckende Informationen zu folgenden Parametern:

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

Das Modellgebiet beinhaltet das gesamte Stadtgebiet von Göttingen sowie das angrenzende Umland. Die Abgrenzung erfolgte nach gutachterlich eingeschätzten Kaltlufteinzugsbereichen inkl. eines Sicherheitspuffers. Das Gebiet hat eine Größe von ca. 290 km² (Abbildung 19), weist also einen mehr als doppelt so großen Flächeninhalt auf wie das Stadtgebiet selbst (117 km²).

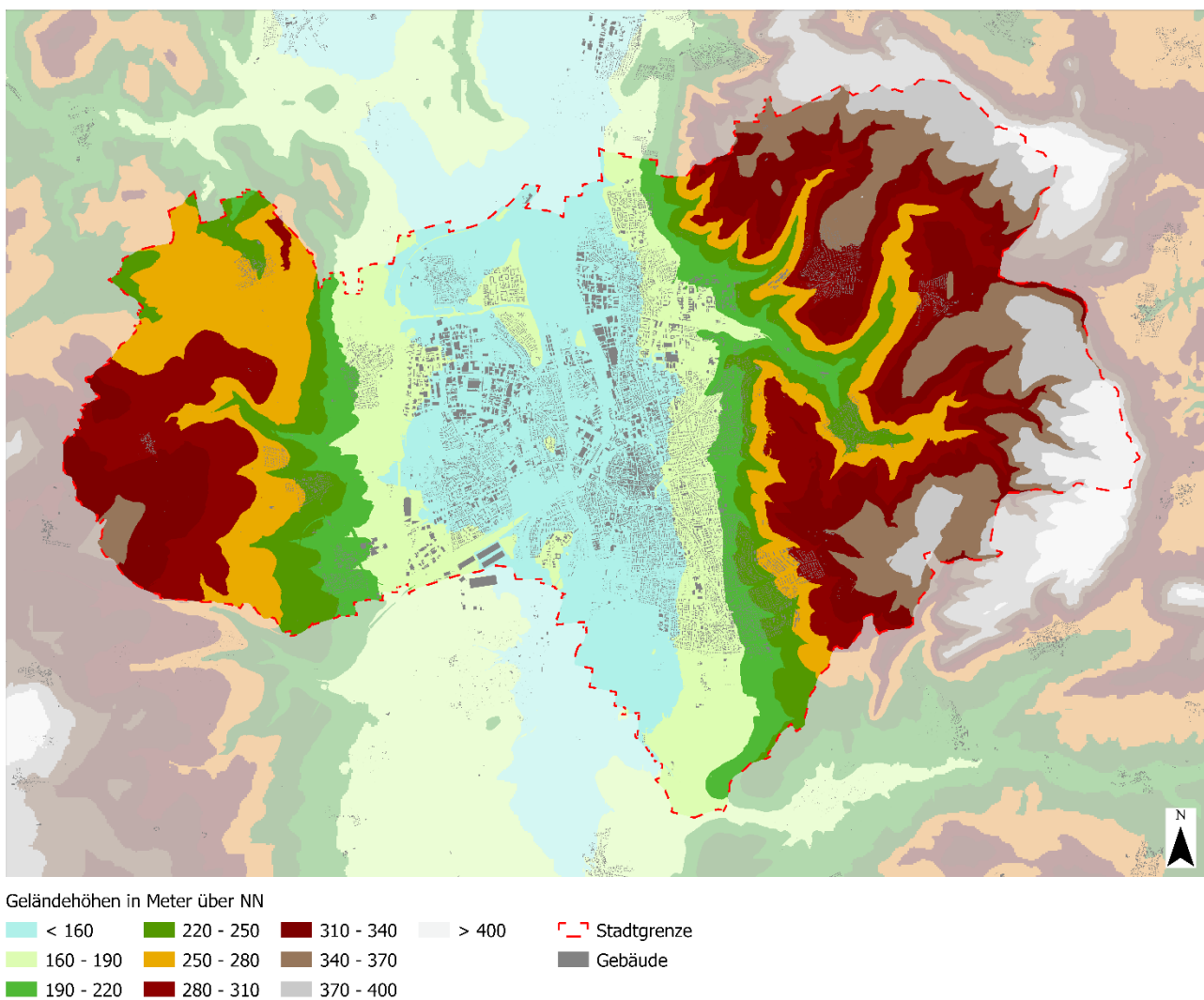


Abbildung 19: DGM im Untersuchungsgebiet mit Gebäudekulisse



Das Geländehöhenmodell liegt in einer Auflösung von 1 m vor. Die Geländehöhen in Göttingen liegen zwischen 137 m und 427 m über dem Meeresspiegel. Der Göttinger Wald mit der Mackenröder Spitze (427 m) als höchste Erhebung begrenzt das Stadtgebiet im Osten. Im Westen der Stadt sind die höchsten Bereiche die Genossenschaftsforste Knutbühren und Grone/ Groß Ellershausen. Die Kernstadt liegt im Leinegraben (Niedersächsische Flussniederung), welcher in Göttingen von Süden nach Norden entlang der Leine verläuft.

Tabelle 8 fasst die wichtigsten Datenquellen für die Zuweisung der Nutzungsklassen sowie der Geländehöhe und Strukturhöhen zusammen. Die Primärdaten liegen in einer hohen räumlichen Auflösung bzw. Genauigkeit / Lagetreue vor. Dennoch kommt es bei der Übertragung ins Modellraster trotz der für gesamtstädtischen Modellanalysen sehr hohen Auflösung zu Generalisierungseffekten. Diese können kleinräumig relevant sein, spielen für gesamtstädtische Fragestellungen aber eine untergeordnete Rolle.

Tabelle 8: Datenquellen zur Erstellung des Nutzungsrasters

Datenquelle	Aktualität	Datentyp	Auflösung	Verwendung
Geländehöhenmodell	2017	ESRI-Punkt-Shapefile	1 m	direkt Verwendung
Gebäudehöhen	2020	ESRI-Shapefile	LOD 1	direkte Verwendung
ALKIS-Nutzung + Gebäudeumrisse	2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungsklassen
OSM-Bahnverkehrslinien	2022	ESRI-Shapefile	-	Klassifikation zu FITNAH-Nutzungsklassen
RGBI-Luftbild „Frühjahr“ RGBI-Luftbild „Sommer“	2022 2016	Geo-TIFF Geo-TIFF	20 cm 2 m	Berechnung NDVI für Vegetationsmaske und versiegelte Flächen
Oberflächenmodell	2017	ASCII-Punktwolke „XYZ“	1 m	Berechnung eines normalisierten Oberflächenmodells (DOM minus DGM), Verschneidung mit NDVI für Vegetationshöhen
öffentliche Baumbestände	2021	ESRI-Shapefile	-	Ergänzung zu den Vegetationshöhen
Grünflächenkataster	übergeben 2022	ESRI-Shapefile	nur für öffentliche Grünflächen	Ergänzung der versiegelten- und Freiflächen
Lärmschutzwände	2022	Aus Luftbild digitalisiert	-	Digitalisierung der Lärmschutzwände + deren Höhe

Da für die Stadt Göttingen lediglich öffentliche Baumbestände als Punktinformationen im Rahmen des Baumkatasters zur Verfügung standen, mussten für die Erzeugung einer flächendeckenden Bauminformation andere Datenquellen hinzugezogen werden. Hierfür lagen Sommer-RGBI-Luftbilder aus dem Jahr 2016 vor, die in einen Vegetationsindex (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index) überführt wurden. Ein NDVI-Schwellenwert von „0“ war geeignet, um die Bäume von vegetationslosen Flächen zu trennen. In Kombination mit der Strukturhöhe aus dem normalisierten Oberflächenmodell konnten auf diese Weise Baumstandorte identifiziert werden (Abbildung 20). Das erzeugte Raster bedurfte einer manuellen, visuellen Überprüfung, da beispielsweise Strommasten über Ackerflächen durch die ermittelte Strukturhöhe während der automatisier-

ten Bearbeitung als Baum fehlinterpretiert werden. Zusätzlich war es aufgrund der gewählten 5 m x 5 m-Rasterauflösung nicht immer möglich, einzelne kleinkronige Bäume (Kronendurchmesser von etwa 3 Metern und kleiner) separat im Raster auszuweisen.

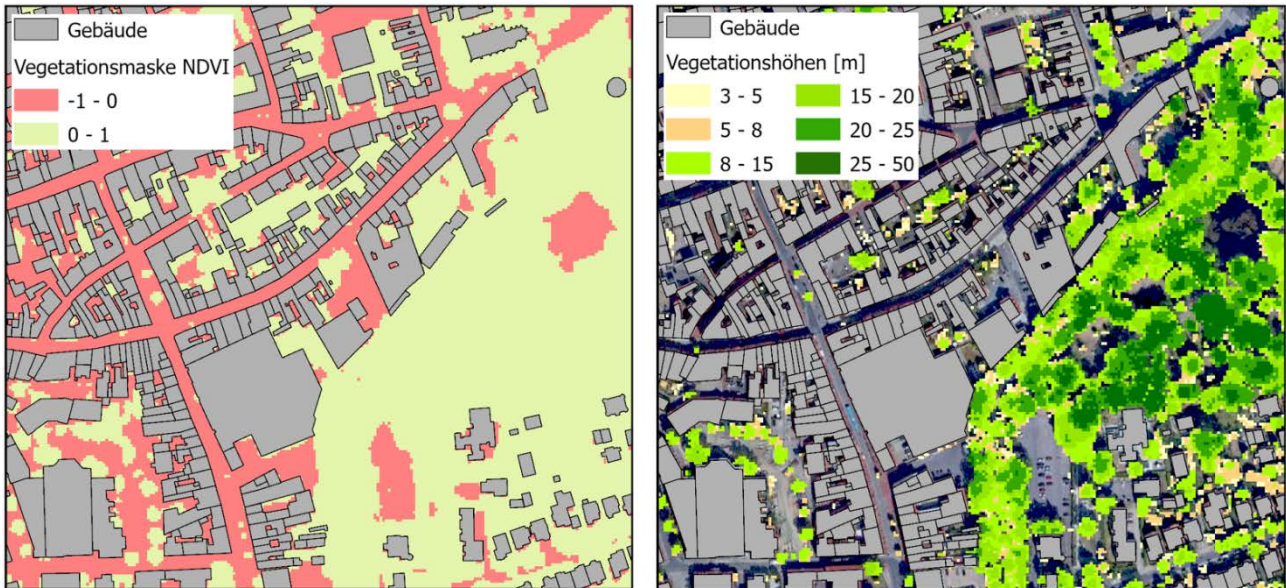


Abbildung 20: Ableitung der Vegetationshöhen aus dem NDVI in Kombination mit dem normalisierten Oberflächenmodell

Die Modelleingangsdaten sollen den aktuellen Sachstand bzw. die Bebauungssituation in Götting im Jahre 2022 repräsentieren. Bereits beschlossene Bebauungspläne sowie schon im Bau befindliche Baustrukturen wurden in die Modelleingangsdaten eingearbeitet (Tabelle 9). Neben den Bebauungsplänen wurde auch ein Gebäudeabgleich mit dem Luftbild aus dem Jahr 2022 gemacht. Gebäude, welche in der Geodatenbasis noch



Abbildung 21: Ausschnitt der klassifizierten Landnutzung im 5 m Modell-Raster



nicht vorhanden waren, wurden manuell eingearbeitet. Abbildung 21 zeigt für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes die in das Modell eingeflossenen Nutzungsklassen.

Tabelle 9: in die Modelleingangsdaten eingeflossene B-Pläne

	B-Plan	Standort	Einarbeitung
1	Nr. 32 - 7. Änderung „Ehemalige Lüttichkaserne“	Liesel Quartier am Gothaer Platz	neues Wohngebiet
2	Nr. 61 - „Wohnpark Junkerberg“	Junkerberg	neues Wohngebiet

3.2.1 RAHMEN- UND RANDBEDINGUNGEN

Sämtlichen Modellrechnungen liegt dem Stand der Technik entsprechend, ein sogenannter autochthoner Sommertag als meteorologische Rahmenbedingung zugrunde. Typischerweise führt ein autochthoner Sommertag aufgrund der hohen Einstrahlung und des geringen, großräumig (allochthon) bedingten Luftaustauschs zu Situationen, die im Jahresverlauf in Teilbereichen der Stadt die höchsten thermischen Belastungen mit sich bringen. Modelliert wurde ein Tagesgang mit Start um 21:00 bis 14:00 Uhr des Folgetages zum Datum des Sonnenhöchststandes (21. Juni). Die Wetterlage wird durch wolkenlosen Himmel und einen nur sehr schwach überlagernden synoptischen Wind gekennzeichnet, sodass sich die lokalklimatischen Besonderheiten in Göttingen und Umgebung besonders gut ausprägen. Charakteristisch für solch eine sommerliche (Hochdruck-) Wetterlage sind die in Kapitel 1.2 beschriebenen Prozesse rund um den Wärmeinseleffekt und die Kaltluftdynamik.

In Abbildung 22 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.

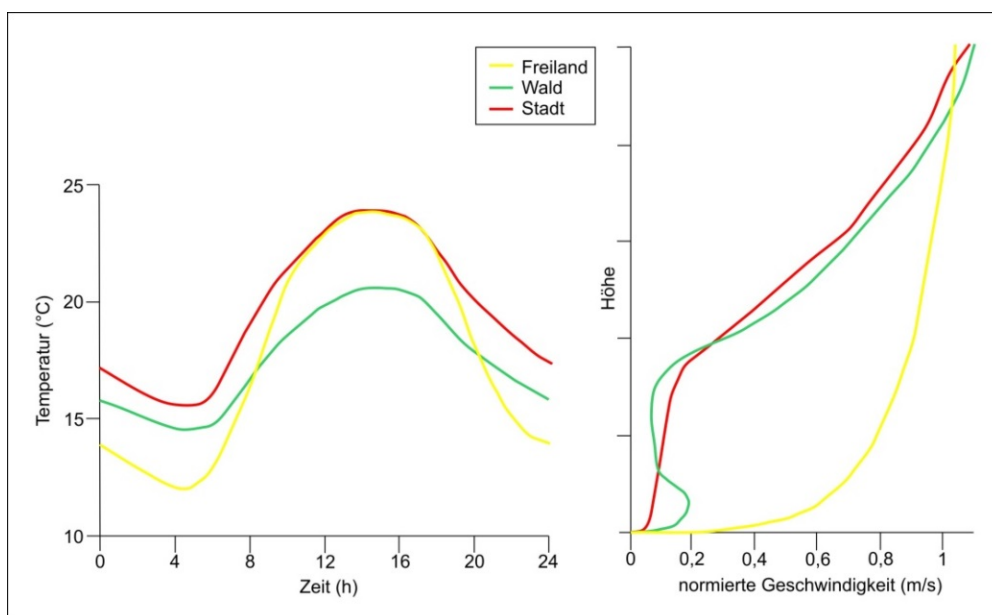


Abbildung 22: Schematische Darstellung des Tagesgangs der bodennahen Lufttemperatur und Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit zur Mittagszeit über verschiedenen Landnutzungen (eigene Darstellung nach Groß 1992)

Die Berücksichtigung der in Kapitel 2.3 beschriebenen Ausprägungen des regionalen Klimawandels in den Modellläufen für die Zukunftsszenarien erfolgt über eine Variation der Ausgangsbedingungen. Die Aufprägung des Temperatursignals für die beiden Modellrechnungen wird auf Basis des in der Literatur als „surrogate-climate-change“ beschriebenen Ansatzes vorgenommen (Schär et al. 1996). Das Delta wird dabei auf das Ausgangsprofil der Lufttemperatur auf allen Höhengniveaus addiert. Das 1D-Vertikalprofil zum Start der numerischen Simulation um 21 Uhr ist stabil geschichtet. Die absolute Temperatur nimmt mit 0,65 K/100m mit der Höhe ab. Die Windgeschwindigkeit in allen Höhen beträgt 0 m/s. Zum Simulationsstart beträgt die Temperatur am Boden 21,0 °C in der Ist-Situation bzw. 21,8 °C (Szenario „mittelstarker Klimawandel“) sowie 23,1 °C (Szenario „starker Klimawandel“).

Eine dauerhafte Erwärmung der Atmosphäre setzt sich auch im Erdboden fort, woraus höhere Bodentemperaturen resultieren. Gleichzeitig führen geringere Niederschläge in den Sommermonaten und eine stärkere Verdunstung zu einer erhöhten Austrocknung der Bodenschicht und damit zu einer etwas schlechteren Wärmeleitfähigkeit. Wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, wurde die Bodenfeuchte im Szenario „starker Klimawandel“ entsprechend auf 30 % nFK gesetzt, welches dem Welkepunkt entspricht. Nutzungsklassen mit niedriger Vegetation können dann nicht mehr verdunsten, sodass im Modell die einfallende kurzweilige Energie unmittelbar in fühlbare Wärme umgewandelt wird, was insbesondere in der Tagsituation zu einer Erhöhung der bodennahen Lufttemperatur beiträgt.

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

3.2.2 MODELLAUSGABEGRÖSSEN

FITNAH gibt für den Themenkomplex thermischer Komfort und Kaltlufthaushalt neun verschiedene physikalisch-meteorologische Ausgabegrößen für mehr als 20 Vertikalschichten und für stündliche – bei Bedarf für noch kürzere – Zeitschnitte aus (Tabelle 10). Insgesamt ergibt sich somit eine deutlich vierstellige Anzahl an Variablendimensionen als Ausgangspunkt für die aufgabenstellungsorientierte Weiterverarbeitung dieses Datensatzes mit einem Umfang von mehreren hundert Gigabyte. Zu den wesentlichsten Parametern zählen Strömungsparameter (U/V/W-Komponenten des Windes) sowie die die bodennahe Lufttemperatur beeinflussende Größen wie der fühlbare und latente Wärmestrom.



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

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

Um die der Analyse zugrunde liegenden Fragestellungen bearbeiten zu können, hat sich in der gesamten Fachdisziplin eine gutachterliche Verdichtung und Weiterverarbeitung der vom Modell berechneten Parameter etabliert. In diesem sogenannten post-processing Schritt werden aus den o.g. Modellausgabegrößen standardisierte Kenngrößen abgeleitet, die von Anwendern in der Regional- und Stadtplanung mit entsprechenden Grundkenntnissen und von Fachgutachtern gleichermaßen verstanden und interpretiert werden. Dieses Vorgehen stellt den bestmöglichen Kompromiss zwischen aussagekräftigen, qualitativ hochwertigen und dennoch allgemeinverständlichen Ergebnissen dar. Für die FITNAH Ergebnisse hat sich in den letzten 20 Jahren ein Set aus sechs abgeleiteten Ausgabegrößen für spezielle Auswerteniveaus und Auswertezeitpunkte entwickelt, von denen je nach Projektzielen ein individueller Parametersatz zusammengestellt wird (Tabelle 11).

In der Maximalvariante – die vor allem im Zusammenhang mit umfassenden Stadtklimaanalysen zum Tragen kommt – handelt es sich insbesondere um Windfelder, Kaltluftparameter, absolute Lufttemperaturen und humanbioklimatischen Indizes. Bezüglich der zu betrachtenden Vertikalschichten liegt der Fokus auf dem bodennahen Niveau, was dem Aufenthaltsbereich des Menschen entspricht. Mit der Kaltluftvolumenstromdichte existiert hier eine Ausnahme, bei der bis zu einer spezifischen Höhe integriert wird. Die Auswertezeitpunkte liegen für die nächtlichen Kenngrößen um 04:00 Uhr morgens des modellierten Tagesgangs als Zeitpunkt der maximalen Abkühlung bzw. Ausprägung des Kaltluftprozessgeschehens sowie für die Indizes der Tagsituation um 14:00 Uhr als Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung.



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

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

3.2.3 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 Modell Anwendungen vorgesehen ist. In diesem Arbeitsschritt unterzieht das bearbeitende Projektteam die Modellergebnisse einem teilformalisierten Plausibilitäts-Check. Hierbei werden die Modellergebnisse zum einen anhand von ausgewählten Teilgebieten im Rahmen einer Teamsitzung fachlich diskutiert sowie ggf. geostatistischen ad hoc Analysen unterzogen bzw. mit vergleichbaren Ergebnissen aus anderen Projekten in Beziehung gesetzt. Die Teilgebiete sind so gewählt, dass sie alle im Rahmen vorheriger Arbeitsschritte identifizierten Besonderheiten sowie alle Abweichungen vom bisherigen Modellstandard abdecken. Die Modellergebnisse gelten dann als qualitätsgesichert, wenn das Projektteam durch einstimmiges Votum deren hinreichende Qualität erklärt. Werden signifikante Auffälligkeiten festgestellt, sind diese in einem ggf. iterativen Prozess kostenneutral für den Auftraggeber zu bereinigen.

Im vorliegenden Fall erfolgte die Qualitätssicherung getrennt nach den drei Modellläufen, wobei in den Szenarien insbesondere auch die angenommene Änderung durch den Klimawandel in den Fokus genommen wurde. Alle Modellläufe durchliefen erfolgreich die Qualitätssicherung.

3.2.4 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 hinreichend gut repräsentieren. Den Maßstab zur Gütebeurteilung bildet dabei das anvisierte Einsatzgebiet des Modells. Dieser Ansatz gilt für (Stadt-)Klimamodelle aufgrund der Komplexität der in physikalischen Gleichungen abzubildenden (Stadt-)Atmosphäre in besonderem Maße. Folglich ist das hier eingesetzte Modell FITNAH-3D nicht mit der Ambition verknüpft, restlos alle ablaufenden Prozesse bis ins letzte Detail abbilden zu wollen, sondern jene Prozesse, die zur Erfüllung der speziellen Aufgabe notwendig sind. FITNAH-3D erfüllt dabei die in der VDI-Richtlinie 3787, Bl. 7 (VDI 2015) definierten Standards zur Windfeldmodellierung. Allerdings existieren Prozesse, deren Abbildung gemäß VDI-Richtlinien nicht zu gewährleisten ist, aus denen sich jedoch gewisse Unsicherheiten ergeben können. So wird FITNAH-3D dem Stand der Technik entsprechend beispielsweise im sogenannten RANS-Modus (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) betrieben, bei dem Turbulenzen nicht explizit, sondern mithilfe von vereinfachenden Gleichungen abgebildet werden. Demgegenüber steht der Turbulenzen auflösende sog. LES-Modus (Large Eddy Simulation), der im Zusammenhang mit Stadtklimaanwendungen noch Gegenstand von F&E-Vorhaben ist.

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

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

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

Im vorliegenden Projekt wurden zunächst sämtliche Eingangsdaten in der Analyse in ein regelmäßiges Raster überführt, bei dem ein Gitterpunkt die Hauptnutzung auf einer Fläche von 25 m² (5 * 5 Meter) repräsentiert. Zwar liegen die Unsicherheiten dieses Gebäude und Grünstrukturen auflösenden Ansatzes deutlich unterhalb von meso-skalierten Ansätzen mit parametrisierten Landnutzungsklassen, dennoch werden sehr kleinteilige Strukturen auch in dieser hohen Auflösung noch unterschätzt. Städte haben besonders kleinteilige Strukturen, sodass oftmals gleich mehrere verschiedene Nutzungsstrukturen in ein und derselben Rasterzelle liegen. In den Eingangsdaten und damit auch im Modell wird jedoch nur die Nutzung berücksichtigt, die den größten Flächenanteil in der Rasterzelle einnimmt. So können z.B. besonders kleinkronige Einzelbäume in einem 5 m-Gitter nicht erfasst werden, was sich insbesondere auf die PET am Tag auswirkt. Es kann demnach vorkommen, dass eine Straße mit kleinkronigen Einzelbäumen nicht oder zumindest nicht durchgängig als Allee erkannt wird. Die betroffenen Teilräume sind in der Regel aber sehr klein mit sehr lokalen Effekten, sodass in der gesamtstädtischen Perspektive bzw. in den grundsätzlichen Schlussfolgerungen keine relevanten Auswirkungen zu erwarten sind. Dennoch empfiehlt sich im konkreten Anwendungs-/Zweifelsfall immer ein kritischer ortskundiger Blick auf die zugrunde liegenden Eingangsdaten.

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

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

Studien deuten darauf hin, dass diese und andere Unsicherheiten in den Modelleingangsdaten im kleinräumigen Einzelfall einen Unterschied bei der Lufttemperatur in 2 m Höhe um die Mittagszeit von 1,5 K und in den Nachtstunden von 1,1 K betragen kann, was wiederum zu kleinräumigen Auswirkungen auf thermisch bedingte Strömungen führen kann (Groß 2016). 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 modelltechnisch abgebildet werden können.

Kapitel 3.2 legt die jeweils verwendeten Datenquellen und –erhebungszeitpunkte detailliert offen. Die älteste Information stammt aus 2017 und ist das Oberflächenmodell, aus welchem die Vegetationshöhen abgeleitet wurden. Die Vegetationshöhen der öffentlichen Baumbestände wurden allerdings mit Informationen aus 2021



ergänzt. Das RGBI-Luftbild, welches (neben der Festlegung der versiegelten Flächen) die Verortung von Vegetation definiert, ist aus 2022 und damit aktuell. Der Datensatz zu Gebäuden und deren Höhen stammt aus 2020, wurde aber durch Abgleich mit Luftbild und Oberflächenmodell verifiziert und ggfs. ergänzt.

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

4. Ergebnisse der numerischen Modellierungen

Im Folgenden werden die rasterbasierten Modellergebnisse der Parameter Lufttemperatur, Kaltluftströmungsfeld und Kaltluftvolumenstrom (Nachtsituation) sowie Physiologisch Äquivalente Temperatur (PET; Tagsituation) für den Status quo beschrieben. Die Ergebnisse basieren auf einer horizontalen räumlichen Auflösung von 5 m (pro Rasterzelle ein Wert) und einer autochthonen Sommerwetterlage (vgl. Kapitel 3.2.1). Mit Ausnahme des Kaltluftvolumenstroms gelten sie für den bodennahen Aufenthaltsbereich des Menschen und betrachten die Zeitpunkte 04:00 Uhr für die Nachtsituation bzw. 14:00 Uhr für die Tagsituation. Für die Darstellung in den Ergebniskarten wurden die Werte mittels einer bilinearen Interpolation geglättet. Die Modellergebnisse wurden in Form von PDF-Karten sowie als Geodaten (georeferenzierte Raster (*.tif)) an die Auftraggeber übergeben.

4.1 NÄCHTLICHES TEMPERATURFELD UND KALTLUFTPRODUKTION

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

In Abhängigkeit der Landnutzung bzw. Boden- und Oberflächeneigenschaften sowie beeinflusst durch die Lage und Höhe des Standorts, kühlen Flächen in den Abend- und Nachtstunden unterschiedlich stark ab. So reicht die bodennahe nächtliche Lufttemperatur im Modellergebnis in der Ist-Situation von ca. 13 bis 15 °C über siedlungsfernen Freiflächen bis knapp 20 °C in hoch versiegelten Bereichen und umfasst in Göttingen damit eine Spannweite von mehr als 6 °C (Abbildung 23).

Die höchsten nächtlichen Belastungen (um 19 bis 20 °C in der Ist-Situation, und bis zu 22 °C im Szenario „starker Klimawandel“) treten vorwiegend in der Göttinger Altstadt, aber auch in den hoch versiegelten Gewerbegebieten (bspw. am Güterverkehrszentrum, Industriegebiet Grone-Ost und Grone-West, Industrie- und Gewerbegebiet im westlichen Weende sowie in Rosdorf) auf. Große Parkplatzflächen, sofern weitgehend versiegelt und ohne Beschattung, sind ebenso als nächtliche Wärmeinseln zu erkennen (bspw. Kaufpark, Klinikum) wie einige dicht bebaute Hauptverkehrsstraßen (bspw. Weender Landstraße, Groner Landstraße). Die geringsten nächtlichen Lufttemperaturen des Siedlungsraums dagegen sind in den aufgelockerten Wohnsiedlungsbereichen am Stadtrand und in den außenliegenden Ortsteilen zu finden. Die Siedlungslagen am Fuße der Waldflächen im Osten der Kernstadt (Geismar, Ostviertel, aber auch Weende) erhalten aufgrund ihrer Lage an bewaldeten Hangbereichen große Kaltluftmengen, welche in Zusammenhang mit starker Durchgrünung bzw. relativ lockerer Bebauung für niedrige Lufttemperaturen in der Nacht sorgen (ca. 14 bis 16 °C (Ist-Situation) bzw. 16 bis 18 °C im Szenario „starker Klimawandel“). Auch die dörflichen Ortsteile, welche an landwirtschaftliche Flächen angrenzen (bspw. Nikolausberg, Elliehausen, Holtensen) werden vergleichbar gut mit Kaltluft versorgt. Charakteristisch für viele Wohnquartiere im gesamten Untersuchungsgebiet ist der deutliche Unterschied zwischen den oberflächennahen Lufttemperaturen im dicht bebauten Straßenbereich und in den oftmals großflächigen Grünbereichen hinter den Gebäuden. Hier zeigen sich Temperaturdifferenzen von bis zu 4 °C.

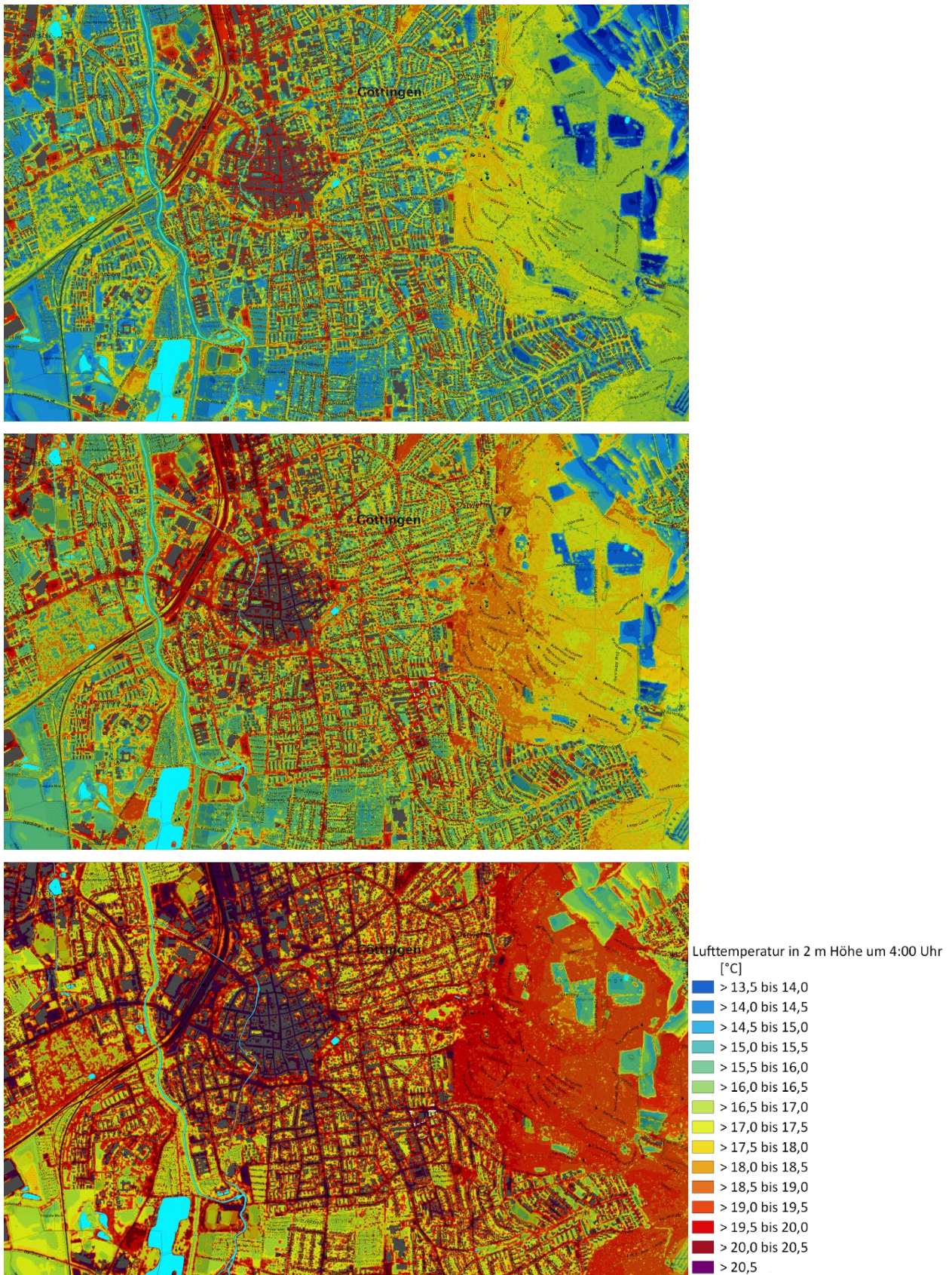


Abbildung 23: Bodennahe nächtliche Lufttemperatur in einem Ausschnitt des zentralen Göttinger Stadtgebiets. Oben: Ist-Situation, Mitte: Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“, Unten: Zukunftsszenario „starker Klimawandel“. Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

Grünflächen wirken ausgleichend auf die höheren Lufttemperaturen im Siedlungsraum, wobei sich hier ein differenziertes Bild ergibt. Freiflächen im Umland - vor allem die landwirtschaftlichen Flächen um die Stadtteile außerhalb der Kernstadt – kühlen am stärksten aus und weisen überwiegend Werte zwischen 13 - 15 °C (bzw. 15 – 17 °C im Szenario „starker Klimawandel“) auf. In Wäldern bzw. auf Flächen mit dichtem Baumbestand mindert dagegen das Kronendach die nächtliche Ausstrahlung und somit die Auskühlung der Oberfläche. Die bodennahen Temperaturen im Göttinger Wald liegen bei etwa 15 – 17 °C (bzw. im Szenario „starker Klimawandel“ bis zu 19 °C) in der Nacht. Auch wenn dies teilweise höhere Temperaturen als in stark durchgrünzten Siedlungsräumen zur Folge hat, nehmen größere Waldgebiete bzw. baumbestandene Flächen eine wichtige Funktion als Frischluftproduktionsgebiete ein, in denen sauerstoffreiche und wenig belastete Luft entsteht. Zudem kann sich Kaltluft auch über dem Kronendach bilden.

Die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser sorgt für einen verringerten Tagesgang der Lufttemperatur über Gewässern und deren unmittelbaren Nahbereich, sodass die nächtlichen Temperaturen unter Umständen höher als in der Umgebung sein können. Entlang der Leine sowie z. B. an den Uferbereichen des Kieselsees ist eine leicht erhöhte (wenige Zehntelgrad °C) Lufttemperatur festzustellen.

Wie beschrieben, wirkt die Abkühlung der Bodenoberfläche maßgeblich auf das nächtliche Temperaturfeld. Als Maß für die Abkühlung kann die **Kaltluftproduktionsrate** verwendet werden, die anzeigt, wie viel Kaltluft über einer Fläche entsteht. Die Maßeinheit hier ist m³ pro m² pro Stunde. In Abbildung 24 wird die flächenhafte Verteilung der Kaltluftproduktionsrate zum Zeitpunkt 4 Uhr nachts für den Großteil der Kernstadt und ihr Umfeld dargestellt. Über versiegelten Flächen (Straßen und Plätze) findet nahezu keine Kaltluftproduktion statt. Am meisten Kaltluft wird über landwirtschaftlichen Freiflächen produziert, vor allem in Kombination mit Hanglagen (vgl. Kap. 2.2). Innerhalb der Siedlungsquartiere ist eine Vielzahl an unversiegelten oder gering versiegelten Grünflächen mit lokaler Kaltluftproduktion zu erkennen. Mit Bäumen bestandene Flächen sowie auch die Waldflächen des Göttinger Walds zeigen eine deutlich geringere Kaltluftproduktionsrate.



Abbildung 24: Nächtliche Kaltluftproduktionsrate im Umfeld der Kernstadt, Ist-Situation.

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

4.2 KALTLUFTSTRÖMUNGSFELD IN DER NACHT

Der Kaltluftvolumenstrom wird wesentlich durch das Relief bestimmt und zeigt im reliefierten Gelände eine große Variabilität. Die **Kaltluftvolumenstromdichte** wird in Kubikmeter Kaltluft, die pro Sekunde über eine gedachte Linie von einem Meter Breite fließt, angegeben ($\text{m}^3/\text{m}/\text{s}$). Abbildung 25 zeigt die Kaltluftvolumenstromdichte und die bodennahe Strömungsrichtung für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets. Die Göttinger Kernstadt wird nachts vorwiegend – dem Gefälle folgend – aus westlichen und östlichen Richtungen angeströmt. Die größten Kaltluftmengen fließen dabei über baumlose (landwirtschaftliche) Freiflächen, mit teilweise über $50 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$. Treffen die Kaltluftmassen auf Siedlungsgebiete, so tragen sie dort effektiv zur Abkühlung bei. Die zentralen Stadtbereiche Göttingens werden sowohl aus östlicher Richtung (Göttinger Wald) als auch von Nord und Süd durch die thermisch bedingte Ausgleichsströmung entlang der Leine und angrenzender Grünflächen mit Kaltluft versorgt. Bebauung und Versiegelung schwächen den Kaltluftstrom ab und im Zentrum der Altstadt beträgt die Kaltluftvolumenstromdichte nur noch weniger als $10 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$.

Die für den Siedlungsraum besonders relevanten Kaltluftprozesse werden in der Klimaanalysekarte, u.a. über die Darstellung von Kaltluftleitbahnen hervorgehoben (Kapitel 5.3).

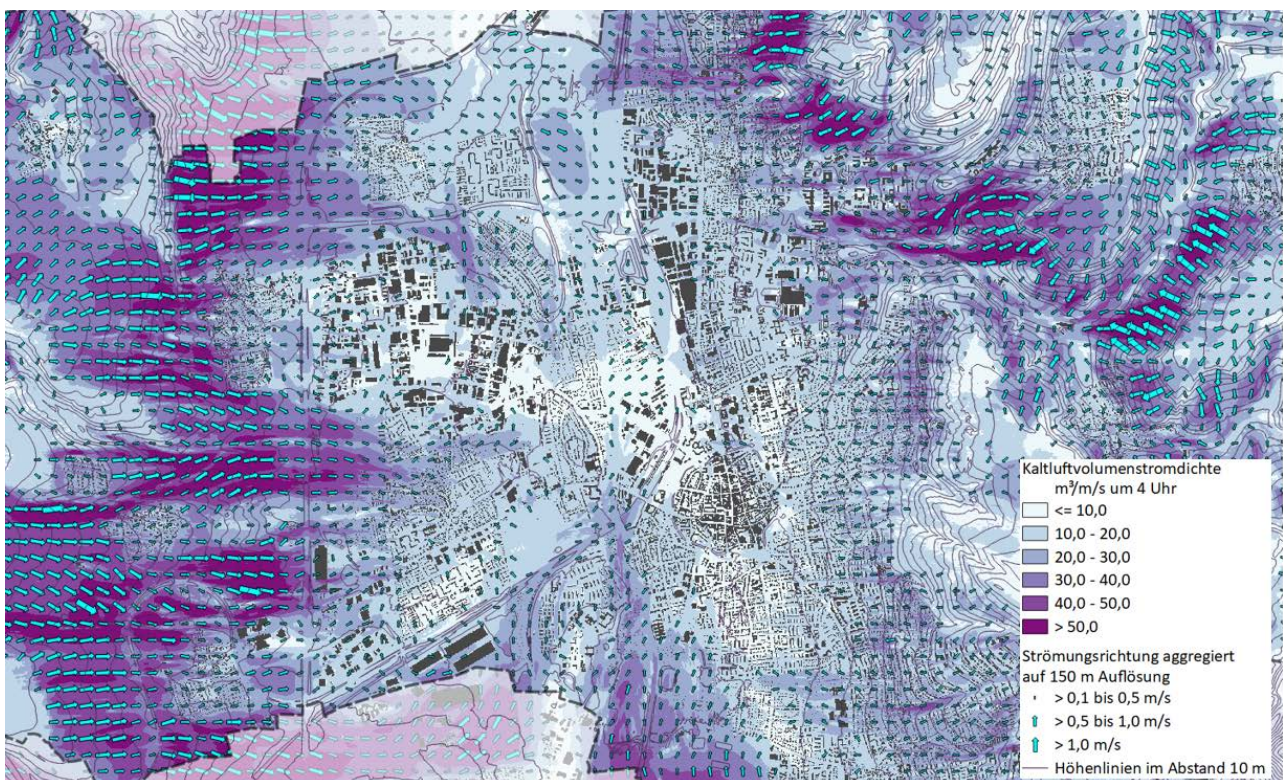


Abbildung 25: Nächtlicher Kaltluftvolumenstrom im Umfeld der Kernstadt, Ist-Situation.

Die geschilderten Kaltluftabflüsse treten über die komplette untere Luftschicht bis ca. 50 m Höhe auf. Für das bodennahe Kaltluftgeschehen wird der Parameter **Strömungsgeschwindigkeit** herangezogen. In Abbildung 26 ist für einen Ausschnitt von Göttingen die Strömungsgeschwindigkeit und -richtung der Kaltluftströmung in 2 m über Grund dargestellt. Die Strömungspfeile werden hier in einer Auflösung von 10 m dargestellt (also

vierfach größer als die Original-Modellergebnisse mit 5 * 5 m). Deutlich ist über der Grünfläche im rechten Bereich zu erkennen, wie die Kaltluft mit relativ hoher Geschwindigkeit (dargestellt über die Größe der Pfeile) in Richtung Wohnsiedlungen strömt. Beim Auftreffen auf Gebäude und versiegelte Bereiche vermindert sich der Kaltluftstrom. Baustrukturen sind klare Strömungshindernisse. Breite Straßen und Plätze sowie Parks dagegen können wertvolle Transportlinien bzw. „Trittsteine“ für Kaltluft sein, so dient beispielsweise die Straße Sandersbeek im weiteren Verlauf dem Kaltlufttransport in westlich anschließende Gebiete.

Die hochauflösende Darstellung in den Modellergebnissen zeigt, dass die bodennahe Kaltluftströmung auf Hindernisse reagiert und lokaler auftritt als die eher flächenhaften Kaltluftvolumenströme. So sind kleinräumige Ausgleichsströmungen zu erkennen (Flurwinde), die auch unabhängig vom Relief auftreten können.

Die bodennahe Kaltluftströmung (Richtung und Geschwindigkeit) bezieht sich auf eine Höhe 2 m über Grund, sodass sie unter Baumbestand sehr gering ausfällt, da die Betrachtungsebene unterhalb des Kronendachs liegt. Auch die Kaltluftvolumenstromdichte (siehe weiter oben) ist im Baumbestand im Vergleich zu Freiflächen reduziert, andererseits ergeben sich gerade in den Hangbereichen Kaltluftabflüsse aus den Wäldern.

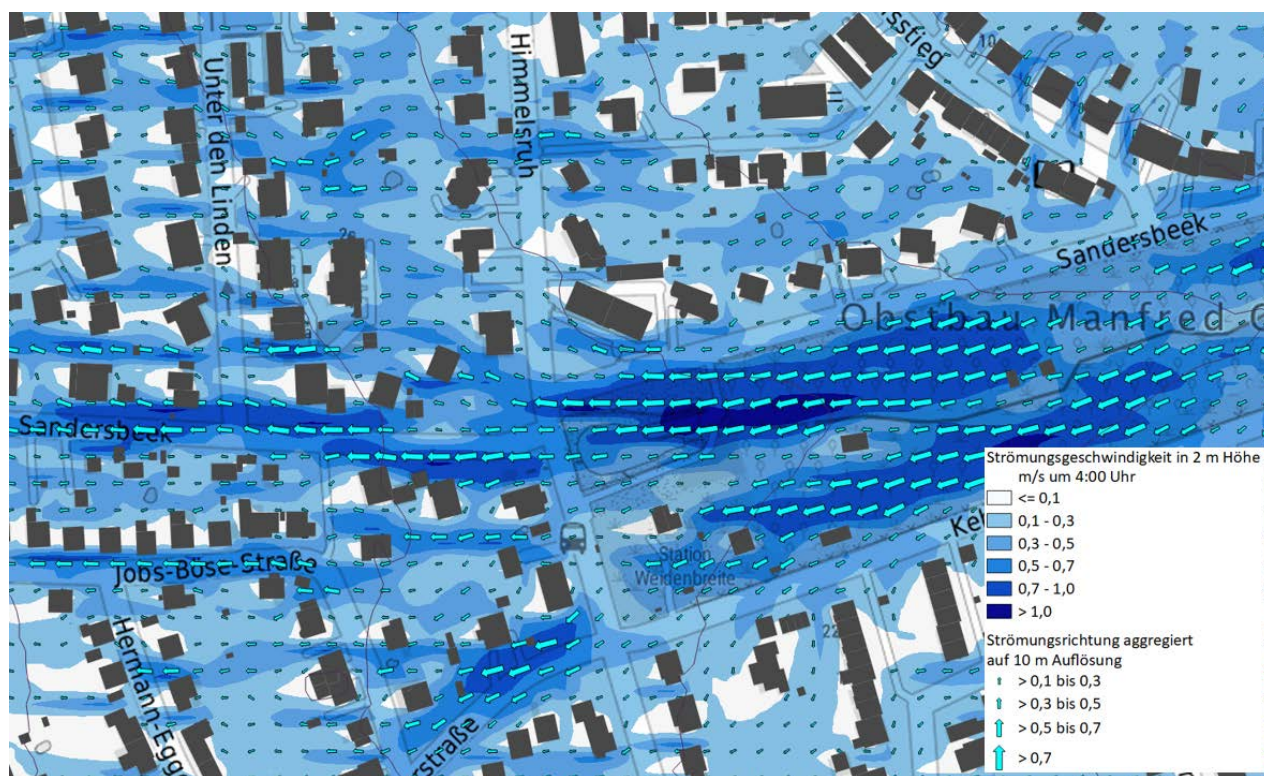


Abbildung 26: Ausschnitt aus dem bodennahen nächtlichen Strömungsfeld. Kartenhintergrund: TopPlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)

4.3 KLIMAANALYSEKARTEN

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

Des Weiteren heißt es in der Richtlinie: „Klimaanalysekarten bieten einen flächenbezogenen Überblick über die klimatischen Sachverhalte des betrachteten Raums und bilden die Grundlage zur Ableitung von Planungs- und

Handlungsempfehlungen in einer Stadt“ (VDI 2015, 13). Der Bezug auf die „Sachverhalte“ verdeutlicht, dass die Klimaanalysekarte bewertungstheoretisch der Sachebene angehört. Diese beschreibt „[...] Gegebenheiten, statistische Zusammenhänge, Sachverhalte, Prognosen, Naturgesetze. Sachaussagen beschreiben die Umwelt wie sie ist oder war“ (Gaede & Härtling 2010, 32). Daraus folgt, dass aus den Klimaanalysekarten noch keine unmittelbaren Wertaussagen (z.B. über das Ausmaß von Belastungen im Wirkraum sowie Wertigkeiten des Ausgleichsraums) abgeleitet werden dürfen. Der „Sprung“ auf die Wertebene erfolgt anschließend über die Bewertungskarten und die Planungshinweiskarte (Kap.5). Mit diesem Verständnis wurden für die Stadt Göttingen folgende Klimaanalysekarten erstellt:

- Klimaanalysekarte für die Bestandssituation
- Klimaanalysekarte für das Szenario „mittelstarker Klimawandel (2045)“
- Klimaanalysekarte für das Szenario „starker Klimawandel (2045)“

Die Legende der Klimaanalysekarten gliedert sich jeweils in die Elemente Wirkraum (Siedlungs- und Verkehrsflächen), Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) und Kaltluftprozessgeschehen (vgl. Abbildung 27). Im Ausgleichsraum ist die gutachterlich klassifizierte Kaltluftvolumenstromdichte flächenhaft dargestellt. Dabei gilt grundsätzlich: je höher die Werte, desto dynamischer ist das Kaltluftpaket. Die räumliche Auflösung der Darstellung entspricht unmittelbar der Modellausgabe⁶ (5 m x 5 m). Im Wirkraum ist die absolute Lufttemperatur für den bodennahen Bereich (2 m über Grund) flächenhaft dargestellt, wobei gilt: je höher die Werte, desto stärker ist die nächtliche Überwärmung ausgeprägt. Die Abgrenzung des Siedlungsraums ist wie in der Planungshinweiskarte vektorbasiert und beruht auf dem ATKIS-Basis DLM.

SIEDLUNGS- / VERKEHRSFLÄCHEN

NÄCHTLICHE ÜBERWÄRMUNG

(LUFTTEMPERATUR IN [°C] UM 04:00 UHR IN 2 M Ü.G.R.)

bis 13	> 16 bis 17	> 20 bis 21
> 13 bis 14	> 17 bis 18	> 21
> 14 bis 15	> 18 bis 19	
> 15 bis 16	> 19 bis 20	

Kaltlufteinwirkungsbereich im Siedlungsraum

GRÜN- UND FREIFLÄCHEN

KALTUFTVOLUMENSTROMDICHTE

(IN [M³/S/M] UM 04:00 UHR)

bis 5	> 15 bis 20	> 30 bis 40
> 5 bis 10	> 20 bis 25	> 40 bis 50
> 10 bis 15	> 25 bis 30	> 50

BODENNAHES STRÖMUNGSFELD

(UM 04:00 UHR, AGGREGIERT AUF EINE AUFLÖSUNG VON 100 M)

† Windgeschwindigkeit > 0,1 m/s

BESONDERE KALTUFTPROZESSE



Kaltluftentstehungsgebiet



Kaltluftleitbahn

Linienhafte Strukturen, über die kältere Luftmassen aus Grünflächen in den Siedlungsraum transportiert werden



Kaltluftabfluss

Auf den Siedlungsraum ausgerichtete, flächenhaft auftretende Kaltluftströme, insb. aus Hangbereichen



Kaltluftabfluss innerorts



Parkwinde

Kühlende Ausgleichsströme aus einer umbauten Grünfläche

RAUMSTRUKTUR



Stadtgrenze



Gewässer



Gleisflächen



Straßen außerorts (unbewertet)



Gebäude



potenzielle städtebauliche Entwicklungsflächen

Kritische Infrastruktur



Krankenhaus



Kindergarten



Schule



Pflegeheim

Abbildung 27: Legende der Klimaanalysekarten

⁶ Bei der Visualisierung erfolgte eine graphische Glättung über die Funktion „bilineare Interpolation“, die den Wert der vier naheliegenden Eingabezellzentren nutzt, um den Wert auf dem Ausgabe-Raster zu bestimmen. Der neue Wert für die Ausgabezelle ist ein gewichteter Durchschnitt dieser vier Werte.

Die flächenhaften Darstellungen im Wirk- und Ausgleichsraum werden durch mehrere 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. Kleineräumigere und/oder schwächere Windsysteme (z.B. Kanalisierungseffekte in größeren Zufahrtsstraßen im Übergang zwischen Ausgleich- und Wirkraum) werden aus der Karte nicht ersichtlich. Derartig detaillierte Informationen können den Geo-Datensätzen zu den bodennahen Windfeldern in Originalauflösung entnommen werden. Die als **Kaltluftentstehungsgebiete** gekennzeichneten Räume sind zusammenhängende Flächen mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 26,8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. **Kaltlufteinwirkungsbereiche** sind solche Siedlungsbereiche deren Kaltluftvolumenstromdichte den Mittelwert (im Siedlungsraum) von $16,55 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{s}$ überschreitet.

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

Die Grünflächen an der Leine begünstigen die Kaltluftleitbahn, welche von Süden her sowohl von den Grünflächen und der Gartenkolonie am Kieselsee als auch vom Stadtfriedhof und Leine-Park gefüttert wird, dann aber an der Groner Landstraße zum Erliegen kommt. Die Leineauen dienen ebenso von Norden als Fließfläche einer schwachen Kaltluftleitbahn in Richtung Zentrum. Von Westen ergibt sich eine Kaltluftleitbahn, welche sich zunächst durch die flächenhaften Abflüsse über den landwirtschaftlichen Flächen westlich des Friedhofs Grone speist, und anschließend in Verlängerung über die Grünflächen nördlich des Greitwegs innerörtlich weitergeleitet wird. Weiter nördlich zieht sich eine Kaltluftleitbahn entlang des Elliehäuser Bachs bzw. Holtenser Landstraße ins Stadtgebiet hinein. Aus den Freiflächen in der Umgebung des Forstbotanischen Gartens am Faßberg im Osten der Stadt speist sich eine Kaltluftleitbahn welche entlang der Lutter und der Bundesstraße 27, aber auch weiter nördlich über den Nordcampus der Universität fließt.

Flächenhafte **Kaltluftabflussbereiche** sind in Vergleich zu Kaltluftleitbahnen nur dann von einer vergleichbaren Verletzlichkeit geprägt, wenn sie ausschließlich auf wenig dynamischen Flurwinden basieren. Die für Göttingen festgestellten flächenhaften Kaltluftabflüsse treten ausschließlich im Gefälle auf und 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) möglich und zu vermeiden. In der Realität sind die hier vorgenommenen Abgrenzungen zwischen flächenhaftem Abfluss und linearer Leitbahn nicht immer eindeutig und/oder gehen ineinander über, sodass den vorgenommenen gutachterlichen Einschätzungen ein Generalisierungseffekt innewohnt, der im konkreten Einzelfall ggf. intensiver zu prüfen ist.

Am östlichen Stadtrand von Göttingen dringen die Kaltluftabflüsse aus den Hangbereiche unterschiedlich weit in die Wohngebiete hinein und sind als **innerörtliche Kaltluftabflüsse** gekennzeichnet. Flächen mit **Parkwind**-Phänomen (Kaltluft strömt aus einer umbauten Grünfläche heraus in die umgebende Bebauung) sind die Schillerwiesen und der Stadtfriedhof. Sowohl innerörtliche Kaltluftflüsse als auch Parkwinde sind grundsätzlich

schwächer ausgeprägt als diejenigen im Ausgleichsraum bzw. am Siedlungsrand, stellen aber wichtige Kaltluftversorgungsstrukturen dar, die entsprechend empfindlich auf bauliche Maßnahmen reagieren.

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

Legendenelement	Ableitungsmethode
Kaltlufteinwirkungsbereiche	Bereiche (im Wirkraum) mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftvolumenstromdichte von $16,55 \text{ m}^3/\text{m/s}$
Kaltluftentstehungsgebiete	Bereiche (im Ausgleichsraum) mit einer überdurchschnittlichen Kaltluftproduktionsrate von $> 26,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$
Fließrichtung der Kaltluft	auf 100 m aggregiertes Windfeld mit einer Windgeschwindigkeit von $> 0,1 \text{ m/s}$
Kaltluftleitbahn (linear) in Richtung Siedlungsraum	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
flächenhafte Kaltluftabflüsse in Richtung Siedlungsraum	Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Innerörtliche Kaltluftabflüsse	Kühlende Ausgleichsströmung im überbauten Bereich (über Straßen, Plätze, innerstädtischen Grünflächen). Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen
Parkwinde	Kühlende Ausgleichsströmung aus einer umbauten Grünfläche heraus. Gutachterlich auf der Basis der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen

Die Ausweisung der Leitbahnen und Austauschbereiche erfolgte gutachterlich (das heißt „händisch“) unter Berücksichtigung der Kaltluftvolumenstromdichte, des Windfeldes sowie der Nutzungsklassen. Es ist für die Ausweisungen in der Klimaanalysekarte zunächst unerheblich, ob in den Wirkräumen eine besondere Belastung vorliegt oder nicht, da die Funktionen des Kaltlufttransports für beide Fälle eine besondere Relevanz besitzen. So können geringere Belastungen auftreten, gerade weil sie im Einwirkungsbereich der Kaltluft liegen bzw. können höhere Belastungen ganz besonders auf die Entlastungsfunktion der Leitbahnen und Austauschbereiche angewiesen sein. Darüber hinaus ist die Ausweisung der Kaltluftprozesselemente auch unabhängig von der tatsächlichen Flächennutzung im Wirkraum. Folglich sind zunächst auch solche Prozesse über die Pfeilsignaturen akzentuiert worden, die auf reine Gewerbeflächen oder Sondernutzungen zielen. Eine Berücksichtigung dieser Nutzungsstrukturen erfolgte im Rahmen der planerischen Inwertsetzung für die Planungshinweiskarte (vgl. Kapitel 5).

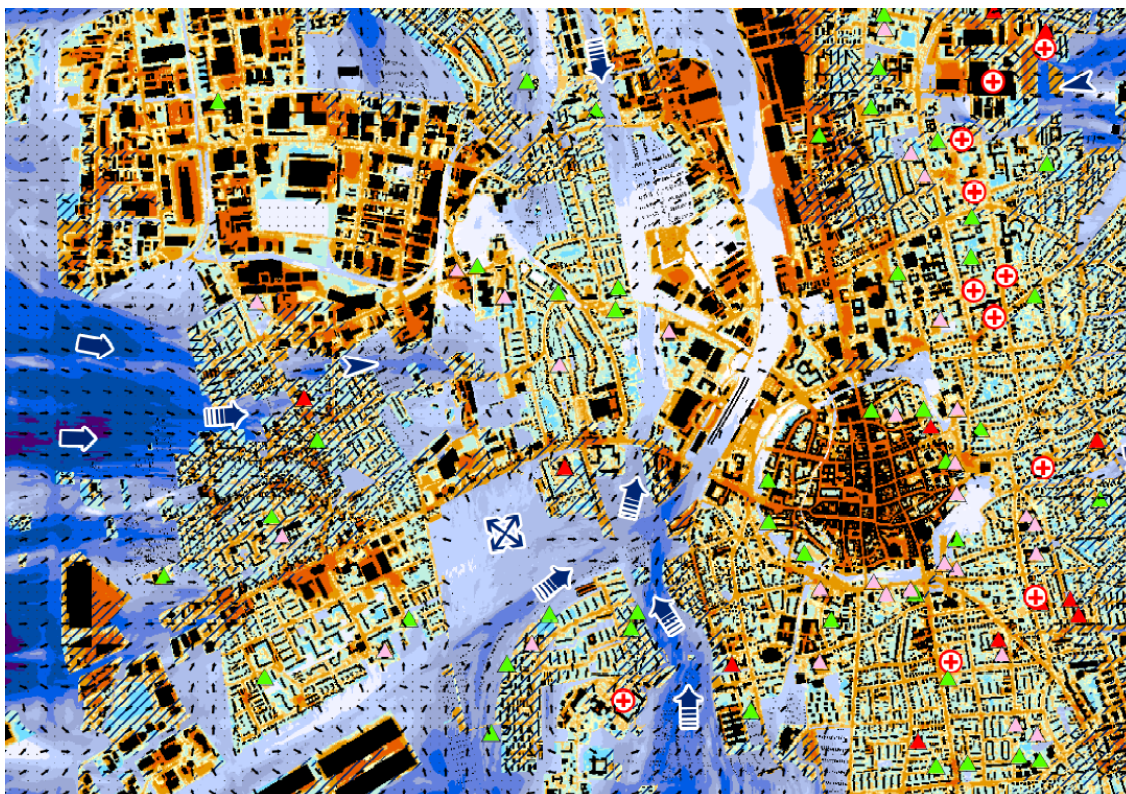


Abbildung 28: Ausschnitt aus der Klimaanalysekarte für die Ist-Situation (Legende: siehe Abbildung 27)

4.4 WÄRMEBELASTUNG AM TAGE

Im Vergleich zur Lufttemperatur weist die **PET** eine höhere Spannbreite im Untersuchungsgebiet auf. Flächenhaft heben sich Waldgebiete mit den geringsten PET-Werten von unter 24 °C ab (keine bis schwache Wärmebelastung; vgl. Tabelle A 3 im Anhang). Der Aufenthaltsbereich des Menschen liegt unterhalb des Kronendachs und ist somit vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt, sodass vor allem die stadtnahen Waldflächen als Rückzugsorte dienen können (Abbildung 29). Die größtenteils landwirtschaftlich genutzten, weitgehend baumlosen Freiflächen im Außenraum zeigen zum Auswertzeitpunkt 14 Uhr PET-Werte um rund 40 °C (Ist-Situation) bzw. 44 °C (Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Aufgrund der modellierten reduzierten Bodenfeuchte ist auf Grün- und Freiflächen für das Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ die höchste Zunahme der Hitzebelastung am Tage dargestellt, denn hier wird der Welkepunkt der Pflanzen überschritten, so dass die Kühlungswirkung der Verdunstung ausfällt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass für die Beurteilung der zukünftigen Hitzebelastung neben der absoluten Zunahme der Temperatur, vielmehr die Zunahme der Häufigkeit von heißen Tagen (vgl. Tabelle 5 in Kapitel 2.3) entscheidend ist.

Im Siedlungsraum zeigt sich eine heterogene Verteilung der Wärmebelastung. Entscheidend für die Hitzebelastung am Tage ist der Versiegelungsgrad, die Baumasse sowie die Verschattung vor Ort durch Baustrukturen und Bäume, wobei Bäume zusätzliche Kühlung durch den Verdunstungsprozess liefern. Große Waldflächen können außerdem auch am Tage im Nahbereich kühle Ausgleichsströmungen liefern, wobei die Luft-Austauschprozesse nie die Dimensionen der Nachtsituation erreichen. Die ungünstigsten Bedingungen treten über versiegelten Plätzen ohne Verschattung auf, wie sie in der Innenstadt (Markt vor dem Alten Rathaus) und teilweise auf den versiegelten, baumlosen Flächen der Gewerbegebiete zu finden sind (ca. 42 bis 43 °C PET in der Ist-Situation, bzw. 45 bis 46 °C PET im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). In der Göttinger Altstadt sorgen die hohen Gebäude der engen Straßen und Gassen aber auch für Schattenwurf und damit relativ kühle Verhältnisse. Auf der Nord- bis Nordost-Seite der Gebäude ist durch den Schattenwurf zum Zeitpunkt 14 Uhr



entsprechend der PET Wert deutlich kühler als auf den Flächen, welche sich in der vollen Sonneneinstrahlung befinden. So ist beispielsweise die Weender Straße zumindest auf der westlichen Seite zum Tageszeitpunkt der größten Wärmeentwicklung fast komplett im Schatten und weist dort nur ca. 34 °C bzw. 37 °C PET (Ist-Situation bzw. Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) auf, während die voll angestrahlte Ost-Seite PET Werte um bis zu 43 bzw. 45 °C erreicht.

Auffällig ist die teilweise hohe Wärmebelastung in einigen umliegenden Ortsteilen. Beispielsweise in Holten- sen und Elliehausen bieten die Wohngebiete zwar meist einen hohen Grünanteil (daher in der Nacht überwiegend günstige Bedingungen), doch gibt es gerade in den Gärten einen geringeren Bestand großkroniger (und damit schattenspendender) Bäume als in vielen Teilen der Kernstadt, in denen die Wärmebelastung geringer ausfällt. Dabei ist zu beachten, dass ein Baum mit kleiner Krone durch das Modell nicht erfasst werden kann (weil er „durch das 5 m-Raster fällt“), mitunter aber ausreichend ist, um den Bewohnenden von Häusern mit Gärten einen verschatteten Bereich bieten zu können.

Als Bereiche relativ niedriger PET-Werte (um 26 °C in der Ist-Situation, bzw. rund 2 bis 3 °C wärmer im Szenario „starker Klimawandel“) stellen sich der Stadtfriedhof Göttingen, der Leine-Park, der Cheltenhampark, der Pfalz-Grone-Park sowie die direkt an die Siedlung angrenzenden Flächen des Göttinger Waldes dar (vgl. Abbildung 29). Als besonders positives Beispiel sticht außerdem der Stadtwall heraus, denn er bietet durch seine hohen Bäume einen schattigen Erholungsort und dient gleichzeitig als kühle Wegeverbindung für Fußgänger und Radfahrer um die Altstadt herum.

Auch Gewässer wirkend am Tag kühlend auf ihre Umgebung, sodass die angrenzenden Grünflächen entlang der Leine, besonders in Kombination mit Vegetation entsprechender Höhe eine leicht reduzierte PET im Vergleich zu weiter entfernten Flächen aufweisen und damit – zumindest vom PET-Wert her – oft eine gute Aufenthaltsqualität am Tage bieten.

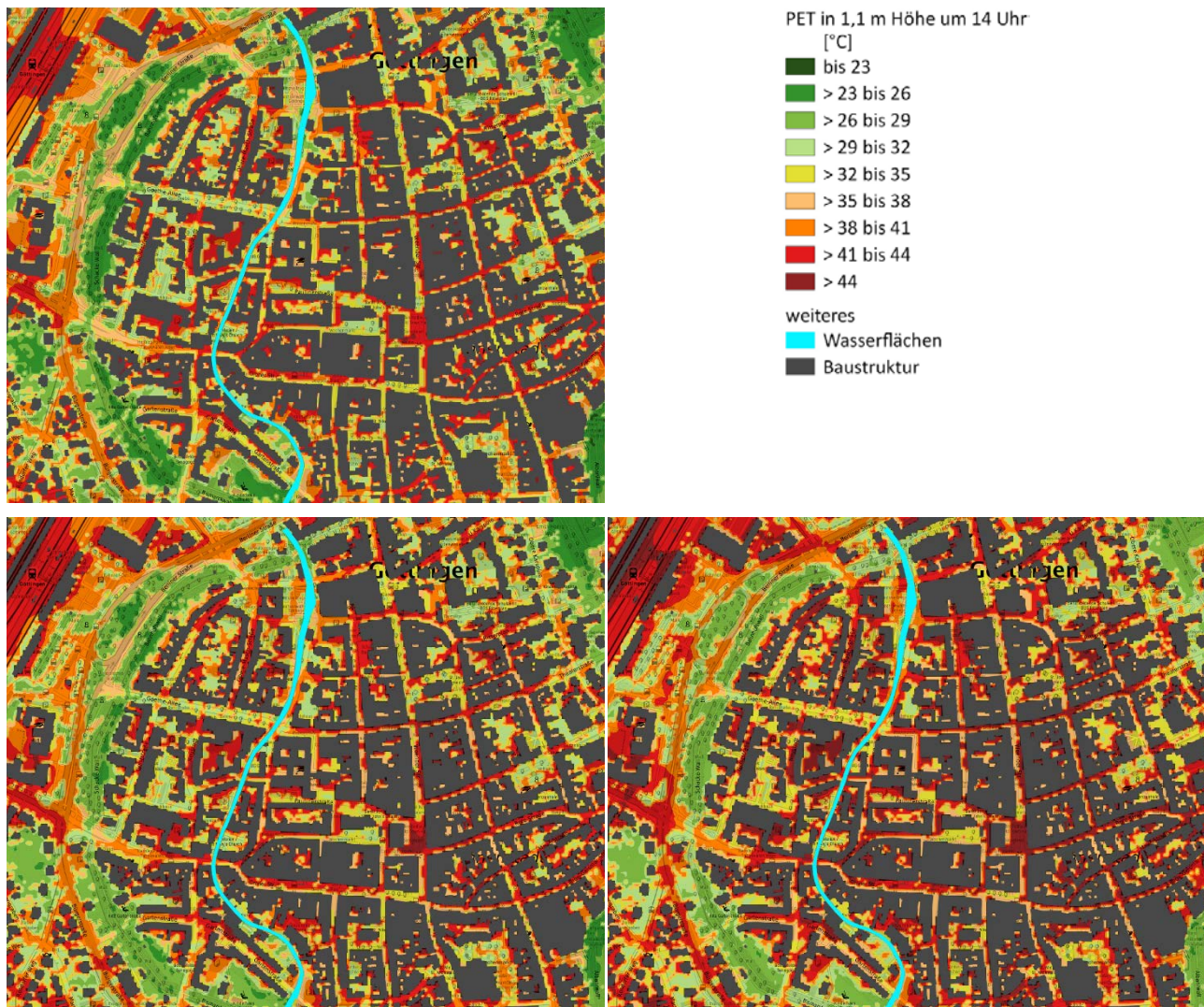


Abbildung 29: Wärmebelastung am Tag (PET) in der Kernstadt von Göttingen. Oben: Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“, unten rechts: Zukunftsszenario „starker Klimawandel“. Kartenhintergrund: Top-PlusOpen (WMS-Dienst des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie)



5. Bewertungskarten und Planungshinweiskarte

5.1 GRUNDLAGEN

Zentrales Produkt der Stadtklimaanalyse ist die Planungshinweiskarte (PHK). Gemäß der VDI Richtlinie 3787, Bl.1 handelt es sich dabei um eine „*informelle Hinweiskarte, die eine integrierende Bewertung der in der Klimaanalysekarte dargestellten Sachverhalte im Hinblick auf planungsrelevante Belange enthält*“ (VDI 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 die klimaökologische Bewertung von Flächen im Hinblick auf die menschliche Gesundheit bzw. auf gesunde Wohn- und Arbeitsverhältnisse. Gemäß dem in der Richtlinie definierten Stand der Technik ist zwischen Flächen im Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen sowie Wälder mit ggf. schützenswerten Klimafunktionen) und Flächen im Siedlungsraum (mit potenziellen Handlungserfordernissen aufgrund von Belastungen, im Folgenden „Wirkraum“ genannt) zu unterscheiden. Die Richtlinie schlägt eine 3-stufige Bewertung im Ausgleichsraum sowie eine 4-stufige Bewertung im Wirkraum (inkl. RGB-Farbcodes für die verschiedenen Klassen) vor und gibt qualitative Hinweise zu ihrer Ableitung. Ferner wird empfohlen, den flächigen Bewertungen punktuell „raumspezifische Hinweise“ zu Begrünungsbedarfen im Stadt- und Straßenraum sowie zu verkehrlich bedingten Schadstoffbelastungspotentialen für Hauptverkehrsstraßen an die Seite zu stellen. Als „erweiterte Aufgaben“ definiert die VDI-Richtlinie seit ihrer letzten Überarbeitung die Berücksichtigung des Klimawandels sowie der Umweltgerechtigkeit. Eine über den Hinweis, dies ggf. über eigenständige Themenkarten zu lösen, hinausgehende Hilfestellung wird jedoch nicht gegeben.

Die Planungshinweiskarte entfaltet – anders als beispielsweise Luftreinhalte- oder Lärmaktionspläne – keinerlei rechtliche Bindungskraft und unterliegt 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 sie nicht gänzlich oder in Teilen in verbindliche Planwerke übernommen werden (z.B. dem Flächennutzungsplan oder insbesondere dem Bebauungsplan). Es wird jedoch vorausgesetzt, dass bei entsprechender Abwägung die Abweichung auch fundiert begründet werden kann.

Aufgrund der Komplexität der Planungshinweiskarte, die sowohl Informationen zur Tag- und Nachtsituation als auch zu Ist- und Zukunftsszenarien in einer einzigen Flächenkulisse bereitstellen muss, ist es nötig, vorgelegt sog. Bewertungskarten zu erstellen. In den sechs Bewertungskarten wurde getrennt für die Tag- und Nacht-Situation jeweils eine stadtklimatische Bewertung für die drei Szenarien Status quo, mittlerer Klimawandel und Starker Klimawandel vorgenommen. Die Planungshinweiskarte fasst die Ergebnisse dieser sechs Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Göttingen Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten.

5.2 GEOMETRISCHE BASIS

Die auf Rasterebene ausgewerteten Modellergebnisse (vgl. Kap.4) 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 Stadt-raum abgrenzbare räumliche stadtklimatische Funktions-/Nutzungseinheiten beziehen. Diese sog. „Basisgeometrie“ muss gleich mehrere Bedingungen erfüllen. Sie muss

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

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

Alle rasterbasierten Modellergebnisse werden zur Erstellung der Bewertungskarten und der Planungshinweiskarte (zur Ableitung von Wertstufen) mithilfe eines statistischen Raummittels aus allen, die jeweiligen Flächen schneidenden Rasterpunkten übertragen. Aufgrund dieser Vorgehensweise liegen die Ergebnisse der Stadtklimaanalyse in zweifacher Form vor; Zum einen als rasterbasierte Verteilung der Klimaparameter im räumlichen Kontinuum, zum anderen als planungsrelevante und maßstabsgerechte, räumlich in der Realität abgrenzbare Flächeneinheiten. Da alle Teilflächen der Basisgeometrie einen größeren Flächeninhalt als 25 m² (also die Flächen einer einzelnen Rasterzelle des Modells) aufweisen, treten auf der Rasterebene innerhalb einer Fläche in aller Regel sowohl höhere als auch niedrigere Werte auf, als in der statistischen Generalisierung zu erkennen ist (Abbildung 30).

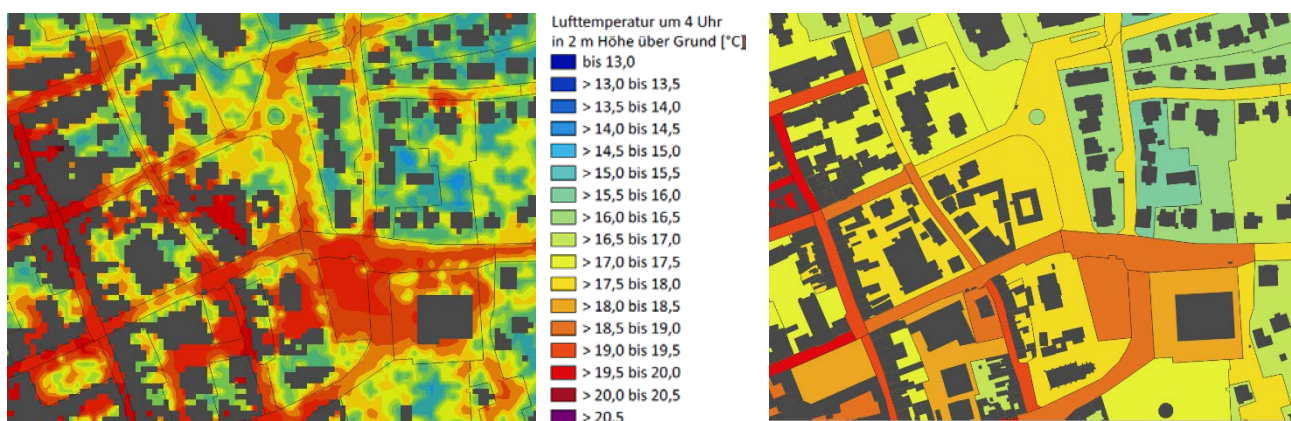


Abbildung 30: links das Ausgangsraster und rechts das Ergebnis der räumlichen Mittelwertbildung auf Ebene der Basisgeometrie



5.3 BEWERTUNGSKARTEN

5.3.1 WIRKRAUM

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

In der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 (VDI 2008) wird daher ein methodischer Standard zur statistischen Normalisierung der modellierten (in anderen Fällen gemessenen) Werte definiert. Bei der sogenannten z-Transformation wird die Abweichung eines Klimaparameters von den mittleren Verhältnissen im Untersuchungsraum als Bewertungsmaßstab herangezogen. Mathematisch bedeutet dies, dass von jedem Ausgangswert der Variablen das arithmetische Gebietsmittel abgezogen und durch die Standardabweichung aller Werte geteilt wird. Die resultierende z-Werte werden gemäß definiertem Standard mithilfe von statistischen Lagemaßen (Mittelwert = 0 sowie positive und negative Standardabweichungen davon als obere und untere S₁-Schranke) in vier Bewertungskategorien zwischen „1 - sehr günstig“ und „4 - ungünstig“ eingestuft (Abbildung 31).

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

Dabei ist

z standardisierter Wert der Variablen x

x Ausgangswert der Variablen x

μ arithmetisches Mittel

σ Standardabweichung

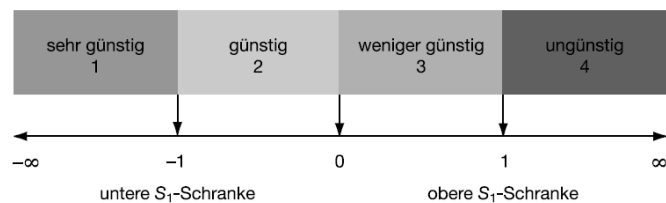


Abbildung 31: Verfahren der z-Transformation zur statistischen Standardisierung von Parametern und sich daraus ergebende Wertstufen (Quelle: VDI 2008)

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

Durch die Abstraktion von konkreten Absolutwerten ist das Verfahren passfähig für die Bewertung der thermischen Belastungssituation im Wirkraum in der vorliegenden Planungshinweiskarte. Die Methode ist für die vergleichende Bewertung von räumlich variablen Klimaparametern innerhalb eines festen Zeitschnitts ausgelegt (typischerweise den Status quo). Sollen mehrere zeitliche Dimensionen miteinander verglichen werden, muss die Methode adaptiert werden. Durch die insgesamt drei Modellrechnungen (Status quo und die Szenarien Mittelstarker sowie Starker Klimawandel) mit ihren im Niveau voneinander abweichenden Temperatur- bzw. PET-Werten ist dies im vorliegenden Fall gegeben. Daher wurden zunächst die Statistiken des Status quo



(als kühlsite Situation) und des Szenarios Starker Klimawandel (als wärmste Situation) als Bandbreiten des „Szenario-Trichters“ miteinander verknüpft. Aus dieser neuen Grundgesamtheit über beide Situationen ergeben sich folgende statistische Werte für die z-Transformation⁷:

- Nächtliche Temperatur für den Siedlungsraum:
Mittelwert = 17,78 °C Standardabweichung = 1,676 °C
- Wärmebelastung am Tag für den Siedlungsraum:
Mittelwert = 36,84 °C PET Standardabweichung = 5,737 °C PET

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

Klassifizierung der bioklimatischen Situation

Abweichend von der in der VDI-Richtlinie 3785, Bl.1 vorgeschlagenen vierstufigen Bewertung (Abbildung 31) wurde in der vorliegenden Untersuchung die bioklimatische Situation im Wirkraum in fünf Klassen eingeteilt, um der hohen räumlichen Auflösung der Modellergebnisse und der damit verbundenen stärkeren Differenzierung der thermischen Belastung Rechnung zu tragen. Sowohl für die Nacht- als auch für die Tag-Situation wurden Siedlungsflächen und der öffentliche Raum (Wohn- und Gewerbegebiete, Straßen und Plätze) in die Klassen *sehr geringe* – *geringe* – *mittlere* – *hohe* – *sehr hohe* bioklimatische Belastung eingeteilt (Tabelle 13). Die Abgrenzung erfolgte über die z-Transformation mit gleich großen, um den Mittelwert ($z = 0$) schwankenden Klassen.

Tabelle 13: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Bioklimatische Belastung am Tag	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
Sehr gering	$z \leq -0,75$	$PET \leq 32,5$
Gering	$-0,75 < z \leq -0,25$	$32,5 < PET \leq 35,4$
Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$35,4 < PET \leq 38,3$
Hoch	$0,25 < z \leq 0,75$	$38,3 < PET \leq 41,1$
Sehr hoch	$z > 0,75$	$PET > 41,1$

In der Darstellung der Nachtsituation wird neben der Überwärmung zusätzlich auf den Kaltlufthaushalt eingegangen. Zu einem gewissen Anteil wirkt sich die Kaltluft bereits auf die nächtliche Lufttemperatur in den einzelnen Flächen aus. Sie wird dennoch zusätzlich beleuchtet, da sich die Durchlüftung einer Fläche positiv auf angrenzende Flächen auswirken kann. Dazu wurden zunächst Siedlungsflächen mit einer überdurchschnittlich hohen Kaltluftvolumenstromdichte ($\geq 16,55 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$) als sogenannter Kaltlufteinwirkungsbereich definiert. Liegt eine Fläche mindestens zur Hälfte im Kaltlufteinwirkungsbereich, so wird angenommen, dass die Fläche potenziell eine Gunstwirkung für angrenzenden Flächen haben kann. Diesen Flächen wird eine Klimafunktion zugeschrieben, sie sind über eine Schraffur in der Bewertungskarte (Nacht) sichtbar und fließen als Kriterium für die stadtklimatische Handlungspriorität in die Planungshinweiskarte ein.

⁷ Zur Erzeugung dieser Werte wurden ausschließlich solche Gitterpunkte aus den Modellergebnissen verwendet, die innerhalb des Siedlungsraums liegen (Wohn- und Gewerbegebiete sowie Straßenraum), da sie die zu vergleichende Gebietskulisse zur Bewertung der thermischen Situation bilden. Die Temperaturen im Ausgleichsraum blieben demnach unberücksichtigt.



Tabelle 14: Grenzen der z-Transformation und zugehörige Lufttemperaturen für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation in der Nacht

Bioklimatische Belastung in der Nacht		Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige Temperaturen (T04) [°C]
	Sehr gering	$z \leq -1,0$	$T04 \leq 16,1$
	Gering	$-1,0 < z \leq -0,25$	$16,1 < T04 \leq 17,4$
	Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$17,4 < T04 \leq 18,2$
	Hoch	$0,25 < z \leq 1,0$	$18,2 < T04 \leq 19,5$
	Sehr hoch	$z > 1,0$	$T04 > 19,5$

5.3.2 AUSGLEICHSPAUM

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

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

Im Hinblick auf planungsrelevante Belange spielt zusätzlich der Siedlungsbezug der Flächen im Ausgleichsraum eine Rolle. Kaltluft, die während einer Strahlungsnacht innerhalb des Ausgleichsraums entsteht, kann nur dann von planerischer Relevanz sein, wenn den Flächen ein entsprechender Siedlungsraum zugeordnet ist, der von ihren Ausgleichsleistungen profitieren kann. Die Fläche des Ausgleichsraums spielt dabei ebenfalls eine Rolle: Flächen von weniger als 0,5 Hektar Größe werden als weniger relevant in Bezug auf nächtliche Ausgleichsfunktion bewertet. Die folgende Abbildung 32 zeigt in schematisierter Form den dabei angewendeten hierarchischen Bewertungsschlüssel, wobei gilt:

- *„Hohe Kaltluftfunktion“*: Flächenmittelwert für Kaltluftvolumenstromdichte oder Kaltluftproduktion ist größer als der jeweilige Mittelwert aller Ausgleichsflächen ($23,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ bzw. $\geq 26,8 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$)
- *„Im Nahbereich zu Wohnsiedlungen“*: Entfernung bis 250 m Luftlinie
- *„Agglomeration“*: geschlossener Siedlungsraum (ohne Splitterflächen, Einzelhöfe etc. im Außenraum; gutachterliche Einteilung)
- *„Siedlungsbezug“*: Entfernung bis 500 m Luftlinie

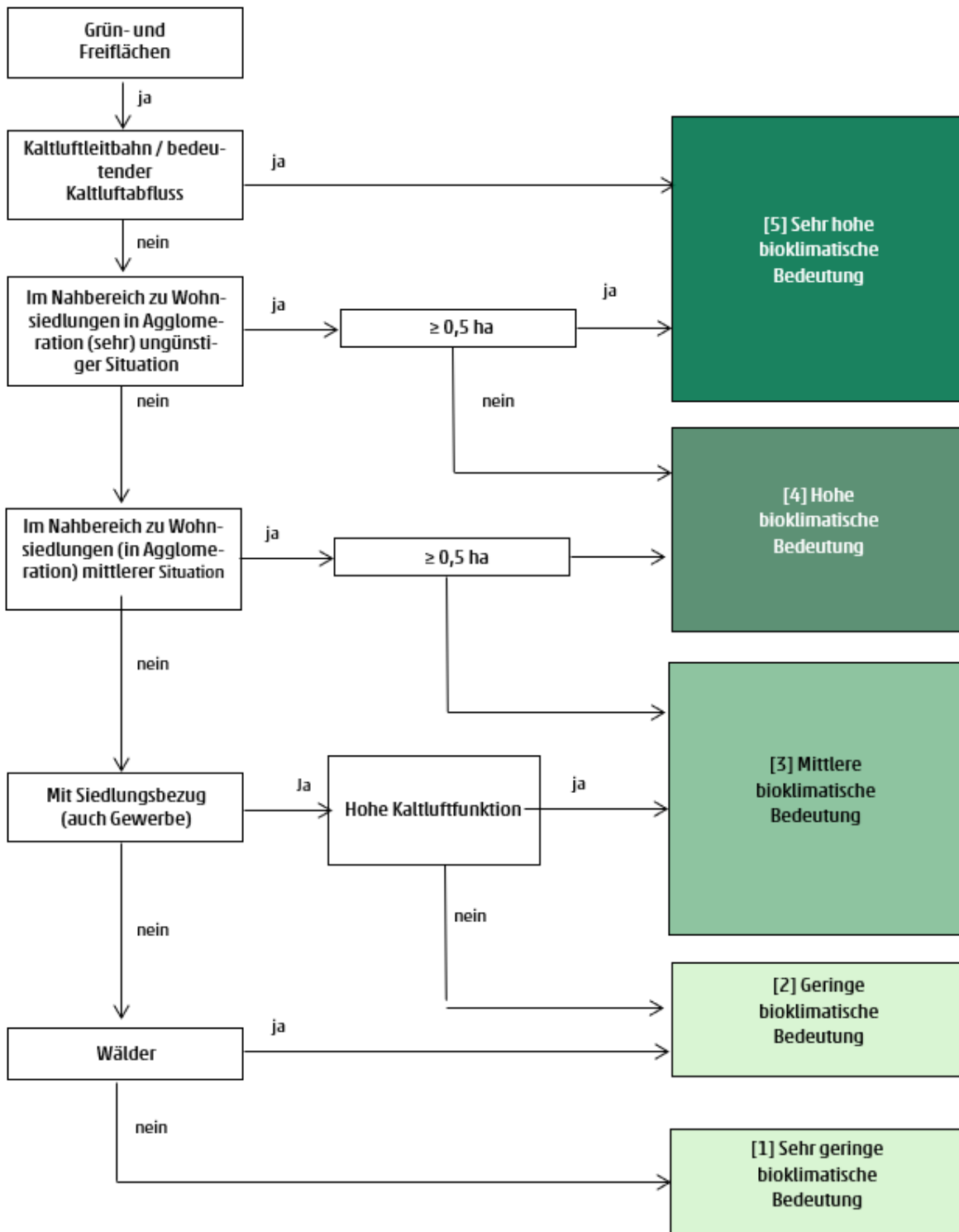


Abbildung 32: Schema der stadtklimatischen Bewertung von Flächen im Ausgleichsraum in der Nacht

Für die Tag-Situation wird die bioklimatische Bedeutung (Aufenthaltsqualität) auf den Flächen im Ausgleichsraum in einer fünfstufigen Skala von *sehr hoch* bis *sehr gering* bewertet (Tabelle 15). Dies geschieht wiederum über die oben beschriebene z-Transformation, der folgende statistische Werte zugrunde lagen (Flächenkultisse: alle Ausgleichsräume im Stadtgebiet von Göttingen):

- bioklimatische Bedeutung am Tag: Mittelwert = 31,91 °C PET / Standardabweichung = 7,620 °C PET



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

Tabelle 15: Grenzen der z-Transformation und zugehörige PET-Werte für die Klassifizierung der bioklimatischen Situation am Tag.

Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Klassengrenzen nach z-Transformation	Zugehörige PET-Werte [°C]
Sehr hoch	$z \leq -0,75$	$PET \leq 26,2$
Hoch	$-0,75 < z \leq -0,25$	$26,2 < PET \leq 30,0$
Mittel	$-0,25 < z \leq 0,25$	$30,0 < PET \leq 33,8$
Gering	$0,25 < z \leq 0,75$	$33,8 < PET \leq 37,6$
Sehr gering	$z > 0,75$	$PET > 37,6$

5.3.3 ERGEBNISSE DER BEWERTUNGSKARTEN

Abbildung 33 zeigt Ausschnitte aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation. In der Ist-Situation sind die Flächen mit *sehr hoher* Belastung lediglich im hoch verdichteten Innenstadtbereich zu lokalisieren. Hier sind Anwohner direkt betroffen. Bereiche mit *hoher* Belastung in der Nacht stellen die Industrie- und Gewerbegebiete um das Güterverkehrszentrum sowie vereinzelt in den Industriegebieten Grone Ost und West und am Kaufpark dar. Die Siedlungsbereiche mit *geringer* und *sehr geringer* Wärmebelastung in der Nacht belegen in der Ist-Situation ca. 73 % Flächenanteil. Hierbei handelt es sich vorrangig um Gebiete mit Einzel- und Reihenhausbau mit relativ hohem Grünanteil. Aber auch viele nicht wohnlich genutzte Gebiete (Gewerbegebiete, sowie größtenteils die Flächen der Universität) mit weniger als ca. 50% Versiegelungsgrad auf den unbebauten Flächen fallen im Status Quo in die Kategorie „*geringe* Belastung“ in der Nacht.

Im Szenario „Starker Klimawandel“ kehren sich die Größenverhältnisse um, und ca. 70 % der Siedlungsflächen weisen eine *hohe* oder *sehr hohe* Wärmebelastung in der Nacht auf. Im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ belegen nur ca. 25 % diese beiden höchsten Belastungskategorien, darunter alle Hauptverkehrsstraßen.

Tabelle 16 zeigt die Flächenanteile der jeweiligen Belastungskategorien. Die Flächen mit *mittlerer* oder *geringer* Belastung im Szenario „Starker Klimawandel“ befinden sich in den außen liegenden dörflichen Ortsteilen sowie in locker bebauten Siedlungen nahe dem Stadtrand der Kernstadt. Während letztgenannte Flächen in der Ist-Situation (Status Quo) noch als *sehr gering* belastet eingestuft werden, wird diese Kategorie im Szenario „starker Klimawandel“ nicht mehr belegt.

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen, welche jeweils mit ihrer geplanten Bau- und Freiraumstruktur in die Modellierung der beiden Zukunftsszenarien eingeflossen sind, zeigen ganz unterschiedliche bioklimatische Belastungsgrade in der Nacht. Während das Baugebiet Kleehöfen am Rande von Esebeck selbst im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ lediglich eine *geringe* bioklimatische Belastung in der Nacht aufweist, wird für den Großteil der anderen Entwicklungsflächen für dieses Szenario eine *mittlere* oder *hohe* Belastung ausgewiesen.

Flächen mit *sehr hoher* Belastung im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ sind auf Teilen des Europaquartiers Holtenser Berg (Teilflächen mit ungünstiger Kaltluftversorgung) sowie in einer Teilfläche des Baugebietes Lange Rekesweg (Quartiersgarage mit komplett versiegelter Fläche) festzustellen.

Das Bewertungsschema für den Ausgleichsraum (Grün- und Freiflächen) basiert auf den Kaltluftprozessen, und der jeweiligen Lagebeziehung mit umliegenden Wohnsiedlungsflächen (vgl. Abbildung 32). Folglich liegen die Flächen mit hoher oder sehr hoher bioklimatischer Bedeutung, in ihrer Funktion als Kaltluftaustauschflächen direkt angrenzend an Wohnsiedlungsflächen mit mindestens mittlerer Wärmebelastung in der Nacht.

In den Zukunftsszenarien kommen die städtebaulichen Entwicklungsflächen mit ihrem jeweiligen Belastungsgrad als zusätzlicher Wirkraum dazu, und die angrenzenden Grün- und Freiflächen bekommen jeweils entsprechend eine höhere bioklimatische Bedeutung als Ausgleichsraum bzw. Kaltluftlieferant in der Nacht zugeordnet. Der Anteil von Flächen mit *hoher* bzw. *sehr hoher* Bedeutung deutlich (Zukunftsszenario „starker Klimawandel“: ca. 48 %), erhöht sich außerdem deutlich aufgrund der Zunahme von hoch und sehr hoch belasteten Siedlungsflächen (Tabelle 17). Bei den Freiflächen sehr geringer bioklimatischer Bedeutung für das Stadtklima in den Wohnsiedlungen handelt es sich um die (meist) großflächigen landwirtschaftlichen Flächen im Umland, mit Abstand zur Siedlungsfläche (ausgenommen Einzelhöfe als Siedlungssplitterflächen) von mindestens einigen Hundertmetern.

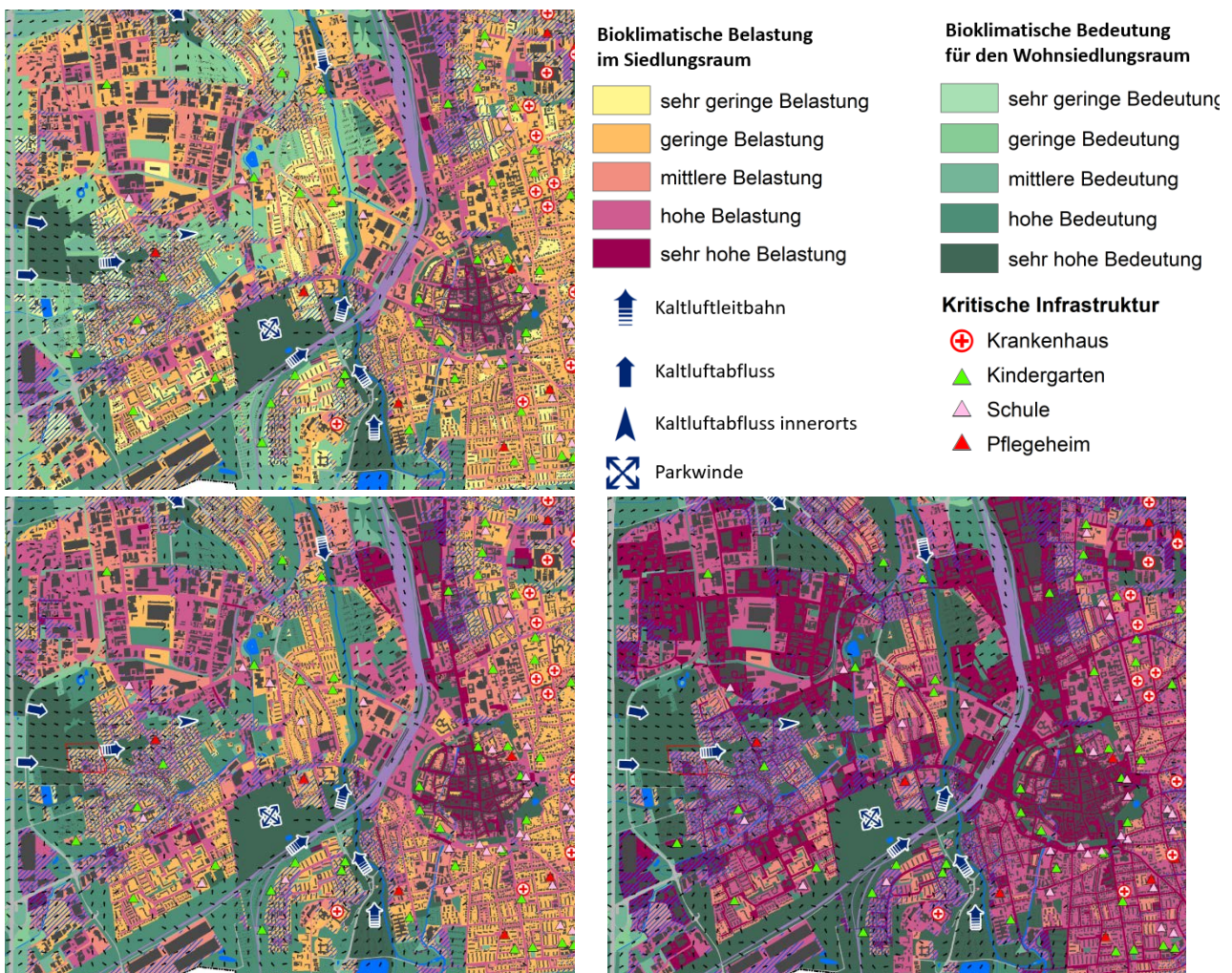


Abbildung 33: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Nachtsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“, unten rechts Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Verkürzte Legende



Tabelle 16: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung in der Nacht		Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „mittelstarker Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
	Sehr gering	27,6 %	3,7 %	0,0 %
	Gering	45,6 %	49,3 %	3,6 %
	Mittel	16,0 %	21,6 %	26,4 %
	Hoch	10,4 %	22,4 %	44,4 %
	Sehr hoch	0,3 %	3,1 %	25,6 %

Tabelle 17: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die Wohnsiedlung in der Nacht, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Bedeutung in der Nacht		Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „mittelstarker Klimawan- del“	Flächenanteil Szenario „starker Kli- mawandel“
	Sehr gering	18,5 %	18,3 %	18,3 %
	Gering	50,1 %	33,7 %	28,4 %
	Mittel	20,7 %	18,3 %	4,9 %
	Hoch	6,1 %	22,4 %	25,4 %
	Sehr hoch	4,6 %	7,4 %	23,1 %

Die Bewertungskarten für die Tagsituation werden in Ausschnitten für die Kernstadt in Abbildung 34 dargestellt. Grundsätzlich verteilen sich Flächen unterschiedlichen bioklimatischen Belastungsgrades mosaikartig im gesamten Stadtgebiet, meist abhängig von Verschattungsgrad durch Bäume und Baustrukturen sowie Baumasse und Versiegelungsgrad insgesamt. Die dörflichen Wohngebiete Nikolausberg und Teile von Roringen sind – ebenso wie in der Nacht – mit der geringsten Hitzebelastung am Tage belegt. Andere Ortsteile dagegen, die in der Nacht relativ niedrig belastet sind, unterliegen am Tage aufgrund fehlender Verschattung bereits in der Ist-Situation mittlerer oder hoher Belastung (bspw. Teile von Geismar, Kiesseekaree, Elliehausen, Esebeck). Hohe bis sehr hohe Hitzebelastung findet sich in allen Gewerbegebieten, sowie in Teilen der stark versiegelten Altstadt. Tabelle 18 zeigt, dass sich in der Ist-Situation 16,5 % der Siedlungsflächen in der Belastungsklasse „hoch“ oder „sehr hoch“ befinden. Im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ sind es bereits 28 %, und im Szenario „starker Klimawandel“ über die Hälfte der Flächen.

Die Grün- und Freiflächen verlieren in Folge der Zunahme der PET-Werte in den Zukunftsszenarien an Erholungspotenzial für den Menschen am Tage. In der Ist-Situation wird ein Anteil von ca. 44 % der Flächen mit sehr hoher bioklimatischer Bedeutung eingestuft – hierbei handelt es sich ausnahmslos um Waldflächen. Im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ belegen nur noch 39 % diese höchste Einstufung. Die baumlosen Freiflächen mit niedriger Vegetation verlieren aufgrund der im Zukunftsszenario „starker Klimawandel“ modellierten reduzierten Bodenfeuchte am deutlichsten an Erholungsfunktion, da sie der stärksten Zunahme von PET-Werten unterliegen. Ca. 43 % der Grün- und Freiflächen wird im Szenario „starker Klimawandel“ nur noch eine sehr geringe bioklimatische Bedeutung zugeordnet (Ist-Situation: 19 %)



Abbildung 34: Ausschnitt aus den Bewertungskarten für die Tagsituation (oben links Ist-Situation, unten links Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“, unten rechts Zukunftsszenario „starker Klimawandel“). Verkürzte Legende

Tabelle 18: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Belastung am Tage, nach Modellierungsszenario

Bioklimatische Belastung am Tage	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „mittelstarker Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
Sehr gering	14,5 %	8,4 %	3,0 %
Gering	30,0 %	24,9 %	11,6 %
Mittel	38,9 %	38,7 %	28,8 %
Hoch	16,1 %	26,4 %	40,7 %
Sehr hoch	0,4 %	1,6 %	15,9 %



Tabelle 19: Flächenanteile der Klassifizierung der bioklimatischen Bedeutung in Bezug auf die potenzielle Erholungsfunktion am Tage, nach Modellierungsszenario

	Aufenthaltsqualität / bioklimatische Bedeutung an Sommertagen	Flächenanteil Ist-Situation	Flächenanteil Szenario „mittelstarker Klimawandel“	Flächenanteil Szenario „starker Klimawandel“
	Sehr gering	19,4 %	26,2 %	42,5 %
	Gering	24,6 %	20,8 %	8,5 %
	Mittel	8,2 %	6,1 %	4,2 %
	Hoch	4,0 %	4,6 %	5,8 %
	Sehr hoch	43,7 %	42,2 %	39,0 %

5.4 PLANUNGSHINWEISKARTE

Die Planungshinweiskarte Stadtklima fasst die Ergebnisse der sechs PHK-Bewertungskarten zusammen, sodass auf den ersten Blick ersichtlich wird, welche Flächen einen hohen Schutzbedarf haben und wo in Göttingen Maßnahmen zur Anpassung vorrangig umgesetzt werden sollten. Im Ergebnis stellt die Planungshinweiskarte eine wichtige fachliche Grundlage für regional-/stadtplanerische Abwägungs- bzw. Entscheidungsprozesse dar und unterstützt bei der Umsetzung einer klimagerechten Stadtentwicklung.

5.4.1 STADTKLIMATISCHE HANDLUNGSPRIORITÄT IM WIRKRAUM

In den Wohn- und Gewerbeflächen sowie im öffentlichen Raum wird die stadtklimatische Handlungspriorität dargestellt. Für die Einteilung der Handlungsprioritäten wurde in einem ersten Schritt die für die Nacht- und Tagsituation vorgenommene bioklimatische Bewertung kombiniert. In Wohngebieten wurde die Nachtsituation stärker gewichtet (Fokus Schlafqualität) und in unbewohnten Gebieten sowie im Straßenraum und auf Plätzen die Tagsituation (Fokus Aufenthaltsqualität im Außenraum; Tabelle 20).



Tabelle 20: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Situation aus den Bewertungskarten Nacht und Tag in Wohngebieten sowie in unbewohnten Gebieten.

Wohngebiete							Unbewohnte Gebiete, Straßen und Plätze						
		Bewertung Nacht							Bewertung Nacht				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
Bewertung Tag	1	1	2	3	3	4	Bewertung Tag	1	1	1	2	2	3
	2	1	2	3	4	4		2	2	2	2	3	3
	3	2	2	3	4	5		3	3	3	3	3	4
	4	2	3	3	4	5		4	3	4	4	4	5
	5	3	3	4	5	5		5	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe Wärmebelastung, ..., 5 = höchste Wärmebelastung

Beispielsweise wird einem Wohngebiet, welches in der Nacht sehr hoch belastet ist (5), in Kombination mit mittlerer Belastung (3) am Tage eine Gesamt-Wärmebelastung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 20, linke Seite). Ein Gewerbegebiet mit sehr geringer Belastung (1) in der Nacht und sehr hoher Belastung (5) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Wärmebelastung bewertet (vgl. Tabelle 20, rechte Seite).

Im zweiten Schritt wird die Betrachtung der Zukunfts-Szenarien hinzugezogen und die Klimafunktion der Siedlungsflächen berücksichtigt. Die höchste Handlungspriorität erhalten Flächen, die bereits heute (Status quo) oder dem als *best case* anzusehendem Szenario Mittelstarker Klimawandel die höchste bioklimatische Belastung und keine Klimafunktion (Kaltlufteinwirkungsbereich) aufweisen. Übernehmen die am höchsten belasteten Flächen dagegen eine Klimafunktion, fallen sie in die zweite Handlungspriorität. In der Klasse „Handlungspriorität 2“ liegen die Siedlungsflächen, die unter dem Einfluss des Szenarios Starker Klimawandel die höchste Belastung und keine Klimafunktion verzeichnen. Diese Abstufung setzt sich wie in Tabelle 21 skizziert für die weiteren Handlungsprioritäten fort bis aus stadtklimatischer Sicht keine vorrangige Handlungspriorität mehr abzuleiten ist. Das Handlungserfordernis lässt sich hier mit dem Vorsorgeprinzip begründen und wird je größer, desto erfolgloser die weltweiten Klimaschutzbemühungen in den kommenden Jahren ausfallen. Die Flächen ohne vorrangige Handlungspriorität behalten auch unter der Annahme eines „starken Klimawandels“ ihre (sehr) günstige humanbioklimatische Situation bei. Sie können als sehr robust gegenüber dem Klimawandel eingestuft werden. Durch diese vorgenommenen Definitionen kann jede auftretende Wertstufenkombination der dreidimensionalen Matrix aus Bestandssituation, „mittelstarker Klimawandel“ und „starker Klimawandel“ eindeutig einer der Belastungsstufen zugeordnet werden.



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

Bewertung im Wirkraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Handlungspriorität 1	Flächen, die bereits heute oder im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen und keine Klimafunktion innehaben.	2,3 %
Handlungspriorität 2	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	14,0 %
Handlungspriorität 3	Flächen ohne Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen mit Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine sehr hohe Wärmebelastung aufweisen	10,0 %
Handlungspriorität 4	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	18,7 %
Handlungspriorität 5	Flächen ohne Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen mit Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine hohe Wärmebelastung aufweisen	17,1 %
Handlungspriorität 6	Flächen mit Klimafunktion, die bereits heute oder im Szenario „mittelstarker Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen sowie Flächen ohne Klimafunktion, die im Szenario „starker Klimawandel“ eine mittlere Wärmebelastung aufweisen	17,2 %
Keine vorrangige Handlungspriorität	Übrige Flächen	20,8 %

„Klimafunktion“ = mindestens Hälfte der Fläche mit überdurchschnittlicher Kaltluftvolumenstromdichte

Die Wärmebelastung bezieht sich auf die kombinierte Bewertung aus Tabelle 20

Ein Großteil der Altstadtfläche ist mit Handlungspriorität 1 oder 2 belegt, ebenso wie ein Großteil der Gewerbeflächen, und viele Straßenräume im Stadtzentrum. Die Handlungsprioritäten sollen eine Hilfestellung geben, in welchen Flächen Maßnahmen zur stadtklimatischen Anpassung besonders wichtig und bevorzugt anzugehen sind, ohne dass dadurch eine Reihenfolge der Maßnahmenumsetzung in den einzelnen Flächen vorgeschrieben wird⁸. Dafür wurden die Handlungsprioritäten in Tabelle 22 mit stadtklimatischen Planungshinweisen versehen. In Flächen der fünf höchsten Handlungsprioritäten, die in Göttingen ca. 62 % (vgl. Tabelle 21) des Siedlungsraums ausmachen, sind optimierende stadtklimatische Maßnahmen notwendig bzw. zu prüfen. Darunter ist in den Flächen der höchsten beiden Handlungsprioritäten (ca. 16 % Flächenanteil) zusätzlich zu prüfen, ob proaktiv Anpassungsmaßnahmen im Bestand umgesetzt werden können. In ca. 38 % des Siedlungsraums besteht eine geringe oder keine vorrangige stadtklimatische Handlungspriorität, für die im Sinne des

⁸ Es können (und sollen im Falle von Gelegenheitsfenstern) also auch stadtklimatischen Anpassungsmaßnahmen bspw. in Flächen der Handlungspriorität 3 umgesetzt werden, wenn noch nicht alle Flächen in den höheren Handlungsprioritäten angepasst wurden.



Vorsorgegedankens jedoch die Einhaltung gewisser klimaökologischer Standards bei Entwicklungen empfohlen wird.

Tabelle 22: Mit den Handlungsprioritäten Stadtklima im Wirkraum verbundene allgemeine Planungshinweise.

Bewertung im Wirkraum	Planungshinweise
Handlungspriorität 1 – 2	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation sind notwendig und je nach ihrer Wirksamkeit zu priorisieren. Im Bestand ist die Möglichkeit entsprechender Maßnahmen zu prüfen. Es sollte keine weitere Versiegelung (insbesondere zu Lasten von Grün-/Freiflächen) erfolgen. Freiflächen sind zu erhalten und der Vegetationsanteil sollte erhöht sowie möglichst Entsiegelungsmaßnahmen durchgeführt werden. Ausreichend Ausgleichsräume sollten fußläufig gut erreichbar und zugänglich sein.
Handlungspriorität 3 – 5	Maßnahmen zur Verbesserung der bioklimatischen Situation werden empfohlen. Je nach Tag- bzw. Nachtsituation sind ggfs. zusätzliche Begrünung und Verschattung sowie Entsiegelung oder Verbesserung der Durchlüftung notwendig. Freiflächen sollten erhalten und möglichst eine Erhöhung des Vegetationsanteils angestrebt werden.
Handlungspriorität 6 bzw. keine vorrangige Handlungspriorität	Klimaökologische Standards sind bei allen baulichen Entwicklungen einzuhalten (Bäume, Begrünung, geringe Versiegelung usw.)

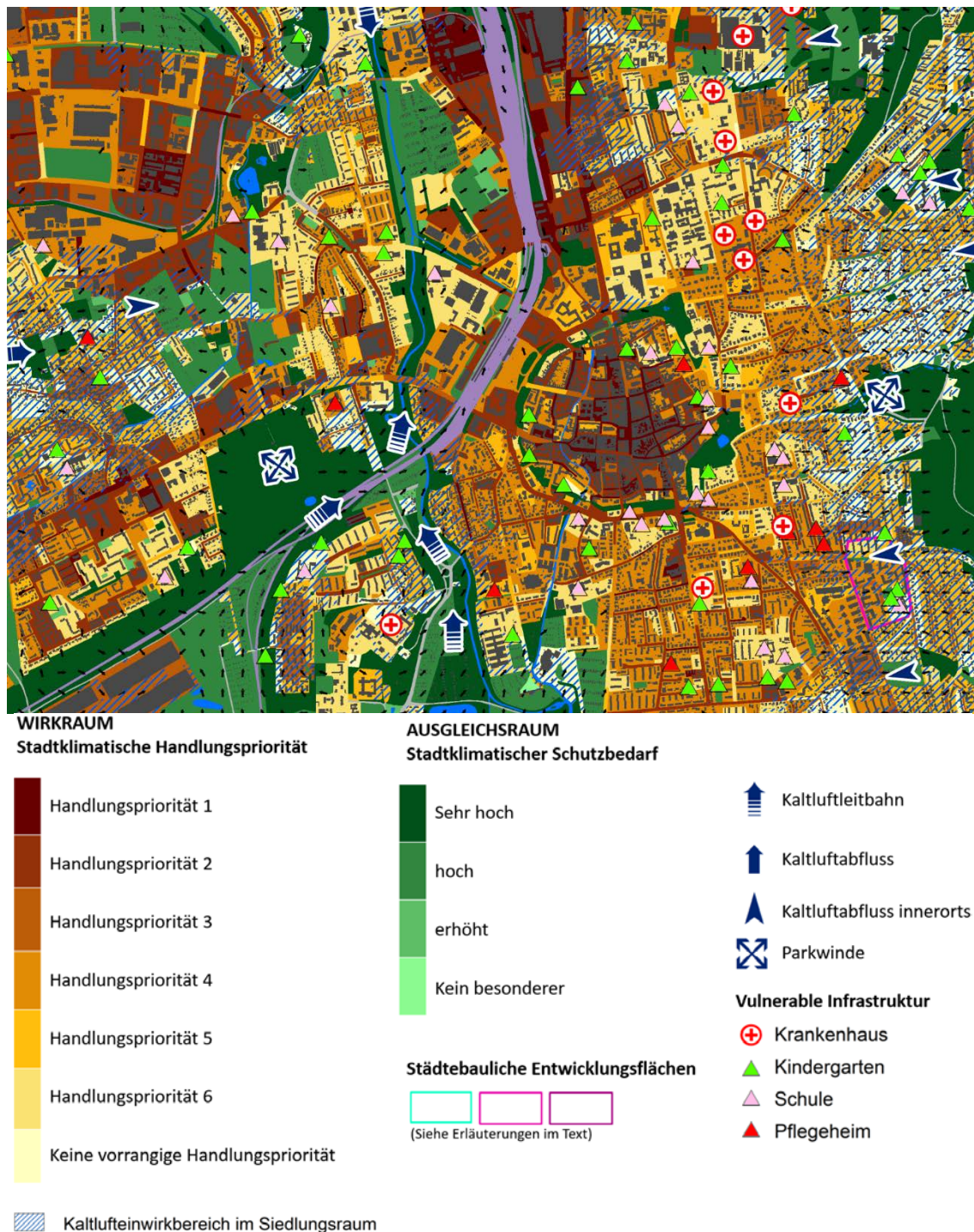


Abbildung 35: Ausschnitt aus der Planungshinweiskarte Stadtklima. Verkürzte Legende

5.4.2 STADTKLIMATISCHER SCHUTZBEDARF IM AUSGLEICHSPAUM

Die Planungshinweiskarte gibt den stadtklimatischen Schutzbedarf von Grün- und Freiflächen, landwirtschaftliche Flächen und Wäldern anhand ihrer Funktion für den Kaltlufthaushalt bzw. als Rückzugsorte an heißen Tagen wieder. Zur Ableitung des Schutzbedarfs wurden zunächst die Bewertungen aus den Bewertungskarten Tag und Nacht kombiniert (Tabelle 23). Dies erfolgte unter dem Grundsatz, dass eine Fläche, die am Tag oder in der Nacht die höchste Bedeutung aufweist, auch den höchsten Schutzbedarf zugeschrieben bekommt. Bei der weiteren Abstufung wurde für Grün- und Freiflächen (ohne landwirtschaftliche Flächen etc.) im siedlungsnahen Umkreis von 500 m die Bewertung der Tagsituation stärker gewichtet. Diese Flächen können ggfs. der



Bevölkerung als Rückzugsorte an heißen Tagen dienen. In den übrigen Flächen wiegt die Bewertung der Nachtsituation schwerer (Fokus auf den Kaltlufthaushalt).

Tabelle 23: Kombinierte Bewertung der bioklimatischen Bewertung aus den Bewertungskarten Nacht und Tag für die Flächen im Ausgleichsraum, unterteilt in fußläufige (potenzielle) Erholungsräume und weitere Grün- und Freiflächen.

Ausgleichsraum (fußläufiger Erholungsraum)						Ausgleichsraum (Landwirtschaftliche Flächen und siedlungsferne Grün- und Freiflächen)							
Bewertung Nacht						Bewertung Nacht							
Bewertung Tag		1	2	3	4	5	Bewertung Tag		1	2	3	4	5
	1	1	1	2	3	4		1	1	2	3	4	5
	2	2	2	2	3	4		2	1	2	3	4	5
	3	3	3	4	4	5		3	2	2	3	4	5
	4	4	4	4	5	5		4	3	3	4	4	5
	5	5	5	5	5	5		5	4	4	5	5	5

1 = sehr geringe, ..., 5 = höchste bioklimatische Bedeutung

Beispielsweise wird einer Grünfläche, welche sich in fußläufiger Entfernung zum Siedlungsraum befindet und am Tage eine sehr hohe Bedeutung (5) aufweist, in Kombination mit sehr geringer Bedeutung (1) in der Nacht eine Gesamt-Bedeutung von 5 = am höchsten zugeordnet (vgl. Tabelle 23, linke Seite). Eine im Umland liegende Freifläche mit hoher Bedeutung (4) in der Nacht und geringer Bedeutung (2) am Tage wird insgesamt mit hoher (4) Bedeutung bewertet (vgl. Tabelle 23, rechte Seite).

Die Zuweisung der Schutzbedarfe für die Planungshinweiskarte ist direkt abhängig von der jeweiligen stadtklimatischen Bedeutung. Flächen, die in mindestens einer der drei Szenarien (Ist, Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“, Zukunftsszenario „starker Klimawandel“) in die Kategorie der höchsten Bedeutung für das Stadtklima fallen, wird der höchste Schutzbedarf zugewiesen (Tabelle 24). Der hohe Anteil von Flächen mit hohem oder sehr hohem stadtklimatischen Schutzbedarf (76 % aller Flächen im Ausgleichsraum) geht auf die großen siedlungsnahen Waldflächen in Göttingen zurück, die am Tag eine (sehr) hohe Bedeutung aufweisen. Aber auch die meisten landwirtschaftlichen Flächen, die an belastete Wohnsiedlungen angrenzen, fallen aufgrund ihrer Bedeutung für die nächtliche Kaltluftversorgung in die Kategorie mit hohem oder sehr hohem Schutzbedarf.

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



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

Bewertung im Ausgleichsraum	Methodische Herleitung	Anteil an Flächen im Wirkraum
Sehr hoher Schutzbedarf	Höchste stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	29,1 %
Hoher Schutzbedarf	Hohe stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	47,4 %
Erhöhter Schutzbedarf	Mittlere stadtklimatische Bedeutung in mindestens einer der drei Szenarien	5,7 %
Kein besonderer Schutzbedarf	Übrige Flächen	17,8 %

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

Bewertung im Ausgleichsraum	Planungshinweise
Sehr hoher Schutzbedarf	Der Erhalt oder die Verbesserung der stadtklimatischen Funktion ist notwendig und prioritär. Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der jeweiligen stadtklimatischen Funktion (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung) nachzuweisen. Je nach Art, Lage und Größe des Vorhabens kann dies über eine fachliche Stellungnahme oder modellhafte Untersuchung erfolgen.
Hoher Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Flächen ist die Erhaltung oder Verbesserung der stadtklimatischen Funktion anzustreben (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei baulichen Entwicklungen ist eine klimafachliche Einschätzung vorzunehmen, bei größeren Vorhaben kann eine modellhafte Untersuchung erforderlich sein.
Erhöhter Schutzbedarf	Bei Eingriffen in die Flächen ist auf die stadtklimatische Funktion zu achten (bspw. Kaltlufttransport, Verschattung). Bei größeren Vorhaben ist eine klimafachliche Begleitung anzustreben.
Kein besonderer Schutzbedarf	Die Flächen weisen für den derzeitigen Siedlungsraum keine besondere stadtklimatische Funktion auf. Eingriffe sollten unter Berücksichtigung der grundsätzlichen Klimafunktionen erfolgen.



5.4.3 STADTKLIMATISCHE BEWERTUNG DER STÄDTEBAULICHEN ENTWICKLUNGSFLÄCHEN

Die städtebaulichen Entwicklungsflächen sind in der Planungshinweiskarte mit einer farblichen Umrandung versehen. Hierbei handelt es sich um neun noch nicht (vollständig) umgesetzte rechtskräftige Bebauungspläne (vgl. Kapitel 3.1.1). Sie wurden in den beiden Zukunftsszenarien modelliert und zeigen somit die potenziellen zukünftigen Hitzebelastungen am Tage und in der Nacht nach Umsetzung der Bebauungsplanung. Analog zu allen Siedlungsflächen wurde ihnen eine stadtklimatische Handlungspriorität zugewiesen. Zusätzlich zeigt die farbliche Umrandung die Bewertung der stadtklimatischen Verträglichkeit dieser Entwicklungsflächen an, welche auf der modellierten Handlungspriorität sowie (sofern gegeben) der bioklimatischen Bedeutung als Grünfläche in der Ist-Situation basiert. Sofern Entwicklungsflächen aus mehreren Bewertungsflächen bestehen, wurde die stadtklimatische Verträglichkeit der Planung zusammenfassend für die ganze Fläche vorgenommen.

Fünf der neun Entwicklungsflächen sind mit Kategorie A bewertet. In ihnen ist die vorgesehene Entwicklung unter Beachtung klimaökologischer Standards stadtklima-verträglich möglich. Jeweils zwei Flächen fallen in die Kategorien B bzw. C. Die Kriterien und Charakteristika sind in **Tabelle 26** aufgeführt. Die Bewertung ist sowohl für B als auch für C gleich: Eine Entwicklung in diesen Flächen ist stadtklimatisch verträglich möglich, die modellierte Planung bedarf aber noch optimierender Maßnahmen und eine klimafachliche Begleitung wird empfohlen.

Tabelle 26: Bewertungsgrundlagen der stadtklimatischen Verträglichkeit der städtebaulichen Erweiterungsflächen

Symbol	Kriterien für Flächen	Betrifft folgende Entwicklungsflächen	Bewertung, Planungshinweise
A 	Stadtklimatische Handlungspriorität 5, 6 oder keine. Falls in Ist-Situation unbebaut: Grünfläche höchstens mit mittlerer Bedeutung (Tag/Nacht)	• Auf der Lieth • Kleehoefen • Menzelberg • Wiesental • Wakenbreite	Die vorgesehene Entwicklung der Fläche bewirkt keine signifikante Verschlechterung des Stadtklimas vor Ort. Sie ist unter Beachtung klimaökologischer Standards stadtklimaverträglich möglich.
B 	Stadtklimatische Handlungspriorität 1 bis 4. Falls in Ist-Situation unbebaut: Grünfläche höchstens mit mittlerer Bedeutung (Tag/Nacht)	• Europaquartier Hol-tenser Berg • Grüne Mitte Ebertal	Fläche mit insgesamt relativ hoher Handlungspriorität bzw. Wärmebelastung im Planzustand. Im Falle von in der Ist-Situation unbebauten Flächen haben diese aktuell lediglich eine mittlere oder geringe Bedeutung als stadtklimatische Ausgleichsfläche, so dass der Eingriff mit möglichst geringen Auswirkungen auf weitere, umliegende Wohnsiedlungsflächen gestaltet werden kann. Eine Entwicklung ist mit optimierenden stadtklimatischen Maßnahmen möglich, klimafachliche Begleitung der Planung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse wird empfohlen.
C	Stadtklimatische Handlungspriorität 5, 6 oder	• Lange Rekesweg • Nördlich Deneweg	Fläche mit insgesamt weniger hoher Handlungspriorität bzw. Wärmebelastung



	keine. Grünfläche in der Ist-Situation mit hoher oder sehr hoher Bedeutung (Tag/Nacht)	im Planzustand. Die in der Ist-Situation unbebauten Grünflächen haben vor allem nachts eine hohe Bedeutung als Ausgleichsraum für umliegende Flächen, die durch den geplanten Eingriff signifikant gestört würde. Eine Entwicklung ist mit optimierenden stadtklimatischen Maßnahmen möglich, klimafachliche Begleitung der Planung auf Basis der Ergebnisse der Stadtklimaanalyse wird empfohlen.
--	--	--



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.
- BBSR (2015): Überflutungs- und Hitzevorsorge durch die Stadtentwicklung. Strategien und Maßnahmen zum Regenwassermanagement gegen urbane Sturzfluten und überhitzte Städte.
- Beckmann S., Hiete M., Beck C. (2021): Threshold temperatures for subjective heat stress in urban apartments — Analysing nocturnal bedroom temperatures during a heat wave in Germany. Climate Risk Management, Volume 32. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100286> (letzter Abruf Mai 2024)
- BFN (2016) – Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.): Urbanes Grün in der doppelten Innenentwicklung. BFN-Skripten 444.
- BMVI (2016): Handlungshilfe Klimawandelgerechter Regionalplan. Ergebnisse des Forschungsprojektes KlimREG für die Praxis: Schriftenreihe: MORO-Praxis. BMVI.
- Bundesregierung (2004): Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV).
- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
- Business Wissen (2023): Grundlagen und Vorgehensweise bei der Szenario-Technik. Online: <https://www.business-wissen.de/hb/grundlagen-und-vorgehensweise-bei-der-szenario-technik> (letzter Abruf Mai 2024).
- DGNB (2020): DGNB System – Kriterienkatalog Quartiere VERSION2020. Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen.
- DKRZ - Deutsche Klimarechenzentrum (2023): Die SSP-Szenarien. Online: <https://www.dkrz.de/de/kommunikation/klimasimulationen/cmip6-de/die-ssp-szenarien> (letzter Abruf Mai 2024)
- DWD (2014): MUKLIMO_3 Modell.
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2018): Datensätze auf der Basis der RCP-Szenarien. Online: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimaprojektionen/fuer_deutschland/fuer_dtld_rcp-datensatz_node.html
- DWD (2020): Nationaler Klimareport, Klima – gestern, heute und in der Zukunft.
- DWD (2020a): Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut. Pressemitteilung des Deutschen Wetterdienstes vom 12.11.2020.
- DWD (2022a): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Beobachtungsdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- DWD (2022b): Datenbasis: Deutscher Wetterdienst, Rasterdaten. ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/
- DWD (2023a): Wetter- und Klimalexikon. https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/lexikon_node.html. (letzter Abruf Mai 2024)
- DWD (2023b): Stadtklima - die städtische Wärmeinsel. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadt/pl/projekt_waermeinseln/startseite_projekt_waermeinseln.html. (letzter Abruf Mai 2024)
- DWD – Deutscher Wetterdienst (2024): Climate Data Center (CDC). Beobachtungs- und Rasterdaten. Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC.
- Fanger, P.O. (1972): Thermal Comfort, Analysis and Application in Environment Engineering. New York: McGraw Hill.
- 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 regionale 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: 10.1127/0941-2948/2002/0011-0601.
- Groß, G. (2012a): Effects of different vegetation on temperature in an urban building environment. *Micro-scale numerical experiments*, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 4, 399-412.
- Groß, G. (2012b): Numerical simulation of greening effects for idealised roofs with regional climate forcing, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 21, No. 2, 173-181.
- Groß, G. (2013): On the parametrization of urban land use in mesoscale models, *Boundary-Layer Meteorol* (2014) 150:319-326.
- Groß G. (2016): Dispersion of traffic exhausts emitted from a stationary line source versus individual moving cars – a numerical comparison, *Meteorologische Zeitschrift*.
- Groß, G. (2017): Some effects of water bodies on the environment – numerical experiments, *Journal of Heat Island Institute International* Vol. 12-2.
- HLNUG (Hg.) (2022): Interaktive Entscheidungshilfe – Checklisten und Einführung in Methoden der Stadtklimaanalyse. Unter Mitarbeit von Infrastruktur & Umwelt, Professor Böhm und Partner. Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung. Online verfügbar unter https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/klima/Handlungshilfen/Interaktive_Entscheidungshilfe_Stadtklimaanalysen.pdf, zuletzt geprüft am 21.05.2024.
- 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.
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* – In Vorbereitung.
- 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.
- Jacob et al. (2016): Regionale Klimamodellierung. In: *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* S. 27-35. Cham: Springer-Verlag.
- Jendritzky, G.; Menz, G.; Schirmer, H.; Schmidt-Kessen, W. (1990): Methodik zur raumbezogenen Bewertung der thermischen Komponente im Bioklima des Menschen (Fortgeschriebenes Klima-Michel-Modell). In: *Beiträge der Akademie für Raumforschung und Landesplanung*, Bd. 114.
- Jendritzky (2007): The Universal Thermal Climate Index UTCI. http://www.utci.org/cost/publications/ICEE_2007-12-Abstract_UTCI_Jendritzky.pdf



- 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.
- LBEG 2022: Geofakten 39: Dokumentation der niedersächsischen Klimaprojektionsdaten AR5-NI v2.1. Online: https://dx.doi.org/10.48476/geofakt_39_1_2022
- Laurent et al (2018): Reduced cognitive function during a heat wave among residents of non-air-conditioned buildings: An observational study of young adults in the summer of 2016. In: PLOS Medicine.
- Linke C. et al. (2016): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Potsdam.
- Mayer, H.; Beckröge, W. ; Matzarakis, A. (1994): Bestimmung von stadtklimarelevanten Luftleitbahnen. UVP-report 5/94, S. 265-268.
- Mosimann et al. (1998): Schutzgut Klima/Luft in der Landschaftsplanung. Bearbeitung der klima- und immissionsökologischen Inhalte im Landschaftsrahmenplan und Landschaftsplan. Schriftenreihe: Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie.
- Moss R. H., Edmonds J. A., Hibbard K. A., Manning M. R., Rose S. K., van Vuuren D. P., Carter T. R., Emori S., Kai-numa 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.
- MVI (2012) - Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Städtebauliche Klimafibel. Hinweise für die Bauleitplanung.
- Oke (2017): Urban Climates. Cambridge: Cambridge University Press.
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R., Wilson C. (2012): The challenge to keep global warming below 2 °C. Nat. Clim. Change 3, 4–6.
- R Core Team (2019): R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- REKLIES-DE (2017): REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN ENSEMBLE FÜR DEUTSCHLAND - NUTZERHANDBUCH.
- SANTHOLZ und SETT (2019): Erfahrungen und Bedarfe von Akteuren der Stadtplanung im Hinblick auf Vulnerabilität gegenüber Hitzestress. Ergebnisse einer Haushalts-Umfrage zum Hitzeempfinden in Bonn. UNU Workingpaper.
- Schär, Ch., Frei, D. Lüthi, H.C. Davies (1996): Surrogate climate-change scenarios for regional climate models. Geophys. Res. Lett. 23, 669-672.
- Sievers, U. (2005): Das Kaltluftabflussmodell KLAM_21. Berichte des DWD 227, Offenbach.
- Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien: Springer.
- The COMET program (2017): Wildfire Smoke Tracing Up-Valley/Down-Valley Winds. <https://satellitellai-sonblog.com/2017/10/13/wildfire-smoke-tracing-up-valleydown-valley-winds/>
- The International Civil Aviation Organization (ICAO) Standard Atmosphere (1957). Nature 179, 299–300. <https://doi.org/10.1038/179299a0>
- 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. Umweltbundesamt.
- UBA (2019a): Untersuchung der Potentiale für die Nutzung von Regenwasser zur Verdunstungskühlung in Städten. UBA-Texte.



UBA (2020): Gesundheitsrisiken durch Hitze. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-gesundheit/gesundheitsrisiken-durch-hitze#gesundheitsrisiko-hitze>

UBA – Umweltbundesamt (2022a): Trends der Lufttemperatur. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-lufttemperatur#steigende-durchschnittstemperaturen-weltweit>

UBA – Umweltbundesamt (2022b): Trends der Niederschlagshöhe. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/trends-der-niederschlagshoehe>

UBA – Umweltbundesamt (2022c): Indikator: Heiße Tage. Online: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#die-wichtigsten-fakten>

Urban H. & Steininger K.W. (2015): Manufacturing and Trade: Labour Productivity Losses. In: Steininger K., König M., Bednar-Friedl B., Loibl W., Kranzl L., Prettenhaler F., Haas W., Formayer H., Goetzl M., Zülka 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.

VDI (2022) VDI-Richtlinie 3787, Bl.2: Methoden zur human-biometeorologischen Bewertung der thermischen Komponente des Klimas.



GEO-NET Umweltconsulting GmbH
Hannover, den 20.06.2024

Erstellt von:

Elke Hipler (Diplom Geographie)

Ulrike Vogelsberg (Diplom Meteorologie)

Nadja Krause (M.Sc. Geoinformationstechnologien)

Geprüft von:

Dr. Cornelia Burmeister (Diplom Geographie)

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



Anhang

Liste der im Rahmen der Stadtklimaanalyse erstellten Karten (Format DIN A0)

- **Modellergebnisse**
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis PET 14 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Lufttemperatur 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom mit Strömungsfeld 4 Uhr Ist-Situation
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom mit Strömungsfeld 4 Uhr Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“
 - Karte Modellergebnis Kaltluftvolumenstrom mit Strömungsfeld 4 Uhr Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Klimaanalysekarten**
 - Klimaanalysekarte Ist-Situation
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“
 - Klimaanalysekarte Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Bewertungskarten**
 - Bewertungskarte Nachtsituation Ist-Situation
 - Bewertungskarte Nachtsituation Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“
 - Bewertungskarte Nachtsituation Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
 - Bewertungskarte Tagsituation Ist-Situation
 - Bewertungskarte Tagsituation Zukunftsszenario „mittelstarker Klimawandel“
 - Bewertungskarte Tagsituation Zukunftsszenario „starker Klimawandel“
- **Planungshinweiskarte**



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



Tabelle A 3: Zuordnung von Schwellenwerten des Bewertungsindex PET während der Tagstunden (nach VDI 2022).

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	Schwache 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