

Lokale Besonderheiten des städtischen Wärmeinseleffekts in Dresden

Masterarbeit

Johanna Glaß

Studiengang: M.Sc. Geoökologie

Erstgutachter: Prof. Dr. Matthias Mauder, TU Dresden, Professur für Meteorologie

Zweitgutachter: Dr. Florian Hogewind, Karlsruher Institut für Technologie

Betreuung: Dr. Astrid Ziemann und Dr. Valeri Goldberg, TU Dresden

04. Dezember 2023

Karlsruher Institut für Technologie

Institut für Geographie und Geoökologie

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis.....	VII
Abkürzungsverzeichnis.....	IX
Abstract	XI
Zusammenfassung.....	XIII
Eidesstattliche Erklärung.....	XV
Danksagung.....	XVI
1 Einleitung.....	1
1.1 Hintergrund und Motivation	1
1.2 Aktueller Forschungsstand.....	2
1.3 Zielsetzung, Hypothesen und Forschungsfragen	4
2 Theoretische Grundlagen.....	6
2.1 Besonderheiten des Stadtklimas.....	6
2.2 Der städtische Wärmeinseleffekt (UHI-Effekt).....	9
2.3 Geografische und klimatische Einordnung der Stadt Dresden	10
2.4 Mögliche klimawirksame lokale Besonderheiten in Dresden	12
2.4.1 Topografische Besonderheiten und Kaltluftsituation in Dresden.....	12
2.4.2 Grüne Infrastruktur in Dresden.....	13
2.4.3 Blaue Infrastruktur in Dresden.....	15
3 Material und Methoden.....	18
3.1 Untersuchungsgebiet und Messstationen	18
3.2 Messgeräte und untersuchte meteorologische Größen.....	20
3.3 Datenrecherche und -aufbereitung	21
3.3.1 Datenrecherche.....	21
3.3.2 Datenaufbereitung und zeitliche Eingrenzung.....	22
3.3.3 Methodischer Test zur Vergleichbarkeit verschiedener Datensätze	23
3.4 Auswahl geeigneter Datenzeiträume.....	26

3.5 Datenauswertung.....	30
3.5.1 Vorgehen bei der statistischen Betrachtung.....	30
3.5.2 Vorgehen bei der Einzelfallbetrachtung.....	31
3.5.3 Absicherung der gemeinsamen Zeitbasis.....	32
3.5.4 Identifizierung lokaler Wärmeinseln.....	32
3.5.5 Festlegung von Einzelfällen.....	32
3.5.6 Vorab-Analyse zum Windeinfluss für Hypothese 1.....	35
3.5.7 Auswahl geeigneter längerer Hitzeperioden	42
3.6 Vorgehen bei der Fehlerbetrachtung und Unsicherheitsdiskussion.....	44
4 Ergebnisse und Diskussion	45
4.1 Übersicht der Tagesgänge.....	46
4.1.1 Auswertung des gesamten Tagesverlaufs.....	46
4.1.2 Auswertung der nächtlichen Temperaturverläufe.....	47
4.2 Einfluss blauer Infrastruktur auf lokale Temperaturen – Hypothese 1.....	51
4.3 Kaltlufteinfluss auf lokale Temperaturen – Hypothese 2.....	53
4.4 Repräsentativität der Messstationen.....	56
4.4.1 Plausibilitätsprüfung: Repräsentativität der Referenzstation.....	56
4.4.2 Plausibilitätsprüfung: Typische Stadtstation.....	59
4.5 Auswertung der lokalen Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden	63
4.5.1 Mittlerer UHI-Effekt	63
4.5.2 Ort/ Zeitpunkt des nächtlichen UHI-Maximums in zeitlicher/ räumlicher Auflösung	67
4.5.3 Ursachen für die Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden	69
4.5.3.1 Allgemeine Ursachen	69
4.5.3.2 Einfluss grüner Infrastruktur – Hypothese 3	71
4.5.3.3 Einfluss blauer Infrastruktur.....	76
4.5.3.4 Einfluss topografischer Besonderheiten	78
4.5.4 Veränderung des UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode.....	79
4.6 Bewertung der Stationen anhand lokaler Klimazonen nach Steward und Oke (2012)	84

4.7 Fehlerbetrachtung und Unsicherheitsdiskussion.....	87
4.7.1 Gerätetechnische Unsicherheiten.....	87
4.7.2 Unsicherheiten aufgrund von Umgebungsfaktoren	89
4.7.3 Unterschiedliche Messbedingungen und Qualitätsanforderungen.....	90
4.7.4 Unsicherheiten bei der Datenauswertung.....	90
4.7.5 Unsicherheiten bei den Ergebnissen.....	92
5 Ableitung von Handlungsempfehlungen.....	93
6 Schlussfolgerung	97
7 Literaturverzeichnis.....	99
8 Anhang	113
8.1 Anhang: Stationssteckbriefe	113
8.2 Anhang: Windeinfluss	134
8.3 Anhang: Übersicht Datensätze.....	135
8.4 Anhang: Ergebnisse	137
8.5 Anhang: Übersicht über den elektronischen Anhang	144

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht über die Lage aller untersuchten Stationen im Dresdener Raum.....	18
Abbildung 2: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BOT, GEB4, PIL und STR im Vergleich zur Referenzstation HOS als Stundenmittel für den Einzelfall JUN10 zur Beantwortung von Hypothese 1 (Einfluss blauer Infrastruktur auf lokale Temperaturen)...	52
Abbildung 3: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BOT, PIL und STR im Vergleich zur Referenzstation HOS als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Beantwortung von Hypothese 2 (Kaltlufteinfluss auf lokale Temperaturen).	54
Abbildung 4: Vergleich der absoluten Temperaturen [°C] bzw. der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen HOS und PIL als Stundenmittel über den statistisch gemittelten Tagesverlauf der Sommer 2018-2022 zur Identifizierung einer geeigneten Referenzstation im Umland.....	57
Abbildung 5: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BER, NEU, NOR, STR und WIN im Vergleich zur Referenzstation HOS als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der Sommer 2018-2022 zur Identifizierung einer typischen Stadtstation.	60
Abbildung 6: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stadtstationen BER, BOT, GEB2, NEU, NOR, STR und WIN im Vergleich zur Referenzstation HOS als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Identifizierung des mittleren stationspezifischen UHI-Effekts.....	64
Abbildung 7: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stadtstationen BER, BOT, GEB2, NEU, NOR, STR und WIN im Vergleich zur Referenzstation HOS als Stundenmittel für den Einzelfall AUG2 zur Untersuchung von Hypothese 3 (Einfluss grüner Infrastruktur).	72
Abbildung 8: Ansicht der Station Bergstraße und ihrer Umgebung von Süden.....	115
Abbildung 9: Ansicht der Station Bergstraße und ihrer Umgebung von Norden.	115
Abbildung 10: Ansicht der Station Botanischer Garten und ihrer Umgebung von Nordosten.	117
Abbildung 11: Ansicht der Station Botanischer Garten und ihrer Umgebung von Südwesten.	117
Abbildung 12: Ansicht der Station Geberbach 2 und ihrer Umgebung.	119
Abbildung 13: Ansicht der Station Geberbach 2 und ihrer Umgebung.	119
Abbildung 14: Ansicht der Station Geberbach 4 und ihrer Umgebung von Nordosten.	121
Abbildung 15: Ansicht der Station Geberbach 4 und ihrer Umgebung von Südwesten.	121
Abbildung 16: Ansicht der Station Hosterwitz und ihrer Umgebung von Westen.	123
Abbildung 17: Ansicht der Station Hosterwitz und ihrer Umgebung von Osten.	123

Abbildung 18: Ansicht der Station Neustadt und ihrer Umgebung von Osten.....	125
Abbildung 19: Ansicht der Station Neustadt und ihrer Umgebung von Südwesten.....	125
Abbildung 20: Ansicht der Station Nord und ihrer Umgebung von Nordosten.....	127
Abbildung 21: Ansicht der Station Nord und ihrer Umgebung von Südwesten.	127
Abbildung 22: Ansicht der Station Pillnitz und ihrer Umgebung von Südwesten.....	129
Abbildung 23: Ansicht der Station Pillnitz und ihrer Umgebung von Norden.	129
Abbildung 24: Ansicht der Station Strehlen und ihrer Umgebung von Südwesten.....	131
Abbildung 25: Ansicht der Station Strehlen und ihrer Umgebung von Nordosten.	131
Abbildung 26: Ansicht der Station Winckelmannstraße und ihrer Umgebung von Nordwesten..	133
Abbildung 27: Ansicht der Station Winckelmannstraße und ihrer Umgebung von Osten.	133
Abbildung 28: Windrose um die Station HOS.	134
Abbildung 29: Windrose um die Station GEB4.....	134
Abbildung 30: Boxplots mit statistisch ermitteltem Tagesgang jeder Station.....	137
Abbildung 31: Gekürzte Definitionen für lokale Klimazonen.....	143

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht wichtiger klimatologischer Größen der Station KLO für die Jahre 2018-2022 sowie die Mittelwerte der Referenzzeiträume 1961-1990 und 1991-2020.	11
Tabelle 2: Grundlageninformationen zu allen verwendeten Stationen.	19
Tabelle 3: Zuordnung der einzelnen Messwerte und -intervalle zu einem Stundenwert.	24
Tabelle 4: Ergebnis des Vergleichs der Differenzen der Stundenwerte über alle verwendeten Werte und tageweise über den Zeitraum 2013-2022 für Daten der Station STR.....	24
Tabelle 5: Ergebnis des Vergleichs der Differenzen der Stundenwerte über alle verwendeten Werte und tageweise über die Sommerhalbjahre 2018-2022 für Daten der Station STR.	25
Tabelle 6: Ergebnis des Vergleichs der Differenzen der Stundenwerte über alle verwendeten Werte und tageweise über das Sommerhalbjahr 2022 für Daten der Station WIN.....	25
Tabelle 7: Vorgehen und Kriterien zur Auswahl geeigneter Datenzeiträume.	26
Tabelle 8: Anzahl der Einträge pro Monat bzw. Sommer und Station über alle fünf Jahre (2018-2022) zusammengefasst, sowie die durchschnittlichen prozentualen Anteile an den jeweils maximal möglichen Einträgen.	31
Tabelle 9: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswahl von Einzelfällen.	32
Tabelle 10: Gewählte Einzelfall-Tage pro Monat.	34
Tabelle 11: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswertung des Windeinflusses an der Station HOS auf Grundlage aller in Kapitel 3.4 ausgewählten Strahlungstage.	36
Tabelle 12: Übersicht der für den Windeinfluss der Station HOS geeigneten und ungeeigneten Windrichtungen sowie Pufferzonen im Radius von 200 m.....	37
Tabelle 13: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswertung des Windeinflusses an der Station GEB4 auf Grundlage aller in Kapitel 3.4 ausgewählten Strahlungstage.	40
Tabelle 14: Übersicht der für den Windeinfluss der Station GEB4 geeigneten und ungeeigneten Windrichtungen sowie Pufferzonen im Radius von 50 m.....	40
Tabelle 15: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswahl von Einzelfällen mit Eignung zur Auswertung längerer Hitzeperioden auf Grundlage aller in Kapitel 3.4 ausgewählten Strahlungstage.	42
Tabelle 16: Übersicht über die gewählten Zeitspannen zur Auswertung längerer Hitzeperioden 2018-2022.	43
Tabelle 17: Übersicht über die Ergebnisse der Arbeit, die Form der Darstellung sowie die Art und den Ort der Ergebnisdarstellung.....	45

Tabelle 18: Temperaturmittelwert über den ganzen Tag (TMW) und über nur die Nachtstunden (NMW) pro Station und Monat bzw. Sommer [°C] sowie die Differenzen zwischen TMW und NMW [K].	47
Tabelle 19: Nächtliche Temperaturdifferenzen [K] zwischen den Stadtstationen und der Referenzstation als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Identifizierung des Orts und Zeitpunkts des nächtlichen UHI-Maximums in zeitlicher/ räumlicher Auflösung.....	67
Tabelle 20: Veränderung der nächtlichen Lufttemperaturen [°C] sowie der Differenzen [K] der sieben Stadtstationen im Vergleich zur Umlandstation HOS für die Nachtstunden im Einzelfall einer längeren Hitzeperiode im Juni 2021 und die jeweilige Differenz der Werte im Vergleich zur gleichen Uhrzeit am Vortag [K].	81
Tabelle 21: Lokale Klimazonen (LCZ) an der Station inkl. Beschreibung, sowie im Umkreis von 50 m um die Station.....	85
Tabelle 22: Übersicht aller Messstationen mit Informationen zu verfügbaren Datenzeiträumen, Betreibern, Datenformaten und der verwendeten Mess-Sensorik.....	135
Tabelle 23: Statistische Auswertung der nächtlichen Temperaturverläufe.....	138
Tabelle 24: Auswertung der nächtlichen Temperaturverläufe der drei Einzelfälle.....	140
Tabelle 25: Messdaten zu Temperatur, relativer Feuchte, Windgeschwindigkeit sowie zur Niederschlagssumme der Station BOT in der Nacht zwischen 05. und 06.07.2022 in 10 min-Auflösung.	141
Tabelle 26: Übersicht der Folgen des in Tabelle 25 dargestellten Wetterereignisses auf die Temperaturstundenmittel aller vorhandener Stationen.....	142

Abkürzungsverzeichnis

Verwendete Messstationen:

Abkürzung	Erläuterung
BER	Dresden-Bergstraße
BOT	Botanischer Garten Dresden
GEB2	Messstelle 2 im Projekt „Blaues Band Geberbach“ (Pferderennbahn)
GEB4	Messstelle 4 im Projekt „Blaues Band Geberbach“ (Niedersedlitzer Flutgraben)
HOS	Dresden-Hosterwitz
NEU	Dresden-Neustadt
NOR	Dresden-Nord
PIL	Dresden-Pillnitz
STR	Dresden-Strehlen
WIN	Dresden-Winckelmannstraße

Meteorologische Größen:

Abkürzung	Einheit	Erläuterung
BG_h	Achtel	Mittlerer Bedeckungsgrad im Stundenintervall
DD_10	°	Mittlere Windrichtung im Zehnminutenintervall
DD_Nh	°	Mittlere Windrichtung im Nachtstundenintervall von 21 Uhr UTC bis 3 Uhr UTC (Endwerte)
FF_h	m/s	Median der Windgeschwindigkeit im Stundenintervall
FF_Nh	m/s	Median der Windgeschwindigkeit im Nachtstundenintervall von 21 Uhr UTC bis 3 Uhr UTC (Endwerte)
GS_d	J/(cm ² d)	Globalstrahlungssumme pro Tag
GS_d_pot	J/(cm ² d)	Potenzielle Globalstrahlungssumme pro Tag
GS_h	J/(cm ² h)	Globalstrahlungssumme pro Stunde
RF_10	%	Relative Feuchte im Zehnminutenintervall
RF_h	%	Relative Feuchte im Stundenintervall
RF_Nh	%	Relative Feuchte im Nachtstundenintervall von 21 Uhr UTC bis 3 Uhr UTC (Endwerte)
SD	h	Sonnenscheindauer
TT_10	°C	Lufttemperaturmittel im Zehnminutenintervall
TT_h	°C	Lufttemperaturmittel im Stundenintervall
TT_h_min	°C	Minimale stündliche Lufttemperatur
TT_h_max	°C	Maximale stündliche Lufttemperatur
ΔTT	K	Differenz der Lufttemperatur

Weitere Abkürzungen:

Abkürzung	Erläuterung
AUG	August
BfUL	Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Elbe
EF	Einzelfall
GR	Gegenrichtung
H1 (bzw. H2, H3)	Hypothese 1 (bzw. Hypothese 2, Hypothese 3)
JUL	Juli
JUN	Juni
LCZ	Englisch: Local Climate Zones Deutsch: Lokale Klimazonen
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LHD	Landeshauptstadt Dresden
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
OSW	OpenSensorWeb-Portal, https://data.opensensorweb.de
PCI	Englisch: Park Cool Island Deutsch: Parkkälteinsel
REF	Referenzstation, entspricht der Station HOS
TU Dresden	Technische Universität Dresden
UHI	Englisch: Urban Heat Island Deutsch: Urbane Wärmeinsel/ Stadtwärmeinsel/ Städtische Wärmeinsel
UHI-Effekt	Englisch: Urban Heat Island Effect Deutsch: Urbaner Wärmeinseleffekt/ Stadtwärmeinseleffekt/ Städtischer Wärmeinseleffekt
UTC	Englisch: Coordinated Universal Time Deutsch: Koordinierte Weltzeit
WB	Wasserbecken
WMO	World Meteorological Organization

Abstract

The urban population in Dresden, particularly in districts close to the city center, has grown due to the urbanization process. This is also forecast for the future. The increasing sealing of land surfaces and the characteristic structure of the three-dimensional urban body, reinforced by higher building density, lead to a modified climate in urban areas. This urban climate differs from that in rural areas, e.g., due to increased air temperatures (Urban Heat Island, UHI) and is accompanied by a reduced quality of life, especially during heat waves. Climate change exacerbates heat stress and poses major challenges for cities, where many vulnerable groups live in confined spaces. There is therefore an urgent need for research and action in cities to prioritize and implement suitable local adaptation measures based on quality-assured data. This is of particular interest for urban planning and healthcare in Dresden. Due to its location in the Elbe valley, the city of Dresden is especially interesting for analyzing the local characteristics of the UHI. The great interest of various measurement network operators in meteorological data is offset by a lack of comparability of previous study results due to different measurement standards and purposes as well as about data management.

In this master's thesis, meteorological data from permanent measuring stations of several measurement networks and from project measurement campaigns were analyzed. Using a specially developed methodology, a well-founded selection of a temporally and spatially suitable and comparable data collective was made. The aim was to analyze the local characteristics of the UHI effect in Dresden based on the thermal properties of gray, green, and blue infrastructure. Furthermore, the local characteristics of the topography and the immediate surroundings of the measuring stations in Dresden were considered. In addition to statistical analyzes over longer periods of time, individual cases were also analyzed using previously developed selection criteria. The main objects of investigation were nights after sunny days in the summers of 2018 to 2022, as maximum urban heat island intensities were to be expected especially in this period.

The results showed a constant average city-wide heat island effect of $2.2 \text{ K} \pm 0.1 \text{ K}$ for Dresden over the nighttime hours and all analyzed summer heat periods for 2018 to 2022. This value was determined using a measuring station identified as typically urban compared to a representative rural station. The maximum nocturnal local urban heat island formed at a highly sealed station whose mean temperature was 3.1 K to 3.7 K higher than that of the reference station. In individual cases, differences of more than 5 K were achieved there. In contrast, the lowest effects were found at stations with a low degree of sealing and a high proportion of green infrastructure. In some cases, they were also inverted with values of up to -1.0 K compared to the rural area and thus represented urban Park Cool Islands (PCI). At night, no clear time for the temperature maximum could be determined.

The focus of the discussion about the causes of the local peculiarities was on a qualitative assessment. An assessment of possible prevailing station-specific influences was made using profiles created on site. The assignment of local climate zones according to Stewart und Oke (2012) to the station environments in Dresden showed very good agreement with the environmental conditions recorded in the profiles.

A local nocturnal cooling effect due to undeveloped and open floodplain areas (hypothesis 1) was confirmed for one of two investigated stations with at least -1.0 K and in some cases -2.0 K compared to the reference station. The air temperature at the station was not influenced by the wind coming from the respective watercourse. The extent of the cooling effect of the blue infrastructure depended much more on the proportion and type of green subsequent structure and its influence. This includes the irradiation conditions depending on the local horizon restriction and water availability.

A cooling effect due to topographically induced cold air flows in the Elbe valley (hypothesis 2) could also be confirmed for one of two investigated stations with at least -0.9 K and in some cases -3.0 K compared to the reference station. Existing tree and building structures might be possible causes for only slightly effective cold air flows.

Small-scale temperature differences in the city center can be explained primarily by the degree of sealing and the proportion of green spaces as well as the building structure. This includes the building density and height with the respective local horizon restriction and the shading situation. Sealed but undeveloped and open areas only exhibited a lower local UHI at night than sealed, densely built-up areas if there were a high proportion of green infrastructure and thus also unsealed areas (hypothesis 3). The effect was stronger in areas with open green infrastructure and high effective radiation at night.

What should be emphasized is the high urban climatic significance of inner-city green spaces, which can already reduce the nocturnal heat load even with small areas. Recommendations were made on measurement technology and methodology as well as for an expanded measurement network.

To reduce the UHI effect in Dresden, the potential of green and blue infrastructures and cold air flows should be used to a greater extent and further developed through urban planning concepts, in addition to less new sealing. In terms of adapting to advancing climate change, particular attention must be paid to the consistent integration and expansion of blue-green infrastructures in all urban planning processes. This can improve the quality of life in densely populated urban areas of Dresden, especially during heat periods with high thermal stress during the day and at night. Vulnerable population groups can also be better protected from health risks in this way.

Zusammenfassung

Durch den Urbanisierungsprozess ist eine Zunahme der Stadtbevölkerung in Dresden, insbesondere in innenstadtnahen Stadtteilen, zu verzeichnen und wird auch für die Zukunft prognostiziert. Die Versiegelung von immer mehr Landoberfläche und die charakteristische Struktur des dreidimensionalen Stadtkörpers, verstärkt durch die zunehmende Verdichtung der Baustruktur, führen zu einem modifizierten Klima in urbanen Räumen. Dieses unterscheidet sich von dem Klima im weniger bebauten Umland unter anderem durch erhöhte Lufttemperaturen (Städtische Wärmeinsel, en. Urban Heat Island, UHI) und geht insbesondere während Hitzewellen mit einer verringerten Lebens- und Aufenthaltsqualität einher. Der Klimawandel verschärft die Hitzebelastung und stellt Städte, in denen viele vulnerable Gruppen auf engem Raum leben, vor große Herausforderungen. Daher ist dringender Forschungs- und Handlungsbedarf in Städten gegeben, um anhand qualitätsgesicherter Daten geeignete lokale Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und umzusetzen. Dies ist vor allem für die Stadtplanung und das Gesundheitswesen in Dresden von Interesse. Die Stadt Dresden ist aufgrund ihrer Lage in der Elbtalweitung besonders interessant, um lokale Besonderheiten der UHI zu untersuchen. Dem großen Interesse an meteorologischen Daten durch verschiedene Messnetzbetreiber steht eine fehlende Vergleichbarkeit bisheriger Studienergebnisse aufgrund unterschiedlicher Messstandards und Messzwecke sowie hinsichtlich des Datenmanagements gegenüber.

In dieser Masterarbeit wurden Messdaten von Dauermessstationen mehrerer Messnetze sowie aus Projekt-Messkampagnen analysiert. Mit einer eigens erstellten Methodik erfolgte eine begründete Auswahl eines zeitlich und räumlich geeigneten und vergleichbaren Datenkollektivs. Ziel war die Bewertung lokaler Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden. Diese erfolgte in Abhängigkeit der thermischen Eigenschaften der grauen, grünen und blauen Infrastruktur sowie der lokalen Besonderheiten der Topografie und der direkten Umgebung der Messstationen in Dresden. Neben statistischen Analysen über längere Zeiträume wurden auch Einzelfälle betrachtet, für deren Auswahl zuvor geeignete Kriterien erarbeitet wurden. Gegenstand der Untersuchungen waren auf sommerliche Strahlungstage folgende Nächte in den Sommern 2018-2022, für die maximale Ausprägungen der Intensität der städtischen Wärmeinsel erwartet wurden.

Die Ergebnisse zeigten einen konstanten mittleren gesamtstädtischen Wärmeinseleffekt für Dresden über die Nachtstunden und alle untersuchten sommerlichen Hitzeperioden für 2018-2022 von $2,2 \text{ K} \pm 0,1 \text{ K}$. Dieser Wert wurde anhand einer als typische Stadtstation ermittelten Station im Vergleich zu einer repräsentativen Umlandstation festgestellt. Die maximale nächtliche lokale urbane Wärmeinsel bildete sich an einer hoch versiegelten Station mit einer im Mittel um $3,1\text{-}3,7 \text{ K}$ höheren Temperatur gegenüber der Referenzstation aus. In Einzelfällen wurden dort Differenzen von mehr als 5 K erreicht. Dagegen waren an Stationen mit geringem Versiegelungsgrad und hohem

Anteil grüner Infrastruktur die geringsten Effekte zu verzeichnen. Diese fielen teilweise auch mit Werten bis $-1,0$ K im Vergleich zur Umlandstation negativ aus und stellen somit urbane Parkkälteinseln (en. Park Cool Island, PCI) dar. Ein eindeutiger Zeitpunkt für das Temperaturmaximum während der Nacht konnte nicht festgestellt werden. Der Fokus der Diskussion der Ursachen der lokalen Besonderheiten lag auf einer qualitativen Betrachtung. Auf Basis von vor Ort erstellten Steckbriefen wurde eine Abschätzung möglicher vorherrschender stationsspezifischer Einflüsse gegeben. Die Zuordnung lokaler Klimazonen nach Stewart und Oke (2012) zu den Stationsumgebungen in Dresden zeigte eine sehr gute Übereinstimmung mit den in den Steckbriefen erfassten Umgebungsbedingungen.

Ein lokaler nächtlicher Kühleffekt durch unbebaute und offene Auenflächen (Hypothese 1) konnte für eine von zwei untersuchten Stationen mit mindestens $-1,0$ K und teilweise $-2,0$ K im Vergleich zur Referenzstation bestätigt werden. Ein auf die Lufttemperatur an der Station wirkender Wind einfluss aus der Richtung des jeweiligen Fließgewässers war nicht festzustellen. Die Ausprägung der Kühlwirkung blauer Infrastruktur hing vielmehr von dem Anteil und der Art grüner Folgestruktur und deren Einfluss ab. Dazu zählen die von der Horizonteinschränkung des Standorts abhängigen Ausstrahlungsbedingungen sowie die Wasserverfügbarkeit.

Eine Kühlwirkung durch topografisch bedingte Kaltluftströmungen im Elbtal (Hypothese 2) konnte ebenfalls für eine von zwei untersuchten Stationen mit mindestens $-0,9$ K und teilweise $-3,0$ K im Vergleich zur Referenzstation bestätigt werden. Zu den möglichen Ursachen für nur in geringem Maß wirksame Kaltluftströmungen zählen die vorhandenen Baum- und Bebauungsstrukturen.

Innerstädtische kleinräumige Temperaturunterschiede ließen sich in großem Ausmaß mit dem Versiegelungsgrad bzw. Grünflächenanteil sowie der Bebauungsstruktur begründen. Dazu zählen die Bebauungsdichte und -höhe mit der jeweiligen Horizonteinschränkung des Standorts sowie die Beschattungssituation. Versiegelte, aber unbebaute, offene Standorte wiesen gegenüber versiegelten, dicht bebauten Standorten nachts nur dann eine geringere lokale UHI auf, wenn gleichzeitig ein hoher Anteil an grüner Infrastruktur und damit auch unversiegelte Flächen vorhanden waren (Hypothese 3). An Standorten mit offener grüner Infrastruktur und hohem effektivem Ausstrahlungsvermögen war der Effekt verstärkt.

Die hohe stadtklimatische Bedeutung innerstädtischer Grünflächen, die auch bereits in kleinem Umfang eine Verringerung der nächtlichen thermischen Belastung bewirken können, wurde deutlich. Ein besonderes Augenmerk muss dabei auf die Vernetzung von blau-grünen Infrastrukturen sowie die Anpassung grauer Infrastruktur zur Nutzung der positiven blau-grünen Effekte gelegt werden. Auch das Potenzial von Kaltluftströmungen in Dresden sollte stärker genutzt und durch stadtplanerische Konzepte weiter ausgebaut werden.

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich wahrheitsgemäß, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der aktuell gültigen Fassung beachtet habe.

Die Stellen der Arbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angaben der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet.

Die eingereichte Arbeit ist weder vollständig noch in wesentlichen Teilen Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens gewesen.

Karlsruhe, den 04. Dezember 2023

Johanna Glaß

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Masterarbeit und während meines gesamten Studiums auf verschiedenste Weise unterstützt und motiviert haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau Dr. Astrid Ziemann und Herrn Dr. Valeri Goldberg für die umfassende und sehr engagierte Betreuung und Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung meiner Arbeit. Sie waren immer offen für Fragen und nahmen sich viel Zeit, um die Ergebnisse konstruktiv zu diskutieren und mir neue Denkanstöße zu geben.

Herrn Prof. Dr. Matthias Mauder möchte ich für die interessante und vielfältige Aufgabenstellung sowie für die Erstbegutachtung danken, ebenso Herrn Dr. Florian Hogewind für die Zweitkorrektur.

Schließlich möchte ich mich bei Frau Franziska Reinfried vom Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden sowie bei Frau Anette Pausch vom Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie bedanken, die mir wichtige meteorologische Messdaten und Metadaten für meine Auswertung zur Verfügung gestellt und meine Fragen ausführlich beantwortet haben.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

In Dresden waren im Dezember 2022 etwa 569.000 Menschen mit Hauptwohnsitz gemeldet. Damit ist seit dem Jahr 2000 eine Steigerung der Einwohnerzahl um mehr als 97.000 bzw. 20% zu verzeichnen (Landeshauptstadt Dresden [LHD], 2023c). Nicht nur in Dresden, sondern weltweit nimmt die Zahl der Menschen, die in Städten leben, zu. Im Jahr 2018 lag der Urbanisierungsgrad in Europa, der den Anteil der Stadtbevölkerung an der europäischen Gesamtbevölkerung beschreibt, bereits bei knapp 75%. Bis 2050 werden knapp 84% prognostiziert (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2019). Auch für Dresden wird ein weiterer Anstieg der Stadtbevölkerung erwartet, insbesondere in einigen Stadtteilen der Innenstadt sowie innenstadtnahen Stadtteilen (LHD, 2022a).

Der Urbanisierungsprozess hat die Versiegelung von immer mehr Landoberfläche durch Bebauung zur Folge. Die European Environment Agency [EEA] (2012) gibt für mehr als 70% der in ihrer Studie untersuchten deutschen Städte mit mehr als 100.000 Einwohnern einen Versiegelungsgrad zwischen 50% und 74% an. Für einzelne Dresdener Stadtteile werden für das Jahr 2015 Versiegelungsgrade, ohne den Anteil der Verkehrsflächen, von 70,5% und 73,4% für die Innere Altstadt und die Äußere Neustadt angegeben (LHD, 2015). Gleichzeitig wirkt sich die charakteristische Struktur des dreidimensionalen Stadtkörpers, verstärkt durch die zunehmende Verdichtung der Baustruktur, in veränderter Form auf die Wechselwirkung zwischen Erdoberfläche und bodennaher Atmosphäre aus. Dadurch bildet sich in der Stadt ein modifiziertes Klima mit Auswirkungen in der Mikro- bis unteren Mesoskala aus, das sich von dem Klima im nicht bzw. weniger bebauten Umland unterscheidet (Henninger & Weber, 2020; van Hove et al., 2011). Die Emissionen in Städten tragen trotz des geringen Anteils urbaner Räume an der globalen Landoberfläche maßgeblich zu erhöhten Emissionen von Treibhausgasen bei und gelten daher als bedeutender Treiber des Klimawandels (Henninger & Weber, 2020). Cleugh und Grimmond (2012) sowie Churkina (2008) verweisen auf verschiedene Studien, die zu dem Schluss kamen, dass mehr als 80% der Kohlendioxidemissionen in städtischen Gebieten entstehen, obwohl diese nur etwa 2% der weltweiten Landfläche einnehmen.

Das Stadtklima zeigt sich insbesondere in den gegenüber dem Umland erhöhten Lufttemperaturen, der sogenannten städtischen Wärmeinsel. Diese ist insbesondere in den auf sommerliche Strahlungstage folgenden Nächten während Hitzeperioden stark ausgeprägt und unterliegt verschiedenen lokalen und regionalen Einflüssen. Insgesamt führt die städtische Wärmeinsel zu einer erhöhten thermischen Wärmebelastung, einer oftmals verringerten Lebens- und Aufenthaltsqualität sowie einem beeinträchtigten gesundheitlichen Wohlbefinden der Menschen in urbanen Räumen (Hackenbruch, 2018; Henninger & Weber, 2020; Oke, 1982).

Der Klimawandel verschärft die Hitzebelastung durch erhöhte Lufttemperaturen. Für Städte ist diese herausfordernde Situation von besonderer Relevanz, da dort viele vulnerable Gruppen auf engem Raum leben und durch die Klimawandelfolgen auch gesundheitlichen Gefahren ausgesetzt sein können (EEA, 2012; Henninger & Weber, 2020; Nicholls et al., 2008; van Hove et al., 2011). Auch für Dresden hob die LHD in einem Umweltbericht bereits 1998 hervor, dass die festgestellten höheren mittleren Lufttemperaturen sowie die geringere nächtliche Abkühlung im Vergleich zum Umland während sommerlicher Hitzeperioden eine „hohe Wärme- bzw. bioklimatische Belastung für das Herz-Kreislauf-System des Menschen“ darstellen. Zu den Risikogruppen, die empfindlicher auf die stärkere Hitzebelastung reagieren, zählen vor allem ältere Menschen, deren Anteil in Dresden laut Prognosen bis 2040 kontinuierlich steigt (LHD, 2022a), aber auch Kinder, sowie Menschen mit chronischen Erkrankungen und gesellschaftlichen Benachteiligungen (Kravchenko et al., 2013). Der Anstieg einer hitzewellenbedingten Mortalität wird auf die Zunahme der Häufigkeit, Intensität und Dauer von Hitzewellen zurückgeführt, welche sich insbesondere negativ auf ältere Menschen auswirkt, deren Anzahl in städtischen Gebieten steigt (D'Ippoliti et al., 2010).

Daher ist dringender Forschungs- und Handlungsbedarf in Städten gegeben, um die Herausforderungen der Klimaanpassung zu bewältigen (EEA, 2012). Die lokale Betrachtung und Quantifizierung des urbanen Wärmeinseleffekts in Dresden ist insbesondere für die Stadtplanung und das Gesundheitswesen von Interesse, um geeignete Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und umzusetzen. Dabei besteht nicht nur Handlungsbedarf zur Anpassung an die gegenwärtige Klimavariabilität und deren Extreme, sondern auch bereits zur Anpassung an ein zukünftiges, geändertes Klima (Burton, 2004). Voraussetzung ist eine qualitätsgesicherte Datengrundlage, auf deren Basis gezielte stadtplanerische Entscheidungen getroffen werden können. Anhand wissenschaftlich fundierter, vor Ort ermittelter Daten ist es möglich, den Ist-Zustand festzustellen, beispielsweise zu den besonders von Hitzewellen betroffenen Quartieren oder den Einflüssen von temperaturmindernden Strukturen im Stadtgebiet. Diese lokalen Informationen sind unerlässlich für die städtische Planung von Anpassungsmaßnahmen (EEA, 2012).

1.2 Aktueller Forschungsstand

Die Stadt Dresden ist aufgrund ihrer Lage in der Elbtalweitung besonders interessant, um lokale Besonderheiten der städtischen Wärmeinsel und die Rolle von grauer, grüner und blauer Infrastruktur sowie topografische Effekte zu untersuchen. Auf ihre Besonderheiten wird in Kapitel 2.4 näher eingegangen.

In der Vergangenheit wurden bereits zahlreiche wissenschaftliche stadtklimatologische Studien mit Schwerpunkten auf verschiedenen meteorologischen Größen durchgeführt. In den letzten Jahrzehnten wurde das Klima um Dresden mehrmals großräumig analysiert und Projektionen für eine

zukünftige Entwicklung gegeben (Bernhofer et al., 2015; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie [LfULG], 2015; Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft [SMUL], 2008, 2015; Spekat & Enke, 2020).

Bezüglich der Situation von Klima und Umwelt in Dresden werden alle zwei Jahre Umweltberichte durch das Umweltamt der LHD herausgegeben. Der aktuelle Umweltbericht 2019/20 macht deutlich, dass auch Dresden in den letzten Jahren von den Auswirkungen starker Hitzewellen betroffen war (LHD, 2022e). Eine besonders ausführliche Analyse ist im Umweltbericht der LHD (1998) zu finden. Die stadtklimatische Situation wurde zudem durch das Ingenieurbüro Lohmeyer (Sörgel et al., 2008) mit einem Kaltluftgutachten untersucht. Auf dieser Basis wurde ein Umweltatlas mit einer synthetischen Klimafunktionskarte sowie einer Planungshinweiskarte veröffentlicht und mehrmals aktualisiert (LHD, 2010b, 2017, 2020b). Viele stadtklimatische Informationen lassen sich mittlerweile in einem interaktiven Themenstadtplan sowie in einem Open Data-Portal abrufen (LHD, 2023d, 2023h). Im Projekt „Heat Resilient City“ wurde der Fokus auf die Hitzebelastung in Dresden und das Wohlbefinden der Bevölkerung gelegt (Westermann, Baldin et al., 2021; Westermann, Boli-sius et al., 2021; Ziemann et al., 2021). Im Rahmen des seit 2018 laufenden Projektes „Blaues Band Geberbach“ des Umweltamtes der LHD unter wissenschaftlicher Begleitung der TU Dresden wird das Stadtklima in der Umgebung des Fließgewässers anhand von meteorologischen Messungen bewertet (Seidel, 2020; Süß, 2022). Schließlich wurden auch zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten an der TU Dresden mit stationären und mobilen Messungen zur Quantifizierung kleinräumiger Temperaturunterschiede innerhalb Dresdens unter anderem in Abhängigkeit von der Wetterlage sowie zu den Zusammenhängen von Lufttemperaturen und Oberflächentemperaturen oder Luftfeuchte durchgeführt (Hoyer, 2012; Koszinski, 2014; Mehler, 2011; Mittag, 2014; Pursche, 2014; Sauer, 2014; Süß, 2021). Dabei wurden immer wieder lokale städtische Wärmeinseln ermittelt und Vermutungen zu möglichen lokalen Einflüssen, beispielsweise durch Grünanlagen, geäußert.

Die Datenverfügbarkeit im Raum Dresden erlaubt es, die städtische Wärmeinsel in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung anhand mehrjähriger Lufttemperaturmessungen in der Stadt und dem Umland zu betrachten und auf ihre lokalen Besonderheiten hin zu analysieren. In Dresden werden die meteorologischen Messstationen von verschiedenen Akteuren betrieben. Dazu zählen der Deutsche Wetterdienst (DWD), das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), die Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL), das Umweltamt der Landeshauptstadt Dresden (LHD) und die Technische Universität (TU) Dresden. Dies zeugt von einem großen Interesse an Lufttemperaturdaten. Der DWD installierte beispielsweise 2020 eine von deutschlandweit fünf festen Stadtklimastationen in der Dresdener Neustadt (Deutscher Wetterdienst [DWD], 2020, 2023).

Gleichzeitig ist die direkte Vergleichbarkeit der bisher vorliegenden Studienergebnisse aufgrund der Messnetze mit unterschiedlichen Zielsetzungen und damit verbundenen verschiedenen Standards nicht gegeben. Dies betrifft beispielsweise die Sensorik und Messmethodik, aber auch die Datenauflösung und Datenspeicherung. Teilweise fehlt auch die Zugriffsmöglichkeit auf Daten, z. B. bei den Stationen der DREWAG – Stadtwerke Dresden GmbH oder privater Messnetzbetreiber. Hindernisse für die Vergleichbarkeit stellen zudem fehlende Metadaten, eine nicht-repräsentative Standortauswahl, zu kleine Stichprobengrößen sowie fehlende Bewertungen externer Einflüsse wie der Wettersituation oder der Saisonalität dar (Oke et al., 2017).

1.3 Zielsetzung, Hypothesen und Forschungsfragen

Ziel dieser Masterarbeit ist die Bewertung lokaler Besonderheiten des städtischen Wärmeineffekts in Dresden. Mit einer eigens erstellten Methodik erfolgt eine begründete Auswahl eines zeitlich und räumlich geeigneten Datenkollektivs von Messdaten von Dauermessstationen verschiedener Messnetze sowie aus Projekt-Messkampagnen. Dabei wird insbesondere auf eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Daten geachtet. Die Bewertung erfolgt in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussfaktoren wie den thermischen Eigenschaften der grauen, grünen und blauen Infrastruktur sowie lokalen Besonderheiten der Topografie und der direkten Umgebung der Messstationen in Dresden. Es sollen ein zeitlich und räumlich aufgelöster sowie ein mittlerer Wärmeineffekt ermittelt und schließlich Handlungsempfehlungen zur Anpassung an Hitzeperioden in Dresden gegeben werden.

Teilfragen dazu lauten:

- Wie repräsentativ sind die verschiedenen Stationen hinsichtlich des Stadtwärmeineffekts?
- Wie sieht der mittlere Stadtwärmeineffekt über alle Sommermonate für Dresden aus?
- Wie sehen die Tagesverläufe für die Ausprägung des lokalen städtischen Wärmeineffekts an den verschiedenen Stationen aus und wie ist diese zeitliche Variabilität zu bewerten?
- An welcher Station bildet sich die maximale lokale städtische Wärmeinsel aus?
- Wann tritt das Maximum des lokalen städtischen Wärmeineffekts auf und gibt es zeitliche Unterschiede zwischen den Stationen?
- Welche Ursachen gibt es für den Zeitpunkt und den Ort des höchsten lokalen städtischen Wärmeineffekts?
- Welche Rolle spielen blaue und grüne Infrastrukturen sowie topografische Besonderheiten bei der nächtlichen Ausprägung des lokalen städtischen Wärmeineffekts?
- Wie verändert sich der nächtliche städtische Wärmeineffekt über eine längere Hitzeperiode?
- Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus für wirksame Anpassungsmaßnahmen in Stadtquartieren?

Zudem sollen folgende Hypothesen untersucht werden:

- Hypothese 1 (H1):

Es wird erwartet, dass unbebaute und offene Standorte mit einem hohen Anteil an blauer Infrastruktur infolge der dadurch entstandenen grünen Infrastruktur (Auenflächen) nachts eine lokale Kühlwirkung erfahren und damit im Vergleich zu unbebauten und offenen Standorten ohne die genannte Kombinationsstruktur eine geringere Temperatur aufweisen. Die Ausprägung der Kühlwirkung von blauer Infrastruktur hängt dabei von ihrem Anteil an grüner Folgestruktur und deren Einfluss ab.

- Hypothese 2 (H2):

Es wird erwartet, dass Standorte mit topografisch durch das Elbtal bedingten, hangabwärts gerichteten Kaltluftschneisen, über welche nachts Kaltluft zugeführt wird, nachts eine lokale Kühlwirkung erfahren und damit im Vergleich zu Standorten ohne Kaltlufteinfluss eine geringere Temperatur aufweisen.

- Hypothese 3 (H3):

Es wird erwartet, dass unbebaute und offene Standorte, insbesondere mit einem hohen Anteil an grüner Infrastruktur, nachts eine lokale Kühlwirkung erfahren und damit eine geringere lokale urbane Wärmeinsel aufweisen als dicht bebaute Standorte. Die Kühlwirkung grüner Infrastruktur hängt dabei von ihrer Art und ihrem Einfluss auf das effektive Ausstrahlungsvermögen des Standorts ab.

Im Folgenden werden zunächst die theoretischen Grundlagen zu den Besonderheiten des Stadtklimas und des städtischen Wärmeinseleffekts vorgestellt, bevor auf die geografische und klimatische Einordnung sowie lokale Besonderheiten der Stadt Dresden eingegangen wird (Kapitel 2). Anschließend wird das Untersuchungsgebiet mit den Messstationen vorgestellt und das Vorgehen bei der Datenrecherche, -aufbereitung und -auswertung erläutert (Kapitel 3). Hierbei wird der Fokus auf das Vorgehen bei der Auswahl geeigneter Datenzeiträume sowie geeigneter Einzelfälle gelegt. Es werden verschiedene Tests zur Überprüfung der Methodik durchgeführt. Kapitel 4 beschreibt und diskutiert die Ergebnisse zu den gestellten Forschungsfragen und aufgestellten Hypothesen und vergleicht sie mit Literaturergebnissen. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Auswertung der lokalen Besonderheiten des städtischen Wärmeinseleffekts in Dresden. Abschließend werden Handlungsempfehlungen für die Stadtplanung zur Anpassung an zukünftige Hitzeperioden in Dresden gegeben (Kapitel 5) und ein Fazit gezogen (Kapitel 6).

2 Theoretische Grundlagen

Im folgenden Kapitel werden zunächst die charakteristischen Eigenschaften des Stadtklimas und des städtischen Wärmeinseleffekts beschrieben. Anschließend erfolgt eine geografische und klimatische Einordnung Dresdens. Schließlich wird auf mögliche klimawirksame lokale Besonderheiten in Dresden eingegangen.

2.1 Besonderheiten des Stadtklimas

Henninger und Weber (2020) beschreiben das Stadtklima in Anlehnung an die Definition der World Meteorological Organization [WMO] (1983) als eine „anthropogene Klimamodifikation der atmosphärischen Grenzschicht, die durch Wechselwirkung mit der Bebauung sowie durch anthropogene Emission von Wärme und Spurenstoffen hervorgerufen wird.“ Diese Modifikation kann durch die Ausprägung verschiedener Klimatelemente, beispielsweise der Temperatur, beschrieben werden (Henninger & Weber, 2020). Dabei sind einerseits die geografische Lage mit ihrem Makroklima und saisonalen Besonderheiten sowie der Einfluss der Topografie und des Reliefs zu beachten. Andererseits spielen aber auch kleinräumigere Aspekte wie die Stadtgröße und die verursachten Emissionen, die Flächennutzung in Zusammenhang mit dem Versiegelungsgrad sowie die Stadt- und Baustruktur eine Rolle (Kuttler, 2004a).

Die städtischen Strahlungs- und Wärmebilanzen unterscheiden sich von denen des Umlands. Dabei wirken sich die städtischen Bau- und Oberflächenmaterialien durch ihre thermischen Eigenschaften besonders auf die Wechselwirkungen des Energieaustauschs innerhalb der Stadtatmosphäre aus (Oke, 1988). Im Folgenden wird auf die urbanen Besonderheiten in der Strahlungsbilanz Q^* eingegangen, welche die kurz- und langwelligen Strahlungsflussdichten an der Erdoberfläche gegenüberstellt (Gleichung 1; Oke, 1988).

$$Q^* = K\downarrow - K\uparrow + L\downarrow - L\uparrow \quad (1)$$

$K\downarrow$ stellt dabei die einfallende kurzwellige Globalstrahlung dar, $K\uparrow$ die kurzwellige Reflexion in die Atmosphäre, $L\downarrow$ die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung in Richtung Erdoberfläche und $L\uparrow$ die langwellige Ausstrahlung der Oberfläche (alle Strahlungsflussdichten in W/m^2).

Die dreidimensionale Stadtstruktur bedingt durch lokale Beschattung durch Gebäude und Straßenbäume sowie unterschiedliche Exposition ihrer insgesamt größeren Oberfläche eine räumlich sehr variable Globalstrahlung $K\downarrow$ an der Erdoberfläche. Die kurzwellige Reflexstrahlung $K\uparrow$ wird von der Albedo der Erdoberfläche bestimmt. Die Albedo [%] stellt das Verhältnis aus kurzwelliger Reflexstrahlung $K\uparrow$ und einfallender Globalstrahlung $K\downarrow$ an der Erdoberfläche dar und resultiert im Wesentlichen aus der Farbe der Oberfläche. Städtische Oberflächen, wie Straßen aus Asphalt und

Gebäudeoberflächen aus Stahl oder Beton, erscheinen insgesamt dunkler und besitzen damit eine niedrigere Albedo als natürliche Landnutzungen, wie Felder und Wiesen, im Umland. Für die städtische Umgebung bedeutet dies einen größeren Anteil an nicht-reflektierter und damit absorbiertes kurzwelliger Strahlung, der zur Erwärmung der Oberflächen beiträgt (Helbig et al., 1999; Henninger & Weber, 2020; Kuttler, 2019). Insgesamt ergibt sich in urbanen Räumen damit auch eine höhere langwellige Ausstrahlung L_{\uparrow} von den wärmeren städtischen Oberflächen. Die Materialien besitzen oftmals eine hohe Wärmekapazität und geben die Wärme daher verzögert an die Umgebung ab (Henninger & Weber, 2020). Die maximale positive Temperaturdifferenz zum Umland wird in den frühen Nachtstunden erreicht und hält aufgrund der Menge an in der städtischen grauen Infrastruktur gespeicherten und kontinuierlich abgegebenen Wärme einige Zeit an (Henninger & Weber, 2020; van Hove et al., 2011). Innerhalb städtischer Strukturen bleibt die emittierte langwellige Wärmestrahlung durch die Einengung der Himmelssicht beispielsweise in Straßenschluchten durch Absorption an Fassaden zudem länger in der Stadthindernisschicht in der unteren städtischen Atmosphäre (en. Urban Canopy Layer) erhalten (en. Radiation Trapping) (Masson et al., 2020).

Demgegenüber stehen (urbane) Freiflächen mit einem hohen Himmelssichtfaktor (en. Sky View Factor), das heißt, einem hohen Anteil der aktuellen Himmelssicht an der potenziell freien Himmelssicht (Kuttler, 2004b; Unger, 2004; Watson & Johnson, 1987). Diese weniger horizonteingeschränkten Flächen kühlen durch eine höhere langwellige Ausstrahlung in der Nacht effektiver ab (Holmer et al., 2007; Onomura et al., 2016; Unger, 2004). Der Unterschied in der Einengung der Himmelssicht ist eine wesentliche Voraussetzung für die Genese und die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel, da sich der Sky View Factor in Abhängigkeit von der nächtlichen Abkühlungsrate umgekehrt proportional zur Intensität der lokalen städtischen Wärmeinsel verhält (Oke et al., 2017).

Gleichzeitig führt die dichte und hohe Bebauung zu veränderten Windverhältnissen mit verringerten mittleren Windgeschwindigkeiten und höheren Stauwirkungen, welche eine Abkühlung durch Konvektion und Advektion hemmen (Oke, 1982). Schließlich wirken sich die Lufttemperatur der urbanen Grenzschicht (en. Urban Boundary Layer) und die Konzentration infrarotaktiver Spurengase aus urbanen Emissionsvorgängen tendenziell erhöhend auf die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung L_{\downarrow} aus, während sich die im Mittel geringere Luftfeuchte der urbanen Grenzschicht aufgrund der höheren Absorptionseigenschaften von Wasserdampf tendenziell verringern auswirkt (Henninger & Weber, 2020).

Gleichung 2 stellt die urbane Energiebilanzgleichung mit dem Umsatz der Netto-Strahlung Q^* an der Erdoberfläche sowie den vertikalen Flächen der dreidimensionalen grauen Infrastruktur dar (Oke, 1988).

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S \quad (2)$$

Dabei steht Q_F für die anthropogene Wärmeflussdichte, Q_H für die sensible Wärmeflussdichte, Q_E für die latente Wärmeflussdichte und ΔQ_S für die Speicherwärmeflussdichte (alle Flussdichten in W/m^2). Im Unterschied zur allgemeinen Energiebilanz wird in der Anpassung für städtische Räume die anthropogene Wärmeflussdichte Q_F für Energieumsetzungen durch menschliche Aktivität (Energie, Wärme, Mobilität) als ganztags aktive Wärmequelle hinzugefügt (Oke, 1988). Die urbane Energiebilanz weist im Vergleich zu unversiegelten und möglicherweise vegetationsbestandenen Umlandstandorten am Tag einen deutlich verminderten latenten Wärmefluss Q_E auf. Gründe dafür sind ein deutlich geringeres Maß an Verdunstung in Städten aufgrund des hohen Versiegelungsgrads des Bodens mit geringen Möglichkeiten zur Versickerung und Wasserspeicherung sowie weniger vorhandener grüner und blauer Infrastruktur (Henninger & Weber, 2020).

Gleichzeitig ist eine erhöhte sensible Wärmeflussdichte Q_H am Tag festzustellen, welche durch die hohen Temperaturen städtischer Oberflächen (siehe oben) angetrieben wird. Der Speicherterm ΔQ_S umfasst alle Flüsse in und aus dem Boden, den Gebäuden bzw. dem Stadtkörper unterhalb der Umsatzfläche. Am Tag stellt der Term durch die Wärmespeicherung in der städtischen grauen Infrastruktur eine bedeutsame Energiesenke dar, in der Nacht eine wichtige Quelle für die städtische Überwärmung (Henninger & Weber, 2020).

Im Folgenden sind die Besonderheiten des Stadtklimas als Bedingungen für die Ausprägung der urbanen Wärmeinsel kurz zusammengefasst. Primäre Ursachen sind die Modifizierungen der urbanen Strahlungs- und Energiebilanz im Vergleich zum Umland. Die unterschiedliche Landnutzung sowie die dichte und hohe Bebauung führen zu Unterschieden im Strahlungseinfall durch die veränderte Albedo und den hohen Versiegelungsgrad der Oberflächen sowie die Einengung der Himmelsicht mit Verschattungseffekten. Gleichzeitig verhindert die in Städten oftmals dichte und hohe Bebauung die nächtliche Ausstrahlung von Oberflächen wärmespeichernder, aufgeheizter grauer Infrastrukturen. In der Energiebilanz haben die fehlende oder geringe Evapotranspiration durch einen hohen Versiegelungsgrad und fehlende Grünflächen und Wasserflächen einen bedeutenden Einfluss. Außerdem müssen die Energieumsetzungen durch menschliche Aktivität (Energie, Wärme, Mobilität) als zusätzliche Wärmequelle betrachtet werden. Hinzu kommen die allgemeinen Besonderheiten des Stadtklimas bezüglich der Windverhältnisse mit verminderter Kaltluft- und Frischluftzufuhr in die Stadt aufgrund von dichter Bebauung und einer erhöhten Rauigkeit und damit verringerten mittleren Windgeschwindigkeiten und höheren Staueffekten (Henninger & Weber, 2020; Sörgel et al., 2008).

2.2 Der städtische Wärmeinseleffekt (UHI-Effekt)

Bei der städtischen Wärmeinsel (en. Urban Heat Island, UHI) handelt es sich um das Phänomen der Überwärmung urbaner Räume im Vergleich zum kühleren Umland, welche bereits im Jahr 1833 von L. Howard beschrieben wurde.

Es werden vier Typen urbaner Wärmeinseln mit einem differenzierten zeitlichen und räumlichen Erscheinungsbild unterschieden: Die Wärmeinsel der urbanen Oberfläche (en. Surface Urban Heat Island) beschäftigt sich mit städtischen Oberflächen- bzw. Oberflächenstrahlungstemperaturen und ist stark von der Exposition sowie von physikalischen, thermischen und aerodynamischen Eigenschaften des Oberflächenmaterials abhängig. Die Wärmeinsel des urbanen Untergrundes (Subsurface Urban Heat Island) erfasst dagegen die Temperaturen des städtischen Untergrunds inklusive Grundwasser. Die Wärmeinsel der Stadthindernisschicht (en. Canopy Layer Urban Heat Island) und die Wärmeinsel der Stadtgrenzschicht (Boundary Layer Urban Heat Island) untersuchen Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen der städtischen Atmosphäre (Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017).

In dieser Arbeit werden ausschließlich Lufttemperaturen der Stadthindernisschicht zwischen Bodennähe und mittlerer städtischer Dachhöhe (Oke et al., 2017) untersucht, da die Messgeräte der meteorologischen Stationen in diesem Höhenbereich arbeiten. Im Folgenden ist mit dem Begriff Wärmeinsel jeweils die Wärmeinsel der Stadthindernisschicht gemeint.

Der städtische Wärmeinseleffekt (en. Urban Heat Island Effect, UHI-Effekt) ist die Ausprägung oder Intensität der städtischen Wärmeinsel im Vergleich zum Umland und wird meist als Differenz zwischen der städtischen und der ruralen Lufttemperatur (ΔT) in K angegeben (Oke, 1982; Phelan et al., 2015; van Hove et al., 2015). In dieser Arbeit wird zwischen einem lokalen und einem mittleren UHI-Effekt unterschieden. Ersterer gibt die Temperaturdifferenz eines spezifischen Ortes und seiner näheren Umgebung innerhalb des aufgrund lokaler Gegebenheiten heterogenen städtischen Raums im Vergleich zum Umland an (Kuttler, 2019). Im Umweltbericht der LHD (1998) und bei Kuttler (2019) wird für den städtischen Standort auch der Begriff „Wärmearchipel“ verwendet. Dem gegenüber definiert der mittlere UHI-Effekt die sowohl zeitlich als auch räumlich integrierte Differenz zum Umland, er spiegelt also die gesamtstädtische und langfristige Temperaturdifferenz zum Umland wider (Kuttler, 2004b; Mehra, 2021).

Für die Entstehung und räumliche sowie zeitliche Ausprägung der urbanen Wärmeinsel sind einerseits die bereits erläuterten geografischen Faktoren sowie die Faktoren zur Ausprägung eines charakteristischen Stadtklimas (Kapitel 2.1) entscheidend. Der grundsätzliche Trend der zunehmenden Ausprägung der städtischen Überwärmung vom Stadtrand hin zum dichter bebauten Stadtkern kann durch die genannten lokalen Besonderheiten kleinräumig variieren, sodass lokale urbane

Wärmeinseln, aber auch lokale Parkkälteinseln (en. Park Cool Island, PCI) entstehen können (Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017; van Hove et al., 2011).

Als weiterer wichtiger Faktor sind die meteorologischen Rahmenbedingungen zu nennen. Es existiert eine ausgeprägte saisonale und tageszeitliche Variabilität der UHI (Arnfield, 2003), die in früheren Studien auch für Dresden nachgewiesen werden konnte (beispielsweise LHD, 1998). Innerhalb eines Jahres werden die höchsten Differenzen im Vergleich zum Umland während der Sommermonate und innerhalb eines Tages in den Nachtstunden erreicht, wenn die Abkühlung der Luftmassen in städtischer Umgebung geringer ausfällt als in ruralen Gebieten (Oke et al., 2017). Eine besonders deutliche Ausprägung der UHI ist während autochthoner Wetterlagen zu erwarten. Dabei handelt es sich um durch lokale und regionale Einflüsse bestimmte Wetterlagen, die mit ausgeprägten Tagesgängen der Lufttemperatur und der Strahlung sowie wind- und wolkenarmen Bedingungen und stabilen atmosphärischen Schichtungsverhältnissen in der Nacht einhergehen (DWD, o. J.b; Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017; van Hove et al., 2015). Oke (1973) bestätigt die Größen Windgeschwindigkeit und Wolkenbedeckung als die Größen mit dem höchsten Einfluss auf den UHI-Effekt. Arnfield (2003) vereint ebenfalls verschiedene Studien, die eine negative Korrelation der UHI-Intensität mit der Windgeschwindigkeit und dem Wolkenbedeckungsgrad ergaben. Insbesondere in den Sommermonaten können hohe Lufttemperaturen am Tag mit gleichzeitig hohen Amplituden des Tagesgangs aus einer geringen Wolkenbedeckung und damit hohen Einstrahlung am Tag resultieren. Während dieser austauscharmen und strahlungsintensiven Witterung sind die mikrometeorologischen Unterschiede von lokalen Oberfläche-Atmosphäre-Wechselwirkungen in der Stadt und im Umland (durch die verwendeten Baumaterialien, die Bebauungsdichte, den Versiegelungsgrad sowie die vorhandenen Grün- und Freiflächen) nachts besonders ausgeprägt (Middel et al., 2014; Phelan et al., 2015). Tagsüber liegen dagegen nur gering positive, negative oder nicht messbare urbane Wärmeinseln vor (Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017).

Betrachtet man die Großwetterlagen, können städtische Wärmeinseln bevorzugt während antizyklonaler Wetterlagen mit überwiegendem Hochdruckeinfluss und einem meist relativ störungsfreien Wettergeschehen auftreten (DWD, o. J.b; Unger, 1996). Eine Auswertung des Einflusses von Großwetterlagen auf die städtische Wärmeinsel in Dresden mithilfe der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD ergab eine Temperaturdifferenz von 3,2 K für antizyklonale Wetterlagen während einer Schwachwindsituation (Koszinski, 2014).

2.3 Geografische und klimatische Einordnung der Stadt Dresden

Die sächsische Landeshauptstadt Dresden liegt im Osten Deutschlands (51,05 °N, 13,74 °O; siehe Kapitel 3.1, Abbildung 1), umfasst eine Fläche von 328 km² und hat ca. 570.000 Einwohner (LHD, 2023b, 2023f). Sie befindet sich im Elbtal zwischen den Ausläufern des östlichen Erzgebirgsvorlands

und der Lausitzer Platte. Die innerhalb der Dresdener Elbtalweitung stark mäandrierende Elbe durchfließt die Stadt von Südost nach Nordwest und trennt mit ihren breiten und meist unverbauten Auen die Altstadt im Süden von der Neustadt im Norden (LHD, 1998, 2022b). Die Innenstadt Dresdens liegt auf einer Höhe von ca. 113 m ü. NN, an den Hanglagen im Nordosten und Süden werden Höhen über 200 m ü. NN erreicht (LHD, 2023f). Dresden wird der Klimazone des feuchtgemäßigten Klimas der mittleren Breiten (effektive Klassifikation nach Köppen, 1931) mit wechselnden maritimen westeuropäischen und kontinentalen osteuropäischen Witterungseinflüssen zugeordnet (Hausmann et al., 2020; LHD, 2019a). Verglichen mit den westlichen Gebieten Deutschlands, lässt sich ein stärkerer kontinentaler Einfluss erkennen, der durch größere Jahresschwankungen der Lufttemperatur deutlich wird (LHD, 1998, 2019a). Tabelle 1 zeigt eine Übersicht wichtiger klimatologischer Größen der Umlandstation Dresden-Klotzsche (KLO) für die Jahre 2018-2022 sowie für die 30-jährigen Referenzzeiträume 1961-1990 und 1991-2020 (DWD, 2023). Die Jahresmitteltemperatur an der Station KLO oberhalb des Elbtals (228 m ü. NN) liegt für die Klimanormalperiode 1991-2020 bei 9,7 °C und damit um 0,8 K höher als noch im Zeitraum 1961-1990. In den Jahren 2018-2022 wurde dieser aktuelle Mittelwert mit Ausnahme von 2021 jeweils um $\geq 1,2$ °C überschritten. Im Vergleich zu der Station KLO in Hochlage liegt der Mittelwert für die im Elbtal befindlichen Stationen Dresden-Hosterwitz (HOS) und Dresden-Strehlen (STR) für 1991-2020 bei jeweils 10,3 °C und damit um 0,6 K höher (DWD, 2023). Die Elbtallage wirkt sich somit thermisch begünstigend auf das Klima in Dresden aus (LHD, 2019a).

Tabelle 1: Übersicht wichtiger klimatologischer Größen der Station KLO für die Jahre 2018-2022 sowie die Mittelwerte der Referenzzeiträume 1961-1990 und 1991-2020. Die Klimakenntage sind auf volle Tage gerundet. Datenquelle: Open-Data-Server (DWD, 2023).

Station Dresden-Klotzsche (KLO)	2018	2019	2020	2021	2022	Mittelwert 1961-1990	Mittelwert 1991-2020
Jahresmitteltemperatur [°C]	11,1	11,2	11,0	9,5	10,9	8,9	9,7
Jahresniederschlagssumme [mm]	421	503	536	735	506	667	637
Jahressonnenscheindauer [h]	2120	2064	1989	1658	2077	1581	1771
Anzahl Heiße Tage (TT_max ≥ 30 °C)	28	25	14	4	17	7	10
Anzahl Sommertage (TT_max ≥ 25 °C)	77	63	52	42	59	38	44
Anzahl Frosttage (TT_min < 0 °C)	69	52	50	84	57	81	76
Anzahl Eistage (TT_max < 0 °C)	16	6	1	16	9	27	22

Das LfULG Sachsen geht in seinen Klimamodellierungen für die Region Dresden von einem durch den Klimawandel verursachten mittleren Temperaturanstieg um 2,1 °C für 2021-2050 und um 4,7 °C für 2071-2100 im Vergleich zur Klimanormalperiode 1961-1990 aus. Zudem werden eine weitere Zunahme der Anzahl an Sommertagen und heißen Tagen sowie eine weitere Abnahme von Frost- und Eistagen erwartet (LfULG, 2021).

2.4 Mögliche klimawirksame lokale Besonderheiten in Dresden

Der folgende Abschnitt stellt mögliche klimawirksame lokale Besonderheiten in Dresden vor. Es wird dabei auf die Topografie und Kaltluftsituation sowie auf grüne und blaue Infrastruktur in Dresden, insbesondere im näheren Umfeld der vorhandenen Messstationen, eingegangen.

2.4.1 Topografische Besonderheiten und Kaltluftsituation in Dresden

Die orografische Situation Dresdens in der Elbtalweitung bietet eine große Chance für eine gute Durchlüftung der Stadt durch kleinskalige geländeklimatische Effekte. Eine effektive Durchlüftung der Stadt ist nicht nur vorteilhaft für das Lokalklima, sondern sorgt meist auch für lufthygienische Verbesserungen. Gerade während austauscharmer Wetterlagen spielen lokale Windsysteme eine wichtige Rolle, um die ohnehin verringerten Luftaustauschprozesse in urbanen Räumen zu fördern (Reuter & Kapp, 2012). Neben Flurwindsystemen, auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden soll, spielen für Dresden insbesondere in wolkenarmen Strahlungsnächten mit windschwachen Verhältnissen die Kalt- und Frischluftzufuhr von den Hochflächen in das Elbtal eine große Rolle (LHD, 1998). Bei hoher nächtlicher Ausstrahlung kommt es vor allem über (landwirtschaftlichen) Freiflächen, deren Oberflächen nach Sonnenuntergang rasch abkühlen, aufgrund von Temperatur- und daraus folgenden Dichteunterschieden von Luftmassen zu einer Ausbildung eines bodennahen Kaltluftvolumens. Dieses fließt gravitationsbedingt bei ausreichender Hangneigung sowie geringer Bebauungsdichte bzw. Reibung talwärts (Hupfer et al., 2005; Verein Deutscher Ingenieure [VDI], 2003). Ein Kaltluftgutachten konnte bedeutende Kaltluftproduktionsflächen sowie Kaltluftströme vor allem über den nordöstlich und süd- bis südöstlich der Stadt gelegenen Hochflächen und Hanglagen nachweisen (Sörgel et al., 2008). Das nordöstliche Gebiet wird in dieser Arbeit durch Messstationen abgedeckt. Im Tal sammelt sich die Kaltluft entweder in Mulden und Senken der Elbauen, staut sich an Hindernissen oder durchströmt angrenzende Siedlungen, wo sie abkühlend wirkt (Hupfer et al., 2005; LHD, 1998; VDI, 2003).

Dichte Baumstrukturen oder Zeilenschlüsse in der Bebauung können die Luftleitbahnen unterbrechen und den Kaltluftfluss unterbinden (Hupfer et al., 2005). Zudem kann der Kaltlufteffekt beim Auftreffen auf Bebauung sowie auf größere Wasserflächen wie der Elbe abgeschwächt oder aufgezehrt werden (Hupfer et al., 2005; Sörgel et al., 2008).

Im Umweltbericht von 1998 werden etwa 225 km² als Kaltluftproduktionsflächen über Freiflächen im Stadtgebiet und Umland ausgewiesen. Innerhalb einer Nacht kann das Elbtal im Stadtgebiet rein rechnerisch fast vollständig mit Kaltluft aufgefüllt werden und eine Durchlüftung der Stadt mit sowohl kühler als auch hauptsächlich frischer Luft bei autochthonen Wetterlagen gewährleistet werden (LHD, 1998). So kann die Intensität der städtischen Wärmeinsel abgeschwächt werden. Im Laufe der letzten 25 Jahre kann sich dieser Durchlüftungseffekt durch die zunehmende Bebauung

sowohl von Hängen als auch im Stadtgebiet jedoch verringert haben (siehe Orthofotos im Themenstadtplan; LHD, 2023d).

2.4.2 Grüne Infrastruktur in Dresden

Grüne Infrastruktur umfasst alle Formen sowohl grüner Freiflächen als auch begrünter Bausubstanz in urbanen Räumen. Dazu zählen beispielsweise Parkanlagen, Kleingärten, Friedhöfe, Brachflächen, Siedlungsgrün bzw. Grünflächen an öffentlichen Gebäuden, private Gärten, Bauwerksgrün mit Fassaden- und Dachbegrünung, begrünte Straßenbahntrassen, Straßenbegleitgrün an Verkehrswegen sowie Spielplätze und Sportflächen (Henninger & Weber, 2020). In der direkten Umgebung der untersuchten Messstationen wurde im Rahmen einer persönlichen Begehung (18.-19.10.2022) keine begrünte Bausubstanz vorgefunden, sodass auf diese nicht weiter eingegangen wird. In der Umgebung bis etwa 2 km um die Messstationen befinden sich größere Parkanlagen und Grünflächen, beispielsweise der Große Garten mit dem daran angrenzenden Botanischen Garten (insgesamt ca. 150 ha), der Alaunpark in der Äußeren Neustadt (ca. 10 ha), der Südpark mit großen Freiflächen in Räcknitz (insgesamt ca. 35 ha) und ein zusammenhängendes Areal aus Blüherpark, Bürgerwiese und Cockerwiese in direkter Nähe zum Großen Garten (insgesamt ca. 20 ha). Daneben finden sich kleinere Grünflächen mit Größen unter 10 ha, beispielsweise der Innere Neustädter Friedhof, verschiedene Gartenanlagen entlang der nördlichen Elbauen, Stadtteilparks, aber auch eine Pferderennbahn mit umgebender Bewaldung (ca. 35 ha) sowie Grün- bzw. Brachflächen am Alten Leipziger Bahnhof in der Leipziger Vorstadt (Google, 2023; LHD, 2023d). Zudem finden sich an nahezu allen Standorten in direkter Umgebung Wiesenflächen, Sträucher und/ oder Bäume in verschiedener Anordnung (vereinzelt, in Reihe, in Gruppen, Waldstück). In der weiteren Umgebung der Umlandstationen sind zudem ausgedehntere Waldgebiete festzustellen. Schließlich sind die zahlreichen Kleingartenanlagen an den Stadträndern Dresdens zu nennen. Weitergehende Informationen zur vorkommenden grünen Infrastruktur finden sich in Kapitel 8.1 im Anhang. Dem gegenüber stehen die Innenstadtbereiche, insbesondere die Altstadt und Neustadt Dresdens, mit einer dichten Bebauung, einem hohen Versiegelungsgrad von mehr als 70% (ohne Verkehrsflächen) und damit weniger vorhandenen grünen Infrastrukturen (LHD, 1998, 2015, 2019b).

Grüne Infrastrukturen können durch ihren Einfluss auf die Umgebungstemperatur ebenfalls ausgleichend auf das Stadtklima wirken. Die lokalklimatische Reichweite variiert dabei deutlich, vor allem in Abhängigkeit von der Größe und der Art des Grüns (Henninger & Weber, 2020; van Hove et al., 2011). Sie führen am Tag zu einem im Vergleich zum versiegelten Stadtgebiet höheren latenten Wärmestrom durch Evapotranspiration und tragen so zu einer Abkühlung in der Umgebung bei. Die Wirkungsstärke ist jedoch abhängig von der Wasserverfügbarkeit und den Bodeneigenschaften,

der Art der Vegetation und deren Wasserbedarf, sowie der Tageszeit und den meteorologischen Bedingungen (Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017; van Hove et al., 2011).

Zudem führt die Beschattung der Bodenoberfläche durch Bäume, insbesondere mit ausladenden Baumkronen, zu einer geringeren kurzwelligen Einstrahlung und folglich zu einer geringeren Aufheizung von Oberflächen und Luftmassen (Akbari et al., 2001; Georgi & Zafiriadis, 2006; Huang et al., 2008). Der Effekt hängt dabei maßgeblich von der Baumhöhe sowie der Größe und Dichte des Kronenraums ab (Georgi & Zafiriadis, 2006; Spronken-Smith & Oke, 1998). Am Tag spielen damit auch am Straßenrand gepflanzte Stadtbäume eine lokalklimatische Rolle (Akbari et al., 2001; Bowler et al., 2010). In Stationsnähe wurden bei der Begehung im Oktober 2022 beispielsweise die in diesen Breiten typischen Stadtbaumarten Spitzahorn (*Acer platanoides L.*), Stieleiche (*Quercus robur L.*) und Gewöhnliche Esche (*Fraxinus excelsior*) vorgefunden (Haase & Hellwig, 2022).

In der Nacht können Grün- und Freiflächen mit niedrigwüchsiger Vegetation und hohem Himmelsichtfaktor ebenfalls eine Reduktion der Lufttemperatur bewirken, wenn bei geeigneten thermischen Eigenschaften der Bodenoberfläche, einer ausreichenden Wasserverfügbarkeit des Bodens sowie einer ausreichenden Flächengröße eine effektive Ausstrahlung vorhanden ist (Chang et al., 2007; Oke et al., 2017). Eine Abkühlung aufgrund von Transpiration wie am Tag findet wegen der ohne Strahlung ausbleibenden Photosynthese und der geschlossenen Stomata nicht statt (Henninger & Weber, 2020).

In einer Metadatenanalyse von meist kleineren Stadtparks kamen Bowler et al. (2010) zu dem Ergebnis, dass diese tagsüber um 0,7-1,2 K kühler sind als nicht begrünte Bereiche und nachts zwischen 0,9 K und 1,5 K. Der Effekt wird insbesondere durch eine ausreichende Flächengröße beeinflusst (Chang et al., 2007; van Hove et al., 2011). Mittlere bis große innerstädtische Parks können eine maximale Abkühlung im Vergleich zum bebauten Stadtgebiet in der Größenordnung von 1,5 K bis 4,5 K erreichen, wie ein Überblick über verschiedene Studien bei Henninger und Weber (2020) zeigt. In ihrem Zentrum weisen diese Parks teilweise maximale Abkühlungseffekte zum Umland von mehr als 5 K auf (Spronken-Smith & Oke, 1998; Upmanis et al., 1998). Sind dichte Baumbestände vorhanden, deren Baumkronen die Bodenoberfläche überdecken, ist die Ausstrahlung nachts gehemmt und die Abkühlung fällt deutlich geringer aus (Henninger & Weber, 2020; Huang et al., 2008).

Damit sich die kühlende Wirkung innerstädtischer grüner Infrastruktur optimal entfalten kann, bedarf es zum einen einer guten Vernetzung der grünen Infrastrukturen untereinander inmitten der grauen Infrastruktur. Beispielsweise können große Grünflächen wie der Große Garten in Dresden über Baumalleen und Gebäudebegrünung mit Parkanlagen in der Nähe verbunden werden. Zum anderen muss der Luftaustausch mit der bebauten städtischen Umgebung ermöglicht sein, indem

Zeilen- und Blockbebauungen sowie dichte Baumpflanzungen an den Rändern großflächiger Parkanlagen vermieden werden. Parkanlagen und Grünflächen können nicht nur lokale Parkkälteinseln ausbilden. Ihre horizontale Kühlwirkung kann, abhängig von der Größe der Grünfläche und der umgebenden Baustruktur, auch über die Grenzen der grünen Infrastruktur mehrere hundert Meter hinaus reichen (Chen & Wong, 2006; Oke et al., 2017; Spronken-Smith & Oke, 1998; Upmanis et al., 1998). Oke et al. (2017) gehen bei geeigneter Baustruktur von einer exponentiellen Abnahme des Einflusses der PCI mit der Entfernung vom Parkrand, sowie von einer ungefähren Reichweite des Einflusses in der Dimension der Parkbreite aus. Für eine optimale Entfaltung der grünen Infrastruktur und der Kühlungswirkung ist zudem eine ausreichende Wasserversorgung notwendig (Henninger & Weber, 2020). Die Vernetzung von blauer und grüner Infrastruktur bietet sich aus Ressourcengründen an (Ludwig et al., 2021; Trapp & Winker, 2020).

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse der global verteilten Praxisstudien auf einzelne Parks und Grünflächen in Dresden ist aufgrund fehlender lokaler Datengrundlagen schwierig. Von einem deutlichen Abkühlungseffekt durch vorhandene grüne Infrastruktur und damit einer abmildernden Wirkung auf die UHI-Intensität kann jedoch aufgrund der Literaturergebnisse auch für Dresden ausgegangen werden.

2.4.3 Blaue Infrastruktur in Dresden

Zur blauen Infrastruktur gehören Fließgewässer (Kanäle, Bäche und Flüsse), Stillgewässer (Teiche und Seen) und offene Wasserflächen (Wasserspiele, Fontänen und Brunnen) in urbanen Räumen, die permanent oder temporär (Überflutungsflächen, Retentionsbecken) mit Wasser gefüllt sind und zu einer lokalklimatischen Entlastung beitragen können (Henninger & Weber, 2020; Völker et al., 2013).

In Dresden sind hier vor allem die Elbe zu nennen, die die Stadt durchquert, aber auch zahlreiche kleinere Zuflüsse wie Geberbach, Kaitzbach, Leubnitzbach, Prießnitz und Weißeritz, die einzelne Stadtviertel durchziehen. Die vorhandenen Messstationen decken dabei nur den Einflussbereich der Elbe und des Geberbachs an jeweils einem Standort ab. Als Stillgewässer kommen der Carolasee und der Palaisteich im Großen Garten sowie die Kiesgrube Leuben in der weiteren Umgebung der Messstationen in Frage, wobei hier bereits Entfernungen von mindestens 500 m vorliegen. Zudem sind einzelne Brunnen und Wasserspiele im Großen Garten zu finden. Auf dem Gelände des Wasserwerks am Stadtrand sind zwei circa 3500 m² große Wasserbecken in direkter Nähe zur Station HOS vorhanden. Details zur vorkommenden blauen Infrastruktur finden sich in Kapitel 8.1 im Anhang.

Blaue Infrastruktur zeichnet sich, abhängig vom Wasservolumen bzw. der Wassertiefe, der Lage im Stadtgebiet und den vorherrschenden Windverhältnissen, durch tagsüber geringere Temperaturen

der umgebenden Luftmassen aus. Gründe dafür sind eine niedrige Albedo mit folglich hoher Strahlungsabsorption sowie eine hohe Wärmespeicherkapazität mit langsamen Erwärmungs- und Abkühlungsraten des Gewässers. Außerdem führen hohe Verdunstungsraten von freien Wasseroberflächen sowie die Entstehung von Ventilationszonen mit effektiverem Luftaustausch zu einer lokalen Abkühlung am Tag (Henninger & Weber, 2020; Kuttler, 1991; Oke, 1987; van Hove et al., 2011).

Nachts stellt sich über Wasserflächen wie über städtischen grauen Infrastrukturen eine verzögerte und kontinuierliche Wärmeabgabe ein, sodass sich der Temperatureffekt umkehrt. Die langwellige Ausstrahlung ist im Fall von größeren Wasserflächen jedoch nicht von einer zusätzlichen Horizont-einschränkung wie oftmals innerhalb städtischer Bebauung betroffen. Die lokalklimatische Ausprägung ist dabei von der Eindringtiefe der Luftmassen in die Bebauungsstruktur abhängig. Dämme oder ungünstige Straßenverläufe vermindern den Effekt ebenso wie dichte Bebauungsstrukturen (Henninger & Weber, 2020; Kuttler, 1991).

Die Elbe als großes Fließgewässer mit einer durchschnittlichen Breite bei Mittelwasser von ca. 150 m und einem mittleren Wasserstand von 199 cm (LHD, 2010a), hat eine ausgleichende Wirkung auf das Lokalklima und unterstützt die Frischluftzufuhr (Umweltbundesamt [UBA], 2021) in Dresden. Kleinere Fließgewässer in Dresden fallen im Sommerhalbjahr in Abhängigkeit von der Niederschlagssumme immer wieder trocken, sodass in diesen Zeiten kein direkter Einfluss des Wassers auf die Temperatur der darüberliegenden Luftmassen vorhanden ist (persönliche Mitteilung von Dr. Björn Helm, TU Dresden, AG Siedlungshydrologie). Die Effekte während andauernden Hitzeperioden sind bisher zwar nicht gut erforscht, Messungen in Rotterdam zeigten jedoch einen allmählichen Anstieg der Wassertemperaturen der Maas im Sommer, was die Kühlwirkung im Laufe des Sommers verringert (van Hove et al., 2011).

Eine Quantifizierung der beschriebenen Effekte und deren Wirkungsbereich ist schwierig und von einer Vielzahl an lokalen Gegebenheiten (Lage im Stadtgebiet, umgebende Bebauung, Vernetzung mit grüner Infrastruktur, Windverhältnisse) sowie gewässerspezifischen Faktoren (Wasserfläche, Tiefe, Volumen) abhängig. Im Vergleich zu grüner Infrastruktur wurde der Einfluss blauer Infrastruktur bisher in nur wenigen Studien, meist in Asien und unter subtropischen Einflüssen, untersucht (Völker et al., 2013). Der tagsüber kühlende Effekt wird jedoch stets bestätigt, wenn auch in unterschiedlicher quantitativer Ausprägung. Völker et al. (2013) verglichen 27 Studien und ermittelten eine mittlere Differenz von 2,5 K durch den Einfluss blauer Infrastruktur. Murakawa et al. (1991) stellten für Fließgewässer mit ähnlicher Breite an heiteren Sommertagen eine Abkühlung der Lufttemperatur von 3-5 K im Vergleich zum Stadtgebiet fest. Die horizontale Reichweite wurde mit 400 m für breite Straßen mit bis zu 100 m Breite und mit maximal 50-150 m für schmale Straßen mit 10 m Breite angegeben.

In einer Studie von Nishimura et al. (1998) konnte für einen Springbrunnen ein signifikanter Abkühlungseffekt von 1-2 K im Vergleich zum umgeben Park während des Tages festgestellt werden, der sich bei Aktivierung von Wassernebeleffekten verstärkt. Die effektive Reichweite auf der Leeseite, der dem Wind abgewandten Seite, war auf < 35 m begrenzt.

Allerdings kommen verschiedene Folgeerscheinungen der Fließgewässer hinzu. Das durch die Elbe geschaffene Elbtal erwirkt als Luftleitbahn mit einer kanalisierenden Wirkung eine gute Durchlüftung des Großraums Dresden trotz der Kessellage (Hackenbruch, 2018; LHD, 2019b; Sörgel et al., 2008). Dieser Effekt kann dabei sogar effizienter sein als die direkte Kühlwirkung (Sugawara et al., 2009). Außerdem konnten in der Elbtalweitung zahlreiche großflächige Auenflächen entstehen (LHD, 1998). Diese zeichnen sich großteils durch einen hohen Nährstoffgehalt und ein hohes Wasserspeichervermögen des Bodens aus und weisen oftmals eine gute Verbindung zum Grundwasser auf (Blume et al., 2010; Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz [MLUK], 2020). Die lokalklimatischen Besonderheiten von Auenwiesen im Vergleich zu anderen blauen (Folge-)Strukturen zeigen sich in einem höheren Abkühlungseffekt der Lufttemperatur (Völker et al., 2013). Eine Studie von Hou et al. (2013) ergab zudem eine deutlich größere maximale signifikante Reichweite des Kühlungseffekts von städtischen Feuchtgebieten von 300 m. Ansonsten weisen Auenwiesen die Eigenschaften üblicher Grünflächen auf (Kapitel 2.4.2).

3 Material und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiet und Messstationen

Insgesamt wurden in dieser Arbeit die Daten von elf Stationen mit mehrjährigen stationären Messungen ausgewertet. Einen Überblick über die Lage in Dresden gibt Abbildung 1. Die farbliche Markierung zeigt die Zugehörigkeit zur betreibenden Stelle (rot: DWD, blau: LfULG, gelb: LHD, grün: TU Dresden). Die verschiedenen Messnetze verfolgen unterschiedliche Zwecke und unterliegen damit unterschiedlichen Standards und Qualitätsanforderungen.

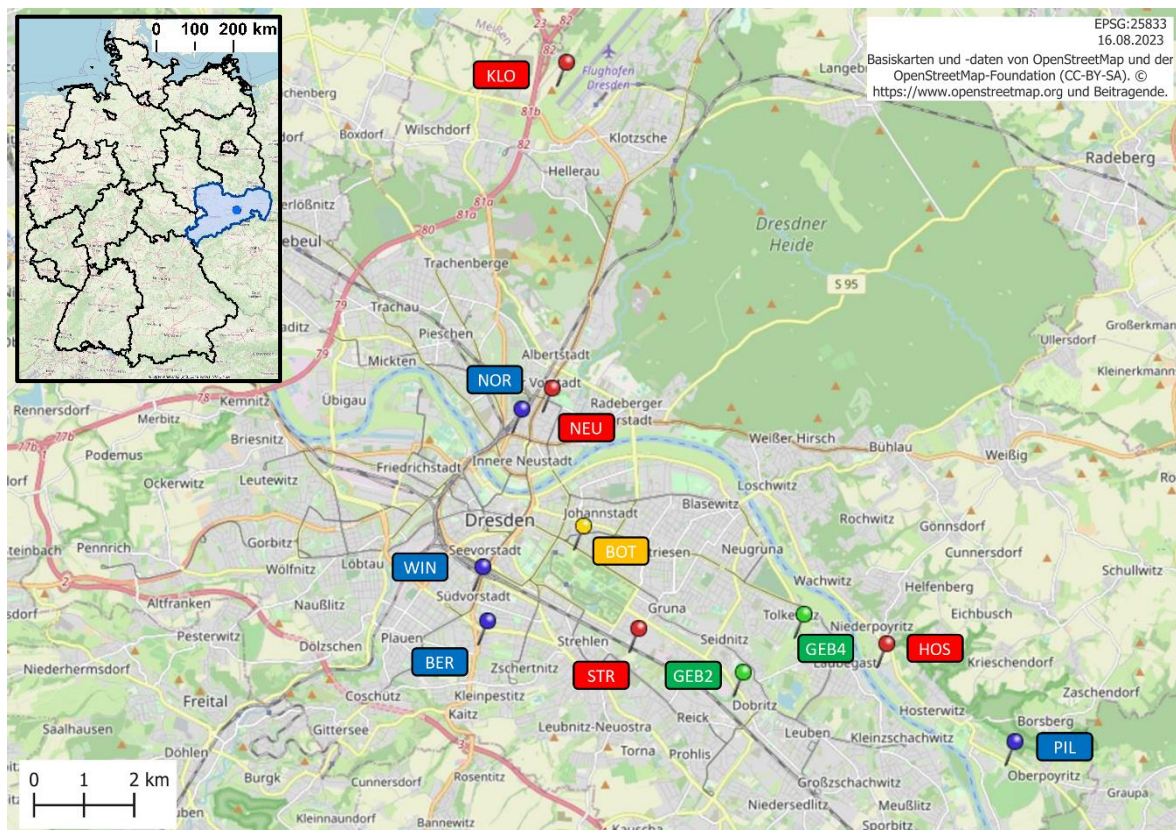


Abbildung 1: Übersicht über die Lage aller untersuchten Stationen im Dresdener Raum. Farbliche Markierung: Zugehörigkeit zur betreibenden Stelle (rot: DWD, blau: LfULG, gelb: LHD, grün: TU Dresden). Karte oben links: Lage der sächsischen Landeshauptstadt Dresden innerhalb Deutschlands. Datengrundlage: OpenStreetMap, abgerufen und bearbeitet am 16.08.2023 mit ArcGIS und QGIS.

Die Luftgüte-Station Bergstraße (BER) steht direkt an einer vielbefahrenen Haupteinfallstraße nach Dresden in Hanglage. Die Station des Umweltamtes der Landeshauptstadt Dresden im Botanischen Garten (BOT), welche vom DWD betreut wird, befindet sich auf einer großen unbeschatteten Wiesenfläche neben dem Großen Garten, einer großen innerstädtischen Parkanlage zentral in der Stadt. Die beiden Stationen GEB2 und GEB4 der LHD, die als Messstellen 2 und 4 Teil des Projekts „Blaues Band Geberbach“ sind, liegen einerseits in einem Laubmischwald neben Kleingartenanlagen, andererseits in einer Auenfläche neben dem Niedersedlitzer Flutgraben am siedlungsgeprägten Stadtrand in Tallage. Die DWD-Station Hosterwitz (HOS) ist als Umlandstation nahe der Elbe mit

Wiesenflächen auf dem Gelände des Wasserwerks charakterisiert. Die DWD-Station Klotzsche (KLO) misst ebenfalls außerhalb der Stadt, auf dem Freigelände des Flughafens Dresden in Höhenlage. Die DWD-Stadtstation Neustadt (NEU) befindet sich dagegen auf einem Spielplatz in einem dicht bebauten Gründerzeitviertel der Innenstadt (Neustadt). Die LfULG Luftgüte-Station Dresden-Nord (NOR) misst auf dem versiegelten Bahnhofsvorplatz der Neustadt neben einer großen Verkehrsachse. Die agrarmeteorologische Station Pillnitz (PIL) liegt am weitesten vom Stadtzentrum entfernt auf einer großen Wiese inmitten von Agrarlandschaft in Tallage. Die DWD-Station Strehlen (STR) gilt als Stadtstation, befindet sich aber in offener, nur gering horizonteingeschränkter Umgebung auf dem Gelände einer Gärtnerei und nahe einer Kleingartensiedlung. Die LfULG Luftgüte-Station Winckelmannstraße (WIN) liegt inmitten eines schattigen Siedlungsbereichs im Süden der noch dicht bebauten Stadt. Tabelle 2 enthält Grundlageninformationen zu den einzelnen Stationen. Im Oktober 2022 wurden alle Stationen außer GEB2, GEB4 und KLO besichtigt.

Tabelle 2: Grundlageninformationen zu allen verwendeten Stationen (Daten zur Verortung: Google, 2023). Die Höhenangaben des Sensors über Grund für die Stationen des LfULG wurden am 01.03.2023 per Mail zur Verfügung gestellt.

Kürzel	Name	Betreiber	Adresse	Koordinaten Nord [°N]	Koordinaten Ost [°O]	Höhe Grund ü. NN [m]	Höhe Sensor ü. Grund [m]
BER	Bergstraße	LfULG	Bergstraße 78/80	51,02627	13,73180	150	3,9
BOT	Bot. Garten	LHD	nahe Stübelallee 2	51,04342	13,75928	114	2,0
GEB2	MST 2, Rennbahn	LHD	nahe An d. Rennbahn 1	51,01691	13,80541	118	2,0
GEB4	MST 4, Flutgraben	LHD	nahe Toeplerstraße	51,02760	13,82284	112	2,0
HOS	Hosterwitz	DWD	nahe Wasserwerkstraße 1	51,02210	13,84700	112	2,0
KLO	Klotzsche	DWD	nahe Flughafenstraße	51,12788	13,75434	228	2,0
NEU	Neustadt	DWD	Jordanstraße 10	51,06842	13,75006	115	2,0
NOR	Nord	LfULG	Schlesischer Platz	51,06486	13,74140	112	4,2
PIL	Pillnitz	LfULG/BfUL	Lohmener Straße 12	51,00444	13,88403	116	2,0
STR	Strehlen	DWD	Eugen-Bracht-Straße 12	51,02491	13,77510	119	2,0
WIN	Winckelmannstraße	LfULG	Schnorrstraße 8	51,03620	13,73030	116	3,3

Die Station KLO am Flughafen Dresden diente aufgrund der Bandbreite an vorhandenen meteorologischen Größen der Vorabbetrachtungen und der zeitlichen Auswahl, floss aber selbst nicht in die Auswertung zu den lokalen Besonderheiten der städtischen Wärmeinsel ein. Wicher (2021) stellte bereits fest, dass direkte Vergleiche der Station KLO mit Stationen im Elbtal sowie Interpretationen zum UHI-Effekt aufgrund von Topografieeffekten durch die große Höhendifferenz nicht ohne weiteres möglich sind.

Kapitel 8.1 im Anhang beinhaltet detaillierte Steckbriefe sowie Fotos der einzelnen Stationen und ihrer direkten Umgebung (Abbildung 8 bis Abbildung 27). In Ordner 5 im elektronischen Anhang befinden sich 16 Abbildungen von 3D-Gebäudemodellen der näheren Stationsumgebungen, die dem virtuellen 3D-Stadtmodell (LHD, 2023a; Abruf: 16.08.2023) entnommen sind.

3.2 Messgeräte und untersuchte meteorologische Größen

Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang enthält eine Übersicht aller Messstationen mit Informationen zu verfügbaren Datenzeiträumen, Betreibern, original vorliegenden Datenformaten und der verwendeten Mess-Sensorik.

Die in dieser Arbeit verwendeten meteorologische Größen werden im Folgenden anhand des Wetter- und Klimalexikons des DWD (o. J.b) kurz vorgestellt:

Die Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$] ist die zentrale Größe dieser Arbeit und gibt den Wärmezustand eines Luftvolumens an (DWD, o. J.b). Sie wird standardisiert in 2 m über dem Grund meist mit einem Widerstandsthermometer (Pt 100) gemessen. Eine Schutzhütte schützt den Sensor vor Strahlung und kann für eine bessere Datenqualität aktiv belüftet werden (Löffler, 2012).

Zur Beurteilung der Globalstrahlung, der gesamten am Erdboden ankommenden kurzwelligen solaren Strahlung, wird in dieser Arbeit die tägliche Globalstrahlungssumme [$\text{J}/(\text{cm}^2 \text{ d})$] herangezogen. Sie wird mit einem Pyranometer ermittelt, welches durch zwei halbkugelförmige Glashauben geschützt ist. Alternativ kann auch die Sonnenscheindauer [h] verwendet werden, welche die tatsächliche Dauer der direkten Sonnenstrahlung pro Zeiteinheit, z. B. pro Tag, angibt und mittels Sonnenscheinautographen oder optoelektronischer Sensoren gemessen wird.

Für den Wind in 10 m über Grund wird einerseits die Windrichtung [$^{\circ}$] mit einer Windfahne, andererseits die Windgeschwindigkeit [m/s] mit einem Schalenkreuzanemometer ermittelt (DWD, o. J.b). Im Zuge der Automatisierung von Messstationen ersetzt der DWD diese Messgeräte sukzessive durch Ultraschallanemometer (DWD, o. J.a). An der Station KLO wird laut aktueller Metadaten (letzte Prüfung: 20.11.2023) weiterhin das ursprüngliche Messverfahren genutzt (DWD, 2023).

Der Bedeckungsgrad wird in Achtel angegeben und beschreibt den Anteil des Himmels, der mit Wolken bedeckt ist. Bei 0/8 ist der Himmel wolkenfrei, bei 8/8 ist der Himmel vollständig mit Wolken bedeckt. Es werden alle Wolken oder Wolkenteile unabhängig von Höhe und Gattung betrachtet (DWD, o. J.b). Die Einschätzung des Bedeckungsgrads erfolgt dabei über die zeitliche Integration der detektierten Wolkenschichten mit einem Laserceilometer (DWD, o. J.a; Löffler, 2012).

3.3 Datenrecherche und -aufbereitung

3.3.1 Datenrecherche

Die Recherche nach verfügbaren Lufttemperaturdatensätzen ergab zunächst Datensätze der DWD-Stationen HOS, KLO, NEU und STR aus dem Open-Data-Bereich des Climate Data Centers des DWD mit einem Qualitätsniveau von 3 (in Routine mit dem Verfahren QUALIMET geprüft und korrigiert; DWD Climate Data Center [CDC], 2019). Für die Stationen HOS, KLO und STR waren Daten in 10 min-Auflösung verfügbar, für NEU lagen ausschließlich Stundenwerte vor.

Die Datensätze der Luftgüte-Messstationen BER, NOR und WIN wurden vom LfULG auf Anfrage zur Verfügung gestellt, sind aber auch auf der Plattform OpenSensorWeb (OSW) frei zugänglich. Es handelt sich dabei ebenfalls um Daten, die bereits einer technischen Plausibilitätskontrolle unterzogen wurden. Dabei wurden Werte außerhalb des Bereiches -30-50 °C manuell geprüft und, falls erforderlich, auf ungültig gesetzt. Bis 2020 liegen die Datensätze als Stundenwerte vor, anschließend auch als Daten in 10 min-Auflösung.

Ein weiterer Stundendatensatz der agrarmeteorologischen Station Pillnitz (PIL) wurde von der Plattform OpenSensorWeb (OSW) heruntergeladen. Auch hier handelt es sich um geprüfte Daten, die täglich vom LfULG bezogen werden. Die Plattform übernimmt Korrekturen seitens des LfULG der letzten 30 Tage, und nimmt keine eigenen Änderungen oder Korrekturen vor. Auf eine weitere Anfrage derselben Daten beim LfULG wurde verzichtet. Die vom BfUL erhaltenen ungeprüften Daten in 10 min-Auflösung konnten aufgrund vieler Fehlwerte und Ausreißer sowie der fehlenden Kontrolle nicht verwendet werden.

Vom Umweltamt der LHD wurde zunächst ein Datensatz in 10 min-Auflösung einer Station in der Nähe des Botanischen Gartens (BOT) zur Verfügung gestellt. Die Daten wiesen jedoch trotz aktiver Belüftung der Sensorik einen Strahlungsfehler, womöglich durch Ausbildung eines Eigenklimas des Strahlungsschutzes, auf. Die Auffälligkeit wird weiter durch die LHD untersucht. In dieser Arbeit wurden stattdessen Daten einer direkt angrenzenden mobilen Messstation, die im Auftrag der LHD vom DWD betrieben wird, analysiert. Eine Prüfung der Daten erfolgte vorab durch den DWD.

Von der TU Dresden konnten zwei Datensätze des Projekts „Blaues Band Geberbach“ (GEB2, GEB4) in 10 min-Auflösung verwendet werden, die ebenfalls bereits geprüft und korrigiert waren.

Darüber hinaus wurden aus dem interaktiven Themenstadtplan und dem Open Data-Portal der Stadt Dresden Informationen zur Topografie, Bebauung, zu oberirdischen Gewässern und städtischen Grünflächen bezogen (LHD, 2023d, 2023h). Insbesondere standen dort eine 3D-Gebäudesimulation (LHD, 2023a) sowie eine Klimafunktions- (LHD, 2022c) und eine Planungshinweiskarte (LHD, 2020a) zur Verfügung.

3.3.2 Datenaufbereitung und zeitliche Eingrenzung

Bei der Auswahl der Datensätze wurden die Jahre 2018 bis 2022 gewählt, zunächst, um die Aktualität der Ergebnisse zu gewährleisten. Dazu kommt, dass die vier Stationen BOT, GEB2, GEB4 und NEU erst ab 2020 Daten aufzeichnen und ein möglichst breiter räumlicher Überblick mit vielen Datensätzen unterschiedlicher Standorte gegeben werden soll. In den Jahren 2018, 2019 und 2022 waren zudem ausgeprägte und heiße Sommer mit Temperaturrekorden in Dresden zu verzeichnen (LHD, 2022e, 2023j).

Um die Daten bestmöglich vergleichbar zu machen, wurden alle Datensätze einheitlich auf Temperatur-Stundenmittelwerte, als Endwerte des Stundenintervalls, in der Koordinierten Weltzeit (en: Coordinated Universal Time, UTC) synchronisiert. Diese Zeitzone unterscheidet, anders als die Mitteleuropäische Zeit (MEZ), nicht zwischen Sommer- und Winterzeit und macht die Ergebnisse problemlos mit anderen Arbeiten vergleichbar (DWD, o. J.b). Anschließend wurden die Datensätze ausführlich auf Plausibilität, Datenlücken und Ausreißer geprüft.

Für die Auswertung sind insbesondere die Nachtzeiträume interessant, da während der Nacht die maximale Ausprägung der Lufttemperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland zu erwarten ist (Middel et al., 2014; Phelan et al., 2015). Daher soll der mittlere UHI-Effekt ausschließlich für die Nachtstunden untersucht werden. Anhand der Sonnenaufgangs- und Untergangsdaten für Dresden im Jahr 2022 wurde geprüft, welche Stundenzeiträume die Nacht am besten abdecken. Der früheste Sonnenaufgang in Dresden war 2022 zwischen dem 14. und 19. Juni um 04:49 Uhr MESZ, der späteste Sonnenuntergang fand zwischen dem 19. und 30. Juni um 21:23 Uhr MESZ statt (Time and Date AS, 2023). Beide Zeiten wurden durch Daten aus dem Jahr 2023 bestätigt. Der optimale Nachtzeitraum ohne Strahlungseinfluss wäre somit 21:23-04:49 Uhr (Dauer ca. 7,5 h). Die Entscheidung fiel auf den Stundenzeitraum von 22 bis 05 Uhr MESZ bzw. 20 bis 03 Uhr UTC (Dauer 7 h), da so der Nachtzeitraum am besten abgedeckt ist. Sowohl bei der Wahl von 8 h statt 7 h als auch bei der Wahl von 21 bis 04 Uhr MESZ wäre ein deutlich größerer Strahlungsanteil und ein längerer davon betroffener Jahreszeitraum enthalten. Da in dieser Arbeit mit Endwerten der Stundenintervalle gerechnet wird, werden im betrachteten Nachtzeitraum die Stundenwerte 21-03 Uhr UTC verwendet. Im Folgenden handelt es sich bei Angaben von Uhrzeiten ohne entsprechende anderslautende Angabe jeweils um Zeiten in UTC.

Eine Höhenkorrektur bezüglich eines Referenzniveaus wurde ebenfalls geprüft. Da die Höhendifferenz zwischen den Stationen meist weniger als 10 m und maximal 39,9 m beträgt, wäre bei einem angenommenen mittleren Temperaturgradienten von 0,65 K pro 100 m (DWD, o. J.b), ohne Berücksichtigung saisonaler oder lokaler Gegebenheiten, eine Höhenkorrektur bezüglich der Referenzstation HOS von meist $\leq 0,04$ K und maximal 0,26 K nötig. In Tallagen wie dem Oberen Elbtal können

häufige Bodeninversionen den mittleren Temperaturgradienten senken, sodass die Höhenkorrektur noch geringer ausfallen würde (Häckel, 2016). Für die Region Stuttgart, die sich teilweise ebenfalls in einem Talkessel befindet, wird im Klimaatlas Region Stuttgart ein Höhengradient von 0,30-0,50 K pro 100 m verwendet (Baumüller et al., 2008). Im Vergleich der Station KLO auf der Hochfläche (228 m ü. NN) mit den im Elbtal befindlichen Messstationen HOS (112 m ü. NN) und STR (119 m ü. NN) liegt der Mittelwert im 30-jährigen Referenzzeitraum 1991-2020 im Elbtal um 0,6 K höher (DWD, 2023). Damit ergeben sich ein Temperaturgradient von circa 0,5 K pro 100 m und Temperaturdifferenzen von meist $\leq 0,03$ K bis maximal 0,20 K. Diese geringe Größenordnung der Temperaturdifferenzen kann im Rahmen der Messungsgenauigkeit und Überlagerung durch andere Einflussfaktoren vernachlässigt werden. Ein direkter Temperaturvergleich mit der Station KLO, die knapp 116 m höher als das Referenzniveau HOS liegt, wird nicht vorgenommen. Gerade in Strahlungsnächten mit Inversionswetterlagen muss zudem beachtet werden, dass die Höhenkorrektur falsch korrigieren kann (Häckel, 2016).

3.3.3 Methodischer Test zur Vergleichbarkeit verschiedener Datensätze

Die Messung mit hoher zeitlicher Auflösung ist wichtig, um zeitliche Inhomogenitäten feststellen zu können. Leider liegen nicht alle Datensätze in der gleichen Auflösung vor. Beispielsweise wird an der DWD-Stadtklimastation NEU nur 1x pro Stunde ein Minutenmittelwert aufgezeichnet, während an den SYNOP-Messstationen des DWD jeweils alle 10 min ein Minutenmittelwert gebildet wird. Berechnet man daraus ein Stundenmittel, muss bei einer gleichzeitigen Verwendung der weniger aufgelösten Stundenmittel auf mögliche systematische Unterschiede geachtet werden.

In einem Vergleich von auf Stundenwerte gemittelte 10 min-Daten und bereits als Stundenwerte gemessenen Daten an der Station STR wurde eine mögliche systematische Abweichung im Zeitraum 2013-2022 (10 Jahre) überprüft. Mithilfe der Beurteilung der Verteilung der Differenzen als Median und Boxplot sollte festgestellt werden, ob eine Mittelung von höher aufgelösten Daten aus statistischer Sicht möglich ist. Dies ist insbesondere für Stationen des DWD von Bedeutung, da ein Stundenwert der Stadtstation NEU aus nur einem Minutenmittel um xx:50 Uhr besteht (hh-10), ein Stundenmittelwert der SYNOP-Messstationen aus 10 min-Daten jedoch aus sechs Minutenmitteln. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Tagesverlauf insgesamt ausgleicht. Während der Stundenwert (xx:50) am Morgen im Vergleich zu den 10 min-Werten durch den Sonnenverlauf höher liegen könnte, würde er am Abend niedriger sein. Da der Fokus dieser Arbeit auf die Nacht gelegt wird, ist der Strahlungseinfluss ohnehin gering. Ein tagesspezifischer Einfluss, beispielsweise durch eine lokale Veränderung exakt zum Messzeitpunkt (z. B. Wolken um 02:50 Uhr UTC während des Sonnenaufgangs) kann jedoch nicht ausgeschlossen werden. Zudem wird eine hohe Vergleichbarkeit der Daten angestrebt, weshalb der Einfluss hier genauer untersucht wurde.

Zunächst wurde ein Vorabtest durchgeführt, um die Methodik zu testen und gegebenenfalls Problemstellen im Vorfeld zu beheben, damit diese das eigentliche Testergebnis nicht beeinflussen. Im Haupttest wurden 521.712 Einträge für 10 min-Werte bzw. 86.952 Einträge an Stundenwerten (Zeitraum 2013-2022) miteinander verglichen. Dazu wurden die 10 min-Werte auf 1 h-Werte gemittelt. Ein gemittelter Stundenwert enthält dabei sechs Einträge aus 10 min-Werten von xx:00 bis xx:50, wohingegen ein gemessener Stundenwert nur Daten aus der Minute xx:49-xx:50 enthält (Tabelle 3). Im Rahmen der Datenbereinigung wurde bei vereinzelt vorhandenen Datenlücken jeweils der ganze Tag entfernt.

Tabelle 3: Zuordnung der einzelnen Messwerte und -intervalle zu einem Stundenwert (Uhrzeit). Die im Beispiel der Stunde 02 Uhr UTC zugeordneten Wert sind grün hinterlegt. Der sechste Wert der 10 min-Werte entspricht dem Wert aus dem Datensatz der 1 h-Werte.

Wert	10 min-Wert	Zugeordnete Minute	Zugeordneter 1 h-Wert
6	00:50	00:49-00:50	1:00
1	01:00	00:59-01:00	2:00
2	01:10	01:09-01:10	2:00
3	01:20	01:19-01:20	2:00
4	01:30	01:29-01:30	2:00
5	01:40	01:39-01:40	2:00
6	01:50	01:49-01:50	2:00 → \cong 1 h-Mittelwert
1	02:00	01:59-02:00	3:00

Anschließend wird jeweils die Differenz zwischen den beiden Stundenwerten gebildet und statistisch ausgewertet. Tabelle 4 zeigt links die ermittelten Werte für einen Vergleich der Differenzen (1 h-Mittelwert minus 1 h-Mittelung aus 10 min-Mittelwerten) über alle verwendeten Werte und rechts für einen Vergleich tageweise zusammengefasst.

Tabelle 4: Ergebnis des Vergleichs der Differenzen der Stundenwerte (1 h-Mittelwert minus 1 h-Mittelung aus 10 min-Mittelwerten) über alle verwendeten Werte (links) und tageweise (rechts) über den Zeitraum 2013-2022 für Daten der Station STR. Fettdruck: Medianwert [K].

	Vergleich der Differenzen insgesamt	Vergleich der Differenzen tageweise
Median [K]	-0,0167	-0,0007
Mittelwert [K]	-0,0003	-0,0003
Standardabweichung [K]	0,5102	0,0729
Anzahl Werte	86.952	3623

Die bereitgestellten 1 h-Werte des DWD sind im Vergleich zur eigenen Mittelung aus 6x 10 min-Werten im Median mit -0,0167 K etwas niedriger. Auf Tagesbasis ist kein systematischer Unterschied erkennbar (-0,0007 K). Die gemessenen Temperaturdaten selbst haben eine Genauigkeit von einer Nachkommastelle, sodass eine Anpassung der Originalwerte nicht erforderlich ist.

In einem zweiten Schritt wurde eine detaillierte Analyse für ausgewählte Zeiträume/ Datenkollektive durchgeführt, da das Ergebnis in der Zeitspanne von 10 Jahren durch saisonale Einflüsse, insbesondere durch die Strahlung, beeinflusst wird. Im Folgenden werden nur die Sommerhalbjahre 2018-2022 an der Station STR betrachtet (135.636 bzw. 22.606 Einträge). Es werden ebenfalls auf 1 h gemittelte 10 min-Werte mit 1 h-Werten verglichen und auf systematische oder zufällige Abweichungen geprüft. Aufgrund einer Datenlücke im untersuchten Zeitraum wurde ein Tag entfernt. Anschließend wurde die Differenz gebildet und deren Verteilung untersucht.

Tabelle 5: Ergebnis des Vergleichs der Differenzen der Stundenwerte (1 h-Mittelwert minus 1 h-Mittelung aus 10 min-Mittelwerten) über alle verwendeten Werte (links) und tageweise (rechts) über die astronomischen Sommerhalbjahre 2018-2022 für Daten der Station STR. Fettdruck: Medianwert [K].

	Vergleich der Differenzen insgesamt	Vergleich der Differenzen tageweise
Median [K]	-0,0333	0,0035
Mittelwert [K]	0,0012	0,0013
Standardabweichung [K]	± 0,6037	± 0,0774
Anzahl Werte	22.606	941

Wie Tabelle 5 zeigt, sind die 1 h-Werte über die Sommerhalbjahre 2018-2022 für STR, anders als im vorangegangenen Test, im Vergleich zur Stundenmittelung aus 10 min-Werten im Median mit 0,0333 K etwas höher. Auf Tagesbasis liegt der Unterschied mit 0,0035 K deutlich niedriger.

Bei der Datengenauigkeit von einer Nachkommastelle liegt in diesem Test ebenfalls keine systematische Abweichung vor. Somit können in dieser Arbeit sowohl die vorhandenen Stundendaten des DWD als auch die eigens gemittelten 10 min-Werte verwendet und miteinander verglichen werden.

In einem letzten Schritt wurde der Test für die Daten des LfULG an der Station WIN im Sommerhalbjahr 2022 wiederholt. Die Auswertung erfolgte analog, mit dem Unterschied, dass hier eine Stundenmittelung des Zeitraums xx:10 bis xx:00, und damit anders als in Tabelle 3 für Daten des DWD dargestellt, vonnöten war. Tabelle 6 zeigt die Ergebnisse:

Tabelle 6: Ergebnis des Vergleichs der Differenzen der Stundenwerte (1 h-Mittelwert minus 1 h-Mittelung aus 10 min-Mittelwerten) über alle verwendeten Werte (links) und tageweise (rechts) über das astronomische Sommerhalbjahr 2022 für Daten der Station WIN. Fettdruck: Medianwert [K].

	Vergleich der Differenzen insgesamt	Vergleich der Differenzen tageweise
Median [K]	0,0000	-0,0002
Mittelwert [K]	0,0002	-0,0002
Standardabweichung [K]	± 0,0292	± 0,0055
Anzahl Werte	4.486	187

Hier liegt im Vergleich von 1 h-Werten und der Mittelung aus 10 min-Werten im Median mit 0,0000 K keine erkennbare Differenz vor. Auch auf Tagesbasis fällt der Unterschied mit -0,0002 K sehr niedrig aus und liegt deutlich unterhalb der Messgenauigkeit.

Somit können die Stundenwerte des LfULG ohne Einschränkungen verwendet werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den 1 h-Werten um die gleiche Datengrundlage handelt wie bei den 10 min-Werten.

3.4 Auswahl geeigneter Datenzeiträume

Die zeitliche Auswahl geeigneter Datenzeiträume erfolgte für die Jahre 2018 bis 2022. Tabelle 7 zeigt das Vorgehen und die jeweils verwendeten Kriterien und Datengrundlagen im Überblick.

Tabelle 7: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswahl geeigneter Datenzeiträume. Falls nicht anders angegeben, stammen die Datengrundlagen vom Open-Data-Server des DWD (siehe Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang).

Auswahlkriterium	Datengrundlage
Eingrenzung des Zeitraums	Jahre 2018-2022
Vorabbetrachtung	
Vorkommen und Dauer besonders heißer Zeiträume für STR	Auswahl der Tage mit mindestens einer gemessenen 10 min-Lufttemperatur $TT_{10} \geq 30 \text{ °C}$ für STR
Vorkommen von Hitzewarnungen des DWD für Dresden	Auswahl der Tage mit einer Hitzewarnung für Dresden und/ oder Umland (DWD, 2022)
Hauptbetrachtung: Identifizierung autochthoner Wetterlagen	
Eingrenzung des Zeitraums	Astronomisches Sommerhalbjahr
Strahlungsreicher Tag	Prozentualer Anteil der Globalstrahlungssumme pro Tag GS_d für KLO $\geq 80\%$ der tagesspezifischen, potenziellen GS (GS_d_{pot})
Sommertag	Stundenmittel der Lufttemperatur $TT_h \geq 25 \text{ °C}$ für KLO
Eingrenzung des Zeitraums	Tage mit sowohl $\geq 80\%$ der potenziellen täglichen Globalstrahlungssumme als auch mit mindestens einem Lufttemperatur-Stundenmittelwert $\geq 25 \text{ °C}$ für KLO
Weitere Kriterien zur besseren Einordnung bzw. Bekräftigung der getroffenen Auswahl	
Stärke der Wärmebelastung	Anzahl der Stunden pro Tag (24 h, 1 UTC bis 0 UTC) mit Lufttemperatur-Stundenmittel $TT_h \geq 25 \text{ °C}$, 28 °C oder 30 °C für KLO
Wolkenarme bzw. wolkenfreie Bedingungen am Tag bzw. in der Nacht	Anzahl der Stunden pro Tag (24 h, 1 UTC bis 0 UTC) bzw. pro Nacht (7 h, 21 UTC des Vortags bis 03 Uhr UTC) mit einem mittleren Bedeckungsgrad $BG_h \leq 4/8$, $3/8$ oder $2/8$ für KLO
Windschwache Bedingungen in der Nacht	Median der nächtlichen Windgeschwindigkeit (7 h, 21 UTC des Vortags bis 03 Uhr UTC) $FF_{Nh} \leq 2,7 \text{ m/s}$ für KLO
Hitzeperiode	Anzahl der zusammenhängenden Tage ≥ 2 für KLO
Eingrenzung des Zeitraums	Nur Tage im meteorologischen Sommer (01. Juni bis 31. August)

Vorabbetrachtung zur Auswahl geeigneter Datenzeiträume

Im ersten Schritt wurde eine Vorabbetrachtung der Lufttemperaturen für die Station STR mithilfe der 10 min-Temperaturmaxima auf besonders heiße Zeiträume durchgeführt und deren Dauer

bestimmt. Zudem wurden Hitzewarnungen des DWD für das Gebiet „Stadt Dresden“, sowie die drei Umlandgebiete „Kreis Bautzen – Tiefland“, „Kreis Meißen“ und „Kreis Sächsische Schweiz-Osterzgebirge – Tiefland“ ausgewertet (DWD, 2022; Abruf: 21.02.2023), die die Datenlage größtenteils bestätigten. Da es sich bei den Hitzewarnungen des DWD jedoch um kurzfristige Vorhersagen für den aktuellen Tag oder Folgetag und nicht um Messdaten handelt, wurde dieser Ansatz nicht weiterverfolgt.

Hauptbetrachtung zur Auswahl geeigneter Datenzeiträume

Anschließend wurde die Station STR im tatsächlichen Auswahlprozess durch die Station KLO ersetzt, da für letztere neben Daten für die 10 min-Lufttemperatur auch Datensätze für die Globalstrahlungssumme (GS) pro Tag GS_d [$J/(cm^2 d)$], die Sonnenscheindauer (SD) [h], den Bedeckungsgrad (BG) [Achtel] sowie die Windgeschwindigkeit (FF) [m/s] vorliegen.

Für die Auswahl geeigneter Datenzeiträume wurden zunächst autochthone Wetterlagen identifiziert, für die eine idealtypische Ausprägung des UHI-Effekts zu erwarten ist. Erschwert wurde dieser Auswahlprozess durch fehlende einheitliche quantitative Kriterien zur Definition einer autochthonen Wetterlage in der Literatur. Somit wurde in einem ersten Schritt entschieden, nur das astronomische Sommerhalbjahr vom 20./ 21. März bis 22./ 23. September zu betrachten, um ausreichende Einstrahlungsbedingungen sowie Lufttemperaturen für einen ausgeprägten städtischen Wärmeinseleffekt zu gewährleisten. Diese Einschränkung wurde bereits in früheren Studien für Karlsruhe, Hamburg und London bestätigt, die bei Hackenbruch (2018) aufgelistet werden. Später werden jedoch ausschließlich Daten innerhalb des meteorologischen Sommers vom 01. Juni bis 31. August ausgewertet. In diesen Monaten sind besonders viele für diese Auswertung interessante Strahlungsperioden enthalten, wie die weitere Auswertung ergab.

Gleichzeitig standen am Ende des Auswahlprozesses für die Monate Mai und September nur wenige Datensätze zur Auswahl, die darüber hinaus nur jeweils zwei der fünf Jahre abbilden konnten. Darauf wird in Kapitel 4.7.4 näher eingegangen. Auch mit der reduzierten Auswahl von drei Monaten können Vergleiche und Ursachenforschung aufgrund von unterschiedlicher Tageslänge, Sonnenstand und Dürregrad angestellt werden.

Für die Identifizierung autochthoner Strahlungswetterlagen stellt die tägliche Globalstrahlungssumme das Primärkriterium dar. Um die Globalstrahlung in ihrem saisonalen Verlauf zu berücksichtigen, wurde statt der absoluten GS der prozentuale Anteil an der tagesspezifischen, potenziellen GS (GS_d_{pot}) verwendet. Eine zur Anwendung geeignete Datengrundlage bot eine Auswertung der GS_d_{pot} für den Lugstein im Osterzgebirge aus dem Jahr 1997 (Goldberg, 1999). Aufgrund des „global brightening“ (Wild, 2009) wurden die etwa 25 Jahre alten Daten um + 5% angehoben, um sie sinnvoll auf aktuelle Messwerte anwenden zu können.

Das Phänomen des „global brightening“ nach 1990 folgt dem „global dimming“ der 1950er bis 1980er Jahre. Die zunächst durch erhöhte Emissionen von Luftschadstoffen und daran anknüpfende erhöhte Reflexion und Streuung an Aerosolen verringerte einfallende Globalstrahlung stieg durch die Verbesserung der Luftqualität im Laufe der Zeit wieder an (Wild, 2009).

Im weiteren Vorgehen wurden die tagesgenauen Schwellenwerte bei 70%, 80% und 90% des Maximums, sowie aus den 10 min-Summen die tatsächliche GS_d für KLO für die Jahre 2018 bis 2022 berechnet. Nach der Prüfung aller Schwellenwert-Eingrenzungen wurde die 80%-Schwelle gewählt. Gegenüber der 70%-Schwelle ergibt sich zum einen eine strengere Auswahl von nur 44% aller Tage statt 57% und damit ein effektiveres Kriterium. Zudem wurde, ausgehend von allen Tagen mit hoher GS (mindestens 70%-Schwelle), die Überschneidung mit Tagen mit hoher Temperatur (mindestens 25 °C) geprüft. Dies trifft auf 20-22% aller Tage mit hoher GS zu. An 78-80% aller Tage mit hoher GS liegt dagegen nur eine hohe GS vor, aber keine ausreichende Temperatur. Grund dafür ist, dass eine prozentual hohe Globalstrahlung auch im Mai oder September ohne hohe Temperaturen auftritt. Daher ist dies nicht zielführend für die Wahl eines Schwellenwertes. Ein Unterschied besteht dann, wenn an Tagen mit hoher Temperatur auch hohe GS-Werte vorliegen. Hier liegt der Vorteil der 80%- gegenüber der 90%-Schwelle in der höheren Übereinstimmungsquote (fast 75% statt 50%), sodass im Anschluss eine größere Datenmenge ausgewählt und ausgewertet werden kann, die die Sommer der Jahre 2018 bis 2022 qualitätsgesichert veranschaulicht.

Neben der Globalstrahlungssumme wurde das Stundenmittel der Lufttemperatur für KLO als wesentliches Entscheidungskriterium verwendet. Die Mindestanforderung wurde hierbei auf 25 °C gelegt, angelehnt an die Definition des DWD, die einen Sommertag als einen „Tag, an dem das Maximum der Lufttemperatur ≥ 25 °C beträgt“ definiert (DWD, o. J.b). Es konnten unter anderem in Karlsruhe als auch in Berlin Erhöhungen der bereits hohen nächtlichen Lufttemperaturdifferenzen im Sommerzeitraum an definierten Sommertagen und heißen Tagen beobachtet werden (Fenner et al., 2014; Hackenbruch, 2018). Da eine ausreichende Datengrundlage für die Auswertung zu Verfügung stehen sollte, wurde von der Definition eines „Heißen Tages“ mit einem Tagesmaximum ≥ 30 °C (DWD, o. J.b; Tomczyk & Sulikowska, 2018) aufgrund der Strenge des Kriteriums abgesehen, auch wenn diese Grenze von Hackenbruch (2018) empfohlen wird. Die Möglichkeit, die Mindestanforderung auf einen deutlich ausgeprägten Sommertag mit ≥ 28 °C zu legen, wurde aufgrund der zu geringen resultierenden Datenmenge ebenfalls verworfen. Diese Grenze basiert auf der Definition der „Hitzewelle“ des DWD, für die unter anderem das Temperaturmaximum an mindestens drei aufeinanderfolgenden Tagen bei mehr als 28 °C liegen muss (DWD, o. J.b).

Davon ausgehend wurden alle Tage ausgewählt, an denen sowohl 80% der potenziellen täglichen Globalstrahlungssumme als auch mindestens einmal pro Tag ein Stundenmittelwert der

Lufttemperatur ≥ 25 °C erreicht werden. Es wurde bereits erklärt, weshalb das Strahlungskriterium allein nicht ausreicht, sondern ebenfalls eine Wärmebelastung vorliegen sollte. Für das Temperaturkriterium trifft diese Aussage ebenfalls zu. Anhand der absoluten täglichen GS und Sonnenscheindauer der zutreffenden Tage im Vergleich mit Tagen mit zusätzlich zutreffendem Temperaturkriterium konnte in einer Vorabbetrachtung für das Jahr 2021 gezeigt werden, dass an warmen Tagen ohne das Strahlungskriterium auffällig niedrige Werte für GS und SD festzustellen waren. Es lagen definitiv keine Strahlungstage vor, die für die Fragestellung dieser Arbeit jedoch zwingend erforderlich sind. Somit kann die Globalstrahlungssumme als primäres Kriterium bestätigt werden.

Die Auswertungstabelle in Ordner 3, Kapitel 3.4 im elektronischen Anhang zeigt von links nach rechts die Daten der Tage mit 80% der potenziellen täglichen Globalstrahlungssumme, die Daten der Tage mit mindestens einmal täglichem Stundenmittelwert der Lufttemperatur ≥ 25 °C sowie die Überschneidungen der Daten. Davon ausgehend folgen die Anzahl der zusammenhängenden Tage und die Anzahl an Stunden pro Tag, an denen jeweils mindestens ein Stundenmittel mit mindestens 25 °C, 28 °C oder 30 °C erreicht werden. Anschließend werden die Anzahl der Stunden pro Tag (24 h, 1 UTC - 0 UTC) bzw. pro Nacht (7 h, 21 UTC des Vortags - 03 Uhr UTC) mit einem mittleren Bedeckungsgrad von maximal 4/8, 3/8 oder 2/8, sowie die nächtliche Windgeschwindigkeit gezeigt. Letztere wurde als Median über sieben Nachtstunden berechnet und markiert, wenn sie den Schwellenwert von maximal 2,7 m/s überschreitet. Dieses Kriterium hat zum Ziel, windschwache Bedingungen in der Nacht abzubilden, die für eine autochthone Wetterlage maßgebend sind (GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2021; Zimmermann, 2015). Die Berechnung des Medians anstatt des Mittelwertes ist aufgrund der vorliegenden Weibull-Verteilung der Windgeschwindigkeit notwendig, da der Median weniger empfindlich gegenüber Extremwerten ist und die vorliegende schiefe Verteilung besser charakterisiert (Altman & Bland, 1994; DWD, o. J.; Lange & Bender, 2001).

Weitergehende Analysen zur Auswahl geeigneter Datenzeiträume

Die weitergehende Analyse von Temperatur, Bedeckungsgrad und nächtlicher Windgeschwindigkeit sowie der Anzahl zusammenhängender Auswahltage wird ebenfalls in der Auswertungstabelle in Ordner 3, Kapitel 3.4 im elektronischen Anhang dargestellt. Diese fließt jedoch nicht in die Entscheidung über die Datenauswahl ein. Eine grundlegende Überprüfung hinsichtlich der Unterstützung der Definition einer autochthonen Wetterlage fand jedoch statt. Die Ergebnisse sind somit als Zusatz- und Stärkungskriterien zu betrachten.

Es wird deutlich, dass die Überschneidungen im Zeitraum Mai bis September liegen. Dies bestätigt die These anderer Studien (z. B. Habeeb et al., 2015), dass sich Hitzeperioden im Zuge des fortschreitenden Klimawandels in ihrem Ersterscheinungsaufreten ausdehnen, also bereits im Mai auftreten können.

Für die Kriterien GS, TT und FF wurde die Wahl der jeweiligen Schwellenwerte auf methodische Unsicherheiten untersucht. Es liegt die Möglichkeit nahe, dass es Tage gibt, an denen die Grenze knapp erreicht oder nicht erreicht wird und der Tag deshalb ausgewählt oder nicht ausgewählt wird.

Schließlich wurde entschieden, dass für die Auswahl das Kriterium erfüllt werden muss, dass mindestens zwei aufeinanderfolgende Strahlungstage zur Auswahl stehen und somit zumindest eine kurze Hitzeperiode vorhanden ist. Eine Mindestanforderung von drei Tagen, wie sie der DWD verwendet (DWD, o. J.b), würde die vorhandene Datenmenge zu sehr eingrenzen. Der Vorteil gegenüber einem einzelnen Strahlungstag liegt darin, dass bei aufeinanderfolgenden Strahlungstagen wahrscheinlich eine Strahlungsnacht enthalten ist, die für die spätere Auswertung von Bedeutung ist. Bei nur einem Tag ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass die vorangegangene Nacht eine Strahlungsnacht war. Es ergaben sich zwischen 5 und 13 geeignete Zeiträume pro Jahr zur weiteren Auswertung.

3.5 Datenauswertung

Bei der Auswertung wird zwischen zwei Vorgehensweisen unterschieden: Einerseits erfolgte eine statistische Analyse der Daten über längere Zeiträume, andererseits wurden ausgewählte Einzelfälle betrachtet. Für beide Methoden gilt, dass ausschließlich die Nachtzeiträume ausgewertet wurden, jedoch der gesamte Tagesgang (24 h) dargestellt wird, um eine Gesamteinordnung zu gewährleisten. Die Nachtzeiträume sind farblich hervorgehoben.

Die Auswertung der Daten wurde in Microsoft Excel (MS Office 365, Versionen 2302-2310) durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt entweder als Boxplots, die mit R (Version 4.2.3, 15.03.2023, "Shortstop Beagle"; R Core Team, 2022) in der Arbeitsumgebung R Studio (Version 2023.06.1+524, 07.07.2023; RStudio Team, 2023) erstellt wurden, oder als Tabellen und Diagramme in Microsoft Excel. Die Karten wurden mit den GIS-Anwendungen ArcGIS Desktop Advanced (Version 10.7.1.11595; Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2019) und QGIS (Version 3.28.10-Firenze, Long Term Release; QGIS Development Team, 2023) angefertigt.

3.5.1 Vorgehen bei der statistischen Betrachtung

Das Basis-Datenkollektiv umfasst mehrere Sommermonate und mehrere Jahre, sodass eine statistische Sicherheit bezüglich des Datenumfanges gegeben ist. Es werden nur saisonale Unterschiede betrachtet. Die Strahlungstage wurden jeweils monatsweise für Juni (JUN), Juli (JUL) und August (AUG) sowie über den gesamten Sommer (meteorologischer Sommer von 01. Juni bis 31. August) zusammengefasst ausgewertet. Die folgende Tabelle 8 zeigt die Anzahl der Einträge (Temperatur-Stundenmittelwerte an Strahlungstagen) pro Monat bzw. Sommer und Station über alle fünf Jahre zusammengefasst, sowie die prozentualen Anteile an den jeweils maximal möglichen Einträgen. Letztere lassen eine Aussage über das Ausmaß an Fehlwerten an Strahlungstagen zu. Insgesamt

liegen für etwa 75% der Zeiträume Daten vor. Die unterschiedliche Datendichte zwischen den Stationen ist dabei zu beachten. Während für BOT, GEB2, GEB4 und NEU mehrere Jahre an Daten fehlen, sind für sechs der zehn Stationen insgesamt mindestens 97% der möglichen vorhandenen Daten an Strahlungstagen verfügbar. Innerhalb jeder Stationsaufzeichnung liegen jedoch für jeden Monat etwa gleich viele Daten vor. Ein Minimum von 12% (GEB2) an Datenverfügbarkeit wird erreicht. Es ist zu beachten, dass Kurvenverläufe gemäßiger sind, wenn mehr Daten einfließen. Bei Stationen mit weniger Daten können besonders hohe Ausschläge in positiver und negativer Richtung auftreten, deren Ursachen dann untersucht werden, obwohl dies an der Datenmenge und nicht an den Umgebungseigenschaften liegt.

Tabelle 8: Anzahl der Einträge (Temperatur-Stundenmittelwerte an Strahlungstagen) pro Monat bzw. Sommer und Station über alle fünf Jahre (2018-2022) zusammengefasst, sowie die durchschnittlichen prozentualen Anteile an den jeweils maximal möglichen Einträgen. Farbskala: Rot (geringe Anzahl an Einträgen) über Gelb (mittlere Anzahl an Einträgen) bis Grün (hohe Anzahl an Einträgen). Fettdruck: Ergebnisse für Sommer.

	BER	BOT	GEB2	GEB4	HOS	NEU	NOR	PIL	STR	WIN	Maximum absolute Anzahl
JUN	791	384	384	357	792	384	792	792	792	792	792
JUL	792	288	288	96	792	240	790	792	718	790	792
AUG	984	552	552	360	944	288	984	984	984	983	984
alle	2567	1224	1224	813	2528	912	2566	2568	2494	2565	2568
											Mittlerer Anteil am Maximum [%]
JUN	99,9	48,5	48,5	45,1	100	48,5	100	100	100	100	79,1
JUL	100	36,4	36,4	12,1	100	30,3	99,7	100	90,7	99,7	70,5
AUG	100	56,1	56,1	36,6	95,9	29,3	100	100	100	99,9	77,4
alle	100	47,7	47,7	31,7	98,4	35,5	99,9	100	97,1	99,9	75,8

Für die statistische Auswertung ergeben sich damit vier auszuwertende Zeiträume (JUN, JUL, AUG, Sommer) für jeweils zehn Stationen. Eine Betrachtung der einzelnen Monate hat den Vorteil, dass die Vergleichbarkeit mit anderen Auswertungen über eine klare Monatszuordnung gegeben ist. Zudem wird angenommen, dass astronomische Unterschiede zwischen gleichen Monaten verschiedener Jahre geringer sind als saisonale Unterschiede. Das heißt, dass davon ausgegangen wird, dass der 1. Juni 2018 eher mit dem 1. Juni 2022 zu vergleichen ist als mit dem 1. August 2018.

3.5.2 Vorgehen bei der Einzelfallbetrachtung

Alternativ erfolgte eine Einzelfallbetrachtung für ausgewählte Strahlungstage. Pro Sommermonat wurden drei Einzelfälle als ideale Strahlungstage mit idealem Tagesgang der Lufttemperatur anhand der nichtbeschatteten Referenzstation ausgewählt, um Unterschiede in der Strahlung zu adressieren. Es werden immer die gleichen Einzelfälle verwendet, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Fragestellungen der Arbeit herzustellen. Die Darstellung erfolgt in Excel als Tagesgang in Form von Liniendiagrammen.

3.5.3 Absicherung der gemeinsamen Zeitbasis

Weiterhin wurde anhand eines Vergleichs einzelner Temperatur-Tagesgänge an ausgewählten Strahlungstagen aller Stationen die gemeinsame Zeitbasis abgesichert. Dafür wurde der jeweils erste Zeitraum pro Jahr gewählt, an dem alle Stationen Daten aufwiesen. Für 2018 und 2019 wurde auf die Stationen, die ganzjährig ohne Daten sind, verzichtet. Die Überprüfung erfolgte jeweils inklusive der vorangegangenen und der folgenden Nacht des jeweiligen Untersuchungszeitraums. Es wurde insbesondere auf die Kurvenverläufe zur Sonnenaufgangszeit und Sonnenuntergangszeit geachtet. Der Vergleich ergab keinen erkennbaren Zeitversatz zwischen den Kurven der einzelnen Stationen. Wären einzelne Stationsdaten zeitlich falsch umgerechnet oder eingepflegt worden, könnte eine Kurve beispielweise um 1-2 h zu den anderen Kurven verschoben sein. Vereinzelt ist der Einfluss von Schatten zu sehen, ansonsten liegt, trotz der unterschiedlichen Rahmenbedingungen, eine sehr gute Übereinstimmung der Kurven vor.

3.5.4 Identifizierung lokaler Wärmeinseln

Vor dem Vergleich der Stationen untereinander ist es ratsam, diese einzeln zu betrachten und stationsspezifische Besonderheiten zu ermitteln. Daher werden zunächst lokale Wärmeinseln bzw. lokal erhöhte Temperaturen der einzelnen Stationen auf ihr Maximum und den zeitlichen Bezug untersucht. Ziel ist es, anhand von Einzelfallbetrachtungen die variablen Umgebungsbedingungen einzufangen und daraus eine Ursachenforschung mithilfe der Steckbriefe (Kapitel 8.1 im Anhang) und Metadaten zu betreiben. In der Einzelfallbetrachtung wird jeweils der Zeitraum von 21 Uhr UTC (Endwert) des Vortags bis 20 Uhr UTC (Endwert) des betrachteten Tags verwendet. Die Nacht enthält somit die Stunden von 21 Uhr des Vortags bis 03 Uhr des betrachteten Tags (beides Endwerte). Der Vorteil gegenüber einer kalendarischen Tagesbetrachtung ist hierbei, dass die Nachtstunden zusammenhängend betrachtet werden können.

3.5.5 Festlegung von Einzelfällen

Zunächst werden geeignete Einzelfälle (EF) idealer Strahlungstage anhand von nachfolgend beschriebenen Kriterien ermittelt, welche in Tabelle 9 im Überblick dargestellt sind.

Tabelle 9: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswahl von Einzelfällen. Datengrundlage: Open-Data-Server des DWD (siehe Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang).

Auswahlkriterium	Datengrundlage
Möglichst hohe Vergleichbarkeit der Einzelfälle	Auswahl eines Tages aus den ersten drei Tagen einer Strahlungsperiode
Möglichst gute Datenbasis	Mindestens neun vorhandene Stationsdatensätze → weitere Eingrenzung: zehn Stationsdatensätze
Möglichst idealer Temperaturverlauf: 1) Hohe Lufttemperaturen 2) Große Amplitude zwischen täglichem Minimum und Maximum der Temperatur-Stundenmittel	Station HOS 1) Stundenmittel der Lufttemperatur TT_h 2) Differenz der Stundenmittel der Lufttemperatur (TT_h_max - TT_h_min)

3) Keine/ geringe Störungen im Temperaturverlauf	3) Grafischer Verlauf des Tagesgangs (qualitativ)
Möglichst strahlungsreiche Tage	Absolute Stunden- und Tagessumme der GS (GS_h, GS_d) für KLO
Wolkenarme bzw. wolkenfreie Bedingungen am Tag bzw. in der Nacht	Anzahl der Stunden pro Tag (24 h, 1 UTC bis 0 UTC) bzw. pro Nacht (7 h, 21 UTC des Vortags bis 03 Uhr UTC) mit einem mittleren Bedeckungsgrad $BG_h \leq 4/8$ für KLO; Markierung, falls positive Auffälligkeit durch ganztags niedrigen BG für KLO
Windschwache Bedingungen in der Nacht	Median der nächtlichen Windgeschwindigkeit (7 h, 21 UTC des Vortags bis 03 Uhr UTC) $FF_{Nh} \leq 2,7$ m/s für KLO; Markierung, falls positive Auffälligkeit durch ganztags niedrigen FF für KLO
Repräsentativität aller Stationen	Vertretung insbesondere der Stationen mit geringerer Datensatzgröße mindestens einmal pro Monat in einem Einzelfall
Tage verschiedener Hitzeperioden	Keine Verwendung von mehreren geeigneten Einzelfällen aus der gleichen Hitzeperiode
<ul style="list-style-type: none"> ➔ Auswahl von vier Einzelfällen pro Monat mit neun Stationsdatensätzen ➔ Auswahl eines Einzelfalls pro Monat mit zehn Stationsdatensätzen 	

Es werden nur die Tage 1-3 einer Strahlungsperiode verwendet. So wird gewährleistet, dass die Einzelfälle untereinander möglichst vergleichbar sind, z. B. bezüglich des Speicherverhaltens der grauen Infrastruktur. Es war aufgrund der Datenlage nicht möglich, jeweils den exakt gleichen Tag innerhalb der Strahlungsperiode zu verwenden.

Zudem werden zunächst nur Zeiträume in Betracht gezogen, bei denen eine gute Datenbasis durch mindestens neun Stationsdatensätze vorhanden ist. Die gilt nur für die Jahre 2020-2022. In einem weiteren Schritt wird pro Monat zusätzlich ein weiterer Einzelfall ermittelt, bei dem alle 10 Stationsdatensätze vorliegen. Dies trifft für Juni nur für das Jahr 2022 und für Juli und August für das Jahr 2021 zu. Da kein Vergleich zwischen den Jahren erfolgt, können die Einzelfälle durchaus aus verschiedenen Jahren stammen.

Des Weiteren ist ein idealer Temperaturverlauf anzustreben. Dieser wird anhand der nichtbeschatteten Referenzstation HOS ermittelt. Dazu zählen ein hohes Stundenmittel der Lufttemperatur, aber auch eine große Amplitude zwischen dem Minimum und dem Maximum der Stundenmittel. Eine große Amplitude spricht für geringen BG und wenig RF, d.h. eine gute Ausprägung der Unterschiede zwischen den Stationen. Schließlich wird auch der grafische Verlauf des Tagesgangs bewertet, der möglichst fließend und ohne besondere Einflüsse wie Advektionsvorgänge sein soll.

Darüber hinaus sollen die Einzelfälle möglichst Zeiträume widerspiegeln, deren Tage strahlungsreich und deren Nächte unbedeckt und windschwach sind. Diese Größen (BG, FF, GS) sind nicht für HOS verfügbar, weshalb für diese Tage auf Daten der Station KLO zurückgegriffen wird. Betrachtet wurden möglichst hohe Stunden- und Tagessummen der GS. Es wurden absolute Werte verwendet,

da pro Monat eine annähernd gleiche GS angenommen werden kann. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass die relative GS stärker von Variablen und tagesabhängigen Besonderheiten aus dem Jahr 1997 abhängig ist als von Unterschieden zwischen den Tagen eines Monats.

Außerdem wurde die Anzahl an Gesamt- bzw. Nachtstunden mit einem $BG \leq 4/8$ betrachtet und notiert, falls ein ganztags niedriger BG vorlag und der Tag damit positiv auffällig war. Bezüglich des Windes wurde der Nachtmedian der Windgeschwindigkeit und positive Auffälligkeiten durch eine ganztags niedrige FF untersucht.

Für alle geeigneten Zeiträume mit mindestens neun von zehn vorhandenen Stationsdatensätzen wurden im Anschluss an die Bewertung durch obige Kriterien möglichst Tage verschiedener Hitzeperioden gewählt, um Autokorrelationen zu vermeiden. Verschiedene Korrelationen von meteorologischen Größen und der städtischen Wärmeinsel wurden beispielsweise von Hackenbruch (2018) untersucht. Wichtig war zudem, dass insbesondere die Stationen mit geringerer Datensatzgröße mindestens einmal in einem Einzelfall vorkommen.

Schließlich wurden pro Monat vier Einzelfälle festgelegt (Tabelle 10). Zusätzlich wurde pro Monat je ein Zeitraum gewählt, in denen alle Datensätze vorhanden waren (Tabelle 10, letzte Zeile). Letztere Zeiträume schneiden in den obigen Kriterien am besten ab und weisen eine ausgezeichnete Vergleichbarkeit auf, da sie jeweils den zweiten Tag einer Strahlungsperiode repräsentieren. Da das spezifische Datum in dieser Arbeit keine Rolle spielt, wird im Folgenden ausschließlich die mit den Daten verknüpften Bezeichnung, bestehend aus dem Monatskürzel und einer Nummer, verwendet. Die 15 dazugehörigen Grafiken befinden sich in Ordner 3, Kapitel 3.5.5 im elektronischen Anhang.

Tabelle 10: Gewählte Einzelfall-Tage pro Monat (Zeitraum jeweils von 21 Uhr des Vortags bis 20 Uhr des genannten Tags). Die Grafiken dazu befinden sich in Ordner 3, Kapitel 3.5.5 im elektronischen Anhang.

Auswahl der Einzelfälle im Juni	Auswahl der Einzelfälle im Juli	Auswahl der Einzelfälle im August
JUN1 = 27.06.2021	JUL1 = 30.07.2020	AUG1 = 07.08.2020
JUN2 = 12.06.2022	JUL2 = 03.07.2022	AUG2 = 03.08.2022
JUN3 = 18.06.2022	JUL3 = 19.07.2022	AUG3 = 11.08.2022
JUN4 = 23.06.2022	JUL4 = 24.07.2022	AUG4 = 17.08.2022
JUN10 = 23.06.2022	JUL10 = 24.07.2021	AUG10 = 13.08.2021

Es ist zu beachten, dass die Einzelfälle individuell verschieden und nicht, z. B. mittels Statistik, vergleichbar sind. Jeder Tag weist Besonderheiten und untypische Verläufe einzelner Temperaturkurven auf, die nicht dem idealen Verlauf entsprechen. Teilweise fehlen auch einzelne Linien (entweder GEB4 oder NEU). Die Temperaturen schwanken zwischen 5 °C und 40 °C, es gibt somit kühlere und heißere Tage. Jedoch wird die 29 °C-Marke an jedem Tag von mindestens einer Station im Stundennittel erreicht. Weitere meteorologische Größen wie BG, FF und GS variieren in der absoluten Zahl als auch im Verhältnis zueinander.

Auf Basis der vorhandenen Datengrundlage war es nicht möglich, gleich viele und im gleichen Ausmaß ideale Tage pro Monat zu identifizieren. Im August liegen beispielsweise sehr viele sehr gute Strahlungstage vor, wohingegen die wenigen annähernd idealtypischen Tage im Juli vergleichsweise niedrige Maximalwerte aufweisen.

3.5.6 Vorab-Analyse zum Windeinfluss für Hypothese 1

Zur Beantwortung der ersten Hypothese muss zunächst der Windeinfluss untersucht werden. Es stellt sich die Frage, ob und inwiefern die Kühlwirkung durch den Transport warmer Luftmassen vom Gewässer her abgeschwächt wird. Es erfolgt zunächst eine Einzelfall-Auswertung der Windrichtung (DD) für KLO für ausgewählte Nachtzeiträume auf stündlicher Basis. Ziel ist es, den nächtlichen Temperaturunterschied mit und ohne Windeinfluss zu ermitteln. Betroffene Stationen sind HOS durch die Elbe sowie drei Wasserbecken der Kläranlage und GEB4 durch den Flutgraben (Gerberbach). Die beiden Fließgewässer sind in ihrem Einfluss deutlich voneinander zu unterscheiden. Bei HOS wird eine Einflussreichweite von ca. 200 m untersucht, wobei die kürzeste Entfernung zum Elbufer 150 m beträgt. Für GEB4 wird eine deutlich geringere Reichweite von 50 m verwendet. Eine alternative Betrachtung mit 400 m (HOS) bzw. 100 m Entfernung (GEB4) führte im Rahmen der allgemeinen Unsicherheiten dieser Auswertung zu keinem Unterschied in der Auswahl der Windrichtung. Zudem werden die Daten für GEB4 nur ausgewertet, wenn der Flutgraben wasserführend ist.

Folgende Unsicherheiten müssen beachtet werden: Je geringer die Streichlänge über die Wasseroberfläche und je höher die Entfernung zum Gewässer ist, desto geringer ist der Effekt. Aufgrund fehlender Messdaten vor Ort und der besseren Vergleichbarkeit werden die Winddaten der Station KLO verwendet. Neben den Unsicherheiten in den Daten selbst ist eine direkte Übertragung von KLO auf HOS bzw. GEB4 aufgrund unterschiedlicher lokaler Gegebenheiten nicht möglich. Daher wurden Pufferzonen von jeweils 30-40° eingerichtet, die trotz fehlender direkter, aber naheliegender Verbindung zu einer Wasserfläche ebenfalls als günstige Windrichtung ausgewertet werden. Die Annahme dabei ist, dass der Wind, wenn er an der Station KLO passend für eine Auswertung ist, auch an den betroffenen Stationen ähnlich geeignet für die Auswertung wäre. Im Rahmen der für diese Fragestellung erfolgten Literaturrecherche wurde nichts bekannt, wie eine Übertragung der Winddaten mit höherer Genauigkeit vollzogen werden könnte. Die auszuwählenden Einzelfälle sollen vergleichbar sein, um sie möglichst nur auf den Effekt des Windes hin unterscheiden zu können. Gleiche Umgebungsbedingungen sind durch nicht-veränderte Standorte der Messstationen gegeben. Durch das gewählte Datenkollektiv an Strahlungstagen wurde eine vergleichbare Ausgangslage bezüglich der Wetterlage geschaffen. Alle weiteren Einflussfaktoren werden im Folgenden je nach Datenlage (Anzahl mit zutreffender geeigneter Windrichtung) stationsspezifisch analysiert (Auswertungstabelle in Ordner 3, Kapitel 3.5.6 im elektronischen Anhang).

Windauswertung an der Station HOS

Die folgende Tabelle 11 zeigt das Vorgehen sowie die Kriterien und Datengrundlagen bei der Windauswertung an der Station HOS im Überblick:

Tabelle 11: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswertung des Windeinflusses an der Station HOS auf Grundlage aller in Kapitel 3.4 ausgewählten Strahlungstage. Datengrundlage: Open-Data-Server des DWD (siehe Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang).

Auswahlkriterium	Datengrundlage bzw. Vorgehen
Vollständige Zeitreihe an Lufttemperaturdaten	Lufttemperatur (TT_10) für HOS, Prüfung auf Lücken → -1 Nacht
Vollständige Zeitreihe an Windrichtungsdaten	Windrichtungsdaten (DD_10) für KLO, Prüfung auf Lücken → keine Einschränkung
Wind-Nachtstundenmittelwerte inkl. Standardabweichung	Berechnung von Stundenmittelwerten (DD_Nh) für 7 Nh (21 UTC des Vortags bis 03 UTC) für KLO
Günstige bzw. ungünstige Windrichtungen	Einordnung der Windrichtung in die Kategorien günstig (optimal, passend, Puffer) und ungünstig (Tabelle 12) mittels Windrose (Abbildung 28)
Weitere Auswahl nach dem Best-Of-Ansatz mit Winddaten für KLO (107 Nächte)	
Windgünstige Nacht, wenn... 1) 7 Nh mit DD_Nh = günstige Windrichtung 2) ≥ 5 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung 3) Standardabweichung DD_Nh $< 100^\circ$ 4) keine Wechsel zwischen Windeinfluss aus Richtung Elbe und Wasserbecken	Nach 1) 67 Nächte Nach 2) 32 Nächte (29 Wasserbecken, 3 Elbe) Nach 3 + 4) keine weitere Einschränkung, betroffene Nächte wurden bereits mit 1) + 2) ausgeschlossen
Weitere Eingrenzung von 2) für Wasserbecken: 7 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung	14 Nächte (Wasserbecken (WB))
wiederholte Durchsicht, Identifizierung von Grenzfällen für Windeinfluss aus Richtung Elbe (Aufweichung von 2)): ≥ 2 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung unter Beachtung von 1), 3) und 4)	→ Zusätzliche sechs Nächte Neun Nächte (Elbe (E))
Windungünstige Nacht, wenn... 1) 0 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung 2) ≥ 2 Nh mit DD_Nh = unpassende Windrichtung 3) Standardabweichung DD_Nh $< 100^\circ$	Nach 1) sechs Nächte Nach 2) fünf Nächte Nach 3) vier Nächte (Gegenrichtung (GR))
Weitere Auswahl anhand von Zusatzgrößen für KLO	
Geringe großräumige relative Luftfeuchte bzw. nur Nächte innerhalb der Hitzeperiode	Stundenmittelwert der relativen Luftfeuchte RF_h ≥ 3 Nh mit $< 80\%$ RF_h für KLO bzw. maximale Summe RF_Nh < 600 in 7 Nh für KLO bzw. Ausschluss der vorangegangenen Nächte zu Beginn von Hitzeperioden → 12x WB, 6x E, 3x GR
Mittlere Windgeschwindigkeit ohne Ausreißer	Stundenmedian der Windgeschwindigkeit FF_h im Bereich 1,0-4,9 m/s → 10x WB, 5x E, 2x GR
Zeitlich ähnliche Lage im Jahr	± 14 Tage zu den beiden ausgewählten Nächten mit ungünstiger Windrichtung → 4x WB, 3x E, 2x GR
<ul style="list-style-type: none"> ➔ Vier Nächte mit günstigem Wind aus Richtung der Wasserbecken ➔ Drei Nächte mit günstigem Wind aus Richtung Elbe ➔ Zwei Nächte mit ungünstigem Wind aus der Gegenrichtung 	

Grundlage für die Auswertung des Windeinflusses bildeten alle Strahlungstage (Mindestanforderungen 80% der potenziell täglichen GS und ein Stundemittel mit $TT_h \geq 25 \text{ °C}$ sind erfüllt), an denen für die Station HOS Temperaturdaten und für die Station KLO Windrichtungsdaten vorliegen (107 Nächte). Davon ausgehend wurden zunächst jeweils sieben Nachtstundenmittelwerte inkl. Standardabweichung für die Windrichtung (DD) ermittelt. Über eine Windrose wurden Windrichtungen, die für einen Einfluss der Stationsdaten geeignet sind, festgelegt (Tabelle 12). Bei den Wasserbecken, die annähernd auf gleicher Höhe liegen wie die Messtation HOS, kann davon ausgegangen werden, dass sie ganzjährig wasserführend sind und ein möglicher Einfluss somit ebenfalls ganzjährig besteht. Aufgrund der größeren Oberflächen (je ca. 3500 m^2) und damit einer größeren Wirksamkeit wurden nur die beiden größeren Wasserbecken betrachtet und das kleinere Wasserbecken (ca. 560 m^2) nicht miteinbezogen.

Eine Abbildung der Windrose mit Einzeichnung der Wasserflächen und der Messtation (Abbildung 28) befindet sich in Kapitel 8.2 im Anhang.

Tabelle 12: Übersicht der für den Windeinfluss der Station HOS geeigneten und ungeeigneten Windrichtungen sowie Pufferzonen im Radius von 200 m.

Bewertung der Windrichtung im Radius 200 m		Große Wasserbecken	Elbe
Betrachtung als günstige Windrichtung	Optimale DD [°]	125-155	225-255
	Passende DD [°]	110-160	190-290
	Pufferzone DD [°]	81-109 und 161-189	161-189 und 291-329
Betrachtung als ungünstige Windrichtung	Ungünstige DD [°]	330-360 und 0-80	

Aufgrund der umfangreichen infrage kommenden Datenbasis wurde nach dem Best-Of-Ansatz vorgegangen, um möglichst andere Einflüsse auszuschließen und Unsicherheiten zu verringern: Es wurden nur Nächte als windgünstig betrachtet, in denen keine definitiv ungünstigen Windgeschwindigkeitseinträge (Tabelle 12, letzte Zeile) vorhanden waren (67 Nächte). Zudem wurde vorausgesetzt, dass für mindestens 5 h pro Nacht eine passende Windrichtung (Tabelle 12, dritte Zeile) vorlag (32 Nächte). Weiterhin wurden, ohne weitere Einschränkung der Auswahl, nur Nächte betrachtet, in denen die Standardabweichung des Stundenmittels der Windrichtung bei $< 100^\circ$ lag und die Windrichtung nicht zwischen Wasserbecken- und Elbeinfluss hin und her schwankte. Letzteres Kriterium hätte bei Zutreffen zur Folge, dass keine eindeutige Zuordnung möglich und gleichzeitig ein zu großer Einfluss aus der Pufferzone vorhanden wäre. Ausgehend von 29 Nächten mit Windrichtung von den Wasserbecken und allen zutreffenden Kriterien wurde deren Auswahl auf 14 Nächte mit jeweils sieben windgünstigen Nachtstundenwerten (gesamte Nacht) eingeschränkt. Da für den Einfluss der Elbe nur drei Nächte infrage kamen, ergab eine Identifizierung von Grenzfällen (mindestens 2 h statt 5 h pro Nacht mit passender Windrichtung bei allen sonstigen geltenden Bedingungen) sechs zusätzlich infrage kommende Nächte.

Außerdem wurden Nächte ermittelt, in denen eine definitiv ungeeignete Windrichtung für einen Einfluss auf die Temperatur vorlag. Dafür wurden Nächte gewählt, in denen kein Nachtstundenmittel aus einer passenden Windrichtung vorhanden war, dafür mindestens zwei Stundenmittel aus ungünstiger Richtung sowie eine Standardabweichung von $< 100^\circ$. Bis auf je eine Nacht wurden alle Ausschlüsse ausschließlich aufgrund des ersten Kriteriums durchgeführt und vier Nächte ermittelt.

In weiteren Schritten wurden die verbleibenden Nächte auf ihre relative Luftfeuchtigkeit (Stundenmittelwert) hin untersucht. Eine synoptisch großräumige hohe relative Luftfeuchte (RF) sollte ausgeschlossen werden, da diese einen möglichen lokalen Einfluss durch Gewässer überlagern oder abschwächen würde. Dies wären ungünstige Nächte, um den Gewässereinfluss zu messen. Es wurde zunächst eine Einschränkung von mindestens 3 Nh mit einer relativen Feuchte $< 80\%$ im Nachtstundenmittel bzw. eine maximale Summe < 600 in 7 Nh gewählt. Letzterer Ansatz wurde zusätzlich verwendet, um Grenzfälle auszuschließen. Während der Auswertung wurde deutlich, dass ausschließlich Nächte zu Beginn einer Hitzeperiode, jeweils von beiden Kriterien, betroffen waren. Daher wurde festgelegt, insgesamt nur Nächte auszuwerten, die zwischen ausgewählten Strahlungstagen liegen. In den Nächten innerhalb ausgewählter Strahlungswetterlagen traten wie erwartet keine hohe Werte für die relative Luftfeuchte auf.

Als weitere Größe wurde der Stundenmedian der Windgeschwindigkeit FF_h verwendet. Abweichungen vom Mittelmaß (1,0-4,9 m/s) ließen im Best-Of-Ansatz zum Ausschluss von Unsicherheiten drei Nächte ausschließen. Eine weitere Nacht wurde nicht miteinbezogen, da bei einer vorhandenen Windgeschwindigkeit von 1,1 m/s eine außergewöhnlich hohe Streuung der Windrichtung von mehr als 80° vorlag. Begründet werden können diese Einschränkungen mit der Tatsache, dass die Standardabweichung mit der Windgeschwindigkeit korreliert: mit kleinerer FF ist die Streuung höher. Eine hohe FF bedingt dagegen eine höhere Durchmischung und damit einen geringeren Effekt.

Als letzter Schritt wurden die Nächte ausgewählt, die innerhalb des Jahreszyklus zeitlich enger zusammenliegen. Ausgehend von den zwei verbliebenen Nächten mit definitiv ungünstigem Wind wurden Nächte innerhalb von 14 Tagen davor oder danach ausgewählt (08.06.-10.08. eines Jahres). So kann eine annähernde Vergleichbarkeit von GS, Vegetationsperiode und Wassertemperatur gewährleistet werden. Diese Auswahl führte zur Streichung von sechs Nächten mit Windrichtung von den Wasserbecken und zwei Nächten mit Windrichtung von der Elbe.

Insgesamt wurden vier Fälle mit Einfluss aus Windrichtung von den Wasserbecken, drei aus Richtung der Elbe und zwei Fälle mit Wind aus der Gegenrichtung bezüglich ihres nächtlichen Temperaturverhaltens an der Station HOS ausgewertet.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt: Die nächtliche Abkühlung zwischen 21 Uhr und 03 Uhr lag bei Einfluss aus Windrichtung der Wasserbecken bei -4,4 K, -5,1 K, -6,1 K und -6,3 K, bei Einfluss aus Windrichtung der Elbe bei -2,8 K, -5,7 K und -6,5 K und bei Wind aus der Gegenrichtung bei -3,6 K und -8,6 K.

Ein eindeutiger Trend lässt sich somit nicht feststellen. Festgehalten werden muss auch, dass sich die Minimaltemperaturen (zwischen 11,4 °C und 24,7 °C) in den jeweiligen Nächten deutlich unterscheiden. Damit liegen trotz aller Vorkehrungen für eine gute Vergleichbarkeit weiterhin sehr unterschiedliche Einzelfälle vor, für die keine klare Aussage bezüglich eines Windeinflusses auf die Temperatur getroffen werden kann. Nimmt man den zuletzt ausgeschlossenen Fall mit ungünstiger Windrichtung für eine größere Datenbasis wieder in die Betrachtung hinein, ergibt sich für diesen eine nächtliche Erwärmung von +0,1 K. Damit wird die Spanne der bisherigen Abkühlungstendenz der Gegenrichtung von -3,6 K bis -8,6 K noch größer und ein Trend ist weiterhin nicht erkennbar.

Bei der Wahl von Optimalfällen (Einschränkung der Windrichtung für eine Effektmaximierung auf die Kernzone) deutet sich eine Abschwächung der nächtlichen Temperaturdifferenz von -8,6 K (Gegenrichtung) auf -2,8 K (Elbeinfluss) bzw. im Bereich -4,4 K bis -6,3 K (Wasserbecken, mehrere Optimalfälle) an. Die statistische Aussagekraft fehlt hier jedoch, sodass insgesamt keine belastbare Folgerung getroffen werden kann.

Anhand der vorliegenden Daten konnte die genaue Strömungssituation vor Ort nicht nachvollzogen und kein Effekt zweifelsfrei bestätigt werden. Hier wären weitergehende Untersuchungen nötig, insbesondere die Messung der Windverhältnisse in geringerer Entfernung und ähnlicher topografischer Lage zu den Stationen sowie eine Analyse des Windeinflusses mittels Transekten zwischen dem Gewässerverlauf und den betroffenen Stationen. Für die weitere Beantwortung der Hypothese 1 wird davon ausgegangen, dass an der Station HOS keine feststellbare Abschwächung der Abkühlungsprozesse durch Windeinflüsse aus der Richtung der Wasserbecken oder der Elbe vorliegt.

Windauswertung an der Station GEB4

Die Windauswertung für die Station GEB4 erfolgte ähnlich wie für HOS. Einen Überblick über das Vorgehen und die Auswahlkriterien gibt Tabelle 13. Aufgrund größerer Datenlücken in den Temperaturdatensätzen musste hier bereits zu Beginn der Auswertung eine Einschränkung auf den Zeitraum 30.07.2020-26.06.2022 erfolgen. Zudem wurde davon ausgegangen, dass auch hier die vorangegangenen Nächte zu Beginn von Hitzeperioden nicht für die Auswertung geeignet sind.

Tabelle 13: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswertung des Windeinflusses an der Station GEB4 auf Grundlage aller in Kapitel 3.4 ausgewählten Strahlungstage. Datengrundlage: Open-Data-Server des DWD (siehe Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang).

Auswahlkriterium	Datengrundlage bzw. Vorgehen
Vollständige Zeitreihe an Lufttemperaturdaten	Lufttemperatur (TT_10) für GEB4, Prüfung auf Lücken → nur Zeitraum 30.07.2020-23.06.2022
Vollständige Zeitreihe an Windrichtungsdaten	Windrichtungsdaten (DD_10) für KLO, Prüfung auf Lücken → keine Einschränkung
Wind-Nachtstundenmittelwerte inkl. Standardabweichung	Berechnung von Stundenmittelwerten (DD_Nh) für 7 Nh (21 UTC des Vortags bis 03 UTC) für KLO
Günstige bzw. ungünstige Windrichtungen	Einordnung der Windrichtung in die Kategorien günstig (optimal, passend, Puffer) und ungünstig (Tabelle 14) mittels Windrose (Abbildung 29)
Weitere Auswahl nach dem Best-Of-Ansatz mit Winddaten für KLO (22 Nächte, ohne Vor-/ Folgenacht)	
Windgünstige Nacht, wenn... 1) 7 Nh mit DD_Nh = günstige Windrichtung 2) ≥ 5 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung 3) Standardabweichung DD_Nh < 100°	Nach 1) 16 Nächte Nach 2) keine weitere Einschränkung Nach 3) keine weitere Einschränkung
Weitere Eingrenzung von 2): 7 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung	15 windgünstige Nächte
Windungünstige Nacht, wenn... 0 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung	Null windungünstige Nächte
wiederholte Durchsicht und Einbezug von Vor- und Folgetagen von Strahlungstagen: Windungünstige Nacht, wenn... 0 Nh mit DD_Nh = passende Windrichtung	→ Zwei zusätzliche Nächte Zwei windungünstige Nächte (Gegenrichtung (GR))
Weitere Auswahl anhand von Zusatzgrößen für KLO	
Geringe großräumige relative Luftfeuchte	Stundenmittelwert der relativen Luftfeuchte RF_h ≥ 3 Nh mit < 80% RF_h für KLO bzw. maximale Summe RF_Nh < 600 in 7 Nh für KLO → keine Einschränkungen
Mittlere Windgeschwindigkeit ohne Ausreißer	Stundenmedian der Windgeschwindigkeit FF_h im Bereich 1,0-4,9 m/s → 14 Nächte + zwei Nächte aus GR
Zeitlich ähnliche Lage im Jahr	± 14 Tage zu den beiden ausgewählten Nächten mit ungünstiger Windrichtung → Fünf Nächte + zwei Nächte aus GR
<p>→ Fünf Nächte mit günstigem Wind aus der Richtung des Flutgrabens</p> <p>→ Zwei Nächte mit ungünstigem Wind aus der Gegenrichtung</p>	

Tabelle 14 zeigt die Einteilung der Windrichtung. Eine Abbildung der Windrose mit Einzeichnung der Wasserflächen und der Messstation (Abbildung 29) befindet sich in Kapitel 8.2 im Anhang.

Tabelle 14: Übersicht der für den Windeinfluss der Station GEB4 geeigneten und ungeeigneten Windrichtungen sowie Pufferzonen im Radius von 50 m.

Bewertung der Windrichtung im Radius 50 m		Niedersedlitzer Flutgraben
Betrachtung als günstige Windrichtung	Optimale DD [°]	125-145
	Passende DD [°]	55-220
	Pufferzone DD [°]	26-54 und 221-249
Betrachtung als ungünstige Windrichtung	Ungünstige DD [°]	250-360 und 0-25

Analog zum Auswahlverfahren für HOS wurden aus 22 Nächten im Best-Of-Ansatz 15 windgünstige Nächte ausgewählt, in denen der Wind ausschließlich aus optimalen oder passenden Windrichtungen kam, und eine einzelne windgünstige Nacht, in der auch Windrichtungen aus Pufferzonen vorhanden waren, ausgeschlossen.

Die Auswahl der Nächte mit einer definitiv ungünstigen Windrichtung erfolgte aufgrund des einzigen Kriteriums, dass kein Stundenmittelwert aus einer geeigneten Windrichtung vorliegen darf. Da dies in keinem Fall der 22 Nächte gegeben war, wurden in einer wiederholten Durchsicht auch Vor- und Folgetage von Strahlungstagen miteinbezogen und zwei Zeiträume ermittelt. Hier wird bereits deutlich, dass es aufgrund der geringen Datengrundlage bei GEB4 schwierig ist, einen Vergleich zwischen windgünstigen und windungünstigen Nächten durchzuführen.

Eine Einschränkung aufgrund einer zu hohen relativen Feuchte war an der Station GEB4 nicht nötig, auch nicht für die beiden nachträglich hinzugefügten Fälle. Das Kriterium einer angemessenen Windgeschwindigkeit schloss eine Nacht mit durchgehend hohen Stundenmedianen ≥ 4 m/s und einem Spitzenwert von 5,0 m/s aus. Zeitlich eng zusammenliegende Tage im Jahreszyklus wurden anhand der zwei Zeiträume mit definitiv ungünstigen nächtlichen Windrichtungen festgelegt (01.06. bis 01.07. eines Jahres). Damit wurden neun Nächte mit Wind aus Richtung des Flutgrabens ausgeschlossen. Eine Ausweitung von 14 auf 30 Tage zuvor und danach ergab das gleiche Resultat.

Insgesamt wurden fünf Fälle mit Windeinfluss aus Richtung des Flutgrabens und zwei Fälle mit Wind aus der Gegenrichtung bezüglich ihres nächtlichen Temperaturverhaltens an der Station GEB4 ausgewertet. Folgende Ergebnisse wurden erzielt: Die nächtliche Abkühlung zwischen 21 Uhr und 03 Uhr lag bei Windeinfluss aus Richtung des Flutgrabens bei -1,8 K, -3,2 K, -3,2 K, -3,6 K und -5,1 K und bei Wind aus der Gegenrichtung bei -1,6 K und -5,0 K. Teils lag kein kontinuierlicher Abkühlungsprozess vor.

Ein eindeutiger Trend lässt sich somit hier ebenfalls nicht feststellen, sodass keine klare Aussage bezüglich eines Windeinflusses auf die Temperatur getroffen werden kann. Auch hier unterscheiden sich die Minimaltemperaturen (zwischen 11,7 °C und 18,5 °C) in den jeweiligen Nächten deutlich. Insgesamt wären deutlich mehr optimal geeignete Einzelfälle pro Windrichtung notwendig gewesen. Eine Aufweichung der Kriterien würde eine noch größere Bandbreite an wenig aussagekräftigen Ergebnissen liefern, sodass davon abgesehen wurde. Eine genauere Untersuchung mit einem umfassenderen Datensatz wäre hier im Rahmen einer Folgearbeit in einigen Jahren sinnvoll.

Parallel dazu wurde mittels Pegelstandsdaten untersucht, ob der Flutgraben zu den entsprechenden Zeiträumen wasserführend war. Der Flutgraben (Gewässer 2. Ordnung, teilweise verrohrt; LHD, 2023e) kann in Hitzeperioden oder im Laufe heißer Sommer austrocknen (persönliche Mitteilung

von Dr. Björn Helm, TU Dresden, AG Siedlungshydrologie). Bei Austrocknung ist der direkte Effekt des Gewässers nicht mehr vorhanden. Zudem können auch die Auenwiesen durch Austrocknung von einem geringeren Bodenwassergehalt betroffen sein (van Hove et al., 2011). Der direkte Effekt des Flutgrabens ist jedoch insgesamt gering, da er künstlich um 1-2 m in einem Graben abgesenkt ist (Abbildung 14 in Kapitel 8.1 im Anhang). Die Auswertung der Informationen ergab, dass keiner der gewählten Zeiträume von den Trockenperioden im Flutgraben an der Messstation Toeplerpark, unweit der Station GEB4, betroffen war.

3.5.7 Auswahl geeigneter längerer Hitzeperioden

Zur Untersuchung länger andauernder Hitzeperioden wurden zunächst geeignete Zeiträume innerhalb des Datenkollektivs ermittelt. Tabelle 15 gibt einen Überblick über das Vorgehen und die verwendeten Kriterien. Die detaillierte Auswertung ist in Ordner 3 im elektronischen Anhang zu finden.

Tabelle 15: Übersicht über das Vorgehen und die Kriterien zur Auswahl von Einzelfällen mit Eignung zur Auswertung längerer Hitzeperioden auf Grundlage aller in Kapitel 3.4 ausgewählten Strahlungstage. Datengrundlage: Open-Data-Server des DWD (siehe Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang).

Auswahlkriterium	Datengrundlage bzw. Vorgehen
Hitzeperiode bzw. längerer warmer Zeitraum	Anzahl Strahlungstage in Folge ≥ 3
Vollständige Zeitreihe der Referenzstation HOS	Temperaturstundenmittel TT_h für HOS, Prüfung auf Lücken
Möglichst gute Datenbasis	Mindestens vier vorhandene Stationsdatensätze → Prüfung einer potenziellen weiteren Eingrenzung
Möglichst idealer Temperaturverlauf: 1) Geringe absolute Nachttemperaturen 2) Hohe absolute Tagestemperaturen 3) Verlauf über die Hitzeperiode ohne bzw. mit nur geringen Störungen im Temperaturverlauf 4) Große Amplitude zwischen täglichem Minimum und Maximum der Temperatur-Stundenmittel	Prüfung insgesamt und gesondert für Station HOS: 1) Temperaturstundenmittel: nächtliche Minimaltemperatur (TT_h_min) 2) Temperaturstundenmittel: maximale Tagestemperatur (TT_h_max) 3) Grafischer Verlauf des Tagesgangs (qualitativ) mit Änderung der Minimum- bzw. Maximaltemperatur über die Zeitspanne (ΔTT_h_{min} bzw. ΔTT_h_{max}) 4) Differenz der Stundenmittel der Lufttemperatur (TT_h_max - TT_h_min) pro Tag → jeweils bezogen auf den 24 h-Zeitraum von 21 Uhr UTC des Vortags bis 20 Uhr UTC
Vergleichbarkeit der Zeiträume untereinander (keine Einschränkung)	Entfernung von Datensätzen ab dem sechsten Tag einer Zeitperiode
→ Ergebnis: jeweils drei geeignete Zeitspannen pro Monat mit einem zeitlichen Umfang von drei bis fünf Tagen und einer Datenbasis von mindestens fünf Stationsdatensätzen	

In Anlehnung an die Definition einer Hitzeperiode des DWD (o. J.b) wurden Zeiträume mit einer Dauer von mindestens drei Strahlungstagen in Folge gewählt. Jedoch existiert keine einheitliche Definition für Hitzeperioden. Lowe et al. (2011) geben einen Überblick über verschiedene Definitionsansätze. Insgesamt liegen für Juni vier, für Juli sieben und für August sechs Zeiträume vor (insgesamt 17), die diese Auswahlbedingung erfüllen. Die durchschnittliche Dauer liegt bei drei bis vier

Tagen, das Maximum bei acht Tagen in Folge. Davon ausgehend wurden nur Zeiträume betrachtet, an denen die Daten der Referenzstation HOS vollständig vorliegen (-1 Datensatz im August) sowie mindestens vier der sieben Stadtstationsdatensätze (keine Einschränkung). Bei mindestens fünf Stationsdatensätzen verringert sich die Auswahl um einen Datensatz, bei mindestens sechs Datensätzen um vier Datensätze, weil hier die Jahre 2018-2019 entfallen. Es wurde zunächst die Mindestanforderung von vier Datensätzen beibehalten.

Ein inhaltliches Kriterium ist der ideale Tagesverlauf der Temperaturkurve, jeweils im Zeitrahmen 21-20 Uhr. Es wurden die Minimaltemperatur sowie die Änderung der Minimaltemperatur über die Zeitspanne betrachtet, wie es auch bei Kuttler (2011) beschrieben wird. Nachrangig wurden auch die maximale Tagestemperatur und die Tagestemperaturamplitude auf ihre Entwicklung im Verlauf der Hitzeperiode analysiert.

Da die Auswertung stark vom Verlauf der Lufttemperatur an der Referenzstation abhängt, wurden die grafischen Temperaturverläufe für HOS gesondert betrachtet. Eine Auffälligkeit an zwei Untersuchungstagen durch einen nicht weiter bestimmbar lokalen Einfluss führte zum Ausschluss dieser Zeiträume. An zwei weiteren Tagen kam es zu Beginn von Zeiträumen mit jeweils fünf Tagen zu vergleichsweise geringen maximalen Temperaturen zwischen 26 und 27 °C. Diese Tage wurden dennoch nicht entfernt, da sie die Basis der nachfolgenden stärkeren Hitzewelle darstellen und als Bewertungsgrundlage für die Speicherkapazität der Stadtinfrastruktur dienen können.

Wichtig ist außerdem die Vergleichbarkeit der Zeiträume untereinander. Dazu wurden die Längen der Zeitspannen verglichen. Hauptsächlich liegen Zeitspannen mit drei Strahlungstagen in Folge vor. Bei längeren Zeiträumen von mehr als fünf Tagen könnte dementsprechend der darüberhinausgehende Zeitraum zur besseren Vergleichbarkeit abgeschnitten werden. Dies war aufgrund der vorangegangenen Auswahl jedoch nicht nötig.

Es ergaben sich jeweils drei geeignete Zeitspannen pro Monat mit einem zeitlichen Umfang von drei bis fünf Tagen und einer Datengrundlage von mindestens fünf Stationsdatensätzen für die Auswertung (Tabelle 16). Für Juli und August liegen in jeweils zwei Fällen Überschneidungen mit den in Kapitel 3.5.5 ausgewählten Einzelfällen vor, für Juni in einem Fall.

Tabelle 16: Übersicht über die gewählten Zeitspannen zur Auswertung längerer Hitzeperioden 2018-2022. In Klammern: Dauer der untersuchten Zeitspanne und Anzahl der verfügbaren Stationsdatensätze.

Auswahl für Juni	Auswahl für Juli	Auswahl für August
01.06.-05.06.2019 (5 Tage, 5 Stationen)	29.07.-31.07.2018 (3 Tage, 5 Stationen)	23.08.-26.08.2019 (4 Tage, 5 Stationen)
15.06.-17.06.2021 (3 Tage, 8 Stationen)	30.07.-01.08.2020 (3 Tage, 7 Stationen)	05.08.-09.08.2020 (5 Tage, 7 Stationen)
17.06.-19.06.2022 (3 Tage, 8 Stationen)	18.07.-20.07.2020 (3 Tage, 8 Stationen)	02.08.-05.08.2022 (4 Tage, 8 Stationen)

3.6 Vorgehen bei der Fehlerbetrachtung und Unsicherheitsdiskussion

Die Fehlerbetrachtung erfolgte in verschiedenen Kategorien. Dazu wurden während der Durchführung der Arbeit sämtliche Unsicherheiten dokumentiert und verschiedenen Bereichen zugeordnet. Eine quantitative Betrachtung ist nur begrenzt möglich, da hierfür oftmals die Datengrundlage fehlt. Metadaten zur verwendeten Sensorik wurden jeweils von den Betreibern in unterschiedlicher Ausführlichkeit zur Verfügung gestellt. Teilweise konnten Informationen jedoch nicht ermittelt werden.

Im Rahmen der Datenauswertung wurden einige Auswahlentscheidungen getroffen, die den verwendeten Datenumfang eingrenzen, indem anhand objektiver Kriterien Zeiträume entfernt oder ausgewählt wurden. Um die festgelegten Grenzen für Entscheidungen sichern zu können, wurden mehrere Schwellenwertbetrachtungen durchgeführt. Die Gesamtzeiträume wurden hinsichtlich der 80%-Schwelle der potenziellen GS, der 25 °C-Temperaturschwelle sowie der Windgeschwindigkeitsgrenze bei 2,7 m/s auf die Anzahl der Tage hin untersucht, an denen das Kriterium nur knapp nicht erreicht wurde. Für die ersten beiden Schwellen gelten jeweils die Tage, an denen das jeweils andere Kriterium zutreffend ist, und der Tag somit bei einer niedrigeren Schwelle ausgewählt worden wäre. Zu diesem Zeitpunkt der Auswertung wurde noch das gesamte astronomische Sommerhalbjahr betrachtet. Für die Globalstrahlung wurde für diese möglichen Tage die fehlende absolute Differenz zum 80%-Schwellenwert anhand der Tagessummen der GS berechnet und der Anteil dieser Differenz am Maximalwert GS_{d_pot} des betreffenden Tages ermittelt. Für die Temperatur wurde die mit niedrigeren Schwellenwerten zwischen 24,5 °C und 25 °C stufenweise veränderte Anzahl an Tagen anhand der Stundenmittelwerte ermittelt. Für die Schwellenwertbetrachtung der Windgeschwindigkeit wurden alle zuvor bestimmten Auswahltage als Datengrundlage verwendet. Es erfolgte ein analoges Vorgehen zu den Schritten bezüglich der Temperaturschwelle mit stufenweise höheren Schwellenwerten für die Nachtmediane über sieben Nachtstunden zwischen 2,7 m/s und 3,3 m/s, welche direkt aus den 10 min-Werten ermittelt wurden.

Anhand des Schwellenwertes wurden jedoch keine Ausschlüsse vollzogen. Die gilt auch für den Bedeckungsgrad, der bereits mit insgesamt drei Schwellen ($\leq 4/8$, $\leq 3/8$, $\leq 2/8$) ganztags sowie in den Nachtstunden betrachtet und deshalb an dieser Stelle nicht weiter untersucht wurde.

Eine weitere Betrachtung wurde für die Eingrenzung des Zeitraums von dem astronomischen Sommerhalbjahr auf den meteorologischen Sommer (Juni-August) durchgeführt. Dabei wurde die Anzahl der zuvor ausgewählten und durch dieses Kriterium ausgeschlossenen Tage begutachtet.

Die Ergebnisse der Schwellenwertbetrachtung werden im Rahmen der Fehlerbetrachtung bei der Datenauswertung in Kapitel 4.7.4 erläutert.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse dieser Arbeit beschrieben und diskutiert. Tabelle 17 gibt einen Überblick über alle vorhandenen Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsfragen und Hypothesen. Dabei werden in den Grafiken zur besseren Einordnung der Ergebnisse die gesamten Tagesverläufe dargestellt, aber nur die Nachtstunden analysiert und interpretiert. Kapitel 8.5 im Anhang gibt einen Überblick über die Inhalte und Struktur des elektronischen Anhangs.

Tabelle 17: Übersicht über die Ergebnisse der Arbeit, die Form der Darstellung sowie die Art und den Ort der Ergebnisdarstellung. Alle nicht gezeigten Darstellungen sind in Ordner 4 im elektronischen Anhang zu finden.

Kapitel	Forschungsfrage bzw. Hypothese	Form der Darstellung	Statistik bzw. Einzelfälle	Ort der Ergebnisdarstellung
4.1	Allgemeine Übersicht der Tagesgänge mit Temperaturmittelwert über die Nachtstunden (NMW) bzw. über den ganzen Tag (TMW) (4.1.1) und gesonderter Betrachtung der nächtlichen Temperaturverläufe (4.1.2)	40 Boxplots, Darstellung pro Station und Monat	Statistik	Abbildung 30 bzw. Ordner 4, Kapitel 4.1.1
		Tabelle, Darstellung pro Station und Monat	Statistik	Tabelle 18
		Tabelle, Darstellung pro Station und EF bzw. Monat	Statistik und Einzelfälle	Tabelle 23 Tabelle 24 (EF)
4.2	Einfluss blauer Infrastruktur auf lokale Temperaturen – Hypothese 1	15 Grafiken, Darstellung pro EF	Einzelfälle	Abbildung 2 bzw. Ordner 4, Kapitel 4.2
4.3	Kaltlufteinfluss auf lokale Temperaturen – Hypothese 2	Vier Grafiken, Darstellung pro Monat; 15 Grafiken, Darstellung pro EF	Statistik und Einzelfälle	Abbildung 3 bzw. Ordner 4, Kapitel 4.3
4.4	Repräsentativität der Messstationen: Referenzstation (4.4.1) und typische Stadtstation (4.4.2)	Jeweils vier Grafiken, Darstellung pro Monat	Statistik	Abbildung 4 Abbildung 5 bzw. Ordner 4, Kapitel 4.4.1 und 4.4.2
4.5	Auswertung der lokalen Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden			
4.5.1	Mittlerer UHI-Effekt	Eine Grafik, Darstellung pro Sommer	Statistik	Abbildung 6
4.5.2	Ort/ Zeitpunkt des nächtlichen UHI-Maximums in zeitlicher/ räumlicher Auflösung	Tabelle, Darstellung pro Station und Monat	Statistik	Tabelle 19
4.5.3	Ursachen für die Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden (4.5.3.1) mit dem Einfluss grüner Infrastruktur – Hypothese 3 (4.5.3.2), dem Einfluss blauer Infrastruktur (4.5.3.3) sowie topografischer Besonderheiten (4.5.3.4)	4.5.3.1, 4.5.3.3, 4.5.3.4: Qualitative Analyse mit Steckbriefen 4.5.3.2: Vier Grafiken, Darstellung pro Monat; 15 Grafiken, Darstellung pro EF	qualitative Analyse Statistik und Einzelfälle	Keine Darstellung 4.5.3.2: Abbildung 7 bzw. Ordner 4, Kapitel 4.5.3.2
4.5.4	Veränderung des UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode	Neun Tabellen, Darstellung pro EF	Einzelfälle	Tabelle 20 bzw. Ordner 4, Kapitel 4.5.4

4.1 Übersicht der Tagesgänge

4.1.1 Auswertung des gesamten Tagesverlaufs

Für eine erste Übersicht und zur allgemeinen Einordnung der Daten und Stationen wurden 40 Boxplots erstellt (R-Skript und Abbildungen in Ordner 4, Kapitel 4.1.1 im elektronischen Anhang). Abbildung 30 in Kapitel 8.4 im Anhang sowie die genannten Abbildungen im elektronischen Anhang zeigen den statistisch über längere Zeiträume ermittelten Tagesgang jeder Station pro Monat bzw. Sommer und damit die räumliche und zeitliche Variabilität. Neben den Boxen sind jeweils horizontal in blau der Temperaturmittelwert über die Nachtstunden (NMW) und in orange der Temperaturmittelwert über den ganzen Tag (TMW) dargestellt. Senkrechte hellblaue Linien markieren den Beginn und das Ende der Nachtstunden. Bei den Boxplots ist zu beachten, dass sie automatisch mit dem Wert um 0 Uhr UTC (Endwert) beginnen, das heißt, dass die erste Box links den Stundenmittelwert für 23:00-00:00 Uhr enthält und die ganz rechte Box (23 Uhr UTC, Endwert) den Stundenmittelwert für 22:00-23:00 Uhr. Außerdem ist darauf hinzuweisen, dass die Station GEB4 insbesondere im Juli sehr wenig Daten aufweist, weshalb die kleineren Boxen und Whisker nicht mit einer höheren Übereinstimmung der Daten verwechselt werden dürfen. Eine diesbezügliche Prüfung der Daten ergab keine systematische Abweichung. Die insgesamt niedrigeren Werte sind durch die fehlenden Stationsdaten für GEB4 insbesondere in den wärmeren Monaten Juli 2018, 2019 und 2022 (LHD, 2022e, 2023j) zu erklären.

Tabelle 18 zeigt die berechneten TMW und NMW sowie die Differenz aus TMW und NMW pro Station und Monat bzw. Sommer. Damit werden die Unterschiede zwischen den Tagesverläufen in den Boxplots besser ersichtlicher. Die Stationen BER, NOR und WIN weisen in allen untersuchten Zeiträumen die höchsten TMW von meist > 25 °C auf, während die TMW der Stationen GEB4, HOS und PIL mit < 24 °C am geringsten sind. Die Minima und Maxima für TMW und NMW sind fett markiert. Der Maximalwert von $26,1$ °C wird laut der Statistik im August an der Station NOR erreicht, der um fast 4 K niedrigere Minimalwert von $21,2$ °C im Juli an der Station GEB4. Der geringere Datenumfang für GEB4 insbesondere im Juli wurde bereits oben erläutert. In der Nacht ergibt sich ein sehr ähnliches Ergebnis. Die Stationen BER, NOR und WIN liegen mit NMW von meist > 21 °C deutlich über den NMW der Stationen BOT, GEB4 und PIL von < 19 °C. Der nächtliche Maximalwert von $22,4$ °C wird ebenfalls im August an der Station NOR erreicht, der um mehr als 6 K niedrigere Minimalwert von $16,1$ °C im Juli wiederum an der Station GEB4. Bei den absoluten Temperaturen liegt somit insgesamt meist eine Differenz von ≥ 2 K bis hin zu > 6 K zwischen den Stationen mit den höchsten und niedrigsten Werten vor. Mögliche Ursachen werden in den folgenden Kapiteln im Detail erläutert.

Die Differenz von TMW und NMW gibt Aufschluss über die unterschiedlichen Temperaturamplituden an den Standorten. Dabei können kleine Tagesamplituden an einer Station tendenziell auf

einen größeren nächtlichen lokalen UHI-Effekt im Vergleich zur Referenzstation HOS hinweisen (LHD, 1998). Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass an Standorten mit geringer Horizonteinschränkung (z. B. auf Wiesenflächen) am Tag eine hohe Einstrahlung, in der Nacht jedoch auch eine hohe Ausstrahlung festzustellen ist. Der starken Aufheizung der Luftmassen über einer offenen Freifläche am Tag folgt eine starke Abkühlung der Luft in der Nacht, sodass sich insgesamt eine große Tagesamplitude ergibt. An Standorten mit dichter Bebauung und größerer Horizonteinschränkung fällt dieser Effekt geringer aus, sodass im Vergleich zur Referenzstation in Strahlungsnächten ein deutlicherer UHI-Effekt verzeichnet werden könnte (LHD, 1998; Reuter & Kapp, 2012).

Die größten Differenzen (blaue Markierung) finden sich an den Stationen BOT, GEB4 und PIL (≥ 5 K), wohingegen die geringsten Differenzen (orange Markierung) an den Stationen BER, GEB2 und NOR (≤ 4 K) festzustellen sind. Für letztere Stationen, welche aufgrund von hoher Bebauung bzw. dichtem Laubwald veränderte Ein- und Ausstrahlungsbedingungen aufweisen, ist damit grundsätzlich eine größere lokale urbane Wärmeinsel zu erwarten.

Tabelle 18: Temperaturmittelwert über den ganzen Tag (TMW) und über nur die Nachtstunden (NMW) pro Station und Monat bzw. Sommer [°C] sowie die Differenzen zwischen TMW und NMW [K]. Fett: Markierung der Minimal- und Maximalwerte für TMW und NMW; Orange bzw. Blau: Markierung der kleinsten bzw. größten 30% der Differenzen.

TMW/ NMW [°C]	BER	BOT	GEB2	GEB4	HOS	NEU	NOR	PIL	STR	WIN
Juni TMW	25,6	23,9	24,1	23,6	23,7	25,1	26,0	23,6	23,9	25,4
Juli TMW	25,2	23,2	23,5	21,2	23,2	24,9	25,7	23,2	23,5	24,9
August TMW	25,7	24,0	24,4	23,8	23,6	24,9	26,1	23,7	23,9	25,2
Sommer TMW	25,5	23,7	24,1	23,4	23,5	25,0	26,0	23,5	23,8	25,1
Juni NMW	21,3	18,6	20,1	18,0	19,1	20,8	21,8	18,0	19,2	21,1
Juli NMW	21,5	18,0	19,6	16,1	18,5	20,6	21,9	17,5	18,8	20,9
August NMW	21,8	19,0	20,7	18,8	19,3	21,1	22,4	18,5	19,4	21,3
Sommer NMW	21,5	18,6	20,3	18,1	19,0	20,8	22,0	18,1	19,1	21,1
Diff. Juni [K]	4,3	5,3	4,0	5,6	4,7	4,3	4,3	5,5	4,7	4,3
Diff. Juli [K]	3,8	5,2	3,9	5,1	4,7	4,2	3,8	5,6	4,7	4,0
Diff. August [K]	3,8	5,0	3,7	5,0	4,4	3,8	3,8	5,2	4,5	3,8
Diff. Sommer [K]	4,0	5,1	3,8	5,3	4,6	4,1	3,9	5,4	4,6	4,0

4.1.2 Auswertung der nächtlichen Temperaturverläufe

Zudem wurde eine tabellarische Übersicht der nächtlichen Temperaturverläufe erstellt. Tabelle 23 in Kapitel 8.4 im Anhang zeigt die statistische Auswertung der einzelnen Monate, Tabelle 24 in Kapitel 8.4 im Anhang die Auswertung der drei monatlichen Einzelfälle mit jeweils allen Stationen (JUN10, JUL10, AUG10). Ermittelt wurden das absolute Temperaturmaximum innerhalb der Nachtstunden und dessen Zeitpunkt, das absolute Minimum innerhalb der Nachtstunden und dessen Zeitpunkt sowie die nächtliche Abkühlungsrate zwischen Maximum und Minimum insgesamt und stundenweise.

Absolute nächtliche Temperaturmaxima und -minima mit jeweiligen Zeitpunkten

Das höchste absolute nächtliche Temperaturmaximum von $> 25,5$ °C wird in der statistischen Betrachtung (Tabelle 23) für alle betrachteten Zeitspannen an der Station NOR festgestellt, gefolgt von BER mit ca. $25,0$ °C. Die niedrigsten absoluten nächtlichen Temperaturmaxima finden sich mit $\leq 22,0$ °C an den Stationen GEB4 und PIL. Die höchsten absoluten nächtlichen Temperaturminima werden mit $\geq 18,0$ °C ebenfalls an den Stationen BER und NOR sowie teilweise für NEU und WIN ermittelt. NOR ist hier wiederum Spitzenreiter mit Werten von stets $\geq 18,5$ °C. Die Stationen BOT, GEB4 und PIL sowie teilweise HOS weisen dagegen die niedrigsten absoluten nächtlichen Temperaturminima auf. Die Minimalwerte schwanken dabei je nach Monat zwischen $12,9$ °C (GEB4 im Juli) und $16,2$ °C (BOT und PIL im August). Über den gesamten Sommer liegt der geringste nächtliche Minimalwert bei $15,5$ °C jeweils für BOT und PIL.

Die Einzelfallbetrachtung (Tabelle 24 in Kapitel 8.4 im Anhang) bekräftigt die statistischen Aussagen bezüglich der absoluten nächtlichen Temperaturmaxima im Vergleich der Stationen. In Bezug auf die absoluten nächtlichen Temperaturminima ist eine Veränderung bei den niedrigsten Werten weg von BOT und hin zu STR zu erkennen. STR trat bisher nicht als Station mit auffällig geringen Werten in Erscheinung. Im Umweltbericht der LHD (1998) wurden kühlere Temperaturen beispielsweise auch in Kleingartenanlagen gemessen. Kleingärten sind auch nahe STR zu finden und könnten sich temperatursenkend auswirken. Die absoluten Werte selbst können in der Einzelfall-Betrachtung nicht verglichen werden.

Der Zeitpunkt des Maximums liegt bei der statistischen Betrachtung durchgehend bei 21 Uhr, das Minimum bei 03 Uhr, es ist somit keine zeitliche Verschiebung über den Sommer hinweg erkennbar. Bei den Einzelfällen wurde jeweils einmal das Minimum an der Station PIL auch um 22 Uhr (JUL10) und um 02 Uhr (AUG10) gemessen, wodurch die nächtliche Abkühlungsrate in diesen Fällen nur bis zu diesem Zeitpunkt berechnet wurde. Grund für diese Abweichungen können lokal begrenzte Austauschprozesse und Störungen sein.

Es kann festgehalten werden, dass die Temperatur an den städtischen Stationen um 21 Uhr bei höheren Maximalwerten und um 03 Uhr auch bei höheren Minimumwerten liegt als im Umland.

Trends für Maxima und Minima über den Sommer hinweg

Für das nächtliche Temperaturmaximum zwischen den Monaten ist kein einheitlicher Trend in der Statistik erkennbar. Dieses liegt im Vergleich der Zeitspannen in drei Fällen im Juni, ebenso dreimal im Juli und viermal im August. Gleiche Werte wurden dabei mehrfach gezählt. Dagegen lässt sich für das nächtliche Temperaturminimum ein eindeutiger Trend erkennen. Die höchsten Minimaltemperaturen werden durchgehend im August erreicht, während die geringsten Minimaltemperaturen in acht Fällen im Juli und dreimal im Juni erreicht werden. Es ist somit von einer

Aufheizungstendenz der Nächte zwischen Juli und August auszugehen. Eine stationsspezifische Betrachtung ist für weitergehende Analysen zu empfehlen. Die Einzelfallbetrachtung lässt einen quantitativen Vergleich zwischen den Monateinzelfällen nicht zu, sodass diesbezüglich keine Aussage möglich ist.

Insgesamt betrachtete nächtliche Abkühlungsrate und Trends

Die statistisch über längere Zeiträume ermittelte, höchste mittlere nächtliche Abkühlungsrate (über 6 h) weist die Station GEB2 mit $-1,3 \text{ °C/h}$ (Juli) bzw. $-1,2 \text{ °C/h}$ (Sommer) auf. Dagegen ergaben die Stationen auf offenen Wiesen (BOT, GEB4, HOS, PIL) keine besonders hohen Werte, hier war das Erreichen des Maximums erwartet worden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass insgesamt nur geringe Unterschiede in den Ergebnissen, teilweise innerhalb des Unsicherheitsbereiches, vorliegen und jeweils Werte zwischen $-0,8 \text{ °C/h}$ und $-1,3 \text{ °C/h}$ erreicht wurden. Eine mittlere Abkühlung in der Größenordnung von 1 °C/h erscheint plausibel.

Auch in dieser Betrachtung ist kein Trend zwischen den Monaten zu erkennen, der oben beschriebene Trend zwischen den Stationen zieht sich jedoch durch alle Monate. Durch die verwendete Zeitschiene (21 UTC bis 03 UTC) wird jedoch nicht die maximale nächtliche Abkühlungsrate erfasst, da das Gesamtminimum erst in den frühen Morgenstunden gegen 04 bzw. 05 Uhr auftritt, welche nicht Teil der Nachtbetrachtung sind. Zudem können die Wiesenstandorte bereits vor 21 Uhr abgekühlt sein, wodurch die Differenz innerhalb der betrachteten Zeitspanne geringer ist.

Die Betrachtung der Einzelfälle ergibt stark variierende mittlere nächtliche Abkühlungsraten von $-1,2 \text{ °C/h}$ bis $-1,9 \text{ °C/h}$ (JUN10), $-0,9 \text{ °C/h}$ bis $-1,1 \text{ °C/h}$ (JUL10) und $-0,5 \text{ °C/h}$ bis $-0,7 \text{ °C/h}$ (AUG10). Bis auf den Fall JUN10, für den die Differenz zwischen den mittleren nächtlichen Abkühlungsraten der Stationen NEU und PIL mit $0,7 \text{ K}$ maximal ist, fallen alle weiteren Differenzen sehr gering aus und liegen damit im Unsicherheitsbereich. JUN10 zeigt außerdem besonders hohe Werte für Wiesenstandorte ohne bedeutende Horizonteinschränkung (BOT, GEB4, HOS, PIL, STR), welche mittels Statistik nicht nachgewiesen werden konnten.

Stundenweise betrachtete nächtliche Abkühlungsrate

Für eine genauere Aussage zur nächtlichen Abkühlungsrate werden die Stundendifferenzen einzeln betrachtet. So kann die Variabilität zwischen den Stationen besser eingeschätzt werden: Welche Stationen kühlen besonders stark in den ersten Nachtstunden ab, welche Stationen erst später?

Wichtig ist an dieser Stelle der methodische Hinweis, dass hierfür nicht über den Gesamtzeitraum gemittelt werden darf, da sonst auch über die Zeitsprünge zwischen den Strahlungsperioden gemittelt wird. Dies betrifft in dieser Auswertung nur den Wert zwischen 0 und 1 Uhr, da hier der Beginn bzw. das Ende jedes betrachteten Tages bzw. jeder Strahlungsperiode liegt. Somit können

die Temperaturmittelwerte von 0 Uhr und 1 Uhr nicht pauschal verglichen werden. Der Versuch führte zu durchschnittlich um mehr als 1,3 °C systematisch erhöhten Ergebnissen. Für dieses Stundenintervall dürfen nur die einzelnen Zeitspannen jeweils für sich verglichen werden. Dabei bietet es sich an, die angepasste Auswertung direkt für alle Nachtstunden einheitlich durchzuführen, auch wenn sich für diese keine Unterschiede ergeben, wie eine Überprüfung auf alle vorhandenen Nachkommastellen gezeigt hat. Es wurden somit pro ausgewähltem Tag Stundendifferenzen gebildet und gegebenenfalls bei Stunde 1 entfernt, falls keine dazugehörige Stunde 0 vorhanden war. Damit liegen dem Wert zwischen 0 Uhr und 1 Uhr zwar in der Folge jeweils ca. 35% weniger Daten zugrunde als den übrigen, jedoch ist die Vergleichbarkeit mit anderen Stundendifferenzen nur so gegeben.

Die höchsten stündlichen nächtlichen Abkühlungsraten liegen in Statistik und Einzelfällen übereinstimmend hauptsächlich zwischen 21 und 23 Uhr (siehe gelbe Markierungen in Tabelle 23 und Tabelle 24 in Kapitel 8.4 im Anhang). An Stationen mit geringerer Horizonteinschränkung in der Umgebung werden schon zu Beginn der Nacht höhere stündliche Abnahmen der Lufttemperatur gemessen, während dies an dichter bebauten und horizonteingeschränkten Standorten (BER, GEB2, NEU, NOR) oftmals erst später auftritt.

Für PIL wurde auch im Umweltbericht der LHD (1998) eine rasche Abkühlung festgestellt. Dabei wurde das Temperaturminimum teilweise bereits um Mitternacht erreicht, was mit dem geringeren Wärmespeicherungsvermögen der dortigen Oberflächen begründet wurde. Andere Gründe wie der unterschiedliche Sky View Factor und die damit verbundenen Ausstrahlungsbedingungen (Masson et al., 2020), auf welche in den folgenden Kapiteln genauer eingegangen wird, spielen hier ebenfalls eine Rolle. Im Einzelfall werden maximale stündliche Abkühlungsraten von $> -4,1$ °C/h (BOT und PIL, JUN10) erreicht, in der statistischen Betrachtung durchaus $\geq -1,5$ °C/h (Bandbreite: $-0,9$ °C/h bis $-1,9$ °C/h), und damit erwartungsgemäß höhere Raten als in der obigen Gesamtbetrachtung (zum Vergleich: Statistik: $-0,8$ °C/h bis $-1,3$ °C/h).

Bei einer statistischen Betrachtung über längere Zeiträume können immer auch Ausreißer enthalten sein. Wichtig ist jedoch, dass diese durch die hohe Datenmenge an nicht-auffälligen Daten kein großes Gewicht haben. Dies kann in der vorliegenden Betrachtung trotz der Verwendung einer Datenbasis von fünf Jahren nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Auch an den ausgewählten Strahlungstagen treten in Einzelfällen deutliche Temperaturabfälle über alle Stationen hinweg auf. Grund für die rasche Abkühlung waren beispielweise Regenschauer, wie das Beispiel am 06. Juli 2022 zeigt. Anhand von Messdaten zu Temperatur, relativer Feuchte, mittlerer und maximaler Windgeschwindigkeit sowie zur Niederschlagssumme der Station BOT in der Nacht zwischen 05. und 06. Juli 2022 konnte ein Wetterumschwung durch ein Regenereignis festgestellt werden,

welches einen raschen Temperaturabfall zur Folge hatte (Tabelle 25 in Kapitel 8.4 im Anhang). Dieses Ereignis betraf alle Stationen (Tabelle 26 in Kapitel 8.4 im Anhang). Die stündliche Temperaturabnahme zwischen 23 Uhr und 0 Uhr lag bei $-2,4 \text{ °C/h}$ (HOS) bis $-5,9 \text{ °C/h}$ (NOR). Dieses Beispiel im Monat Juli, der ohnehin eine geringere Datendichte aufweist, verändert das statistische Temperaturstundenmittel um 0 Uhr je nach Station um $0,1-0,2 \text{ K}$. Daher ist in zukünftigen Studien noch mehr darauf zu achten, möglichst eine noch größere Datenbasis zu verwenden, damit, wie im Beispiel gezeigt, einzelne deutliche Wetterumschwünge am Ende einer untersuchten Zeitspanne keinen großen Einfluss haben. Auf diese Auffälligkeiten ist bei der Datenanalyse zu achten.

4.2 Einfluss blauer Infrastruktur auf lokale Temperaturen – Hypothese 1

Hypothese 1 (H1):

>> Es wird erwartet, dass unbebaute und offene Standorte mit einem hohen Anteil an blauer Infrastruktur (z. B. Elbe, Geberbach) infolge der dadurch entstandenen grünen Infrastruktur (Auenflächen) nachts eine lokale Kühlwirkung erfahren und damit im Vergleich zu unbebauten und offenen Standorten ohne die genannte Kombinationsstruktur eine geringere Temperatur aufweisen. Die Ausprägung der Kühlwirkung von blauer Infrastruktur hängt dabei von ihrem Anteil an grüner Folgestruktur und deren Einfluss ab. <<

Untersucht wird einerseits die Station HOS aufgrund ihrer Nähe zur Elbe sowie zu zwei Wasserbecken der Kläranlage und andererseits die Station GEB4 im Hinblick auf die Nähe zum Niedersedlitzer Flutgraben (Geberbach). Die beiden Fließgewässer sind in ihrem Einfluss deutlich voneinander zu unterscheiden. Eine Vorab-Analyse in Kapitel 3.5.6 ergab, dass in den untersuchten Nächten kein eindeutiger Windeinfluss auf die nächtlichen Lufttemperaturen erkennbar ist und dieser im Rahmen der Datenlage und Genauigkeit sowie der mangelnden Abgrenzbarkeit von anderen Einflussfaktoren im Folgenden vernachlässigt werden kann.

Als Vergleichsstationen dienen BOT, PIL und STR als Stationen ohne Einfluss blauer Infrastruktur, aber unter ähnlichen sonstigen Bedingungen und im Optimalfall ohne andere große Einflussfaktoren. Es erfolgt somit ein Temperaturvergleich von Stationen auf wasserbeeinflussten Auenwiesen mit Stationen auf wasserunabhängigen Grünflächen.

Von einer statistischen Auswertung über längere Zeiträume wurde an dieser Stelle abgesehen, da GEB4 insbesondere für Juli eine zu geringe Datenbasis (12%, Tabelle 8) aufweist und eine grafische Darstellung irreführend sein könnte. Eine Prüfung ergab jedoch keine systematische Abweichung in den vorhandenen Daten selbst, sodass eine Einzelfalluntersuchung weiterhin infrage kommt.

Die folgende Abbildung 2 zeigt mit dem Einzelfall JUN10 beispielhaft und repräsentativ für 14 weitere Abbildungen in Ordner 4, Kapitel 4.2 im elektronischen Anhang die Temperaturanomalien der verschiedenen Stationen im Vergleich zu HOS als Referenzstation (REF).

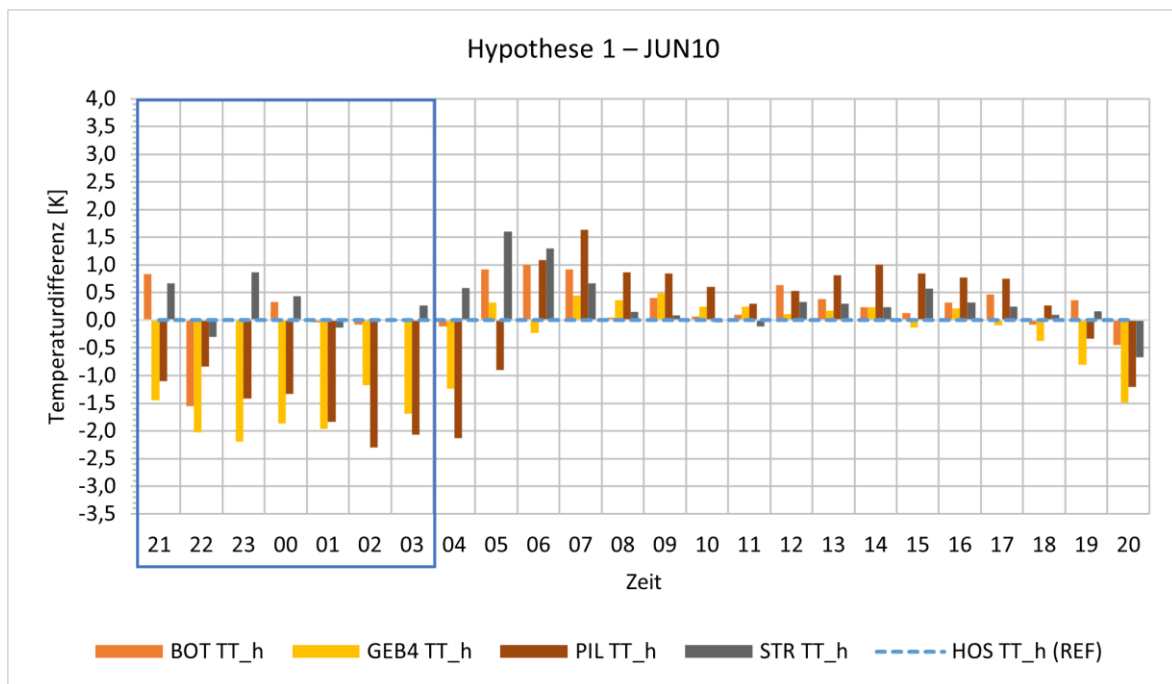


Abbildung 2: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BOT, GEB4, PIL und STR im Vergleich zur Referenzstation HOS (blau gestrichelte Linie) als Stundenmittel für den Einzelfall JUN10 zur Beantwortung von Hypothese 1 (Einfluss blauer Infrastruktur auf lokale Temperaturen). Blauer Rahmen: untersuchte Nachtstunden. Stundenangaben (x-Achse, UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten.

Während der Nachtstunden im Einzelfall JUN10 liegen insbesondere die Temperaturen an den Stationen GEB4 und PIL etwa 1-2 K unter dem Niveau an der Station HOS, während die Temperaturen der Stationen BOT, STR und HOS sehr ähnlich sind.

Für GEB4 kann die Hypothese eines lokalen Kühleffekts durch die Auenwiesen aufgrund der stets deutlich geringeren Temperatur im Vergleich zu den Vergleichsstationen damit bestätigt werden. Andere Ursachen durch lokale Besonderheiten sind nicht ersichtlich. Dieser Effekt ist auch in allen weiteren Einzelfällen mit vorliegenden Daten für GEB4 (JUN1-4, JUL1+10 und AUG1+10) zu sehen. In den übrigen Fällen fehlen die Daten für GEB4, sodass dazu keine Aussage getroffen werden kann.

Es lässt sich nicht bestätigen, dass HOS einen deutlich kühlenden Effekt durch die Auenwiesen erfährt, da die Temperaturen für HOS in den Einzelfällen meist um mehr als 1 K, teilweise sogar um mehr als 2 K höher liegen als für die Vergleichsstation PIL. Gleichzeitig lässt sich auch kein bedeutender Unterschied zu den nicht gewässerbeeinflussten Stationen STR und BOT erkennen. In den Fällen JUN1 und AUG2-4 ist die Temperatur für BOT sogar tendenziell niedriger als für HOS. Im Vergleich zu STR deutet sich der Trend, dass HOS kühler als STR ist, über alle Einzelfälle an.

Damit wird die Hypothese 1 durch die vorliegenden Daten nur teilweise bestätigt.

Zur Diskussion steht, inwiefern man möglichst zweifelsfrei den Einfluss blauer Infrastruktur von dem Einfluss der grünen Infrastruktur und der Topografie an den Vergleichsstationen abgrenzen

kann. Es liegt nahe, dass sich die durch Fließgewässer entstandenen Auenwiesen nicht stark von nicht gewässerbeeinflussten Grünflächen unterscheiden. Bei feuchten Böden, welche auch an nicht gewässerbeeinflussten Standorten vorliegen könnten, liegt eine höhere Wärmeleitfähigkeit vor, was die thermischen Eigenschaften des Bodens merklich beeinflusst. Außerdem trägt die Verdunstung von Wasser bei ausreichend wasserversorgten Böden an der Oberfläche zur Verminderung der lokalen Oberflächen- bzw. Lufttemperatur bei. Die ebenfalls hohe Wärmespeicherkapazität kann jedoch dazu führen, dass feuchte Böden über den Nachtverlauf weniger schnell auskühlen (Henninger & Weber, 2020). Details dazu, insbesondere zum Bodenwassergehalt, müssten in weiterführenden Bodenuntersuchungen ermittelt werden.

Hou et al. (2013) stellten fest, dass der Einfluss von Auen auf die Lufttemperatur mit der Entfernung von ihrem Zentrum abnimmt. Möglicherweise ist die Entfernung der Station HOS vom Elbufer mit 150 m schon zu groß, um in 2 m Höhe messbare Einflüsse durch die Auendynamik zu erhalten. Hier wäre die Verwendung von Transekten an verschiedenen Stellen der Aue hilfreich. Die Messungen der LHD (1998) zeigten für die Auenwiesen einen deutlichen kühlenden Einfluss des Gewässers.

Trotz entgegenstehender Resultate zur Bewertung des Windeinflusses in Kapitel 3.5.6 ist ein Gewässereffekt, der die Abkühlung der Lufttemperaturen an der Station HOS durch Zufuhr wärmerer Luftmassen aus Richtung Elbe oder Wasserbecken dämpft, nicht gänzlich auszuschließen. Dieser könnte zu den geringeren Temperaturdifferenzen zu nicht gewässerbeeinflussten Stationen im Vergleich zu GEB4 mit dem deutlich kleineren Flutgraben beitragen. Hathway und Sharples (2012) kamen in ihrer Fallstudie zu dem Ergebnis, dass die Wasserfläche des untersuchten 22 m breiten Fließgewässers in Sheffield, Großbritannien, nachts tendenziell zu einer Erwärmung und keiner wesentlichen Abkühlung der lokalen Lufttemperaturen beiträgt.

Es wird vermutet, dass die Temperaturunterschiede weniger stark von einer möglichen Auendynamik der Wiese beeinflusst werden, sondern vielmehr von den Ausstrahlungsbedingungen, welche von der Horizont einschränkung des Standorts abhängen, und der oben erwähnten Wasserverfügbarkeit. Damit kann weiter von der Teilhypothese ausgegangen werden, dass die Ausprägung der Kühlwirkung von blauer Infrastruktur von dem Anteil und der Art von grüner Folgestruktur und deren Einfluss abhängt. Hierfür wird auf Kapitel 4.5.3.2 zu grünen Infrastrukturen verwiesen.

4.3 Kaltlufteinfluss auf lokale Temperaturen – Hypothese 2

Hypothese 2 (H2):

>> Es wird erwartet, dass Standorte mit topografisch durch das Elbtal bedingten, hangabwärts gerichteten Kaltluftschneisen, über welche nachts Kaltluft zugeführt wird, nachts eine lokale Kühlwirkung erfahren und damit im Vergleich zu Standorten ohne Kaltlufteinfluss eine geringere Temperatur aufweisen. <<

Für die Untersuchung kommen die Stationen HOS und PIL aufgrund ihrer offenen Tallage entlang der Elbtalhänge infrage. Als Vergleichsstationen dienen BOT und STR, die keine topografischen Besonderheiten und damit keinen Einfluss durch Kaltluftströmungen aufweisen, aber unter ähnlichen sonstigen Bedingungen und im Optimalfall ohne andere große Einflussfaktoren ausgewertet werden können. Es erfolgt somit ein Temperaturvergleich von freistehenden Wiesenstationen mit Kaltluftfluss mit freistehenden Wiesenstationen ohne Kaltluftfluss. Es wurde sowohl eine statistische Auswertung über längere Zeiträume als auch eine Einzelfallbetrachtung durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die statistische Auswertung des Tagesverlaufs der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BOT, PIL und STR im Vergleich zur Referenzstation HOS im Sommer.

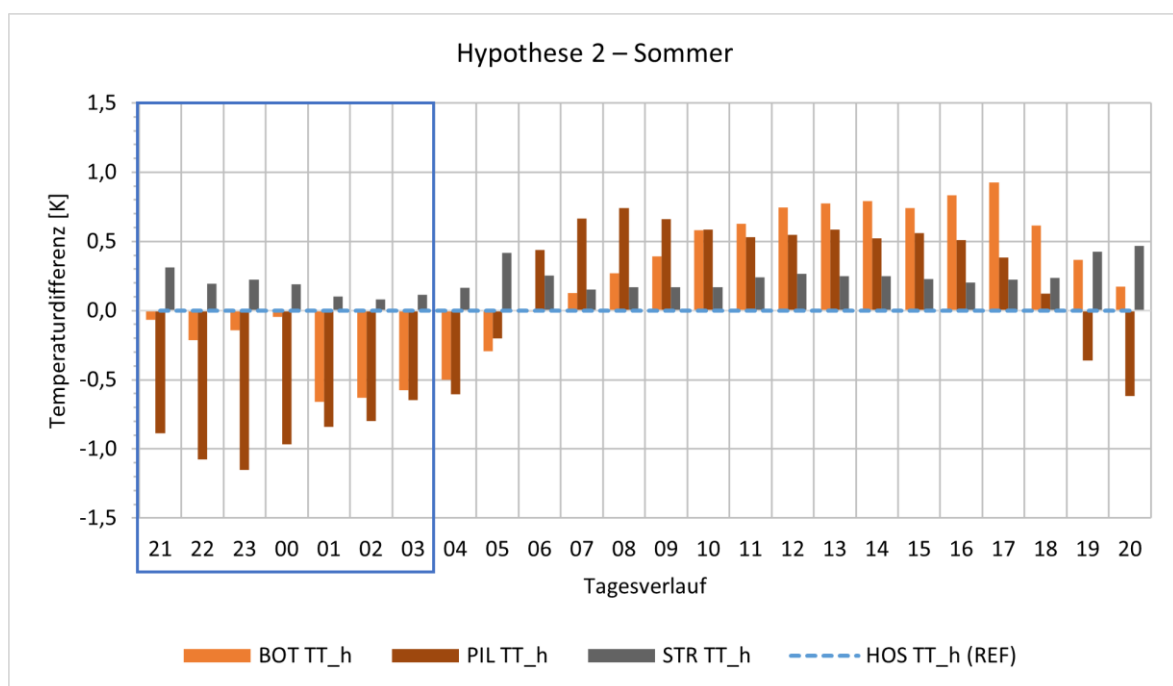


Abbildung 3: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BOT, PIL und STR im Vergleich zur Referenzstation HOS (blau gestrichelte Linie) als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Beantwortung von Hypothese 2 (Kaltluftfluss auf lokale Temperaturen). Blauer Rahmen: untersuchte Nachtstunden. Stundenangaben (x-Achse, UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten.

Wie auch in den drei Abbildungen für die statistische Auswertung der einzelnen Monate in Ordnung 4, Kapitel 4.3 im elektronischen Anhang übereinstimmend zu sehen ist, weist PIL deutlich kühlere Nachttemperaturen auf als die Stationen HOS und STR. Eine erhebliche Differenz zu den Temperaturen für BOT lässt sich dagegen für PIL nur bis Mitternacht feststellen, bevor sich die Temperaturen in der zweiten Nachthälfte deutlich annähern. Im Juni liegen die Temperaturen für BOT teils sogar niedriger als für PIL.

Die Differenz von PIL zu HOS und STR erreicht nach einer stetigen Steigerung meist zwischen 22 Uhr und 23 Uhr UTC ihr Maximum und nimmt dann wieder ab. Dieser Verlauf ist im August am geringsten ausgeprägt. In Abbildung 3 liegen die Differenzen zwischen PIL und HOS bei 0,6 K bis 1,2 K. Maximal wird ein Unterschied von knapp 1,5 K zwischen 22 Uhr und 23 Uhr im Juni erreicht, der minimale nächtliche Unterschied liegt bei circa 0,5 K zwischen 02 Uhr und 03 Uhr im August. Im Vergleich zu STR liegen die Differenzen meist noch höher. Somit kann von einem deutlichen kühlenden Effekt an der Station PIL ausgegangen werden, welcher durch den Einfluss von Kaltluftströmungen bedingt sein kann. Diese sind laut der synthetischen Klimafunktionskarte großräumig in der Umgebung der Station in Fließrichtung der Elbe zu verzeichnen (LHD, 2022c). Sörgel et al. (2008) verwiesen explizit auf den Einfluss mächtiger Kaltluftabflüsse im Elbtal als Ursache für deutlich niedrigere Temperaturen im Bereich Pillnitz als im Stadtzentrum oder östlich des Stadtzentrums. Laut BfU (2006), zitiert nach Sörgel et al. (2008), ergaben Messungen in der Nähe von PIL in etwa 5 m Höhe Kaltluftgeschwindigkeiten von $1,2 \text{ m/s} \pm 0,7 \text{ m/s}$ und Modellierungen von 0,5 m/s zu Beginn sowie 0,9 m/s zum Ende der Nacht. Auf die Neigung zur Bildung von Kaltluftseen an den Talrändern an der Station PIL wurde ebenfalls bereits im Umweltbericht der LHD (1998) hingewiesen.

Für die zweite Station mit möglichem Kaltlufteinfluss, HOS, zeigt sich wiederum ein weniger deutliches Bild. Auch diese liegt laut der synthetischen Klimafunktionskarte innerhalb des Kaltluftstromes in Fließrichtung der Elbe, jedoch etwas weiter flussabwärts (LHD, 2022c). Die Differenzen zu STR und in der ersten Nachthälfte zu BOT reichen meist nicht über 0,5 K hinaus. Über den Sommer hinweg deutet sich der Trend, dass HOS kühler als STR ist, an, er ist jedoch nicht deutlich feststellbar. Für BOT lässt sich dies nicht bestätigen. Damit kann für HOS kein – möglicherweise durch Kaltlufteffekte bedingter – wirksam kühlender Einfluss gegenüber den Vergleichsstationen festgestellt werden.

Im zweiten Schritt wurden die Einzelfälle betrachtet (15 Abbildungen in Ordner 4, Kapitel 4.3 im elektronischen Anhang). Kühlere Temperaturen für PIL im Vergleich zu HOS können in etwa 80% der Fälle in unterschiedlicher Intensität bestätigt werden. In knapp der Hälfte der Fälle werden nachts maximale Differenzen $> 2 \text{ K}$ erreicht. Ein eindeutiger Zeitpunkt der maximalen Ausprägung ist nicht zu erkennen. In den meisten Fällen heben sich die Temperaturen an der Station PIL dabei auch deutlich von den Temperaturen an der Station BOT ab, welche keinen eindeutigen Trend verzeichnet. Man kann davon ausgehen, dass einzelne Nächte mit einem sehr deutlichen Kühleffekt durch Kaltluftprozesse an der Station PIL vertreten sind (JUN1, JUL1, JUL4). Der Einfluss des Kühleffekts wird in der statistischen Betrachtung durch die große Anzahl an Nächten mit schwächer ausgeprägtem Effekt abgemildert.

Für die Station HOS sind sowohl Einzelfälle mit niedrigeren Temperaturen als auch mit höheren Temperaturen im Vergleich zu STR und BOT vorhanden. Ein eindeutiger Trend ist nicht erkennbar. In fast allen Fällen werden Differenzen von 0,5 K in beide Richtungen nicht überschritten. Ausnahmen bilden die Fälle JUN2, JUL4 und AUG10, an denen für HOS nachts deutlich kühlere Temperaturen im Vergleich zu STR erreicht werden. Teilweise ist HOS aber auch fast durchgehend die wärmste Station (JUN1, AUG1, AUG4).

Die Einzelfälle bestätigen insgesamt das Ergebnis der statistischen Betrachtung eines kühlenden Effekts durch Kaltluftströmungen für PIL, aber nicht für HOS. Die Hypothese 2 wird durch die Daten daher nur teilweise bestätigt.

Möglicherweise hat an der Station HOS einerseits die Elbe nachts keine temperaturmindernden Effekte (Kapitel 4.2; Hathway & Sharples, 2012). Andererseits können große Gebäude und dichte Baumstrukturen in der näheren Umgebung der Messstation sowie Bebauungsstrukturen am Hang und im Elbtal Kaltluftströmungen abhalten bzw. abschwächen, auch wenn sich die Station HOS in einer sehr freistehenden Lage befindet. Zu möglichen Einflusststrukturen zählen das Wasserwerksgebäude (Abbildung 16, Kapitel 8.1 im Anhang, im Hintergrund) in der näheren Umgebung sowie die Siedlungen der Stadtteile Pillnitz und Hosterwitz (Google, 2023).

Die Station PIL, welche etwa 3 km Luftlinie flussaufwärts liegt, weist dagegen keinerlei Hindernisse aus Richtung der Elbtalhänge sowie geringfügige Bebauung aus Richtung der Elbe und der Kaltluftströmung (Südost) auf. Dies zeigte die persönliche Begehung des Standorts im Oktober 2022 (Abbildung 22 und Abbildung 23 in Kapitel 8.1 im Anhang) sowie Luftbildanalysen (Google, 2023).

4.4 Repräsentativität der Messstationen

Forschungsfrage 1:

>> Wie repräsentativ sind die verschiedenen Stationen hinsichtlich des Stadtwärmeineffekts? <<

Das folgende Kapitel behandelt die Frage der Repräsentativität der einzelnen Stationen im Hinblick auf den städtischen Wärmeineffekt. Es soll geklärt werden, ob eine Station nur eine lokale Wärmeinsel abbildet oder tatsächlich das Stadtgebiet bzw. das Umland großräumig widerspiegelt.

4.4.1 Plausibilitätsprüfung: Repräsentativität der Referenzstation

Bei der Wahl der Referenzstation im Umland sind einige Anforderungen zu beachten. Idealerweise zeigt diese wenig Einfluss durch städtische graue Infrastrukturen und kann durch kühlere Nachttemperaturen und einen gleichmäßigeren Tagesgang als rurale Station bezeichnet werden. Gleichzeitig sollten möglichst wenig andere Faktoren wie lokale Kaltluft- oder Windströmungen vorhanden sein, die die Vergleichbarkeit stören können.

Auch eine ausreichende Verfügbarkeit und Qualität an Daten sowie die Länge der Zeitreihe spielen eine Rolle. Die Referenzstation hat einen großen Einfluss auf die Temperaturdifferenz zwischen Stadt und Umland, welche im Anschluss berechnet werden soll.

Aufgrund der Entfernung zum Stadtgebiet und den nicht bzw. wenig vorhandenen versiegelten oder bebauten Strukturen im Umfeld der Station kommen als Umland-Referenzstation die Stationen HOS und PIL in Frage. Diese werden im Folgenden im direkten Vergleich auf ihre Differenzen bzw. systematischen Unterschiede und ihre Übereinstimmung hin bewertet.

Hauptkriterien sind die Nachttemperaturen sowie der grafische Verlauf des Temperaturtagesgangs. Dabei lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den Stationen feststellen. Die nächtlichen Temperaturen für PIL sind, wie bereits in den Kapiteln 4.2 und 4.3 beschrieben, deutlich niedriger als für HOS. Dies wird auch in Abbildung 4 mit einem direkten Vergleich der Temperaturen beider Stationen im Tagesverlauf, beginnend um Mitternacht, für den Sommer deutlich. Drei weitere Abbildungen für die statistische Betrachtung der einzelnen Monate befinden sich in Ordner 4, Kapitel 4.4.1 im elektronischen Anhang.

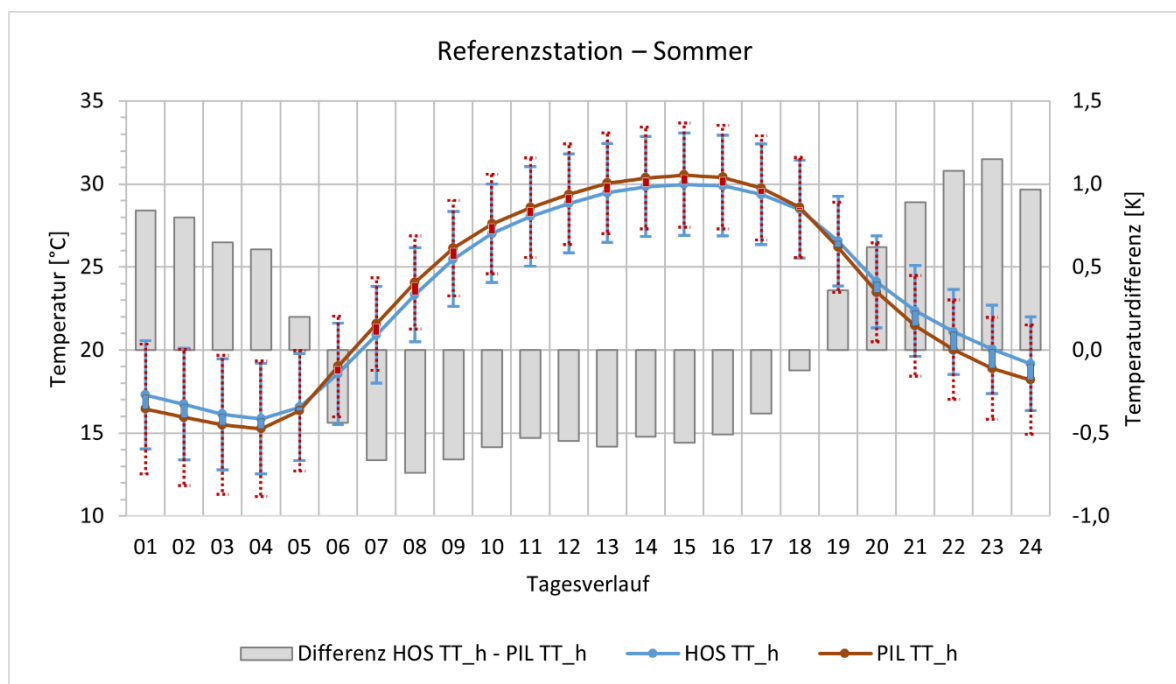


Abbildung 4: Vergleich der absoluten Temperaturen [°C] (linke y-Achse) bzw. der Temperaturdifferenzen [K] (rechte y-Achse) der Stationen HOS und PIL als Stundenmittel über den statistisch gemittelten Tagesverlauf der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Identifizierung einer geeigneten Referenzstation im Umland. Gestrichelte Balken: positive und negative Standardabweichung der absoluten Temperaturen. Stundenangaben (x-Achse, UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten.

Von 19 Uhr bis 04 Uhr UTC am Morgen sind niedrigere Temperaturen für PIL mit Differenzen $> 0,5$ K festzustellen. Im Maximum zwischen 21 Uhr und 23 Uhr werden $\geq 1,1$ K erreicht. Dieser nächtliche Effekt ist vermutlich auf den Kaltlufteinfluss bei PIL zurückzuführen, wie in Kapitel 4.3 ausgeführt wurde. Grundsätzlich ist die nächtliche lokale Bildung von Kaltluft an Umlandstationen zu erwarten, da sich diese oft auf freien Wiesenstandorten befinden. Hier ist jedoch die hangabwärts strömende Kaltluft gemeint, die nur unter der Voraussetzung von Hang- bzw. Tallagen ohne größere Hindernisse in Erscheinung tritt, wie es im Elbtal der Fall ist. HOS ist, wie in Kapitel 4.3 beschrieben, durch Gebäude stärker von Kaltluftströmungen abgeschirmt als es bei PIL der Fall ist. Der kühlende Effekt durch Kaltluft am Standort PIL spricht somit eher für eine lokale Besonderheit und weniger für eine räumlich repräsentative Umlandstation, auch im Hinblick auf Vergleiche des UHI-Effekts mit anderen Städten.

Der grafische Verlauf des Temperaturtagesgangs selbst ist für beide Stationen nicht zu beanstanden. Es liegen statistisch für den Sommer gemittelte Tagesamplituden von $14,1$ K für HOS bzw. $15,3$ K für PIL vor, was einer Verdopplung der Temperaturen im Laufe des Tages entspricht und als plausibel für einen durchschnittlichen Strahlungstag angenommen werden kann. Insgesamt weist HOS einen Tagesverlauf mit geringerer Amplitude für die Lufttemperatur auf. Im Gegensatz zur Nacht werden am Tag für PIL deutlich höhere Werte gemessen als für HOS. Im Zeitraum 06 Uhr bis 16 Uhr liegen Differenzen $> 0,5$ K und ein Maximum zwischen 07 Uhr und 08 Uhr von $\geq 0,7$ K in anderer Richtung als in der Nacht vor.

Zu den weiteren Faktoren bei der Auswahl einer geeigneten Referenzstation zählen die Datenverfügbarkeit, die Länge der Zeitreihen und die Datenqualität. Für PIL sind Lufttemperaturdaten in Stundenauflösung über das OpenSensorWeb-Portal öffentlich frei verfügbar. Auf die Anforderung der Originalquelle am BfUL hin konnten ausschließlich ungeprüfte Rohdaten in 10 min-Auflösung mit zahlreichen Fehl- bzw. Ausreißerwerten zur Verfügung gestellt werden. Gegebenenfalls stellt das LfULG im Einzelfall geprüfte 10 min-Daten zur Verfügung, für diese Arbeit bestand die Möglichkeit jedoch nicht. Über die Lufttemperaturdaten an der Station HOS kann über das OpenData-Portal des DWD unter Angabe der Quelle ebenfalls frei verfügt werden. Diese liegen dort sowohl in 10 min-Auflösung als auch stündlicher Auflösung vor.

Allerdings besteht ein Stundenwert für HOS aus nur sechs 1 min-Mittelwerten, die jeweils im Abstand von 10 min gemessen werden. Im Gegensatz dazu besteht ein Stundenwert für PIL aus 60×1 min-Mittelwerten, welche wiederum eine sekundliche Auflösung aufweisen. In dieser Hinsicht kann von einer höheren Datenqualität auf Stundenniveau für PIL ausgegangen werden.

Gleichzeitig wird an der Station HOS mit dem bezüglich Wartung, Messmethodik und Geräte standardisierten System des DWD gemessen, welches eine hohe Vergleichbarkeit mit DWD-Stationen, auch anderer Städte, sowie eine gewisse Zukunftssicherheit aufweist. Die Station PIL, die Teil des agrarmeteorologischen Messnetzes des BfUL ist, misst die Temperatur in Anlehnung an DWD-Standards in der gleichen Messhöhe und besitzt ebenfalls eine belüftete Strahlungshütte. Es werden jedoch andere Messgeräte verwendet (Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang).

Die Länge der Zeitreihen der aktuell dort installierten Messstationen unterscheidet sich für die Stundenmittel im OpenData-Portal um etwa drei Jahre (HOS: ab April 2006, PIL: ab Januar 2009). 10 min-Daten liegen für HOS bereits seit August 2005 vor, für PIL seit Dezember 2017. Somit bietet HOS eine längere Zeitreihe, insbesondere für höher aufgelöste Daten. Keine der beiden Stationen weist größere Datenlücken auf.

Als letztes Kriterium kann die Vergleichbarkeit mit anderen Studien herangezogen werden. Während HOS in aktuellen Publikationen der Stadt Dresden mehrmals als Referenzstation im Umland verwendet wurde (z. B. LHD, 2017, 2019b), wurde die Station PIL laut eigener Recherche vornehmlich in bereits älteren Studien verwendet (z. B. Mittag, 2014; Pursche, 2014) oder war mit dem Hinweis auf dort vorhandene Kaltlufteinflüsse verbunden (Hoyer, 2012; LHD, 1998). Eine bessere Vergleichbarkeit von Ergebnissen bietet somit die Station HOS. Somit wird unter Beachtung aller aufgeführten Gesichtspunkte HOS als Referenzstation gewählt.

4.4.2 Plausibilitätsprüfung: Typische Stadtstation

Für die Auswahl als typische Stadtstation in Dresden kommen die Stationen BER, NEU, NOR, STR und WIN infrage. Ausgeschlossen werden einerseits die Umlandstationen HOS und PIL, andererseits die Stationen GEB2 (Laubwald), GEB4 (Auenwiesen) und BOT (Botanischer Garten/ Großer Garten), die sich nicht unmittelbar in bebautem Umfeld befinden. Ziel ist es, eine Station festzulegen, die ihr städtisches Umfeld und folglich auch den gesamtstädtischen UHI-Effekt am besten repräsentiert. Da an jeder Station lokale Gegebenheiten (Beschattung, umgebende Baustruktur, Exposition) einfließen, ist hierbei nur von einer annähernd idealen typischen Stadtstation für Dresden auszugehen.

Die Analyse erfolgt über den Vergleich der Stationen anhand der Temperaturdifferenzen zur Referenzstation HOS. Die Ergebnisse werden in Abbildung 5 veranschaulicht. Drei weitere Abbildungen für die einzelnen Monate befinden sich in Ordner 4, Kapitel 4.4.2 im elektronischen Anhang. Dabei wird insbesondere der nächtliche Temperaturverlauf (innerhalb des blauen Kastens) und hier das erreichte nächtliche Minimum betrachtet. Für die Stadtstationen wird ein deutlicher UHI-Effekt im Vergleich zur Referenzstation durch eine geringere nächtliche Abkühlung erwartet. Erste Anhaltspunkte dazu gaben bereits die Kapitel 4.1.1 und 4.1.2 mit Tabelle 18 sowie Tabelle 23 und Tabelle 24 in Kapitel 8.4 im Anhang.

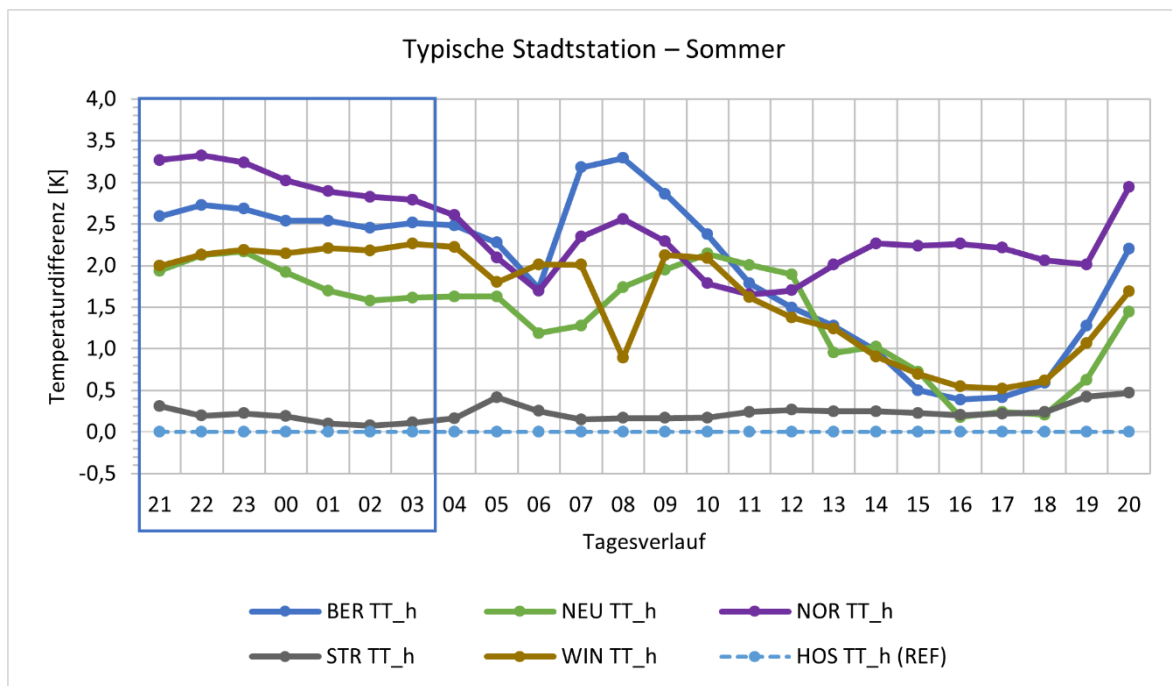


Abbildung 5: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stationen BER, NEU, NOR, STR und WIN im Vergleich zur Referenzstation HOS (blau gestrichelte Linie) als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Identifizierung einer typischen Stadtstation. Blauer Rahmen: untersuchte Nachtstunden. Stundenangaben (x-Achse, UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten.

Analyse der Datengrundlage

In Abbildung 5 fällt zunächst der im Vergleich zu HOS nur geringfügig höhere und im Verlauf sehr ähnliche Tagesgang der Temperatur an der Station STR auf. Dies deutet darauf hin, dass STR eher einer elbtalbeeinflussten Umlandstation gleicht und weniger eine typische Stadtstation ist. Aufgrund der Lage in einem offenen Gelände mit Kleingartensiedlungen und Wiesenflächen lässt sich dies nachvollziehen. Auch Mehler (2011) und LHD (2019b) kamen zu dem Ergebnis, dass STR eher als Übergangsstation am Stadtrand zu behandeln ist. Allerdings muss zur Kenntnis genommen werden, dass STR in verschiedenen Studien als typische Stadtstation herangezogen wurde (Hoyer, 2012; LHD, 1998; Mittag, 2014; Wicher, 2021). Auf Basis der obigen Datenlage lässt sich dem nicht zustimmen. Möglicherweise war ein Mangel alternativer Messstationen im engeren Stadtgebiet die Ursache. Die DWD-Stadtstation NEU in der Dresdener Neustadt wurde beispielweise erst 2020 in Betrieb genommen, während in der Altstadt auch 2023 noch keine Station zur Verfügung steht.

Alle weiteren Stationen in Abbildung 5 weisen jedoch einen generell plausiblen Verlauf für Stadtstationen auf und verhalten sich grundsätzlich ähnlich. Dies gilt, obwohl die Sensorik, die Messhöhen und die Methodik der Messnetzbetreiber deutliche Unterschiede aufweisen.

In den Nachmittagsstunden tritt mit Ausnahme der Station NOR, die vermutlich von lokaler Aufheizung der vollversiegelten Umgebung aufgrund der exponierten Lage am Schlesischen Platz geprägt

ist (Abbildung 20 und Abbildung 21 in Kapitel 8.1 im Anhang, sowie 3D-Ansichten in Ordner 5 im elektronischen Anhang), eine Annäherung der Temperaturen an die der Referenzstation im Umland auf. Die Abnahme der Temperaturdifferenz am Tag entspricht in etwa dem erwarteten klassischen Bild einer Stadtstation, wobei diese auch bereits in den frühen Nachmittagsstunden abfallen kann (Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017). Eine weiterführende stationspezifische Betrachtung erfolgt in Kapitel 4.5.1. Zu Beginn der Nachtstunden, die an dieser Stelle im Detail betrachtet werden sollen, ist ein starker Anstieg bis 21 Uhr UTC zu verzeichnen. Nach Erreichen eines stationspezifischen Plateaus, das sich über die Morgenstunden hält und unter anderem auch bei Fenner et al. (2014) beschrieben wird, wird die Differenz mit Ende der Nacht wieder abgebaut.

An der Station WIN scheint im Verlauf der Nacht eine tendenziell geringere Abkühlung stattzufinden als an der REF, was sich mit einem leicht ansteigenden Trend der Differenzkurve andeutet. Dies könnte einen weniger von lokalen Störungen beeinflussten Standort mit hoher nächtlicher Wärmebelastung darstellen und wäre damit eine gute Grundlage für eine typische gesamtstädtische Station. An der Station BER, aber vor allem bei NEU nach 23 Uhr und NOR finden dagegen nachts sogar stärkere Abkühlungsprozesse statt als bei HOS. Dies wird durch die Annäherung der Kurven an HOS deutlich. Die unterschiedlichen hohen absoluten Temperaturen sind dabei jedoch zu beachten.

Aus der Datenlage in Abbildung 5 kann somit nur STR als typische Stadtstation ausgeschlossen und eine Empfehlung für WIN gegeben werden. Zwischen den Stationen BER, NEU, NOR und WIN erfolgt im Folgenden eine qualitative Einschätzung der Eignung.

Analyse der Umgebungsbedingungen

Die bereits angesprochene exponierte Lage der Station NOR auf dem weitläufigen, vollversiegelten Schlesischen Platz (Abbildung 20 und Abbildung 21 in Kapitel 8.1 im Anhang) spiegelt zwar einen typischen städtischen Platz wider, jedoch weniger die Situation einer engen und hohen Bebauungsstruktur in den besiedelten Stadträumen. Daher wird diese Station ausgeschlossen. Sie ist durch das dort gemessene, ganztags extreme Temperaturverhalten mit niedriger Tagestemperaturamplitude jedoch sehr gut geeignet, um eine maximale thermische Belastung durch eine lokale Wärmeinsel, insbesondere in der Nacht, zu veranschaulichen.

Die Station NEU liegt zentral in der hoch versiegelten und dicht bebauten Neustadt Dresdens und eignet sich damit hinsichtlich der Ortslage sehr für eine typische Stadtstation. Die Installation der Station in einer Baulücke mit zahlreichen grünen Infrastrukturen (Abbildung 18 und Abbildung 19 in Kapitel 8.1 im Anhang), deren Einfluss schwer zu quantifizieren ist, ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Das Vorkommen von schattenspendenden Bäumen, Sträuchern sowie ein unversiegelter Boden entspricht nicht den weitläufigen Umgebungsbedingungen der dicht und hoch bebauten sowie stark versiegelten Neustadt. Dies wird auch in den 3D-Ansichten der Station, zu finden in

Ordner 5 im elektronischen Anhang, sowie in der synthetischen Klimafunktionskarte (LHD, 2022c) deutlich. Auf die in den Metadaten der Station genannten Empfehlungen zur Installation (Oke, 2006) wird detailliert in Kapitel 4.7.3 eingegangen. Dass der zwischen NEU und der Referenzstation gemessene lokale UHI-Effekt möglicherweise nicht dem großräumigen Effekt des Stadtviertels oder gesamten Stadtgebiets entsprechen könnte, kann daher nicht sicher ausgeschlossen werden.

Die Station BER zeichnet sich durch ihren hohen Versiegelungsgrad entlang einer stark befahrenen Straße aus (Abbildung 8 und Abbildung 9 in Kapitel 8.1 im Anhang). Allerdings können sich besondere Effekte durch die starke Hangneigung von 7% und Wind vor allem aus NNW-N und S (Pausch & Mühlner, 2020) ergeben, z. B. durch Abfließen abgekühlter Luftmassen. Gleichzeitig liegt die Station mit einer Höhenlage von 150 m ü. NN etwa 40 m oberhalb des Stadtkerns, was weitere lokale topografische Effekte auf die Temperaturen zur Folge haben könnte, die nicht den großräumigen Effekten in Dresden entsprechen.

Die Station WIN liegt in einem städtischen, aber durch Wohnsiedlungen geprägten Gebiet, wie es in großen Teilen Dresdens der Fall ist. Dies spricht für eine möglicherweise infrage kommende typische Stadtstation. Allerdings sind auch hier zahlreiche lokale grüne Infrastrukturen zu verzeichnen (Abbildung 26 und Abbildung 27 in Kapitel 8.1 im Anhang), die den Umfang üblicher Straßenzüge in Siedlungsgebieten (z. B. Baumalleen, Hecken und Zierpflanzenbeete) überschreiten könnten. Die Nutzung der nahegelegenen Fläche als Parkplatz ist ebenfalls weniger repräsentativ für das sonst eher dicht bebaute Stadtgebiet.

Messmethodische Faktoren

Daneben spielen weitere, organisatorische Faktoren eine Rolle: Die Stationen BER und WIN weisen durch ihre zweckmäßige Bestimmung zur Messung der Luftgüte keine einheitlichen Messbedingungen bezüglich der Temperatur auf. Beispielsweise unterscheiden sich die Messhöhen deutlich von der Standardhöhe von 2 m über Grund (Tabelle 2). Ein merklicher Einfluss dieser Bedingungen ist in den Daten jedoch nicht zu erkennen (Abbildung 5). Eine Verwendung dieser Stationen zur expliziten Beurteilung der thermischen Belastung von Fußgängern wäre aufgrund ihrer Messhöhen von mehr als 3 m über Grund möglicherweise dennoch nicht zielführend.

Im Vergleich mit NEU bergen die Stationen des LfULG deutliche Vorteile bezüglich der Länge der Zeitreihe und der zeitlich höheren Auflösung der Daten (Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang). Jedoch ist für die Zukunft unbedingt zu empfehlen, das Vorgehen des LfULG, die 10 min-Daten der Stationen in einem Ringspeicher abzulegen und nach etwa einem Jahr zu überschreiben, zu überdenken und die Daten zur langfristigen Verwendung systematisch sicherzustellen.

Fazit zur Wahl einer typischen Stadtstation

Bei Betrachtung aller genannten Faktoren kommen mehrere Stationen als typische Stadtstation in Frage. Wie erläutert wurde, kann auch der Zweck der Auswertung ausschlaggebend für die Wahl sein. Zur Auswertung von Temperaturen bezüglich des UHI-Effekts ist bei begrenzten Ressourcen die Station WIN zu empfehlen, insbesondere aufgrund ihres vielversprechenden nächtlichen Verlaufs im Vergleich zur Referenzstation, fehlenden Ausschlusskriterien bezüglich lokaler Besonderheiten (gegenüber BER, NEU, NOR) und der längeren Zeitreihe mit hoher Datenauflösung (gegenüber NEU). Jedoch werden in den folgenden Kapiteln auch weiterhin alle Stationen im engeren Stadtgebiet auf lokale städtische Wärmeineffekte hin ausgewertet. Insgesamt ist es ratsam, zusätzliche Stationen in der Altstadt und Neustadt zu installieren, die unter Beachtung der obigen Hinweise den gesamtstädtischen Bedingungen entsprechen und nicht durch lokale grüne oder blaue Infrastruktur sowie topografisch bedingte Strömungseffekte tendenziell beeinflusst werden.

4.5 Auswertung der lokalen Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden

In diesem Kapitel erfolgt die Hauptauswertung der Arbeit in Bezug auf die lokalen Besonderheiten des städtischen Wärmeineffekts in Dresden. Außerdem werden die Ergebnisse in Bezug auf die Veränderung des UHI-Effekts über längere Hitzeperioden vorgestellt. Nicht in die Beurteilung einbezogen werden die Umlandstation PIL sowie die Station GEB4, welche beide tendenziell niedrigere Temperaturen als die Referenzstation und damit keine lokale Wärmeinsel aufweisen, die für eine Untersuchung von Interesse ist. Aufgrund der sich nur wenig überschneidenden Datenlage der Stationen GEB4 und NEU ist die Stadtstation NEU der Station GEB4 zudem vorzuziehen, um aussagekräftige Ergebnisse im Vergleich der Stationen zu erhalten. Die Stationen BOT und GEB2 werden ebenfalls integriert, gerade, weil sie durch die dort vorhandene grüne Infrastruktur innerhalb städtischer Umgebung interessant sind.

4.5.1 Mittlerer UHI-Effekt

Forschungsfrage 2:

>> Wie sieht der mittlere Stadtwärmeineffekt über alle Sommermonate für Dresden aus? <<

Zunächst stellt sich die Frage nach dem gesamtstädtischen mittleren UHI-Effekt über die Nächte aller Strahlungsperioden in den Sommermonaten der Jahre 2018-2022 für Dresden. Dieser wird anhand der in Kapitel 4.4.2 als typische Stadtstation ausgewählten Station WIN festgestellt. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, verhält sich der mittlere UHI-Effekt zwischen WIN und der Referenzstation HOS in der Nacht sehr konstant, sodass es möglich ist, ihn in einem einzelnen aussagekräftigen Wert von $2,2 \text{ K} \pm 0,1 \text{ K}$ darzustellen.

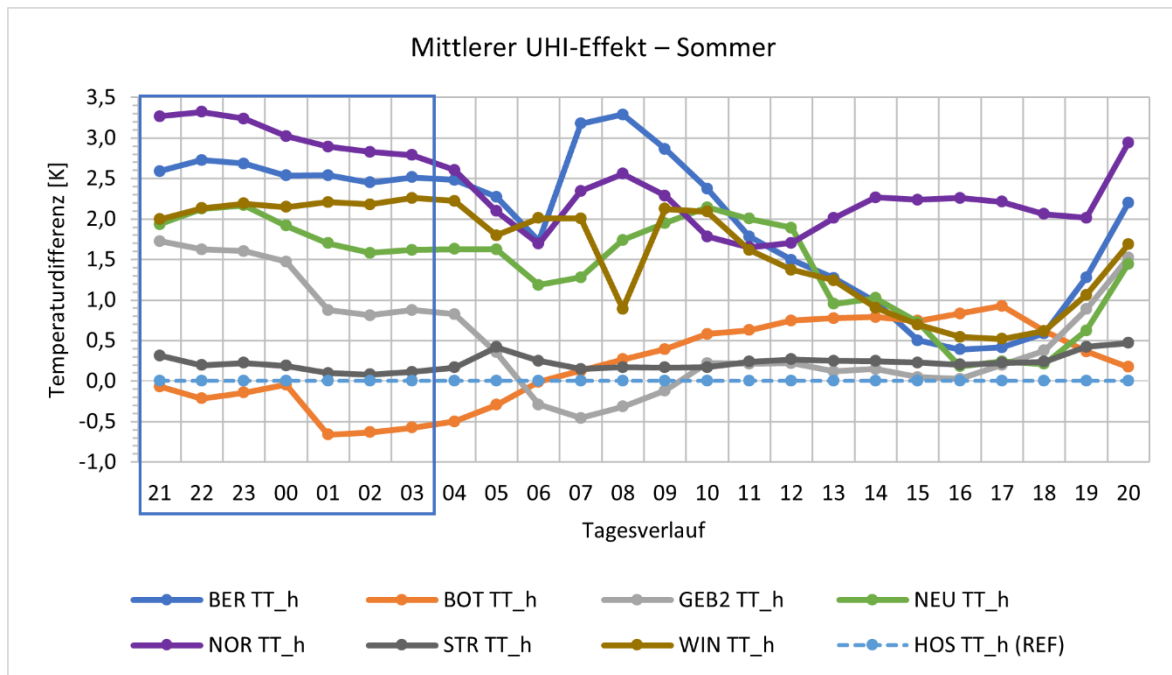


Abbildung 6: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stadtstationen BER, BOT, GEB2, NEU, NOR, STR und WIN im Vergleich zur Referenzstation HOS (blau gestrichelte Linie) als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Identifizierung des mittleren stationsspezifischen UHI-Effekts. Blauer Rahmen: untersuchte Nachtstunden. Stundenangaben (x-Achse, UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten.

Da der Fokus dieser Arbeit zur Darstellung einer thermischen Belastungssituation auf sommerlichen Strahlungswetterlagen mit besonders ausgeprägtem UHI-Effekt in der Nacht lag, gestaltet sich ein Vergleich mit der Literatur schwierig. Ein Bericht der LHD (2019b) zur klimatischen Situation in Dresden stellt verschiedene Ergebnisse von Messkampagnen aus den Jahren 2015 und 2016 vor. Während autochthoner Wetterlagen im Jahr 2015 wurden dabei lokale UHI-Effekte im Vergleich zur Referenzstation HOS zwischen 2 K und knapp 6 K gemessen. Dabei wurden Daten anderer Stationen verwendet, die in dieser Arbeit nicht zur Verfügung standen. 2016 wurden ebenfalls nächtliche lokale Lufttemperaturdifferenzen von 1-5 K an städtischen Messorten in Dresden festgestellt. Eine Aussage zum gesamtstädtischen Effekt wird mit 1 K nur als Gesamtjahresmittel für die Innenstadt getroffen, jedoch nicht ausschließlich für autochthone sommerliche Wetterlagen. Kuttler (2004a) gibt eine Überwärmung von 1-2 K im Jahresdurchschnitt für westeuropäische Großstädte an. Dies kann unter anderem für Berlin bestätigt werden (Fenner et al., 2014). Auch eine Zusammenstellung älterer Studienergebnisse von Matzarakis (2001) ergab für einen Großteil eine mittlere Stadtwärmeinsel von 1-2 K. Der ermittelte gesamtstädtische Wert liegt damit im Literaturvergleich in einem angemessenen und plausiblen Rahmen, hätte jedoch nach eigener Erwartung, aufgrund der ausgewählten besonderen Strahlungswetterlagen mit hoher thermischer Belastung, auch höher ausfallen können. Eine lokal differenzierte Betrachtung ist einer gesamtstädtischen Aussage vorzuziehen.

Forschungsfrage 3:

>> Wie sehen die Tagesverläufe für die Ausprägung des lokalen städtischen Wärmeinseleffekts an den verschiedenen Stationen aus und wie ist diese zeitliche Variabilität zu bewerten? <<

An dieser Stelle soll ein Blick auf den gesamten Tagesgang geworfen werden. Abbildung 6 zeigt den bereits in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Verlauf mit einem stationsspezifischen Plateau bzw. meist einer leichten Abnahme der Temperaturdifferenzen im Vergleich zu Referenzstation HOS in der Nacht. Es folgen eine weitere Annäherung der Kurven in den Morgenstunden, verschiedene lokale Effekte (z. B. Beschattung) während des Vormittags, eine Annäherung der Temperaturen an die der Referenzstation am Nachmittag mit Ausnahme von NOR, sowie ein starker Anstieg bis 21 Uhr UTC.

Zwischen den Stationsumgebungen von BOT und HOS sowie von STR und HOS können jeweils keine nächtlichen lokalen städtischen Wärmeinseleffekte nachgewiesen werden. Grund dafür sind aller Wahrscheinlichkeit nach die umfangreichen Abkühlungsprozesse durch die großflächige umgebende grüne Infrastruktur auch an diesen Standorten im städtischen Raum. Am Morgen erfährt die Temperaturkurve für BOT im Verhältnis zum Temperaturverlauf der Referenzstation einen stärkeren Anstieg, während dieser für GEB2 schwächer ausfällt. Dies wird an der Kreuzung der Verläufe deutlich und ist mit der unterschiedlichen Einstrahlungs- und damit Aufheizungssituation der Luftmassen am Vormittag zu begründen (Henninger & Weber, 2020). Zwischen 05 Uhr und 10 Uhr UTC ist die Differenz der dargestellten Kurven für GEB2 im Vergleich zu HOS sogar negativ, was für eine lokale PCI im Umfeld der Station GEB2 im Vergleich zu HOS spricht. Diese ist mit Differenzen $\leq 0,5$ K allerdings sehr schwach ausgeprägt. Das Blätterdach über der Station GEB2 (Abbildung 12 in Kapitel 8.1 im Anhang) hält die Strahlung effektiver ab, während die Strahlung an den Stationen BOT und HOS ungehinderter einfällt und zur Erwärmung der Luftmassen führt, wie es auch bei Oke et al. (2017) beschrieben wird. Auch Kuttler et al. (2015) stellten teils negative Werte für die UHI zur Mittagszeit in Essen fest, die mit den Beschattungsverhältnissen begründet werden konnten.

Für die Stationen BER, NOR und WIN sind ebenfalls einzelne Ausschläge der dargestellten Kurve zwischen 05 Uhr und 08 Uhr UTC zu verzeichnen. Eine Begründung für die besonderen Verläufe in dieser Zeitspanne liegt mutmaßlich in den lokalen Beschattungssituationen und Einstrahlungsbedingungen an den Stadtstationen und der Referenzstation (Oke et al., 2017). Diese können sich plötzlich ändern und durch die Stundenauflösung der Daten einen unterschiedlich starken Einfluss haben bzw. nicht nachvollziehbar sein. Dies kann zu falschen Interpretationen führen, z. B., wenn ein Sonne-Schatten-Wechsel regelmäßig innerhalb eines Stundenmittels zwischen zwei Stunden passiert. Sowohl BER als auch WIN sind durch die Bebauungsumgebung stark horizonteingeschränkt und werden direkt beschattet. Bei NOR gibt es in der Nähe ebenfalls Beschattung, die zumindest indirekt zur langsameren Aufheizung der Luftmassen in der Umgebung am Vormittag beiträgt.

Durch die Betrachtung von ausgewählten Strahlungstagen im Sommer werden solche Besonderheiten durch den saisonalen Strahlungsverlauf möglicherweise nicht ausgeglichen. Deshalb wird davon abgesehen, einzelne stündliche Effekte näher zu bewerten. Insgesamt kann festgehalten werden, dass die Lufttemperatur an städtisch geprägten Stationen nicht immer höher ist als im Umland.

Während für STR ganztags eine starke Annäherung an den Temperaturverlauf der Referenzstation zu erkennen ist, liegt diese ab 09 Uhr UTC für GEB2 und im Zeitraum von 13-18 Uhr UTC an fast allen Stadtstationen vor. In dieser Zeit ist ein UHI-Effekt somit kaum messbar. Grund hierfür ist die Speicherung der Wärme in der grauen Infrastruktur, die damit nicht in die Umgebungsluft abgegeben werden kann (Oke et al., 2017). Damit dient die städtische Bebauung zunächst als Energiesenke (Henninger & Weber, 2020). Eine Ausnahme bildet die Station NOR, die vermutlich von lokaler Aufheizung der vollversiegelten Umgebung und schneller Auffüllung der Energiespeicher aufgrund der exponierten Lage am Schlesischen Platz geprägt ist (Abbildung 20 und Abbildung 21 in Kapitel 8.1 im Anhang sowie 3D-Ansichten in Ordner 5 im elektronischen Anhang). Sie weist ganztags eine lokale Wärmeinsel von $\geq 1,5$ K auf. Auf der anderen Seite kommt es an der Umlandstation HOS zu einer starken Aufheizung, sodass die Lufttemperaturen dort vergleichsweise stark ansteigen. Dies führt zu einer Annäherung von ruralen und städtischen Temperaturen.

Die Abnahme der Temperaturdifferenz zur Referenzstation am Tag entspricht in etwa dem erwarteten klassischen Bild einer Stadtstation (Henninger & Weber, 2020; Oke et al., 2017). Im Unterschied zu den Ergebnissen dieser Arbeit wird in der Literatur von einer bereits in den Vormittags- und frühen Nachmittagsstunden (09-12 Uhr UTC) stattfindenden Temperaturannäherung berichtet (Henninger & Weber, 2020). Diese Zeitverzögerung kann mit lokalen Durchmischungs- und Speicherprozessen in der Stadt zusammenhängen, welche sich vom Umland unterscheiden. Es kommen sowohl Einflüsse an den Stadtstationen als auch an der Referenzstation als Gründe in Betracht.

Gegen Abend kühlen städtische und rurale Umgebungen, unter anderem in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, der thermischen Materialeigenschaften der Oberflächen und der Himmelssicht unterschiedlich schnell und stark ab (Oke et al., 2017). Alle Stationen außer BOT verzeichnen am Abend den typischen und unterschiedlich starken Anstieg der Temperaturdifferenzen zur Referenzstation, welcher die Ausprägung nächtlicher lokaler urbaner Wärmeinseln in diesen Gebieten veranschaulicht. Diese Differenz bildet ein Plateau aus, wie es auch bei Fenner et al. (2014) beschrieben wird, fällt im Laufe der Nacht mit Ausnahme von WIN aber durch kontinuierliche Speicherentlassungen (Oke et al., 2017) langsam wieder ab. Auffällig sind dabei die Temperaturdifferenzen an den Stationen BOT, GEB2 und NEU, die nach Erreichen des Maximums besonders deutliche Abnahmen von 23 Uhr bis 01 Uhr verzeichnen. Hier können Speicherentlassungen im Nachtverlauf von Bedeutung sein, die beispielsweise von einer stationsnahen Baumschicht beeinflusst werden.

4.5.2 Ort/ Zeitpunkt des nächtlichen UHI-Maximums in zeitlicher/ räumlicher Auflösung

Die Forschungsfragen 4 und 5 untersuchen den Ort und Zeitpunkt des nächtlichen UHI-Maximums:

>> *An welcher Station bildet sich die maximale lokale städtische Wärmeinsel aus?* <<

>> *Wann tritt das Maximum des lokalen städtischen Wärmeinseleffekts auf und gibt es zeitliche Unterschiede zwischen den Stationen?* <<

Tabelle 19 zeigt die statistisch über längere Zeiträume ermittelten nächtlichen Temperaturdifferenzen der Stadtstationen im Vergleich zur Referenzstation mit Hervorhebung der Maximalwerte.

Tabelle 19: Nächtliche Temperaturdifferenzen [K] zwischen den Stadtstationen und der Referenzstation als Stundenmittel in der statistischen Betrachtung der meteorologischen Sommer 2018-2022 zur Identifizierung des Orts und Zeitpunkts des nächtlichen UHI-Maximums in zeitlicher/ räumlicher Auflösung. Uhrzeit (UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten. Fettdruck: jeweilige stationsspezifische maximale Differenz zu HOS pro Zeitraum. Dafür wurde auch die zweite Nachkommastelle betrachtet. Dies soll keine höhere Datenqualität indizieren, die teils sehr geringen Unterschiede zwischen den Tabellenwerten sind von Unsicherheiten betroffen. Die Farbskala von Blau (negative Differenz) über Weiß (keine Differenz) bis Rot (positive Differenz) erfolgte spaltenweise, um stationsspezifische zeitliche Unterschiede hervorzuheben.

Zeitraum	Uhrzeit	BER	BOT	GEB2	NEU	NOR	STR	WIN	HOS (REF)
SOMMER	21:00	2,6	-0,1	1,7	1,9	3,3	0,3	2,0	0,0
	22:00	2,7	-0,2	1,6	2,1	3,3	0,2	2,1	0,0
	23:00	2,7	-0,1	1,6	2,2	3,2	0,2	2,2	0,0
	00:00	2,5	0,0	1,5	1,9	3,0	0,2	2,1	0,0
	01:00	2,5	-0,7	0,9	1,7	2,9	0,1	2,2	0,0
	02:00	2,5	-0,6	0,8	1,6	2,8	0,1	2,2	0,0
	03:00	2,5	-0,6	0,9	1,6	2,8	0,1	2,3	0,0
JUNI	21:00	2,5	0,1	1,6	1,9	3,1	0,5	2,2	0,0
	22:00	2,6	-0,1	1,7	2,2	3,1	0,3	2,3	0,0
	23:00	2,3	-0,1	1,4	2,0	2,8	0,2	2,2	0,0
	00:00	2,0	-0,3	1,1	1,8	2,6	0,0	1,9	0,0
	01:00	2,0	-1,0	0,5	1,4	2,5	-0,2	1,9	0,0
	02:00	1,9	-1,0	0,5	1,3	2,3	-0,3	1,8	0,0
	03:00	2,1	-0,8	0,7	1,5	2,4	-0,1	2,0	0,0
JULI	21:00	2,5	-0,5	1,3	2,0	3,0	0,2	1,7	0,0
	22:00	2,8	-0,4	1,4	2,5	3,4	0,1	2,0	0,0
	23:00	3,1	0,1	1,7	2,8	3,7	0,4	2,4	0,0
	00:00	3,1	0,3	1,7	2,5	3,5	0,4	2,6	0,0
	01:00	3,2	-1,1	0,5	1,8	3,4	0,4	2,7	0,0
	02:00	3,1	-0,9	0,5	1,8	3,4	0,6	2,8	0,0
	03:00	3,1	-0,8	0,6	1,7	3,3	0,4	2,8	0,0
AUGUST	21:00	2,8	0,1	2,1	1,8	3,6	0,3	2,1	0,0
	22:00	2,8	-0,2	1,7	1,8	3,4	0,1	2,1	0,0
	23:00	2,6	-0,4	1,6	1,7	3,2	0,1	2,0	0,0
	00:00	2,5	-0,3	1,4	1,5	3,0	0,1	2,0	0,0
	01:00	2,4	-0,4	1,1	2,0	2,8	0,0	2,1	0,0
	02:00	2,4	-0,4	1,0	1,8	2,8	-0,1	2,0	0,0
	03:00	2,4	-0,5	0,9	1,8	2,7	0,0	2,1	0,0

Der maximale nächtliche lokale UHI-Effekt über den Sommer wird mit 3,3 K höherer stündlicher Lufttemperatur gegenüber der Referenzstation HOS an der Station NOR zwischen 21 Uhr und 22 Uhr erreicht. Auch in den Stunden davor und danach ergeben sich nahezu gleich hohe Differenzen zu HOS. Die Station BER weist eine maximale Differenz von 2,7 K zwischen 21 Uhr und 22 Uhr sowie ähnlich hohe Werte in allen weiteren Nachtstunden auf. Die Temperaturdifferenzen der Stationen NEU und WIN verhalten sich ähnlich und bewegen sich um 2 K. Der Monat Juli deutet sich dabei – leicht ersichtlich durch die stark rote Farbgebung – als Monat mit dem deutlichsten nächtlichen UHI-Effekt über fast alle Stationen hinweg an. Zwischen der Station NOR und der Referenzstation wird eine maximale Differenz von 3,7 K zwischen 22 Uhr und 23 Uhr erreicht. Die Station BOT bildet insgesamt eine Ausnahme, da dort nachts hauptsächlich eine lokale PCI im Vergleich zu HOS sichtbar wird. Die Reihenfolge der Stationen hinsichtlich ihrer Differenz zu HOS bleibt über alle Monate hinweg gleich, auch wenn einzelne stündliche Abweichungen auftreten können.

Insgesamt wird das Maximum je nach Station in jeder Stunde erreicht. Es lässt sich ein Trend von Maxima in den früheren Nachtstunden im Juni zu späteren Nachtstunden im Juli feststellen. Der August zeigt dagegen wieder hauptsächlich Maxima in den früheren Nachtstunden. Gründe hierfür sind nicht ersichtlich und sollten daher im Rahmen einer Folgearbeit untersucht werden. Es wird zudem deutlich, und das betrifft alle in diesem Kapitel getroffenen Aussagen, dass die Unterschiede zwischen den Tabellenwerten sehr gering sind und teils nicht durch eine Nachkommastelle dargestellt werden können. Schlussfolgerungen zu Unterschieden sind damit oftmals mit Unsicherheiten belastet. An manchen Stationen gibt es keinen belastbaren Zeitpunkt für ein deutliches Maximum.

Damit kann festgehalten werden, dass sich die an den vorhandenen Stationen gemessene maximale lokale nächtliche urbane Wärmeinsel in Dresden an der Station NOR im Bereich zwischen 3,1 K und 3,7 K bewegt und sich bei den meisten Stationen als nächtliches Plateau ohne hervorzuhebenden konkreten Zeitpunkt ausbildet. Für Berlin wurde für Sommernächte im dicht bebauten Stadtkern eine langjährige Differenz der stündlichen Lufttemperatur zum Umland von 6,0 K berechnet. Hier scheinen die Größe der Stadt und die höhere Bevölkerungszahl einen Einfluss zu haben, dessen Ausmaß immer wieder diskutiert wird (Henninger & Weber, 2020; Kuttler, 2011, 2019; Oke, 1973). Für eine Untersuchung in Essen werden 5,5 K angegeben (Kuttler et al., 2015), für Karlsruhe bis zu 6,5 K (Hackenbruch, 2018). Damit fällt der maximale UHI-Effekt für Dresden deutlich niedriger aus. Jedoch spielen Details, zum Beispiel für die Auswahl und Analyse der Daten getroffene Einschränkungen, bei der Berechnung dieser Werte eine große Rolle und sind aus den Veröffentlichungen nicht immer ersichtlich.

4.5.3 Ursachen für die Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden

Dieses Kapitel behandelt die Forschungsfragen 6 und 7:

>> Welche Ursachen gibt es für den Zeitpunkt und den Ort des höchsten lokalen städtischen Wärmeineffekts? <<

>> Welche Rolle spielen blaue und grüne Infrastrukturen sowie topografische Besonderheiten bei der nächtlichen Ausprägung des lokalen städtischen Wärmeineffekts? <<

Bei den folgenden Ausführungen ist zu beachten, dass es sich um eine qualitative Diskussion handelt. Aufgrund der vorhandenen Datenlage kann der Anspruch, eine bestimmte Temperaturdifferenz auf einen einzelnen Faktor an einem einzelnen Standort zurückzuführen, nicht erfüllt werden. Eine Quantifizierung von Stadtstrukturen mittels Indizes, wie sie bei Henninger und Weber (2020) vorgestellt werden, beispielsweise zum Versiegelungsgrad (Anteil versiegelter Oberflächen an der Gesamtfläche im Untersuchungsgebiet), dem Grünflächenanteil (Anteil vegetationsbestandener Oberflächen an der Gesamtfläche im Untersuchungsgebiet), der Bebauungsdichte (Anteil der durch Bebauung eingenommenen Fläche im Untersuchungsgebiet) oder dem Himmelsichtfaktor war im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar. Der Fokus wird daher auf eine qualitative Betrachtung gelegt und eine Abschätzung möglicher vorherrschender stationsspezifischer Einflüsse auf Basis der erstellten Steckbriefe gegeben.

4.5.3.1 Allgemeine Ursachen

Als generelle Ursachen für lokale Besonderheiten des UHI-Effekts in Dresden kommen verschiedene Umgebungsbedingungen und -strukturen in Frage, die an dieser Stelle im Überblick aufgeführt werden. Dazu zählen beispielsweise die Dichte und Höhe der Bebauung sowie deren Eigenschaften zur Wärmespeicherung und -abgabe (Oke, 1973; van Hove et al., 2015), die auch für die vorhandene graue Infrastruktur in Dresden gelten. Auf verschiedene Besonderheiten sowie Local Climate Zones wird in den nachfolgenden Kapiteln eingegangen. Zu den Faktoren zählen weiterhin der Grad der Horizont einschränkung (Holmer et al., 2007; Onomura et al., 2016; Unger, 2004) und die Beschattungssituation (Kuttler et al., 2015), welche auch durch die Ergebnisse dieser Arbeit identifiziert werden konnten. Der Versiegelungsgrad stellt einen der Haupteinflussfaktoren in vielen Studien dar (Kuttler et al., 2015; Matzarakis, 2001; van Hove et al., 2015). Hinzu kommen lokale Unterschiede der Stationen mit unversiegeltem Untergrund hinsichtlich der Beschaffenheit des Bodens (z. B. Bodenwassergehalt, Untergrundfarbe, Bewuchs) und dessen thermische Eigenschaften (Kuttler, 2019). Diese Unterschiede werden im Zusammenhang mit grüner und blauer Infrastruktur in den nachfolgenden Kapiteln genauer erläutert. Alle Faktoren nehmen in Abhängigkeit von den jeweiligen Studienbedingungen in unterschiedlichem Ausmaß Einfluss auf die lokale UHI-Intensität.

Großräumigere saisonale Veränderungen in der Globalstrahlung (z. B. Sonnenstand und Einfallswinkel) können sich je nach Exposition der Station ebenfalls unterschiedlich auf die Temperaturverläufe auswirken. Die zeitliche Variabilität des lokalen UHI-Effekts zeigt sich auch in den Ergebnissen dieser Arbeit, im Hinblick auf Unterschiede zwischen den Monaten, aber auch im genaueren Verlauf der Nacht, beispielsweise hinsichtlich des Zeitpunkts und der Intensität des Maximums und der stündlichen Abkühlungsrate. Insgesamte Trends über den Verlauf des Sommers sind dabei jedoch schwierig auszumachen. Auf Tagesebene steigen die Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland am Abend bis in die erste Nachthälfte an und nehmen in der zweiten Hälfte wieder ab. Hackenbruch (2018) folgert aus diesem gegebenen Zusammenhang mit den Sonnenaufgangs- und Sonnenuntergangszeiten, dass sich die urbane Wärmeinsel im Sommer zeitlich später ausprägt und früher verschwindet, jedoch in ihrer Intensität im Sommer stärker ausgeprägt ist. Sie begründet sie mit der Durchmischung der bodennahen Luftschichten nach Sonnenaufgang, welche im Sommerhalbjahr aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung höher ausfällt. Hierfür wäre eine Analyse der exakten Strahlungszeiten in Dresden im Rahmen einer weiteren Auswertung interessant.

Auch die Windverhältnisse und die Bewölkung können Einfluss auf die lokale Ausprägung der UHI haben. Höhere Windgeschwindigkeiten sowie Bewölkung können zu einer Abschwächung der lokalen UHI an den betroffenen Standorten führen und damit den UHI-Effekt im Vergleich zur Umlandstation abschwächen (Arnfield, 2003; Oke, 1973; Oke et al., 2017; van Hove et al., 2015). Deshalb wurde bei der Auswahl geeigneter Zeiträume auf geringe Windgeschwindigkeiten und Bewölkungsgrad geachtet. Aufgrund der sonst zu eingeschränkten Datenlage konnten Zeiträume mit stärkeren Einflüssen jedoch nicht immer ausgeschlossen werden. Der höchste Nachtmedian an der Station KLO an einem ausgewählten Strahlungstag liegt bei 5,5 m/s und damit über der gesetzten Schwelle von 2,7 m/s, welche insgesamt an knapp 30% der Strahlungstage um mehr als 30% und an knapp 15% der Tage um mehr als 50% überschritten wurde. Auch wenn an den Stationen selbst ein möglicherweise schwächerer Wind herrscht als in Höhenlage, ist dennoch davon auszugehen, dass die tatsächlichen lokalen urbanen Wärmeinseln in Dresden noch stärker ausgeprägt sein könnten als die in dieser Arbeit im Durchschnitt ermittelten. Im Zuge des Klimawandels, der sich auch in der Zunahme austauscharmer Wetterlagen mit wenig Bewölkung und geringen Windeinflüssen bemerkbar macht, könnten in Zukunft lokale Wärmeinseln, auch in Dresden, in häufigerer und stärkerer Ausprägung vorkommen (Matzarakis, 2013). Dies sollte bei der klimaangepassten Stadtplanung beachtet werden. Anhand der Steckbriefe (Kapitel 8.1 im Anhang) lassen sich oben genannte Faktoren und Besonderheiten auf einzelne Stationen übertragen. Eine detaillierte Einschätzung kann jedoch nur unter Zuhilfenahme weiterer Messdaten beispielsweise zu Oberflächentemperaturen, Gebäudegeometrien und lokalen Windverhältnissen erfolgen.

4.5.3.2 Einfluss grüner Infrastruktur – Hypothese 3

Im folgenden Kapitel soll der Einfluss grüner Infrastruktur auf lokale Besonderheiten des UHI-Effekts untersucht und Hypothese 3 beantwortet werden.

Hypothese 3 (H3):

>> Es wird erwartet, dass unbebaute und offene Standorte, insbesondere mit einem hohen Anteil an grüner Infrastruktur, nachts eine lokale Kühlwirkung erfahren und damit eine geringere lokale urbane Wärmeinsel aufweisen als dicht bebaute Standorte. Die Kühlwirkung grüner Infrastruktur hängt dabei von ihrer Art und ihrem Einfluss auf das effektive Ausstrahlungsvermögen des Standorts ab. <<

Für die Beantwortung der Hypothese 3 werden zwei Perspektiven eingenommen. Einerseits wird die hoch versiegelte, aber unbebaute und offene Umgebung an der Station NOR der hoch versiegelten und dicht bebauten, horizonteingeschränkten Umgebung an der Station BER gegenübergestellt. Andererseits werden die unversiegelten und unbebauten, offenen Umgebungen an den Stationen BOT und STR mit einem hohen Anteil an offener grüner Infrastruktur (Wiesenstandorte) mit der Umgebung der ebenfalls unversiegelten Station GEB2 verglichen, die einen hohen Anteil an dichter, nicht-offener grüner Infrastruktur (Laubwald) aufweist.

Für NOR bzw. BOT und STR werden geringere Temperaturen und damit im Vergleich zur Referenzstation geringere Differenzen bzw. ein geringerer lokaler nächtlicher UHI-Effekt erwartet als für BER bzw. GEB2. Die Stationen NEU und WIN, die von dicht bebauter und versiegelter Umgebung, aber gleichzeitig auch von einem hohen Anteil nicht-offener grüner Infrastruktur in direkter Nähe beeinflusst werden, stellen Übergangsbereiche in diesem Vergleich dar.

Für die Analysen wurde sowohl eine statistische als auch eine Einzelfallbetrachtung durchgeführt. Die Ergebnisse der statistischen Auswertung wurden bereits in den Kapiteln 4.5.1 und 4.5.2 mit Abbildung 6 für den Sommer und mit Tabelle 19 veranschaulicht. Drei zusätzliche Abbildungen zur monatsweisen Betrachtung befinden sich in Ordner 4, Kapitel 4.5.3.2 im elektronischen Anhang. In diesem Kapitel soll der Fokus auf die Einzelfallbetrachtung gelegt werden. Abbildung 7 und 14 weitere Abbildungen von Einzelfällen in Ordner 4, Kapitel 4.5.3.2 im elektronischen Anhang zeigen grundsätzlich ein sehr ähnliches Bild zu den statistischen Ergebnissen.

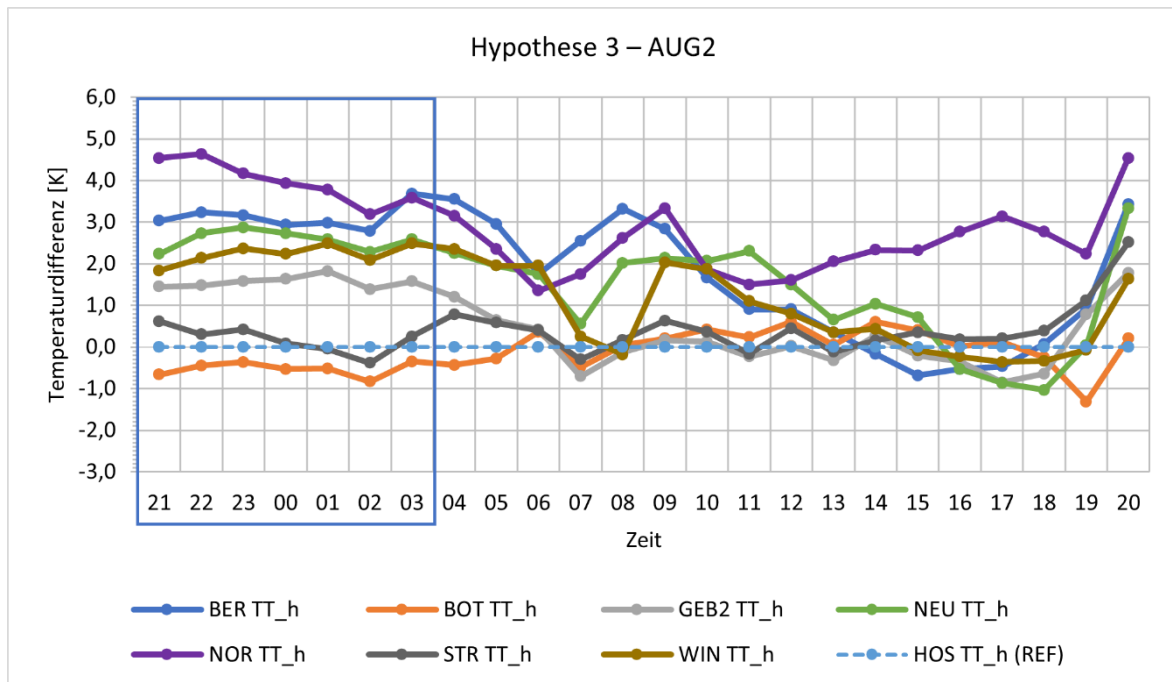


Abbildung 7: Tagesverlauf der Temperaturdifferenzen [K] der Stadtstationen BER, BOT, GEB2, NEU, NOR, STR und WIN im Vergleich zur Referenzstation HOS (blau gestrichelte Linie) als Stundenmittel für den Einzelfall AUG2 zur Untersuchung von Hypothese 3 (Einfluss grüner Infrastruktur). Blauer Rahmen: untersuchte Nachtstunden. Stundenangaben (x-Achse, UTC): Endwerte, die das vergangene Stundenmittel enthalten.

Vergleich des nächtlichen Temperaturverlaufs für die Stationen NOR und BER

Der Vergleich der nächtlichen Verläufe der Temperaturdifferenzen an den Stationen NOR und BER zu HOS ergibt ein differenziertes Bild. Auf dem hochversiegelten, aber unbebauten und offenen Bahnhofsvorplatz (NOR) bildet sich entgegen der Hypothese 3, nach der ein tendenziell geringerer lokaler nächtlicher UHI-Effekt erwartet worden wäre als in einer dicht bebauten Umgebung, die stärkste lokale nächtliche Wärmeinsel aus. Im Einzelfall AUG2 (Abbildung 7) werden für NOR nächtliche Differenzen zur Referenzstation zwischen 3,2 K und 4,6 K erreicht, in anderen Einzelfällen mehr als 5 K. Die Station BER verzeichnet mit ihrer gleichfalls hoch versiegelten, aber dicht bebauten und horizonteingeschränkten Umgebung ebenso eine starke, der Station NOR ähnlichen, lokale urbane Wärmeinsel zwischen 2,8 K und 3,7 K im Vergleich zum Umland. Es ist somit keine deutlich schwächere Ausprägung der lokalen urbanen Wärmeinsel für NOR im Vergleich zu BER festzustellen. Dies bestätigen auch die weiteren Einzelfälle. Außerdem wird ersichtlich, dass in nahezu allen Fällen eine Annäherung der Kurven von NOR und BER über die Nachtstunden stattfindet, wie es auch Abbildung 7 zeigt. Die maximale Annäherung erfolgt meist in der zweiten Nachthälfte und ist teilweise mit einer Kreuzung der Kurven und damit geänderten Reihenfolge der maximalen Temperaturdifferenzen ($TT_{BER} > TT_{NOR}$) verbunden (JUL10, AUG2, AUG3).

Die Hypothese war, dass sich die Dichte der bebauten Oberfläche und damit der veränderte Sky View Factor deutlich und in Form einer stärkeren Abkühlung an der Station NOR auswirken würden (Masson et al., 2020; Onomura et al., 2016; Unger, 2004). Diese erste Perspektive in Hypothese 3

kann in dieser Untersuchung nicht bestätigt werden. Die bereits während des Nachmittags und Abends (13-18 Uhr UTC) sehr stark ausgeprägte lokale Wärmeinsel an der Station NOR verstärkt sich bis in die Nacht hinein (18-21 Uhr UTC). Der nächtliche Abbau der Wärmeinsel, der in einem deutlich geringeren Ausmaß als an anderen Stationen stattfindet, erstreckt sich zudem über einen längeren Zeitraum (Abbildung 7). Ein Grund könnte in der dicht bebauten weiteren Umgebung der Station NOR liegen, deren Wärmeabgabe die möglicherweise tatsächlich vorhandene effektive nächtliche Ausstrahlung auf dem offenen Platz ausgleicht oder sogar überlagert. Beispielsweise befinden sich das massive Bahnhofsgebäude sowie hohe Blockbebauung mit Gründerzeit-Altbauten sowie Glas- und Stahlbauten in 40-60 m Entfernung. Gleichzeitig bieten die großen Parkplatzflächen nicht nur eine gute Möglichkeit zur nächtlichen ungehinderten Ausstrahlung. Durch die potenziell dort zahlreich abgestellten Fahrzeuge könnten sie auch eine nicht zu unterschätzende abstrahlende Wärmequelle grauer Infrastruktur darstellen. Die nächtliche Auslastung des Parkplatzes ist allerdings nicht bekannt. Bestehende Studienergebnisse für andere Orten (Grajeda-Rosado et al., 2022; Hoehne et al., 2022) sind nicht auf die Situation an der Station NOR übertragbar, da die Fläche des Parkplatzes sowie die Ausrichtung der Fahrzeuge und der Gebäude eine zentrale Rolle für das Ergebnis spielen und hierzu die Datengrundlage in Dresden fehlt. Der Einfluss der in begrenztem Umfang vorhandenen Bäume an beiden untersuchten Standorten scheint nachts erwartungsgemäß eine eher untergeordnete Rolle im Vergleich zu anderen Standorten zu spielen. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Temperaturen ohne die grüne Infrastruktur bei BER und NOR theoretisch nicht sogar noch höher wären.

Vergleich des nächtlichen Temperaturverlaufs für die Stationen BOT, STR und GEB2

Der Vergleich des nächtlichen Verlaufs der Temperaturdifferenzen der Stationen BOT und STR zum Umland mit denen der Station GEB2 zum Umland (Abbildung 7) ergibt ein deutliches Bild. Für die Stationen BOT und STR mit einem hohen Anteil an offener grüner Infrastruktur in der direkten und weiteren Umgebung ist im Fall AUG2 nahezu keine (STR) bzw. eine schwach negative (BOT) lokale Wärmeinsel zu verzeichnen. Für GEB2 liegt diese dagegen in deutlicher Ausprägung vor und bewegt sich über alle Nachtstunden recht konstant im Bereich zwischen 1,4 K und 1,8 K zur REF. Das Ergebnis ist ebenfalls deutlich in den Einzelfällen JUN2 und AUG3 zu sehen, in den meisten Fällen jedoch von Schwankungen geprägt. In allen Einzelfällen ist die nächtliche lokale Wärmeinsel an den Stationen STR und BOT (hauptsächlich im Bereich $\pm 1,0$ K zur Referenzstation) niedriger als für GEB2.

Es kann davon ausgegangen werden, dass der hohe Anteil an nicht-offener grüner Infrastruktur, insbesondere durch das dichte Kronendach des umgebenden Laubwalds in der direkten und weiteren Umgebung von GEB2, dazu führt, dass lokale Abkühlungsprozesse durch die weniger effektive Ausstrahlung verzögert und verringert werden (Henninger & Weber, 2020; Huang et al., 2008).

Ziter et al. (2019) zeigten, dass die über den Strahlungstag aufgebaute und nachts ausstrahlende Wärme in der Luftmasse unter den dichten Baumkronen länger erhalten bleibt. Im Gegensatz dazu kann auf den Wiesen bzw. dem offenen Boden ohne Baum- und Strauchvegetation in direkter Umgebung der Stationen BOT und STR eine ungehinderte nächtliche Ausstrahlung und damit Wärmeabgabe stattfinden (Chang et al., 2007; Oke et al., 2017). Somit kann die zweite untersuchte Perspektive der Hypothese 3 zur stärkeren Kühlwirkung durch offene grüne Infrastruktur im Vergleich zu nicht-offener grüner Infrastruktur an unversiegelten Standorten bestätigt werden.

Vergleich des nächtlichen Temperaturverlaufs für die Stationen NEU und WIN

Für die Stationen NEU und WIN, die von dicht bebauter und hoch versiegelter Umgebung, aber gleichzeitig auch von einem hohen Anteil an nicht-offener grüner Infrastruktur in unmittelbarer Nähe zur Messstation beeinflusst werden, ist in Abbildung 7 ein sehr ähnlicher Verlauf zu sehen. Beide Stationen weisen mittlere nächtliche Differenzen zwischen 1,8 K und 2,9 K zum Umland auf, wobei für NEU in diesem Einzelfall in der ersten Nachthälfte geringfügig höhere Temperaturdifferenzen auftreten als für WIN. Ein Großteil der Einzelfälle weist das gegenteilige Ergebnis auf, allerdings mit ebenfalls sehr geringen Differenzen. Die in der direkten Stationsumgebung vorhandene Vegetation scheint bei beiden Stationen im Vergleich zu den Stationen BER und NOR eine Abschwächung der lokalen Wärmeinsel zu erzeugen. Gleichzeitig ist eine geringere Kühlwirkung festzustellen als bei den Stationen BOT und STR. Dies kann einerseits mit der Abschirmung langwelliger Strahlung durch das Blätterdach der umgebenden Bäume bei NEU und WIN begründet werden, wie es auch für GEB2 der Fall ist. Andererseits wird möglicherweise auch die begrenzte Kühlwirkung kleiner Grünflächen innerhalb dichter umgebender Bebauung deutlich, da die ausgestrahlte Wärme zwischen den Gebäuden ebenfalls effektiver zurückgehalten wird und sich verschiedene gegenläufige Einflüsse überlagern (Masson et al., 2020). Es ist außerdem zu beachten, dass die Stationen BER, NOR und WIN auf Containern installiert sind und möglicherweise den Untergrundeinfluss in anderer Form wiedergeben als die übrigen Stationen. Hinzu kommt, dass die Abkühlung durch Grasflächen auch von der Bodenfeuchtigkeit abhängig ist, welche bei ausdauernden Hitzewellen oder im Laufe heißer Sommer durch Austrocknung des Bodens abnehmen kann (van Hove et al., 2011).

Wechselwirkung von grüner Infrastruktur und Versiegelungsgrad

In engem Zusammenhang mit den positiven Auswirkungen grüner Infrastruktur stehen somit die Auswirkungen von nicht versiegelten Flächen. Man kann davon ausgehen, dass Flächen mit grüner Infrastruktur meist einen signifikanten Anteil an unversiegeltem Untergrund aufweisen und im Gegenzug versiegelte Flächen meist keine großflächigen grünen Infrastrukturen verzeichnen. Aus obigen Ergebnissen wird somit auch die Wirkung des Versiegelungsgrads und der Untergrundbeschaffenheit bei vergleichbarer Horizonteneinschränkung des Messstandorts deutlich. Die gemessenen

Unterschiede in der Lufttemperatur zwischen den Stationen BER und NOR mit einer nahezu vollständigen Versiegelung des Untergrunds und den Stationen NEU und WIN sowie BOT und STR mit entsiegelten Untergründen in unterschiedlichem Ausmaß bestätigen diese Einschätzung. Hackenbruch (2018) konnte beispielsweise für Karlsruhe bestätigen, dass an Stationen mit hohem Grünflächenanteil in der direkten Umgebung, beispielweise am Hauptfriedhof und in einer Kleingartensiedlung in der Nordweststadt, fast immer geringere Temperaturdifferenzen zur Referenzstation vorherrschten als in den stärker versiegelten Bereichen, beispielweise in der Innenstadt. In Dresden werden der Versiegelungsgrad und die jährlich entsiegelte Fläche durch die Stadt erfasst und ausgewertet (LHD, 2015). Die online verfügbare WMS-Datengrundlage zum Versiegelungsgrad (LHD, 2023i, Abruf: 15.10.2023) beinhaltet keine Verkehrsflächen. Aufgrund der geringen Datenauflösung ist keine Differenzierung der Stationsstandorte zu ihrer Umgebung möglich. So wird für die Umgebung bei NEU trotz Platzierung in einer Grünanlage die gleiche Versiegelungsklasse wie für die Umgebung bei NOR von 81-100% angegeben. Für die Umgebung bei BER (Verkehrsflächen) liegen keine Daten vor. Die umgebende Bebauung wird der Klasse 41-60% zugeordnet. Die Umgebung der Station BOT ist aufgrund der angrenzenden Flächen des Botanischen Gartens der Klasse 21-40% zugeordnet, die Stationsumgebungen bei GEB2 und STR weisen einen Versiegelungsgrad von < 10% auf. Insgesamt bestätigen die Daten, abgesehen von Ungenauigkeiten durch die geringe Auflösung, die oben getroffenen Aussagen. Der in der Nähe der Station BOT befindliche Große Garten birgt als große Parkanlage ein hohes stadtklimatisches Potenzial für die Stadt Dresden. Im Umweltbericht der LHD (1998) werden als Vorteile die im Vergleich zur umliegenden Bebauung bis zu zehn Tage geringere Wärmebelastung pro Jahr sowie die Zerschneidung ausgedehnter städtischer Belastungskomplexe genannt. Weiterhin wird die gute Erreichbarkeit aus dem südlichen Bereich der Stadt und die Ausweichmöglichkeit vor allem während thermischer Belastungssituationen betont.

Schlussfolgerungen zum Einfluss grüner Infrastruktur

Insgesamt kann damit bezüglich Hypothese 3 anhand der untersuchten Daten festgehalten werden, dass versiegelte, aber unbebaute und offene Standorte gegenüber versiegelten und dicht bebauten Standorten nachts nur dann eine geringere lokale städtische Wärmeinsel aufweisen, wenn sie gleichzeitig einen hohen Anteil an grüner Infrastruktur und damit auch teilweise entsiegelte Flächen aufweisen. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn eine möglichst offene grüne Infrastruktur vorliegt, da das effektive Ausstrahlungsvermögen des Standorts entscheidend für die Ausprägung der Kühlwirkung grüner Infrastruktur ist. Zwischen Standorten mit offener grüner Infrastruktur und großflächig entsiegeltem Untergrund (BOT, STR) und der Referenzstation im Umland wird der geringste UHI-Effekt gemessen, gefolgt von Standorten mit nicht-offener grüner Infrastruktur (GEB2) und gegebenenfalls zusätzlichen Einflüssen angrenzender grauer Infrastruktur (NEU, WIN).

Die maximale nächtliche lokale Wärmeinsel ist an Standorten ohne ausreichende grüne Infrastruktur und mit einem hohen Versiegelungsgrad (BER, NOR) festzustellen. Die kleine Grünanlage an der Station NEU wirkt sich bei ähnlichem Versiegelungsgrad der weiteren Umgebung positiv auf die nächtlichen Lufttemperaturen aus. Dies unterstreicht die hohe stadtklimatische Bedeutung innerstädtischer Grünflächen, die auch bereits bei kleiner Fläche eine Änderung der nächtlichen thermischen Belastung bewirken können.

Um die Lebens- und Aufenthaltsqualität in Dresden zu verbessern, sollten daher nicht nur große Grünflächen, sondern auch kleine Stadtteilparks erhalten, ausgebaut und miteinander vernetzt werden. Damit können für die Bevölkerung aller Stadtteile und insbesondere vulnerable Gruppen wohnortnahe Erholungsmöglichkeiten am Tag geboten werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass geringere Temperaturen in der Nacht einen positiven Effekt auf die Schlafdauer und Erholungsstärke haben (Minor et al., 2022). Dieser Effekt wirkt sich auch auf die wirtschaftliche Produktivität aus, wie eine aktuelle Studie von Hafner et al. (2023) für Österreich verdeutlicht.

Um die tatsächliche horizontale Distanz des Abkühlungseffekts von Grünflächen in Dresden beurteilen zu können, sind Transektmessungen der Lufttemperatur im Einzelfall nötig. Wie in Kapitel 2.4.2 erläutert, gehen Oke et al. (2017) bei geeigneter Baustruktur von einer exponentiellen Abnahme des Einflusses der PCI in Abhängigkeit von der Entfernung vom Parkrand sowie von einer ungefähren Reichweite in der Dimension der Parkbreite aus. Für den Großen Garten mit einer Breite von etwa knapp 1 km würde dies eine enorme Abkühlungsreichweite bedeuten. Die Ergebnisse verschiedener Profildfahrten von Matzarakis (2001) verdeutlichen die hohe Bedeutung der an Parks angrenzenden Bebauungsstruktur in ihrem Einfluss auf die Reichweite. Für unterschiedliche Parks in München ergab sich im Durchschnitt eine Reichweite von etwa 100 m (Matzarakis, 2001). Eine diesbezügliche Untersuchung könnte Gegenstand einer Folgearbeit zum Einfluss grüner Infrastruktur in Dresden sein.

4.5.3.3 Einfluss blauer Infrastruktur

Des Weiteren soll auf den Einfluss blauer Infrastruktur auf den UHI-Effekt eingegangen werden. In Kapitel 4.2 wurde bereits erläutert, wie sich durch blaue Infrastruktur entstandene grüne Folgestrukturen, z. B. in Form von Auenwiesen, auf lokale Temperaturen im Umland auswirken können. Auf die Temperaturen der vorhandenen Stadtstationen haben die in Dresden aufzufindenden blauen Infrastrukturen keinen nennenswerten Einfluss. Einerseits liegt keine Stadtstation nahe der Elbe, welche auch das Stadtgebiet durchquert, oder auf Auenwiesen (Abbildung 1). Hier würde es sich für die Zukunft anbieten, mindestens eine (hochwassergeschützte) Station in der Nähe des Elbufers und gleichzeitig in Stadtnähe zu installieren. Andererseits haben die vorhandenen kleinskaligen blauen Infrastrukturen wie Gärtnereibewässerung (für STR) und Wasserbecken im Großen

Garten (für BOT, STR und weitere) keine Fernwirkung und sind daher an den Stationen ohne messbaren Effekt. Meist sind Entfernungen von mehreren hundert Metern zwischen Station und blauer Infrastruktur zu überbrücken (Details siehe Kapitel 8.1 im Anhang).

Zudem wurden in dieser Arbeit nur die Nachtstunden näher betrachtet. Am Tag tragen offene Wasserflächen dagegen durch eine hohe Evaporation und die geschaffene Ventilationszone, welche zu einem Luftaustausch führt, zu einer deutlichen Abkühlung der Lufttemperatur in direkter Umgebung bei (Henninger & Weber, 2020; Oke, 1987; van Hove et al., 2011).

Hathway und Sharples (2012) konnten eine signifikante Abkühlung der Luftmassen über dem Fluss sowie am Flussufer von mehreren Grad Celsius nur während des Tages messen. Dieser Effekt nahm über die Sommermonate hinweg ab (Hathway & Sharples, 2012). Hierfür könnten steigende Wassertemperaturen als Ursache vermutet werden. In der Studie konnte eine Optimierung des Abkühlungseffekts durch stark begrünte Ufer nachgewiesen werden. Die Art des umgebenden Materials hatte dabei teilweise einen größeren Einfluss als das Fließgewässer selbst. Bei Öffnung von Straßen oder Plätzen in Richtung des Fließgewässers wurden signifikante Abkühlungseffekte in bis zu 30 m Entfernung vom Ufer erfasst (Hathway & Sharples, 2012). Robitu et al. (2006) zeigten mithilfe numerischer Simulation ebenfalls einen positiven Effekt auf den thermischen Komfort im Freien durch ein Wasserbecken in Kombination mit schattenspendenden Bäumen. Es wird deutlich, dass in der Stadtplanung ein besonderes Augenmerk auf die Vernetzung von blau-grünen Infrastrukturen sowie die Anpassung grauer Infrastruktur zur Nutzung der positiven blau-grünen Effekte gelegt werden muss.

Hinsichtlich des nächtlichen Temperatureffekts durch blaue Infrastrukturen ergibt sich weiterhin ein großer Forschungsbedarf. Im Umweltbericht der LHD (1998) konnte im Rahmen von Intensivmesskampagnen beim zweimaligen Überqueren der Elbe über eine Brücke bei Nacht keine signifikante Abkühlung gemessen werden. Es wurde vermutet, dass die Elbe selbst aufgrund der hohen Wärmekapazität des Wassers keine deutlich abkühlende Wirkung aufweist, insbesondere nicht beim Durchfließen des Stadtzentrums, welches teilweise bis zum Elbufer hin versiegelt ist. Für die Auenwiesen, auf denen sich Tau und Nebel bildet, war ein signifikant kühlender Einfluss des Gewässers sichtbar (LHD, 1998). Mit Transektmessungen zur Lufttemperatur sowie einer systematischen Messung von Windrichtung und Windgeschwindigkeit an Temperaturmessstationen könnte die Fernwirkung von kleineren und größeren Gewässern (Geberbach, Elbe und weitere) quantifiziert werden und eine gute Datengrundlage für stadtplanerische Entscheidungen liefern. Dazu gehört auch, die unterschiedlichen Faktoren zu ermitteln, die die Auswirkungen von Gewässern auf ihre unmittelbare Umgebung im städtischen Umfeld beeinflussen können. Im realen Fall ist es schwierig, ideale Bedingungen für Vergleichszwecke zu finden.

Die Elbe trennt mit ihrem Verlauf zwischen Alt- und Neustadt zwei große stadtklimatisch stark belastete Gebiete und verhindert darüber hinaus das Zusammenwachsen der Stadt mit potenziell deutlich stärkeren Belastungsmustern (LHD, 1998). Insgesamt ist das Vorkommen von blauer Infrastruktur in der näheren Umgebung der Stadtstationen als gering einzustufen. Bei der Begehung vor Ort im Oktober 2022 wurden beispielsweise keine Brunnen, Wasserspiele, Teiche oder Versickerungsmulden aufgefunden. Hier könnten bei der klimaangepassten Stadtplanung für Dresden ein generelles Umdenken und Integrieren neuer blauer Strukturen bzw. eine intensivere Erforschung der Potenziale der Elbe stattfinden.

4.5.3.4 Einfluss topografischer Besonderheiten

Zum Schluss soll der Einfluss topografischer Besonderheiten auf den UHI-Effekt behandelt werden. In Kapitel 4.3 wurde bereits erläutert, wie sich Kaltluftströmungen auf lokale Temperaturen im Umland auswirken können.

Von topografischen Einflüssen könnte die Station BER durch die Hanglage mit 7% Gefälle (Pausch & Mühlner, 2020) betroffen sein. Sie liegt innerhalb einer breiten Schneise durch eine mehrspurige Straße und unterhalb des 200 m entfernten Südparks (siehe Steckbrief und Abbildung 8 sowie Abbildung 9 in Kapitel 8.1 im Anhang bzw. 3D-Ansichten in Ordner 5 im elektronischen Anhang). Ein Kaltluftfluss in Süd-Nord-Richtung könnte somit vermutet werden. Die aktuelle Klimafunktionskarte der LHD auf Basis der Stadtklimaanalyse ergab jedoch keine Kaltluftströmung mit Zuführung kühler Luftmassen in Richtung der Messstation (LHD, 2022c; Sörgel et al., 2008).

Auch die Messergebnisse scheinen eine deutliche Erwärmung und weniger einen kühlenden Einfluss durch Kaltluft zu verzeichnen. Verschiedene, teilweise zusammenhängende Gründe kommen hier in Betracht. Einerseits scheint die Verbauung südlich und damit oberhalb der Station bereits so dicht zu sein, dass mögliche Kaltluftströmungen aus Richtung des Südparks und der unbesiedelten Elbtalhänge verhindert werden. Die Karte zur Stadtklimaanalyse aus dem Jahr 2008 zeigt zwischen dem Südpark und den angrenzenden Gebäuden der TU Dresden einen Kaltluftstau durch ein Strömungshindernis, welches einen möglicherweise flächenhaften hangabwärts gerichteten Kaltluftabfluss blockiert (Sörgel et al., 2008).

Gleichzeitig kann davon ausgegangen werden, dass sich abkühlende Luftmassen an der Station, die sich innerhalb des verbauten Gebiets noch weit hangaufwärts befindet, aufgrund der Neigung rasch abfließen und damit zu einer Abkühlung in tieferen Lagen, aber nicht an der Station, führen. Da es sich bei BER um eine Station zur Luftgütemessung handelt, wäre es ratsam, potenzielle Kaltluftbahnen, unter anderem aus dem Südpark, sowie den Einfluss von Störungshindernissen mithilfe qualifizierter meteorologischer Messungen oder aktuellen Klimamodellierungen zu analysieren.

Parkanlagen, wie der Südpark, sind grundsätzlich wichtige Produzenten und Lieferanten von Kaltluft (Bongardt, 2006). Sie sollten so angelegt werden, dass die produzierte Kaltluft in städtische Gebiete abfließen kann (Kuttler, 2010), beispielsweise durch strategische und nicht zu dichte Pflanzung von Bäumen oder einen Verzicht auf dichte städtische Randbebauung. Die Funktion als beschatteter Aufenthaltsbereich an Sommertagen kann erhalten bleiben, indem Bäume mit ausladender Krone für Schatten und lokale Abkühlung sorgen. Gleichzeitig sollte bei der Ausweisung von Wohn- und Siedlungsgebieten auf eine ausreichende Anbindung an Kaltluftschneisen geachtet werden, welche nicht mit Barrieren durch dicht stehende Bäume oder Lückenschluss von Bebauungen versperrt werden sollten. So kann die nächtliche Zufuhr kühler Luftmassen und damit eine höhere Aufenthaltsqualität in neuen Wohngebieten ermöglicht werden. Für bestehende Siedlungsgebiete lohnt sich eine weitergehende Analyse vorhandener Barrieren, mit dem Ziel, bereits versperrte Kaltluftflüsse wiederherzustellen und die nächtliche Aufenthaltsqualität in den Siedlungen zu verbessern.

Die bestehenden Kaltluftströme parallel zum Elbtal (Sörgel et al., 2008) können ebenfalls zu einer verminderten nächtlichen Lufttemperatur in städtischen Gebieten führen, wenn Ventilationsbahnen offengehalten werden, beispielsweise entlang des Geberbachs und zwischen den Stadtteilen Seidnitz, Laubegast und Leuben (LHD, 2022c). Für innenstadtnahe Stadtteile müssten diese Flächen laut Klimafunktionskarte (LHD, 2022c) jedoch wie für den Elbeinfluss (Kapitel 4.5.3.3) erst geschaffen werden, was eine große stadtplanerische Herausforderung darstellt.

4.5.4 Veränderung des UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode

In diesem Abschnitt soll die Forschungsfrage zur Veränderung des nächtlichen UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode untersucht werden.

Forschungsfrage 8: >> *Wie verändert sich der lokale städtische Wärmeinseleffekt, vor allem in den Nachtstunden, über eine längere Hitzeperiode?* <<

Dafür wurden, wie in Kapitel 3.5.7 erläutert, je drei gesonderte Einzelfälle pro Monat (Tabelle 16) nach geeigneten Kriterien (Tabelle 15) ausgewählt und ausgewertet (Auswertungstabelle in Ordner 3, Kapitel 3.5.7 im elektronischen Anhang). Laut der dortigen Auswertung liegt das absolute Lufttemperaturminimum im Stundenmittel für HOS je nach Tag innerhalb der Hitzeperiode zwischen 10 °C und > 22 °C und das Tagesmaximum zwischen etwa 26 °C und > 38 °C. An mehr als der Hälfte der Tage wird die für Hitzeperioden charakteristische Schwelle von 30 °C (DWD, o. J.a) von mindestens einem Stundenmittel an der Station HOS überschritten. In etwa 90% der Tage liegt eine Zunahme des absoluten nächtlichen Minimums sowie des täglichen Maximums von Tag zu Tag vor. Der grafische Verlauf der Lufttemperaturen für HOS und zudem für alle Stationen zusammen ist in der Auswertungstabelle in Ordner 3, Kapitel 3.5.7 im elektronischen Anhang zu finden.

Der Tagesgang der Lufttemperatur für HOS ist mit einer Amplitude im Bereich von meist 14-17 K, mit einem Minimum bei etwa 10 K und einem Maximum bei etwa 22 K, sehr gut ausgeprägt, was insgesamt für geeignete Strahlungstage spricht. Beispielsweise wurden im Umweltbericht der LHD (1998) während einer mehrtägigen sommerlichen autochthonen Wetterlage Tagesamplituden von 16 K ermittelt.

Aus der Auswahl von neun Einzelfällen wird im Folgenden eine Hitzeperiode (15.-17. Juni 2021) für alle Stationen näher beschrieben. In diesem Zeitraum lag eine Hitzewarnung des DWD für den 17. Juni 2021 mit Warnstufe 1 vor (starke Wärmebelastung: die gefühlte Temperatur liegt an zwei Tagen in Folge über etwa 32 °C, zusätzlich findet nur eine geringe nächtliche Abkühlung statt (CDC, 2021); zur Beschreibung der gefühlten Temperatur siehe Staiger et al., 2012).

Tabelle 20 zeigt die nächtlichen Lufttemperaturen [°C] (links) sowie die Differenzen [K] der sieben Stadtstationen im Vergleich zur Umlandstation HOS (Mitte) im Verlauf der drei Nächte. Rechts ist die jeweilige Differenz der Werte im Verhältnis zur gleichen Uhrzeit am Vortag [K] gezeigt.

Veränderung der absoluten Lufttemperaturen und des UHI-Effekts

Zunächst ist eine Zunahme der absoluten nächtlichen Lufttemperaturen über die Hitzeperiode an allen Stationen festzustellen. Das nächtliche Maximum steigt von Tag 1 bis Tag 3 von meist unter 20 °C auf mehr als 23 °C, das Minimum von meist unter 15 °C auf mehr als 18 °C. Somit liegt eine Erhöhung von mehr als 3 K im Laufe der drei Nächte sowie eine ausgeprägte Hitzeperiode von drei Tagen vor.

An allen Stationen nehmen die Differenzen der Lufttemperaturen zu HOS über die Hitzeperiode ab und fallen an Tag 3 in der zweiten Nachthälfte sogar negativ aus. Das bedeutet, dass sich die nächtlichen Temperaturen zwischen der Stadt und dem Umland mit der Zeit der Hitzeperiode annähern und die Temperatur am Ende der untersuchten Zeitspanne an der Umlandstation sogar höher ist als an den Stadtstationen. Die Verteilung und hohe Anzahl der gelb markierten Werte, die die Differenz zum Vortag darstellen, verdeutlichen diese Aussage, da nahezu alle Werte an Tag 3 sowie ein Großteil der Werte bereits an Tag 2 negativ sind. Während zwischen den Stationen BER, NOR und WIN im Vergleich zum Umland zu Beginn der Nacht des ersten Tages lokale Wärmeinseleffekte von 3-5 K gemessen wurden, werden an Tag 3 maximale Differenzen von etwa 1-2 K ermittelt. Dieser Verlauf gilt auch für die Stationen GEB2 und NEU, wenn auch in geringerem Umfang. Insbesondere die beiden ersten Nächte stellen die vorherrschenden Strahlungseffekte in Stadt und Umland heraus. In der dritten Nacht ist für HOS in diesem Einzelfall dagegen eine Temperaturabnahme von nur 2,1 K festzustellen, wohingegen alle anderen Stationen um 4-5 K abkühlen. Als Referenzstation wirkt sich dieser Effekt damit auch auf die Aussage zum UHI-Effekt aus.

Tabelle 20: Veränderung der nächtlichen Lufttemperaturen [°C] (links) sowie der Differenzen [K] der sieben Stadtstationen im Vergleich zur Umlandstation HOS für die Nachtstunden im Einzelfall einer längeren Hitzeperiode im Juni 2021 (Mitte) und die jeweilige Differenz der Werte im Vergleich zur gleichen Uhrzeit am Vortag [K] (rechts). Farbskala links: ansteigende Temperaturwerte von Blau über Weiß nach Rot. Farbskala mittig: Blau (negative Differenz im Vergleich zu HOS) über Weiß (keine Differenz) bis Rot (positive Differenz). Gelbe Füllung rechts: negative Differenzen zur gleichen Stunde am Vortag.

Einzelfall JUN	Uhrzeit (UTC)	Lufttemperatur [°C]								Differenz zu HOS [K]							Differenz zum Vortag [K]							
		BER	BOT	GEB2	HOS	NEU	NOR	STR	WIN	BER	BOT	GEB2	NEU	NOR	STR	WIN	BER	BOT	GEB2	NEU	NOR	STR	WIN	
TAG 1	21:00:00	20,9	16,3	19,2	16,6	18,8	21,6	17,3	19,7	4,3	-0,4	2,6	2,2	5,0	0,7	3,1								
	22:00:00	19,6	14,8	17,9	15,7	18,2	19,5	15,2	18,1	3,9	-0,9	2,2	2,5	3,8	-0,5	2,4								
	23:00:00	17,9	13,7	16,7	15,4	16,9	18,1	14,9	17,2	2,5	-1,7	1,3	1,5	2,7	-0,5	1,8								
	00:00:00	16,8	13,1	15,4	14,5	16,3	17,2	14,8	16,2	2,3	-1,4	0,9	1,8	2,7	0,3	1,7								
	01:00:00	16,2	12,8	14,7	13,3	15,5	16,5	14,1	15,9	2,9	-0,5	1,4	2,2	3,2	0,8	2,6								
	02:00:00	15,8	12,2	14,1	12,5	14,9	15,8	13,6	15,3	3,3	-0,3	1,6	2,4	3,3	1,1	2,8								
	03:00:00	15,3	11,4	13,7	11,9	14,1	15,2	12,9	14,9	3,4	-0,5	1,8	2,2	3,3	1,0	3,0								
TAG 2	21:00:00	23,5	22,4	21,7	21,6	21,6	23,8	21,5	23,1	1,9	0,8	0,1	0,0	2,2	-0,1	1,5	-2,4	1,2	-2,5	-2,2	-2,8	-0,8	-1,6	
	22:00:00	22,6	20,0	20,8	20,0	20,8	22,9	19,8	22,0	2,6	0,0	0,8	0,8	2,9	-0,1	2,0	-1,3	0,9	-1,4	-1,7	-0,9	0,3	-0,4	
	23:00:00	21,6	18,2	20,1	18,0	19,9	22,4	18,2	21,3	3,6	0,1	2,1	1,9	4,4	0,2	3,3	1,1	1,8	0,8	0,4	1,7	0,7	1,5	
	00:00:00	20,7	17,0	19,0	17,0	18,9	21,2	17,2	20,1	3,7	-0,1	1,9	1,9	4,2	0,1	3,1	1,4	1,4	1,1	0,1	1,5	-0,1	1,4	
	01:00:00	20,0	16,5	17,8	17,5	18,3	20,1	16,6	19,4	2,6	-1,0	0,4	0,9	2,7	-0,8	2,0	-0,4	-0,5	-1,0	-1,4	-0,6	-1,6	-0,7	
	02:00:00	19,4	15,8	17,2	16,8	17,5	19,4	16,0	18,9	2,6	-1,0	0,4	0,7	2,6	-0,8	2,1	-0,7	-0,6	-1,2	-1,7	-0,7	-1,8	-0,7	
	03:00:00	18,6	15,4	16,6	15,5	17,2	18,8	15,3	18,3	3,1	-0,1	1,1	1,7	3,3	-0,1	2,8	-0,3	0,4	-0,7	-0,5	0,0	-1,1	-0,2	
TAG 3	21:00:00	24,8	23,5	24,6	23,8	24,3	25,4	23,5	25,2	1,0	-0,3	0,8	0,5	1,6	-0,3	1,4	-0,9	-1,1	0,7	0,5	-0,6	-0,3	-0,1	
	22:00:00	23,6	21,5	23,3	22,7	23,4	24,3	21,8	23,8	0,9	-1,2	0,6	0,7	1,6	-0,9	1,1	-1,7	-1,2	-0,2	-0,1	-1,3	-0,7	-0,9	
	23:00:00	22,7	21,0	22,0	21,3	22,5	23,4	21,0	22,7	1,4	-0,3	0,7	1,2	2,1	-0,3	1,4	-2,2	-0,4	-1,5	-0,7	-2,3	-0,5	-1,9	
	00:00:00	21,9	19,9	20,8	21,3	22,0	22,7	20,1	21,9	0,6	-1,4	-0,5	0,7	1,4	-1,1	0,6	-3,0	-1,3	-2,5	-1,1	-2,7	-1,3	-2,4	
	01:00:00	21,1	17,9	19,9	22,0	21,5	22,0	19,5	21,3	-0,9	-4,1	-2,1	-0,5	0,0	-2,5	-0,7	-3,4	-3,1	-2,5	-1,3	-2,6	-1,7	-2,6	
	02:00:00	20,6	18,1	19,5	22,6	20,6	21,6	19,6	20,9	-2,0	-4,5	-3,1	-2,0	-1,0	-3,0	-1,7	-4,6	-3,5	-3,5	-2,7	-3,6	-2,3	-3,8	
	03:00:00	20,1	18,3	19,8	21,7	20,3	21,3	19,3	20,4	-1,6	-3,4	-2,0	-1,4	-0,4	-2,4	-1,3	-4,8	-3,4	-3,0	-3,2	-3,8	-2,3	-4,2	

Neben einem über die Hitzeperiode möglicherweise verändertem Speicherverhalten könnte das nächtliche Abkühlungsverhalten von HOS im Umland zudem stärker von SO-Winden entlang der Elbe und einer daraus folgenden stärkeren Durchmischung beeinflusst sein als die durch Verbauung eher windgeschützten Stadtstationen. Um diese Faktoren quantifizieren zu können, sind Windmessungen sowie Energiebilanzmessungen vonnöten. Insgesamt kann jedoch eine Abschwächung von lokalen UHI-Effekten, aber auch des gesamtstädtischen Wärmeineffekts im Laufe einer Hitzeperiode anhand dieses Einzelfalls bestätigt werden.

Die Auswertungstabelle aller weiteren acht Einzelfälle für längere Hitzeperioden ist in Ordner 4, Kapitel 4.5.4 im elektronischen Anhang zu finden. Eine Zunahme der absoluten nächtlichen Lufttemperaturen ist in allen Fällen festzustellen. Je ein Einzelfall aus Juli und August bestätigt die oben gezogenen Schlüsse. In drei weiteren Fällen – dies betrifft insbesondere die längeren Zeiträume von fünf Tagen im Juni und August – ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. Teilweise ist es aufgrund fehlender Datensätze nicht möglich, eine Aussage zu treffen. Die drei übrigen Einzelfälle, davon zwei im Juli, weisen einen eher gegensätzlichen Verlauf auf, da am dritten Tag höhere Temperaturdifferenzen zum Umland gemessen werden als zu Beginn der Hitzeperiode. Hackenbruch (2018) konnte diesen ansteigenden Trend der Temperaturdifferenzen zwischen Stadt- und Umlandstationen mit zunehmender Dauer der Hitzeperiode ebenfalls feststellen und kam zu dem Schluss, dass die maximale städtische Wärmeinsel im Verlauf der Hitzeperiode von Tag zu Tag häufiger stärker als schwächer ausgeprägt ist.

Somit sind die Aussagen der Einzelfallbetrachtungen für Dresden getrennt voneinander zu betrachten und lassen keine Verallgemeinerung zu. Dies gilt auch für die Übertragbarkeit der Literaturergebnisse, die ebenfalls unter bestimmten Voraussetzungen und möglicherweise nicht-reproduzierbaren lokalen Gegebenheiten entstanden sind. Für zukünftige Untersuchungen in Dresden wären daher kleinräumige mikroklimatische Untersuchungen mit einem guten Netzwerk von über das Stadtgebiet verteilten und gut ausgestatteten Dauermessstellen zu empfehlen. Dabei ist auf eine qualitativ hochwertige, kalibrierte und regelmäßig gewartete Messtechnik zu achten, um kleinskalige Temperaturunterschiede richtig erfassen und mögliche Ursachen erforschen zu können.

Veränderungen über den Sommer

Zwischen den Hitzewellen in verschiedenen Monaten kann trotz des unterschiedlichen Strahlungseinflusses kein Trend festgestellt werden. Für eine Identifizierung eines möglichen Trends wäre eine größere Datengrundlage notwendig. Auch gezielte Messungen zum Speicherverhalten der umgebenden Oberflächen wären vorteilhaft. Möglicherweise spielen hier auch die Installationen der Sensorik für BER, NOR und WIN auf Containern eine Rolle, deren Speicher- und Abstrahlungsverhalten

im Vergleich zu den Messstationen auf offenem Grund in zukünftigen Arbeiten auf ihren Einfluss auf die Lufttemperatur hin analysiert werden sollten.

Veränderungen zwischen den Stadtstationen

In dem in Tabelle 20 gezeigten Einzelfall findet eine Annäherung der jeweiligen Verläufe der Temperaturdifferenzen zum Umland zwischen den Stadtstationen statt. Dazu wurden die Differenzen zwischen allen stündlichen Maxima und Minima verglichen, sowie gesondert zwischen den Stationen mit Grünflächen (BOT, STR) und stark versiegelten Flächen (BER, NOR), um eine Veränderung der nächtlichen Kühlwirkung feststellen zu können. Die allgemeine Betrachtung ergibt im Durchschnitt der ermittelten Differenzen für jede Nachtstunde eine Veränderung von 4,3 K Differenz in der ersten Nacht, gefolgt von 3,5 K in der zweiten und 2,9 K in der dritten Nacht. Diese Differenzen werden ausschließlich aus den Werten der Stationen BOT, STR sowie BER und NOR generiert und würden für einen abnehmenden Trend im Laufe der Zeit sprechen. Entfernt man die beiden vegetationsbestandenen Stadtstationen BOT und STR aus der Berechnung, ergibt sich ein weniger deutliches Bild von 1,8 K in der ersten, 2,3 K in der zweiten und 1,6 K in der dritten Nacht. In den weiteren Einzelfällen werden die maximalen Differenzen ebenfalls durch die genannten Stationen verursacht. Ein abnehmender Trend, das heißt eine Annäherung der Temperaturverläufe der Stadtstationen untereinander, im Verlauf der Hitzewelle wie im oben beschriebenen Einzelfall konnte für keinen weiteren Fall bestätigt werden. Teilweise sind Zunahmen zu verzeichnen, teilweise Schwankungen in beide Richtungen. Ohne die beiden vegetationsbestandenen Stationen ist ebenfalls kein Trend zu erkennen.

Anhand der vorliegenden Einzelfälle mit Ausnahme des Falls in Tabelle 20 konnte kein abnehmender Kühleffekt der grünen Infrastruktur im Verlauf der Hitzeperiode festgestellt werden. Möglich wäre jedoch auch, dass die Stadtstationen ihr individuelles maximales Speichervermögen der umgebenden grauen Infrastruktur erreichen können und sich nicht mehr so stark aufheizen können wie am ersten Tag. Hierfür wären weiterführende Untersuchungen nötig sowie eine nähere Betrachtung der jeweils herrschenden meteorologischen Bedingungen und insbesondere der Energiebilanzen an den Standorten. Es ist davon auszugehen, dass die Anzahl der in dieser Arbeit analysierten Stationen nicht ausreicht, um einen möglicherweise vorhandenen eindeutigen Effekt festzustellen.

Literaturvergleich und Fazit zur Veränderung des UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode

Die Wechselwirkungen zwischen Hitzewellen und dem städtischen Wärmeineffekt sind vielschichtig und bisher wenig untersucht. Hitzeperioden führen nicht nur zu erhöhten Lufttemperaturen in Stadt und Umland, sie können auch den UHI-Effekt durch „synergetische Interaktionen“ verstärken (Li & Bou-Zeid, 2013). Schatz und Kucharik (2015) stellten fest, dass die Hitzebelastung an

sehr heißen Tagen in der Stadt Madison (Wisconsin, USA) höher und die städtische Wärmeinsel stärker als durchschnittlich ausgeprägt ist. Gleichzeitig wird auch von einer Verstärkung und Verlängerung von Hitzewellen in stark versiegelten Stadtgebieten durch städtische Wärmeinseln berichtet und unter anderem mit fehlender Vegetation und Bodenfeuchte begründet (Li & Bou-Zeid, 2013; Schatz & Kucharik, 2015). Weiterführende Erklärungsansätze für mögliche Wechselwirkungen zwischen der Ausprägung der städtischen Wärmeinsel und Hitzeperioden sind bei Li und Bou-Zeid (2013) nachzulesen. Eine Übertragung dieser komplexen Zusammenhänge auf konkrete Hitzeperioden in Dresden ist auf Basis der aktuell vorhandenen Datengrundlage nicht möglich.

Erwartet wurde eine Abnahme der nächtlichen Differenzen zwischen Stadt- und Umlandtemperaturen und damit eine Abschwächung des UHI-Effekts bei gleichzeitiger Zunahme der absoluten nächtlichen Lufttemperaturen im Verlauf der Hitzeperiode, wie es im in Tabelle 20 dargestellten Einzelfall zu sehen ist. Dessen Ergebnisse wurde von dem Großteil der weiteren Einzelfälle nicht bestätigt, wobei auch kein eindeutiger gegenläufiger Effekt zu erkennen war. Insgesamt kann somit in dieser Arbeit kein greifbarer Trend einer Abschwächung oder Verstärkung des UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode festgehalten werden. Die gewonnenen Erkenntnisse leisten dennoch eine wichtige Vorarbeit für weitere Untersuchungen mit mehr Hitzeperioden und Messstationen. Dabei könnte die relative Feuchte ebenfalls untersucht werden, um auch die zusätzliche Belastungssituation durch die Luftfeuchte zu betrachten. Außerdem wären insbesondere auch die Auswirkungen der Speichereffekte auf Gebäude und Innenräume interessant, um Maßnahmen zu ermitteln, die in Innenräumen für das Wohlbefinden der Menschen förderlich sind. Franck et al. (2013) stellten fest, dass die Stadtstruktur in Leipzig während einer Hitzewelle auch die Innenraumtemperatur in Gebäuden beeinflusste. In den Innenräumen ergab sich vor allem am Abend ein starker Einfluss auf das subjektive Hitzeempfinden. Der Forschungsbedarf hierzu ist jedoch noch groß.

4.6 Bewertung der Stationen anhand lokaler Klimazonen nach Steward und Oke (2012)

Für die Gestaltung einer nachhaltigen, widerstandsfähigen und klimaangepassten Stadt besteht ein Bedarf an räumlich detaillierten Informationen über vorhandene (inner-)städtische Landschaften. Aus diesen können evidenzbasierte klimasensitive Stadtplanungsstrategien geschaffen werden (Demuzere et al., 2022). Demuzere et al. (2023) stellen eine globale Karte lokaler Klimazonen (en. Local Climate Zones, LCZ) mit einer räumlichen Auflösung von 100 m zur Verfügung (Version 3, Stand 08.10.2023; Ausschnitt für Dresden: Ordner 4, Kapitel 4.6 im elektronischen Anhang). Die Karte wurde aus mehreren Erdbeobachtungsdatensätzen und LCZ-Klassifizierungen abgeleitet und repräsentiert das Nominaljahr 2018. Anhand der universellen urbanen LCZ-Typologie nach Stewart und Oke (2012) können städtische Gebiete unterschieden und typische Kombinationen mikroskaliger Landbedeckungen sowie damit verbundene physikalische Eigenschaften berücksichtigt werden.

Das LCZ-Schema unterscheidet sich von anderen Landnutzungsschemata durch seinen Fokus auf städtische und ländliche Landschaftstypen. Diese werden durch zehn bebaute (LCZ 1-10) und sieben natürliche Bodenbedeckungstypen (LCZ A-G) beschrieben (Abbildung 31 in Kapitel 8.4 im Anhang). Details zu den einzelnen Klassen sowie zur Methodik sind bei Stewart und Oke (2012) und Demuzere et al. (2022) nachzulesen. Der Vorteil dieses Schemas liegt in der Vielfalt an städtischen Klassen, die global konsistent sind und die die innerstädtische Variabilität der Oberflächenformen und Bodenfunktionen erfassen können (Demuzere et al., 2022). Dazu zählen die Bebauungsdichte, die Straßenbreiten, die Gebäudehöhen, die Himmelssicht, die Baumaterialien, der Anteil der begrünten bzw. versiegelter Flächen sowie der anthropogene Wärmefluss (Demuzere et al., 2022; Kuttler, 2019). Für eine klimaangepasste Stadtplanung ist das Verständnis der Interaktionen dieser verschiedenen innerstädtischen Formen mit der Atmosphäre essenziell (Demuzere et al., 2022). Gleichzeitig dient dieses standardisierte Konzept dem Verständnis und der Interpretation von Lufttemperaturunterschieden im städtischen Kontext sowie der Verbesserung der Kommunikation und der Vergleichbarkeit von Ergebnissen zum Ausmaß der städtischen Wärmeinsel zwischen Städten. Durch Zuhilfenahme der Standort-Metadaten sollen Ursachen besser erforscht und Wärmeinseln besser kontrolliert werden können (Fenner et al., 2014; Stewart & Oke, 2012).

Die Zuordnung der LCZ zu den Stationsumgebungen in Dresden stellt somit eine Fortführung der in den Steckbriefen erfassten Umgebungsbedingungen (Kapitel 8.1 im Anhang) dar. Für die untersuchten Stationen ergibt sich hinsichtlich der räumlichen Zuordnung zu den lokalen Klimazonen folgendes Ergebnis (Tabelle 21):

Tabelle 21: Lokale Klimazonen (LCZ) an der Station inkl. Beschreibung, sowie im Umkreis von 50 m um die Station. Datengrundlage und Karte: Demuzere et al. (2023), Kartenausschnitt Dresden: Ordner 4, Kapitel 4.6 im elektronischen Anhang. Beschreibungen: Demuzere et al. (2022) nach Stewart und Oke (2012), siehe auch Abbildung 31 in Kapitel 8.4 im Anhang.

Station	LCZ inklusive Beschreibung	Zusätzliche LCZ im 50 m-Radius
NEU	<u>2 – Compact midrise:</u> Dichte Anordnung von Gebäuden mittlerer Höhe (3-9 Stockwerke). Wenige oder keine Bäume. Meist gepflasterter Boden. Baumaterialien: Stein, Ziegel, Beton.	<u>5 – Open midrise</u> (siehe WIN)
WIN	<u>5 – Open midrise:</u> Offene Anordnung von Gebäuden mittlerer Höhe (3-9 Stockwerke). Reichlich durchlässige Bodenbedeckung (niedrige Pflanzen, verstreute Bäume). Baumaterialien: Beton, Stahl, Stein, Glas.	-
STR	<u>6 – Open low-rise:</u> Offene Anordnung von Flachbauten (1-3 Stockwerke). Reichlich durchlässige Bodenbedeckung (niedrige Pflanzen, vereinzelt Bäume). Baumaterialien: Holz, Ziegel, Stein, Fliesen, Beton.	<u>8 – Large low-rise</u> (siehe BER)

BER	<u>8 – Large low-rise:</u> Offene Anordnung von großen Flachbauten (1-3 Stockwerke). Wenige oder keine Bäume. Meist gepflasterter Boden. Baumaterialien: Stahl, Beton, Metall, Stein.	<u>4 – Open high-rise:</u> Offene Anordnung von hohen Gebäuden mit mehreren Dutzend Stockwerken. Reichlich durchlässige Bodenbedeckung (niedrige Pflanzen, vereinzelte Bäume). Baumaterialien: Beton, Stahl, Stein und Glas. <u>5 – Open midrise</u> (siehe WIN)
NOR	<u>8 – Large low-rise</u> (siehe BER)	<u>5 – Open midrise</u> (siehe WIN)
BOT	<u>8 – Large low-rise</u> (siehe BER)	<u>B – Scattered trees</u> (siehe GEB2)
PIL	<u>9 – Sparsely built:</u> Spärliche Anordnung von kleinen/ mittelgroßen Gebäuden in natürlicher Umgebung. Reichlich durchlässige Bodenbedeckung (niedrige Pflanzen, vereinzelte Bäume).	<u>B – Scattered trees</u> (siehe GEB2)
GEB2	<u>B – Scattered trees:</u> Leicht bewaldete Landschaft mit laubabwerfenden und/ oder immergrünen Bäumen. Bodenbedeckung meist durchlässig (niedrige Pflanzen). Funktionen: natürlicher Wald, Baumzucht, Stadtpark.	<u>6 – Open low-rise</u> (siehe STR)
GEB4	<u>B – Scattered trees</u> (siehe GEB2)	-
HOS	<u>D – Low plants:</u> Eigenschaftslose Landschaft aus Gras oder krautigen (Nutz-)Pflanzen. Wenige oder keine Bäume. Funktionen: natürliches Grünland, Ackerland, Stadtpark.	-

Die Ergebnisse der Zuordnung von LCZ zeigen grundsätzlich eine sehr gute Übereinstimmung mit den erstellten Steckbriefen. Die weniger passende Zuordnung der Station BOT zur LCZ 8 ist der räumlichen Auflösung von 100 m geschuldet. Die Station befindet sich nahe an der Grenze zur LCZ B, welche eine sehr gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Bedingungen darstellt. Einige Stationen können innerhalb eines 50 m-Umkreises mehr als einer LCZ zugeordnet werden. Diese Gegebenheit erschwert eine eindeutige Interpretation und Ursachenforschung, was bereits im Rahmen dieser Arbeit für einige Standorte (z. B. NEU, NOR) deutlich wurde. Hierfür könnte eine Kombination der Auswertung mit anderen Klassifikationsschemata, die beispielsweise auch mikroklimatische Eigenschaften des Gebiets wie die Luftfeuchte oder die Windverhältnisse miteinbeziehen, hilfreich sein.

Die Zuordnung von LCZ unterstützt die in dieser Arbeit getroffenen Aussagen zum Einfluss von Bebauungsstruktur, Horizonteneinschränkung und Versiegelungsgrad. Die Station NEU zeichnet sich durch ihre dicht mit Gebäuden mittlerer Höhe bebaute und hoch versiegelte Stationsumgebung im Zentrum Dresdens aus. Die ebenfalls städtisch geprägten Stationsumgebungen von BER und NOR zeigen eine offenere Bebauung mit großen flachen Gebäuden und ebenfalls eine hohe Versiegelung, bedingt durch die großen Verkehrsachsen und Parkflächen. Gegenüber NEU wird WIN durch

einen weniger stark versiegelten Untergrund und einen größeren Baumbestand charakterisiert. Dies lässt sich ebenfalls bestätigen, wenn angenommen wird, dass der an der Station NEU befindliche Spielplatz mit Grünfläche aufgrund der räumlichen Auflösung von 100 m unbeachtet bleibt.

Im Vergleich zu diesen städtisch geprägten Stationen konnten für BOT, GEB2, GEB4, HOS, STR und PIL in dieser Arbeit deutlich niedrigere Nachttemperaturen ermittelt werden. Dies lässt sich auch anhand der LCZ, in Übereinstimmung mit bisherigen Interpretationen, erläutern. Den meisten Stationen wird eine LCZ mit natürlicher Bodenbedeckung in direkter und/ oder weiterer Umgebung zugeordnet. Der vorhandene Baumbestand mit temperatenausgleichenden Effekten spiegelt sich in der Zuordnung der LCZ bei BOT und GEB2, jedoch weniger bei GEB4, wider. Die Kleingartenanlagen bei STR und GEB2 werden ebenfalls in der Zuordnung der LCZ berücksichtigt. Insgesamt werden der geringe Versiegelungs- und Bebauungsgrad sowie der hohe Anteil an grüner Infrastruktur deutlich. Eine räumliche Differenzierung der Temperaturunterschiede und der Ausprägung der UHI anhand der LCZ kann damit durchaus erfolgen. Der enge Zusammenhang zwischen Bodenbedeckung, Bebauungsstruktur und mikroklimatischen Effekte kann bestätigt werden. Die sinnvolle Verwendung von HOS als Referenzstation im Umland lässt sich anhand der zugeordneten LCZ einer Grünlandschaft mit niedrigem Bewuchs (LCZ D) bestätigen. Die Verwendung der LCZ D als Referenzzone zur Ermittlung des UHI-Effekts hat sich bereits bei Stewart und Oke (2012) sowie in zahlreichen weiteren Studien (z. B. Benjamin et al., 2021; Molnár et al., 2019) bewährt.

Die thermischen Unterschiede zur Stadt werden durch die Zuordnung der entsprechenden LCZ sehr gut repräsentiert. Blaue Infrastruktur (LCZ G – Gewässer; Demuzere et al., 2022) spielt in den Stationsumgebungen keine Rolle. Eine Station innerhalb der LCZ G, z. B. entlang der Elbe (siehe Kartenausschnitt Dresden: Ordner 4, Kapitel 4.6 im elektronischen Anhang), ist daher zu empfehlen. Die Station NEU liegt in einem von zwei größeren zusammenhängenden Gebieten in Dresden, die die LCZ 2 aufweisen. Eine zusätzliche Station im zweiten Gebiet am Altmarkt würde die Klasse mit hoher stadtklimatischer Belastung besser repräsentieren.

4.7 Fehlerbetrachtung und Unsicherheitsdiskussion

Die Fehlerbetrachtung umfasst gerätetechnische Unsicherheiten, aus Umgebungsfaktoren resultierende Unsicherheiten sowie Unterschiede, die durch unterschiedliche Messbedingungen existieren. Hinzu kommen die während der Datenauswertung getroffenen Auswahlentscheidungen, die den verwendeten Datenumfang eingrenzen und ebenfalls zu Unsicherheiten beitragen können.

4.7.1 Gerätetechnische Unsicherheiten

Zu den gerätetechnischen Unsicherheiten zählen die in den technischen Datenblättern genannten Messunsicherheiten und Auflösungen. Im Folgenden wird nur auf die Sensorik zur Messung der

Lufttemperatur, die an allen Stationen gemessen wurde, eingegangen. Für die übrigen Größen an der Station KLO gelten die üblichen Standards des DWD. Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang enthält die Bezeichnungen der verwendeten Sensorik. Die technischen Datenblätter der Hersteller befinden sich in Ordner 2 im elektronischen Anhang und wurden jeweils per Mail angefragt.

Für die Temperatursensoren der Firma Galltec + Mela, die an den Stationen BER, NOR und WIN des LfULG verwendet werden, liegt die Messunsicherheit bei $\pm 0,3$ K im Messbereich von 10 °C bis 40 °C (Pausch & Kühne, 2020). Dabei besitzt der Strahlungsschutz laut Datenblatt keine aktive Ventilation. An den Stationen BOT, HOS, KLO, NEU und STR, die vom DWD betrieben werden, befinden sich Platin-Widerstandsthermometer der Firma Friedrichs mit einer Messunsicherheit von $\pm 0,1$ K bei 0 °C. Dieser Wert wird auch für einen ähnlichen Sensor der Firma Friedrichs für die Stationen GEB2 und GEB4 angegeben. Für die Messsensorik an der Station PIL des LfULG/ BfUL wird vom Hersteller TOSS ein absoluter Messfehler von $\pm 0,15$ K im Messbereich von -20 °C bis $+50$ °C angegeben. Damit weisen die Sensoren der Luftgüte-Stationen des LFULG die höchsten Unsicherheiten auf. Der insgesamt mögliche Messbereich aller Sensoren (siehe Datenblätter in Ordner 2 im elektronischen Anhang) wurde in den ausgewählten Zeiträumen nicht unter- bzw. überschritten.

Im Vergleich zwischen den Stationen liegen außerdem je nach Hersteller Unsicherheitsquellen durch die passive oder aktive Belüftung und die Art des Strahlungsschutzes, die Sensorträgheit, die verwendeten Materialien und die Alterung der Sensorik, die Rundung der Werte sowie die verschiedenen Wartungs- und Kalibrierintervalle vor. Es wird vorausgesetzt, dass Wartung und Kalibrierung anhand der einschlägigen Normen und Richtlinien erfolgen. Trotz eines gleichen Gerätetyps kann es zu minimalen Unterschieden kommen, sodass zwei gleiche Geräte keine identischen Werte messen. Hier kann auch eine nicht exakt gleiche Messposition eine Rolle spielen. Diese Unsicherheiten sind im Vergleich zu den übrigen als gering einzustufen. Eine Auswertung zur Korrektur und Unsicherheitsbestimmung der Temperaturmessungen an den Klimareferenzstationen des DWD geht auf verschiedene Unsicherheiten ein (Brinckmann & Dirksen, 2020). Dabei wurde ein Temperaturfehler durch solare Strahlung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe und der Globalstrahlung abgeschätzt. In dieser Arbeit wurde die Windgeschwindigkeit nur nachts zur Auswahl von austauscharmen Strahlungsnächten bis $\leq 2,7$ m/s untersucht und dabei jeweils $\geq 1,0$ m/s im Median der sieben Nachtstunden erreicht. Für diese Windgeschwindigkeiten ist laut Brinckmann und Dirksen (2020) bei fehlender Solarstrahlung in der Nacht von einem geringen Fehler von $\pm 0,00$ - $0,05$ K auszugehen. An Strahlungstagen werden deutlich größere Unsicherheiten von meist $\pm 0,0$ - $0,3$ K und maximal $\pm 0,7$ K geschätzt.

Bezüglich der Kalibrierungsfehler ergab eine Auswertung von 903 Temperaturkalibrierungen im Standardverfahren des DWD zwischen 2018 und 2019 eine Abweichung zur Referenz von etwa $\pm 0,1$ K (95%-Bereich) bzw. eine Standardunsicherheit von $\pm 0,05$ K im Temperaturbereich von -30 °C bis $+40$ °C (Brinckmann & Dirksen, 2020). Zudem wurde eine Sensorträgheit von meist $\pm 0,0-0,2$ K ermittelt. Eine Rundung von Werten auf eine statt zwei Dezimalstellen bei der Speicherung führt nach Brinckmann und Dirksen (2020) zudem zu Unsicherheiten von $\pm 0,0475$ K (95%-Bereich) bzw. einer Standardunsicherheit von $\pm 0,03$ K unter Annahme einer Gleichverteilung. Es ist nicht für alle Stationen bekannt, ob eine höhere Auflösung von zwei Nachkommastellen bei der Ermittlung der Werte zur Verfügung stand, für die die Unsicherheit durch Rundung vernachlässigbar klein wäre. In Bezug auf die statistische Unsicherheit durch leicht unterschiedliche Messpositionen und die Geräteelektronik werden mittlere Standardunsicherheiten von $\pm 0,01$ K angegeben, wobei $\pm 0,05$ K nur sehr selten überschritten werden (Brinckmann & Dirksen, 2020).

Insgesamt stellen die Unsicherheiten durch die Strahlung den größten Einflussfaktor dar, gefolgt von der Sensorträgheit. Für DWD-Stationen konnten insgesamt Standardunsicherheiten von meist $\pm 0,05$ K bis $\pm 0,45$ K nach erfolgter Korrektur ermittelt werden (Brinckmann & Dirksen, 2020), welche bei einer Aussagekraft der Ergebnisse dieser Arbeit von einer Dezimalstelle als gering einzustufen sind. Aufgrund der fehlenden Datengrundlage wird auch an den anderen Stationen von ähnlichen gerätetechnischen Fehlerwerten wie an den Stationen des DWD ausgegangen. Für die genannten Unsicherheiten wären gesonderte Vergleichsmessungen zur gleichen Zeit am gleichen Ort mit einer anschließenden Kalibrierung sinnvoll. Damit könnte auch ein möglicher Zeitdrift erkannt werden, dessen Bedeutung mit einer höheren Auflösung der Daten steigt. Die tatsächlichen Messdatenreihen müssten hierfür jedoch unterbrochen werden.

Insgesamt sind die gerätetechnischen Unsicherheiten im Vergleich zu den weiteren Unsicherheiten als gering in ihrem Einfluss auf die Lufttemperaturmessung mit einer Genauigkeit von einer Nachkommastelle einzustufen.

4.7.2 Unsicherheiten aufgrund von Umgebungsfaktoren

Die aus Umgebungsfaktoren resultierenden Unsicherheiten umfassen die Beschaffenheit des Untergrunds, die Beschattungseffekte durch die umgebende Bebauung oder grüne Infrastrukturen, sowie weitere lokale Einflüsse beispielsweise durch spiegelnde Scheiben (CDC, 2018). Insbesondere die Beschattung müsste durch Webcams im täglichen und saisonalen Verlauf untersucht werden, um Einflüsse zweifelsfrei bestätigen zu können. Auch die Witterung spielt eine Rolle, deren Effekt kann jedoch nicht weiter quantifiziert werden und muss im Einzelfall analysiert werden.

4.7.3 Unterschiedliche Messbedingungen und Qualitätsanforderungen

Zunächst ist festzuhalten, dass die Betreiber der verschiedenen Messnetze unterschiedliche Zwecke, beispielsweise die Lufthygiene, Stadtklima oder die Agrarmeteorologie, verfolgen, wodurch die Sensorik und die Messstationen unterschiedlichen Standards und Qualitätsanforderungen unterliegen. Alle Stationen des DWD außer NEU sind nach den WMO-Vorschriften eingerichtet und betrieben. Alle verwendeten Datensätze des DWD lagen mit Qualitätsniveau 3 vor, welches diese in Routine mit dem Verfahren QUALIMET von Spengler (2002) auf Vollständigkeit, zeitliche und räumliche Konsistenz, und gegen statistische Schwellwerte ab 2003 prüft und korrigiert (CDC, 2019). Weitere Informationen zu Qualitätsprüfung und Unsicherheitsabschätzung können bei Kaspar et al. (2013) nachgelesen werden. Die Station NEU aus dem Sondermessnetz Stadtklima wird nicht entsprechend den üblichen WMO-Anforderungen, sondern auf der Grundlage der Empfehlungen der „Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites“ (Oke, 2006) eingerichtet. Dabei gelten folgende Kriterien: Innenstadtlage, typischer Messort für das jeweilige Quartier/ Viertel, zentrierte Lage innerhalb einheitlicher Bebauung, typischer Stationsuntergrund (z. B. Versiegelung, Grünfläche, Schotter etc.) der Stationsumgebung, Mindestabstand zu Bebauung von 5 m, keine Lage innerhalb von Parks oder unter Bäumen (CDC, 2018; Oke, 2006). Das zweite und vierte sowie insbesondere das letzte Kriterium können für die Station NEU aufgrund der Installation auf einer für das Viertel untypischen grünen Freifläche nicht zweifelsfrei bestätigt werden. Die verwendeten Standards an allen weiteren Stationen sind nicht bekannt. Es wird aber davon ausgegangen, dass sie sich grundsätzlich an den Standards des DWD orientieren.

Jedoch existieren einige unterschiedliche Messbedingungen. Dazu zählen die abweichenden Höhen der Sensoren über Grund an den Stationen des LfULG von 3,3-4,2 m, welche sich zudem auf einem Container mit eigenen Einflüssen auf Strahlung und folglich Lufttemperatur befinden. In allen anderen Fällen wurde die Lufttemperatur in 2 m Höhe über Grund gemessen. Eine Höhenkorrektur war jedoch nicht erforderlich (siehe Kapitel 3.3.2). Zudem sind die Sensoren an verschiedenen Auslegern angebracht und weisen eine unterschiedliche Exposition zur Sonne auf, wodurch die Vergleichbarkeit der Datensätze erschwert wird.

4.7.4 Unsicherheiten bei der Datenauswertung

Im Rahmen der Datenauswertung wurden verschiedene Auswahlentscheidungen anhand von möglichst objektiven Kriterien getroffen, die den Datenumfang eingrenzen und vergleichbar machen sollten. Dadurch wurden jedoch teilweise Daten aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Die erfolgte Schwellenwertbetrachtung (Teil der Auswertungstabelle in Ordner 3, Kapitel 3.4 im elektronischen Anhang) ergab für die 80%-Schwelle der maximal möglichen täglichen Globalstrahlungssumme insgesamt neun Tage, an denen die GS um maximal 2% zu niedrig ist, um den

Schwellenwert zu erreichen (entspricht maximal $47 \text{ J}/(\text{cm}^2 \text{ d})$ Differenz). Davon weisen drei Tage eine maximale Differenz von 1% (entspricht $7\text{-}18 \text{ J}/(\text{cm}^2 \text{ d})$) und drei weitere Tage Differenzen zwischen 1% und 1,5% auf. Betroffen ist vor allem das Jahr 2018 mit acht der ermittelten neun Tage. Zwischen 2% und 3% kommen nur zwei weitere Tage hinzu, zwischen 3% und 5% weitere zwölf Tage. Somit ist keine klare Grenze nahe der festgelegten 80% absehbar. Es muss damit gerechnet werden, dass aufgrund der Entscheidung für diese Grenze wenige Einzeltage ausgeschlossen wurden, an denen ebenfalls Strahlungstage und -nächte vorlagen. Durch die pauschale Erhöhung der potenziellen täglichen Globalstrahlungssummen aus dem Jahr 1997 um 5% entstehen ebenfalls Unsicherheiten bezüglich einer klaren Grenzziehung. Hier wären aktuelle Untersuchungen der potenziellen täglichen Globalstrahlungssummen für den Raum Dresden zur Verifizierung empfehlenswert.

Hinsichtlich der Temperaturschwelle bei $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ergeben sich über die Jahre 2019-2022 verteilt maximal 6 Tage im Jahr, an denen mindestens $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$, aber nicht $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht werden (maximal 4 h am Tag). Davon sind je 1-2 Tage pro Jahr festzustellen, an denen mindestens $24,9 \text{ }^\circ\text{C}$, aber nicht $25,0 \text{ }^\circ\text{C}$ erreicht werden (maximal 2 h am Tag). Auch hier ist von einem fließenden Übergang auszugehen, unabhängig von dem konkreten Schwellenwert oder einer festen Definition. Die Grenze von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ist bereits als konservativ für einen Tag mit Wärmebelastung anzusehen und erfolgte in Anlehnung an die Definition des DWD für einen Sommertag (DWD, o. J.b). Wählt man einen zu niedrigen Schwellenwert, erhielten die für diese Auswertung interessanten Tage mit hohen Temperaturen in der Gesamtbetrachtung zudem weniger Gewicht. Dennoch ist auch durch diese Grenzziehung davon auszugehen, dass potenziell geeignete Datensätze von der weiteren Auswertung ausgeschlossen wurden. Dies gilt insbesondere für das Jahr 2021, für das bei einer Schwelle von $24,7 \text{ }^\circ\text{C}$ weitere acht Untersuchungstage dazugekommen wären.

Die Schwelle für die Windgeschwindigkeit bei $2,7 \text{ m/s}$ ergab sich, wie bereits in Kapitel 3.4 erläutert wurde, aus der Literatur (GEO-NET Umweltconsulting GmbH, 2021; Zimmermann, 2015). Bei einer Schwelle von maximal $2,8 \text{ m/s}$ würde der Datensatz je nach Jahr um 0-2 Tage (maximal + 7%) erweitert werden, bei einer Schwelle von $3,0 \text{ m/s}$ um 3-5 Tage (maximal + 19%), und für $3,3 \text{ m/s}$ um 5-11 Tage (maximal + 35%). Diese Grenze wurde jedoch ausschließlich zur Bestätigung der auf Grundlage von Strahlung und Temperatur getroffenen Auswahlentscheidung gezogen, sodass die Schwelle keinen tatsächlichen Ausschluss nach sich zieht.

Die Eingrenzung des Zeitraums von dem astronomischen Sommerhalbjahr auf den meteorologischen Sommer führte dazu, dass ein Tag im April 2018, zwei bis vier Tage im Mai 2018, 2021 und 2022 sowie ein bis acht Tage im September 2018-2021 ausgeschlossen wurden. Damit wurde die Anzahl auswertbarer Tage für 2018 um -27% im Vergleich zum Vorwert reduziert, für 2019 um -3%,

für 2020 um -22%, für 2021 um -12% und für 2022 um -9%. Unter der Voraussetzung, dass die Bedingung von mindestens zwei aufeinanderfolgenden Strahlungstagen besteht, ergeben sich folgende Resultate: kein Ausschluss im März und April, ein Ausschluss von je zwei Tagen im Mai 2018 und 2021 sowie ein Ausschluss von acht bzw. drei Tagen im September 2018 bzw. 2021. Damit fällt die prozentuale Reduktion wie folgt aus: für 2018 um -26%, für 2019 um -0%, für 2020 um -19%, für 2021 um -13% und für 2022 um -0%.

Während sich für die Jahre 2019 und 2022 nahezu kein Effekt auf die Datengrundlage durch die Eingrenzung ergibt, werden insbesondere im Jahr 2018, aber auch in den Jahren 2020 und 2021 viele Zeiträume gestrichen, die die Kriterien an 80% der potenziell täglichen GS sowie 25 °C in mindestens einem Temperaturstundenmittel pro Tag erreichen würden. Da in dieser Arbeit kein Vergleich zwischen den Jahren angestrebt wird, ist bei einer insgesamten Reduktion der Datenzeiträume um etwa 12% bei Entfallen aller Auswahltage der Monate März bis Mai und September unverkennbar festzustellen, dass diese im Vergleich zu den Sommermonaten deutlich unterrepräsentiert sind. Zudem wäre die Datengrundlage im Vergleich zu den Sommermonaten ohnehin zu gering, um aussagekräftige Vergleiche zwischen den Monaten anstreben zu können.

Weitere Unsicherheiten bei der Datenauswertung umfassen die unterschiedliche Datenqualität durch Datenlücken. Es wurde ein Untersuchungszeitraum von 2018 bis 2022 festgelegt, um ein Maximum an verfügbaren Datensätzen verschiedener Stationen zu erreichen. Jedoch deckt auch dieser insbesondere die Stationen BOT, GEB2, GEB4 und NEU zu großen Teilen nicht ab, da diese erst im Winter 2019 oder Sommer 2020 in Betrieb genommen wurden. Für die Unsicherheiten bezüglich der Vergleichbarkeit der Daten bei Mittelung auf Stundenniveau wird auf die Ergebnisse in Kapitel 3.3.3 verwiesen.

4.7.5 Unsicherheiten bei den Ergebnissen

Insgesamt ist festzuhalten, dass nicht alle Fragen anhand von einzelnen Stationen beantwortet werden können. Oftmals sind Temperaturunterschiede auch nicht einem einzigen Einflussfaktor zuordenbar. Es wäre eine größere Datengrundlage nötig, um kleinskalige Phänomene untersuchen und zweifelsfrei bestätigen oder widerlegen zu können. Dies umfasst mehr und umfassender ausgestattete Stationen, aber auch die Durchführung von Transektmessungen für differenziertere Aussagen zur räumlichen Verteilung von lokalen Besonderheiten und dem quantitativen Einfluss von blauer und grüner Infrastruktur in der Umgebung der Messstationen. Weitere Empfehlungen werden in Kapitel 5 gegeben. Hinzu kommt die oftmals fehlende Vergleichbarkeit mit Literaturergebnissen aufgrund der zuvor genannten Unsicherheiten und unterschiedlichen Messbedingungen. Teilweise liegen noch keine Ergebnisse für Dresden vor, die die vorliegenden Resultate verifizieren könnten, sodass auf Literatur anderer Städte zurückgegriffen wurde.

5 Ableitung von Handlungsempfehlungen

Forschungsfrage 9:

>> Welche Schlussfolgerungen ergeben sich daraus für wirksame Anpassungsmaßnahmen in Stadtquartieren? <<

Messtechnische und methodische Empfehlungen

Bezüglich der technischen Anforderungen an den bestehenden Messstationen ist zu empfehlen, dass Messtechnik verwendet wird, die den energetischen Ansprüchen einer zeitlichen Auflösung von mindestens 10 min, besser 1 min, gerecht wird. Zudem muss die regelmäßige Wartung, Kontrolle und wissenschaftliche Begleitung der Messungen sichergestellt werden. Eine hohe Qualität der Messwerte ist unerlässlich für eine wirksame Maßnahmenplanung für die Stadt Dresden.

Es muss zudem das Bewusstsein dafür geschaffen werden, dass nur dann gute Ergebnisse für einen räumlichen Vergleich in Dresden erzielt werden können, wenn die Daten untereinander vergleichbar sind. Dazu zählen ausreichende Stationsmetadaten zur Vergleichbarkeit der Datenreihen (Sensorik, Standort) und Informationen zum zeitlich variablen Umfeld, aber auch insgesamt lange Zeitreihen an möglichst vielen Messstationen. Deshalb ist insbesondere zu empfehlen, auch die 10 min-Messdaten des LfULG zur langfristigen Verwendung systematisch zu speichern, welche bisher nur temporär bis zur Überschreibung des Ringspeichers verfügbar sind. Wenn möglich, sind direkte Vergleichsmessungen aller Messstationen im Freien sowie eine Kalibrierung der Messgeräte in einer Klimakammer durchzuführen. An mehreren Stellen in dieser Arbeit wird deutlich, dass eine größere Datengrundlage sowie die Betrachtung mehr geeigneter Einzelfällen nötig gewesen wären, um aussagekräftigere Resultate zu erzielen. Eine Ausweitung war jedoch zum Zeitpunkt der Arbeit aufgrund der kurzen Messzeiträume einiger Stationen (BOT, GEB2, GEB4, NEU) nicht möglich.

Für die Abbildung kleinräumiger Effekte in der Stadtstruktur ist die Erweiterung der Datengrundlage von Dauermessstationen durch räumliche Interpolation mit Messdaten aus Projekt-Messkampagnen und mobilen Messungen sowie die Verschneidung mit räumlich hochaufgelösten Daten aus der Satellitenfernerkundung zu empfehlen.

Zu einer besseren Vergleichbarkeit zählt aber auch eine angemessene und in ihrer Qualität und Messmethodik vergleichbare Zusatzausstattung der Messstationen. Anzustreben wäre insbesondere die langfristige und systematische Messung der Windverhältnisse an allen in dieser Arbeit verwendeten sowie zukünftigen Stationen oder in deren näherer Umgebung. Nur so können quantitative stationsspezifische Aussagen zu den lokalen Windverhältnissen und der Fernwirkung von blauer Infrastruktur getroffen und die Unsicherheiten verringert werden. Dies würde eine wichtige Datengrundlage für stadtplanerische Entscheidungen bezüglich der Wirksamkeit und Förderung

blauer Infrastruktur in Dresden schaffen. Hilfreich wären für diese Fragestellung zudem Transektmessungen zur Analyse der Reichweite des Gewässereinflusses in verschiedenen elbnahen Stadtgebieten in Abhängigkeit von der Entfernung zum Gewässerverlauf. Auch hinsichtlich des Kaltluftinflusses wären stationsnahe Transektmessungen an den Umlandstationen zu empfehlen. Eine umfassende Aktualisierung des 2008 angefertigten Stadtklimagutachtens mit Kaltluftanalyse wäre ebenfalls anzustreben und anschließend in alle städtischen Planungsverfahren zu integrieren.

Bezüglich der Fragestellungen zum Einfluss grauer Infrastruktur, insbesondere während längerer Hitzeperioden, sind neben Temperaturmessungen gezielte Messungen an den Stadtstationen zu den Strahlungs- und Energiebilanzen und dem Speicherverhalten umgebender Oberflächen empfehlenswert. Dies gilt insbesondere für die Stationen des LfULG, deren Sensorik auf Containern installiert ist und damit speziellen Strahlungs- und Speicherbedingungen in der Umgebung unterliegt. Für eine bessere Quantifizierung der Ursachen des UHI-Effekts ist die Messung dieser Größen auch an den Umlandstationen relevant. Außerdem sollte die relative Feuchte ebenfalls flächendeckend untersucht werden, um die Belastungssituation durch die Luftfeuchte, aber auch die Folgen geringer städtischer Luftfeuchte auf urbane Grünflächen und Bäume zu betrachten. Interessant wäre zudem, die Auswirkungen der Speichereffekte auf Gebäude und Innenräume zu untersuchen, um Maßnahmen zu ermitteln, die in Innenräumen für das Wohlbefinden der Menschen zu tätigen sind.

Ausbau des Messnetzwerks

Für zukünftige kleinräumige mikroklimatische Untersuchungen ist ein gutes Netzwerk von über das Stadtgebiet verteilten und gut ausgestatteten Dauermessstellen mit einer qualitativ hochwertigen, kalibrierten und regelmäßig gewarteten Messtechnik unerlässlich. Nur so können kleinskalige Temperaturunterschiede richtig erfasst und mögliche Ursachen erforscht werden. Daher ist die Installation weiterer Messstationen und der Aufbau eines dichteren Messnetzwerks dringend zu empfehlen. Bisher fehlt ein Monitoring der Altstadt, welche durchaus Unterschiede in der Lufttemperatur zwischen voll versiegelten Plätzen und teils vorhandenen grünen und blauen Infrastrukturen, beispielweise an der Parkanlage des Zwingers oder am Elbufer, aufweisen könnte. Bereits bestehende grüne und blaue Infrastrukturen können ein wichtiger Ausgangspunkt für deren Ausweitung im Rahmen einer klimaangepassten Stadtplanung sein.

Bei Neuinstallationen ist auf eine Repräsentation des Stadtviertels zu achten, welche an der Stadtklimastation in der Neustadt durchaus kritisch betrachtet werden kann. Weitere Stationen wären zudem in bereits bestätigten Kaltluftgebieten ratsam, vor allem im Süden und Südosten der Stadt (z. B. entlang der Dohnaer Straße), wo die Stationsdichte bisher sehr gering ist, aber laut Sörgel et al. (2008) ausgeprägte Kaltluftströmungen vorliegen.

Die Station WIN wird bei begrenzten Ressourcen zur Betrachtung des gesamtstädtischen Wärmeinsel effekts empfohlen. Zu den Gründen zählen insbesondere der typische nächtliche Verlauf im Vergleich zur Referenzstation, fehlende Ausschlusskriterien bezüglich lokaler Besonderheiten (gegenüber BER, NEU, NOR) und die längere Zeitreihe mit hoher Datenauflösung (gegenüber NEU). Dennoch liegen auch dort Einflüsse durch die Beschattung durch Bäume, einen angrenzenden für das Viertel untypischen weitläufigen Parkplatz sowie die Installation der Sensorik auf einem Containerdach in 3,3 m Höhe vor. Generell sollte der Zweck der Auswertung ausschlaggebend für die Wahl einer geeigneten Stadtstation sein. Eine Verwendung der Station WIN zur Beurteilung der thermischen Belastung von Fußgängern wäre möglicherweise nicht zielführend.

Eine anhand der Ausführungen in dieser Arbeit neu zu schaffende Station ist zu empfehlen. Diese sollte möglichst den gesamtstädtischen Bedingungen entsprechen und nicht durch lokale grüne oder blaue Infrastruktur, die Art der Installation oder durch topografisch bedingte Strömungseffekte tendenziell beeinflusst werden. Das Stadtgebiet um die Station WIN, aber auch die Gebiete der Alt- und Neustadt bieten sich hierfür grundsätzlich als Standorte an. Insbesondere in der Innenstadt besteht ein Handlungsdruck zur Umsetzung konkreter Maßnahmen, da sich dort viele vulnerable Gruppen sowohl tagsüber als auch nachts aufhalten und der maximalen thermischen Belastung durch die städtische Wärmeinsel ausgesetzt sind. Hackenbruch (2018) weist darauf hin, dass sich die Hitzewarnungen des DWD hauptsächlich auf meteorologischen Messungen im Umland, beispielsweise auf dem Flughafengelände, beziehen und deshalb die tatsächliche Ausprägung der thermischen Belastung in der Kernstadt unterschätzt werden kann. Daher sind insbesondere für stadtplanerische Entscheidungen die Lufttemperaturen in der Nacht sowie Indizes zur thermischen Belastung am Tag in stark hitzebelasteten Stadtgebieten heranzuziehen, um die erforderliche Wirkung von Gegenmaßnahmen nicht zu niedrig anzusetzen.

Räumliche Netzwerke zur Datengenerierung wie Citizen Science oder das in Dresden 2023 gestartete Forschungsprojekt KLIPS sind hilfreiche Schritte, um ein dichteres Netzwerk an Informationen zu erhalten. Bei KLIPS handelt es sich um eine KI-basierte Lokalisierung und Simulation von Hitzeinseln in Dresden mithilfe von rund 300 Temperatur- und Feuchtesensoren mit dem Ziel einer innovativen Stadt- und Verkehrsplanung (LHD, 2023g). Ein ausgereiftes und wissenschaftlich begleitetes methodisches Vorgehen zur Gewinnung qualitätsgesicherter Daten ist hierbei unerlässlich.

Ausbau und Nutzung des Potenzials grüner und blauer Infrastrukturen bzw. von Kaltluftströmungen

In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass sowohl grüne als auch blaue Infrastrukturen sowie Kaltluftströmungen temperatursenkende Effekte mit sich bringen und damit von hoher stadtklimatischer Bedeutung sind. Ihre Erhaltung sowie Förderung und Ausweitung in dicht bebauten und versiegelten Stadtgebieten trägt – unter den erläuterten Bedingungen – zu einer positiven Entwicklung der

mikroklimatischen Situation und der Reduktion der Belastung durch die städtischen Wärmeinsel bei. Deshalb sollte die gezielte Offenhaltung oder Aufweitung von Kalt- und Frischluftschneisen von Bebauung sowie strategisch sinnvolle Pflanzungen von Bäumen auf Grünflächen durch stadtplanerische Maßnahmen und in der Bauleitplanung konsequent und flächendeckend umgesetzt werden.

Daneben ist, wie auch bei Henninger und Weber (2020) beschrieben, die Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils sowie eine durchdachte räumlich-funktionelle Vernetzung grüner Infrastrukturen anzustreben. Dies kann beispielsweise durch Alleen an geeigneten Stellen, Dach- oder Fassadenbegrünung oder die Anlage sogenannter Pocket Parks oder Mikroparks (kleiner Parkflächen auf bisher brachliegendem und ungenutztem Raum) geschehen. Die Verschattung von Gebäuden und Freiräumen durch Bäume am Tag kann durch Kombination mit künstlicher Verschattung erweitert werden. Beispielsweise können Sonnensegel gerade in eng verbauten Innenstädten eine geeignete Anpassungsmaßnahme an Tagen mit hoher Strahlungs- und Hitzebelastung darstellen.

Durch eine Vernetzung innerhalb der grauen, städtischen Infrastruktur kann sich die Wirkung grüner Strukturen zudem besser auch auf Wohngebiete und Stadtbereiche entfalten, die sonst nicht von dem kühlenden Einfluss großer Parks mit begrenzter Reichweite profitieren könnten.

Für die optimale Nutzung blauer Infrastruktur sind obige Empfehlungen bezüglich der Generierung einer qualitätsgesicherten Datengrundlage zu beachten. Insbesondere die Potenziale der Elbe sollten intensiver erforscht werden. Die Auenwiesen sind in ihrer Fläche und Funktion unbedingt zu erhalten.

Insgesamt muss das Bewusstsein geschaffen werden, dass der Klimawandel das Klima auch im Dresdener Raum bereits verändert hat (Bernhofer et al., 2015; LfULG, 2021; SMUL, 2008) und weiter verändern wird (LfULG, 2021; Spekat & Enke, 2020). Dies führt zu einer sich verschärfenden thermischen Belastung und zu einer immer weiter verringerten Lebens- und Aufenthaltsqualität insbesondere in den dicht besiedelten Stadtgebieten mit geringem Anteil an blau-grüner Infrastruktur. Dem lässt sich im Rahmen der Klimaanpassung nur durch weniger Neuversiegelung und konsequente Integration grüner und blauer Infrastrukturen sowie die Nutzung topografischer Potenziale begegnen.

6 Schlussfolgerung

Ziel dieser Masterarbeit war die Bewertung lokaler Besonderheiten des städtischen Wärmeinsel-effekts in Dresden anhand von Messdaten von Dauermessstationen verschiedener Messnetze sowie aus Projekt-Messkampagnen. Gegenstand der Untersuchungen waren auf sommerliche Strahlungstage folgende Nächte in den Sommern 2018-2022, für die maximale Ausprägungen der Intensität der städtischen Wärmeinsel erwartet wurden. Die Bewertung erfolgte in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren wie den thermischen Eigenschaften der grauen, grünen und blauen Infrastruktur sowie lokalen Besonderheiten der Topografie und der direkten Umgebung der Messstationen.

Die Ergebnisse zeigten einen konstanten mittleren gesamtstädtischen Wärmeineleffekt für Dresden über die Nachtstunden und alle untersuchten sommerlichen Hitzeperioden für 2018-2022 von $2,2 \text{ K} \pm 0,1 \text{ K}$ im Vergleich zur Umlandsstation Hosterwitz. Die maximale nächtliche lokale urbane Wärmeinsel bildete sich an der hochversiegelten Station Nord mit einer im Mittel um $3,1\text{-}3,7 \text{ K}$ höheren Temperatur (Maxima in Einzelfällen teilweise $> 5 \text{ K}$) gegenüber der Referenzstation aus. Dagegen stellten die Umgebung im Botanischen Garten und Strehlen mit geringem Versiegelungsgrad und hohem Anteil grüner Infrastruktur eine schwache lokale UHI und teilweise sogar lokale PCI dar.

Ein lokaler nächtlicher Kühleffekt durch unbebaute und offene Auenflächen (Hypothese 1) konnte für eine von zwei untersuchten Stationen mit mindestens $-1,0 \text{ K}$ und teilweise $-2,0 \text{ K}$ im Vergleich zur Referenzstation bestätigt werden. Eine Kühlwirkung durch topografisch bedingte Kaltluftströmungen im Elbtal (Hypothese 2) wurde ebenfalls für eine von zwei untersuchten Stationen mit mindestens $-0,9 \text{ K}$ und teilweise $-3,0 \text{ K}$ im Vergleich zur Referenzstation festgestellt. Zu den möglichen Ursachen für nur in geringem Maß wirksame Kaltluftströmungen zählen die in den Stationsumgebungen vorhandenen Baum- und Bebauungsstrukturen.

Innerstädtische kleinräumige Temperaturunterschiede lassen sich in großem Ausmaß mit dem Versiegelungsgrad bzw. Grünflächenanteil sowie mit der Bebauungsstruktur begründen. Versiegelte, aber unbebaute, offene Standorte wiesen in dieser Arbeit gegenüber versiegelten, dicht bebauten Standorten nachts nur dann eine geringere lokale UHI auf, wenn sie gleichzeitig einen hohen Anteil an grüner Infrastruktur und damit auch unversiegelte Flächen aufweisen konnten (Hypothese 3). An Standorten mit hohem effektivem Ausstrahlungsvermögen war der Effekt verstärkt. Die hohe stadtklimatische Bedeutung innerstädtischer Grünflächen, die auch bereits in kleinem Umfang eine Verringerung der nächtlichen thermischen Belastung bewirken können, wurde deutlich.

Für eine hohe Qualität der Messwerte wurde auf die Bedeutung der technischen Anforderungen durch entsprechende Ausstattung der Messstationen, regelmäßige Kontrolle, Kalibration und Wartung sowie wissenschaftliche Begleitung der Messungen hingewiesen. Eine höhere Vergleichbarkeit

der Datenreihen ist zudem mithilfe ausreichender Stationsmetadaten, aber auch langer Zeitreihen an möglichst vielen Messstationen erreichbar. Für die Abbildung kleinräumiger Effekte in der Stadtstruktur ist eine Kombination mit Daten aus Projekt-Messkampagnen, mobilen Messungen sowie der Satellitenfernerkundung zu empfehlen. Lokalklimatische Effekte können ebenfalls durch angemessene und in ihrer Qualität und Messmethodik vergleichbare Zusatzausstattung der Messstationen besser nachvollzogen werden. Dazu zählen die Messung der lokalen Windverhältnisse als wichtige Datengrundlage für stadtplanerische Entscheidungen bezüglich der Wirksamkeit blauer Infrastruktur, aber auch eine aktualisierte Kaltluftanalyse zum Einfluss topografisch bedingter Effekte. Die gezielte Messung von Strahlungs- und Energiebilanzen und dem Speicherverhalten umgebender Oberflächen ist für ein besseres Verständnis der Rolle grauer Infrastruktur ebenso zu empfehlen. Außerdem sollte die relative Feuchte ebenfalls flächendeckend untersucht werden, um die Belastungssituation durch die Luftfeuchte, aber auch die Folgen geringer städtischer Luftfeuchte auf urbane Grünflächen und Bäume zu betrachten. Die Stadtstation Winckelmannstraße wird bei begrenzten Ressourcen zur Betrachtung des gesamtstädtischen UHI-Effekts empfohlen. Generell sollten jedoch die Fragestellung und der Zweck der Auswertung ausschlaggebend sein. Eine anhand der Ausführungen in dieser Arbeit neu geschaffene Station in der Alt-/ Neustadt, die möglichst den gesamtstädtischen Bedingungen entspricht und von wenigen Einflüssen betroffen ist, ist zu empfehlen. Für mikroklimatische Untersuchungen ist der Aufbau eines dichteren Netzwerks von Messstellen unerlässlich, welche über das Stadtgebiet verteilt, gut ausgestattet und für das jeweilige Stadtquartier repräsentativ sein sollten. Insbesondere ist ein Monitoring der Altstadt anzustreben.

Der Klimawandel verschärft die Hitzebelastung auch in Dresden und stellt die Stadt, in der viele vulnerable Gruppen auf engem Raum leben, damit vor große Herausforderungen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind insbesondere für die Stadtplanung und das Gesundheitswesen in Dresden relevant, um geeignete lokale Anpassungsmaßnahmen zu priorisieren und umzusetzen. In dieser Arbeit wurde festgestellt, dass sowohl grüne als auch blaue Infrastrukturen sowie Kaltluftströmungen temperatursenkende Effekte mit sich bringen und damit von hoher stadtklimatischer Bedeutung sind. Für eine Reduktion der UHI-Belastung sollte neben weniger Neuversiegelung das Potenzial grüner und blauer Infrastrukturen bzw. von Kaltluftströmungen in Dresden stärker genutzt werden. Eine konsequente Integration grüner und blauer Infrastrukturen in alle stadtplanerischen Prozesse, die Erhöhung des städtischen Grünflächenanteils sowie eine räumlich-funktionelle Vernetzung grün-blauer Infrastrukturen sind im Hinblick auf die Anpassung an den fortschreitenden Klimawandel anzustreben. So kann die Lebens- und Aufenthaltsqualität in den dicht besiedelten Stadtgebieten Dresdens, insbesondere während Hitzeperioden mit einer hohen thermischen Belastung am Tag und in der Nacht, verbessert, und vulnerable Gruppen können effektiver vor negativen Auswirkungen auf die Gesundheit geschützt werden.

7 Literaturverzeichnis

- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Altman, D. G. & Bland, J. M. (1994). Quartiles, quintiles, centiles, and other quantiles. *BMJ (Clinical research ed.)*, 309(6960), 996. <https://doi.org/10.1136/bmj.309.6960.996>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Baumüller, J., Reuter, U., Hoffmann, U. & Esswein, H. (2008). *Klimaatlas Region Stuttgart*. Stuttgart. Verband Region Stuttgart. http://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_klimaatlas_region
- Benjamin, K., Luo, Z. & Wang, X. (2021). Crowdsourcing Urban Air Temperature Data for Estimating Urban Heat Island and Building Heating/Cooling Load in London. *Energies*, 14(16), 5208. <https://doi.org/10.3390/en14165208>
- Bernhofer, C., Franke, J., Fischer, S., Kirsten, L., Körner, P., Kostrowski, D., Prasse, H., Schaller, A. & Donix, T. (2015). *Analyse der Klimaentwicklung in Sachsen* (Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2015). Dresden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). <https://repository.publisso.de/resource/fri:6030285-1/data>
- BfU (2006). *Klimamessprogramm im Zuge der Überarbeitung der Klimakarten Dresden, Übergabe der Messwerte des Messprogramms 2006 durch den Auftraggeber*.
- Blume, H.-P., Welp, G., Brümmer, G. W., Thiele-Bruhn, S., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K. & Wilke, B.-M. (2010). *Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde* (16. Aufl.). Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1497885>
- Bongardt, B. (2006). *Stadtklimatologische Bedeutung kleiner Parkanlagen: Dargestellt am Beispiel des Dortmunder Westparks. Essener ökologische Schriften: Bd. 24*. Westarp Wissenschaftlicher Fachverlag, Hohenwarsleben.
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M. & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Brinckmann, S. & Dirksen, R. (2020). *Eine Methode zur Korrektur und Unsicherheitsbestimmung der Temperaturmessungen an den Klimareferenzstationen*. Meteorologisches Observatorium Lindenberg – Richard-Aßmann-Observatorium. MOL-RAO Aktuell.

- https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/lindenbergersaeule/rao_download/aktuell_2020_01.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Burton, I. (2004). Climate change and the adaptation deficit. In A. Fenech, D. MacIver, H. Auld, R. B. Rong & Y. Yin (Hrsg.), *Climate Change: Building the Adaptive Capacity* (S. 25–33). Ministry of Public Works and Government Services, Ottawa, ON, Kanada.
- Chang, C.-R., Li, M.-H. & Chang, S.-D. (2007). A preliminary study on the local cool-island intensity of Taipei city parks. *Landscape and Urban Planning*, 80(4), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.005>
- Chen, Y. & Wong, N. H. (2006). Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*, 38(2), 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.04.003>
- Churkina, G. (2008). Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modelling*, 216(2), 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.03.006>
- Cleugh, H. & Grimmond, S. (2012). Urban Climates and Global Climate Change. In A. Henderson-Sellers & K. McGuffie (Hrsg.), *The future of the world's climate* (S. 47–76). Elsevier, Heidelberg. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386917-3.00003-8>
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J. & Bechtel, B. (2022). A global map of local climate zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. *Earth System Science Data*, 14(8), 3835–3873. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>
- Demuzere, M., Kittner, J., Martilli, A., Mills, G., Moede, C., Stewart, I. D., van Vliet, J. & Bechtel, B. (2023). *Global map of Local Climate Zones (3.0.0) [Data set]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6364593>
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (o. J.a). *Messtechnik*. https://www.dwd.de/DE/presse/pressebilder/messtechnik_node.html
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (o. J.b). *Wetter- und Klimalexikon: Adiabatischer Temperaturgradient, Anemometer, Antizyklonal, Autochthone Witterung, Bodenwind, Eistag, Frosttag, Gesamtbedeckungsgrad, Globalstrahlung, Heißer Tag, Hitzewelle, Jahreszeiten, Kaltluftabfluss, Kaltluftfluss, Kaltluftstau, Luftfeuchte, Lufttemperatur, Meteorologischer Sommerbeginn, Pyranometer, Relative Luftfeuchte, Sommertag, Sonnenscheindauer, Standardatmosphäre, Städtische Wärmeinsel, Stadtklima, Strahlung, Strahlungshaushalt, UTC - Universal Time Coordinated, Weibull-Parameter, Wind, Windrose*. www.dwd.de/lexikon
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2020). *Bundesweites Stadtklimamessnetz wird ausgebaut: Deutscher Wetterdienst nimmt Stadtklimastation in Dresden-Neustadt in Betrieb*. https://www.dwd.de/DE/presse/pressemitteilungen/DE/2020/20201112_stadtklimastation_dresden_neustadt_news.html

- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2022). *Historische Hitzewarnungen*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/health/historical_alerts/heat_warnings/
- Deutscher Wetterdienst (Hrsg.) (2023). *Open-Data-Server des Deutschen Wetterdienstes*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/
- D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., de'Donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., Analitis, A., Medina-Ramón, M., Paldy, A., Atkinson, R., Kovats, S., Bisanti, L., Schneider, A., Lefranc, A., Iñiguez, C. & Perucci, C. A. (2010). The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: Results from the EuroHEAT project. *Environmental health*, 9, 37. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-37>
- DWD Climate Data Center (Hrsg.) (2018). *DATENSATZBESCHREIBUNG: Aktuelle stündliche Lufttemperatur und Luftfeuchte, gemessen an Stadtklimastationen, für ausgewählte urbane Räume in Deutschland*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate_urban/hourly/air_temperature/recent/BESCHREIBUNG_obsgermany_climate_urban_hourly_tu_recent_de.pdf
- DWD Climate Data Center (Hrsg.) (2019). *DATENSATZBESCHREIBUNG: Historische 10-minütige Stationsmessungen des Luftdrucks, der Lufttemperatur (in 5cm und 2m Höhe), der Luftfeuchte und des Taupunkts in Deutschland*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/10_minutes/air_temperature/BESCHREIBUNG_obsgermany_climate_10min_air_temperature_de.pdf
- DWD Climate Data Center (Hrsg.) (2021). *Historische Hitzewarnungen in Deutschland: Jahr 2021*. https://opendata.dwd.de/climate_environment/health/historical_alerts/heat_warnings/heat_alerts_2021.csv
- Environmental Systems Research Institute (2019). *ArcGIS Desktop: Version 10.7.1.11595*. Redlands, CA, USA. <https://www.arcgis.com>
- European Environment Agency (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe: Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. EEA report: Bd. 2012,2. European Environment Agency, Kopenhagen, Dänemark. <http://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5db575f0-9f56-48a2-b858-9cae8fbecbaf>
- Fenner, D., Meier, F., Scherer, D. & Polze, A. (2014). Spatial and temporal air temperature variability in Berlin, Germany, during the years 2001–2010. *Urban Climate*, 10, 308–331. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.02.004>
- Franck, U., Krüger, M., Schwarz, N., Grossmann, K., Röder, S. & Schlink, U. (2013). Heat stress in urban areas: Indoor and outdoor temperatures in different urban structure types and

- subjectively reported well-being during a heat wave in the city of Leipzig. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(2), 167–177. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0384>
- GEO-NET Umweltconsulting GmbH (Hrsg.) (2021). *Klimaanalyse Boizenburg/Elbe*. <https://www.boizenburg.de/downloads/datei/OTAwMDAxODIwOy07L3Vzci9sb2NhbC9odHR-wZC92aHRkb2NzL2JvaXplbmJ1cmcvYm9pemVuYnVyZy9tZWRpZW4vZG9rdW1lbnRlL2tsaW1hYW5hbHlzV9ib2l6ZW5idXJnX2JlcmJjaHRfbW9kZWxsZXJnZWJuaX-NzZV9maW5hbC5wZGY%3D>
- Georgi, N. J. & Zafiriadis, K. (2006). The impact of park trees on microclimate in urban areas. *Urban Ecosystems*, 9(3), 195–209. <https://doi.org/10.1007/s11252-006-8590-9>
- Goldberg, V. (1999). *Zur Regionalisierung des Klimas in den Hochlagen des Osterzgebirges unter Berücksichtigung des Einflusses von Wäldern* (Dissertation). *Tharandter Klimaprotokolle: Bd. 2*. Dresden.
- Google (2023). *Google Maps: Kartendaten (2023), GeoBasis-DE/BKG (2009)*. <https://www.google.de/maps/>
- Grajeda-Rosado, R. M., Alonso-Guzmán, E. M., Escobar-Del Pozo, C., Esparza-López, C. J., Sotelo-Salas, C., Martínez-Molina, W., Mondragon-Olan, M. & Cabrera-Macedo, A. (2022). Anthropogenic Vehicular Heat and Its Influence on Urban Planning. *Atmosphere*, 13(8), 1259. <https://doi.org/10.3390/atmos13081259>
- Haase, D. & Hellwig, R. (2022). Effects of heat and drought stress on the health status of six urban street tree species in Leipzig, Germany. *Trees, Forests and People*, 8, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100252>
- Habeeb, D., Vargo, J. & Stone, B. (2015). Rising heat wave trends in large US cities. *Natural Hazards*, 76(3), 1651–1665. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1563-z>
- Häckel, H. (2016). *Meteorologie* (8. Aufl.). *UTB Geowissenschaften, Ökologie, Agrar- und Forstwissenschaften: Bd. 1338*. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Hackenbruch, J. (2018). *Anpassungsrelevante Klimaänderungen für städtische Baustrukturen und Wohnquartiere* (Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie, Band 77) (Dissertation). Karlsruher Institut für Technologie (KIT). <https://doi.org/10.5445/KSP/1000080685>
- Hafner, M., Romanelli, R. J., Yerushalmi, E. & Troxel W. M. (2023). *The societal and economic burden of insomnia in adults: An international study*. RAND Corporation, Santa Monica, CA, USA. https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2166-1.html
- Hathway, E. A. & Sharples, S. (2012). The interaction of rivers and urban form in mitigating the Urban Heat Island effect: A UK case study. *Building and Environment*, 58, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.06.013>

- Hausmann, A., Franke, J., Kerl, F. & Rumpf, D. (2020). *Kompendium Klima: Sachsen im Klimawandel*. Dresden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/37471/documents/58114>
- Helbig, A., Baumüller, J. & Kerschgens, M. J. (1999). *Stadtklima und Luftreinhaltung* (2., vollständig überarbeitete und ergänzte Aufl.). Springer, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58545-6>
- Henninger, S. & Weber, S. (2020). *Stadtklima. UTB: Bd. 4849*. Schöningh, Paderborn. <https://doi.org/10.36198/9783838548494>
- Hoehne, C. G., Chester, M. V., Sailor, D. J. & King, D. A. (2022). Urban Heat Implications from Parking, Roads, and Cars: a Case Study of Metro Phoenix. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 7(4), 272–290. <https://doi.org/10.1080/23789689.2020.1773013>
- Holmer, B., Thorsson, S. & Eliasson, I. (2007). Cooling rates, sky view factors and the development of intra-urban air temperature differences. *Geografiska Annaler*, 89 A(4), 237–248. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2007.00323.x>
- Hou, P., Chen, Y., Qiao, W., Cao, G., Jiang, W. & Li, J. (2013). Near-surface air temperature retrieval from satellite images and influence by wetlands in urban region. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1-2), 109–118. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0629-7>
- Howard, L. (1833). *The Climate of London, Deduced from Meteorological Observations* (1-3).
- Hoyer, C. (2012). *Untersuchung des Zusammenhanges von Temperaturverteilung und Gebäudegeometrie für die Erstellung einer flächendeckenden, kleinräumigen Temperaturverteilung in der Stadt Dresden* (Diplomarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Huang, L., Li, J., Zhao, D. & Zhu, J. (2008). A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China. *Building and Environment*, 43(1), 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.025>
- Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, F.-M. & Pethe, H. (2005). *Witterung und Klima: Eine Einführung in die Meteorologie und Klimatologie* (11. Aufl.). Teubner, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-96749-7>
- Kaspar, F., Müller-Westermeier, G., Penda, E., Mächel, H., Zimmermann, K., Kaiser-Weiss, A. & Deutschländer, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany's National Climate Data Centre. *Advances in Science and Research*, 10(1), 99–106. <https://doi.org/10.5194/asr-10-99-2013>
- Köppen, W. P. (1931). *Grundriss der Klimakunde: Klimakarte der Erde* (2. Aufl.). de Gruyter, Berlin.
- Koszinski, A. (2014). *Wetterlagenabhängigkeit des nächtlichen Temperaturminimums in Dresden* (Bachelorarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).

- Kravchenko, J., Abernethy, A. P., Fawzy, M. & Lyerly, H. K. (2013). Minimization of heatwave morbidity and mortality. *American Journal of Preventive Medicine*, 44(3), 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.amepre.2012.11.015>
- Kuttler, W. (1991). Zum klimatischen Potential urbaner Gewässer. In H. Schuhmacher & B. Thiesmeier (Hrsg.), *Urbane Gewässer - mit Beiträgen zu Limnologie, Stadtökologie, Wasserwirtschaft und Planung* (S. 378–394). Westarp Wissenschaftlicher Fachverlag, Hohenwarsleben. https://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/zum_klimatischen_potential_urbaner_gew__s__er__1991_.pdf
- Kuttler, W. (2004a). Stadtklima: Teil 1: Grundzüge und Ursachen. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 16(3), 187–199. <https://doi.org/10.1065/uwsf2004.03.078>
- Kuttler, W. (2004b). Stadtklima: Teil 2: Phänomene und Wirkungen. *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 16(4), 263–274. <https://doi.org/10.1065/uwsf2004.08.083>
- Kuttler, W. (2010). Urbanes Klima: Teil 2. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 70(9), 378–382. https://www.uni-due.de/imperia/md/content/geographie/klimatologie/urbanes_klima_teil_2.pdf
- Kuttler, W. (2011). Klimawandel im urbanen Bereich, Teil 1, Wirkungen. *Environmental Sciences Europe*, 23(11). <https://doi.org/10.1186/2190-4715-23-11>
- Kuttler, W. (2019). Stadtklima: Einführung, Charakteristika, Nachweismöglichkeiten. In J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, W. Kuttler & A. Matzarakis (Hrsg.), *Warnsignal Klima: Die Städte* (S. 21–27). Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO Magazin-Hamburg. <https://doi.org/10.25592/warnsignal.klima.die-staedte.03>
- Kuttler, W., Miethke, A., Dütemeyer, D. & Barlag, A.-B. (2015). *Das Klima von Essen/ The Climate of Essen*. Westarp Wissenschaftlicher Fachverlag, Hohenwarsleben.
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (1998). *Umweltbericht 1998: Stadtklima von Dresden*. Dresden. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/umweltbericht_text.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2010a). *Gewässersteckbrief – Elbe: Plan Hochwasservorsorge Dresden*. <https://stadtplan.dresden.de/getimage/image.ashx?w=500&idas-set=1393407&k=E1AC86DC55AD287790C4B85FC78B8C51>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2010b). *Karte 5.2: Kaltluftverhältnisse in Strahlungsnächten* (Umweltatlas Dresden, 3., überarbeitete Ausgabe). Dresden. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/ua_5_2_text.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2015). *Karte 1.3: Versiegelung des Bodens* (Umweltatlas Dresden, 4., überarbeitete Ausgabe). Dresden. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/ua_1_3_text.pdf

- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2017). *Karte 5.3: Synthetische Klimafunktionskarte* (Umweltatlas Dresden, 9., überarbeitete Ausgabe). Dresden. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/ua_5_3_Text.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2019a). *Das Klima von Dresden*. https://www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/klima-und-energie/stadtklima/Klima_von_Dresden.php
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2019b). *Klimatische Situation in Dresden*. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/Klimatische_Situation_Dresden.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2020a). *Fachleitbild Stadtklima - Planungshinweiskarte*. dl-de/by-2-0, opendata.dresden.de. https://stadtplan.dresden.de/?TH=UW_PLAN_KLIMA
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2020b). *Karte 5.4: Fachleitbild Stadtklima - Planungshinweiskarte* (Umweltatlas Dresden, 8., überarbeitete Ausgabe). Dresden. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/ua_5_4_text.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2022a). *Bevölkerungsprognose 2022*. <https://www.dresden.de/de/leben/stadtportrait/statistik/bevoelkerung-gebiet/bevoelkerungsprognose.php#?searchkey=Bev%C3%B6lkerungsprognose>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2022b). *Naturschutz*. <https://www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/naturschutz.php>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2022c). *Synthetische Klimafunktionskarte*. dl-de/by-2-0, opendata.dresden.de. https://stadtplan.dresden.de/?TH=UW_SYN_KLIMA
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2022d). *Synthetische Klimafunktionskarte*. https://www.dresden.de/apps_ext/UmweltmetadatenApp/themegroupdetails;jsessionid=FADFB77866BCF810499A6A358A3AAB38?0&searchThemeGroup=bea050f3-c080-4f89-9549-f369f6463efe
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2022e). *Umweltbericht 2019/2020: Fakten zur Umwelt*. Dresden. https://www.dresden.de/media/pdf/umwelt/Umweltbericht_2019_I_2020_web.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023a). *3D-Stadtmodell LoD2*. dl-de/by-2-0, opendata.dresden.de
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023b). *Bevölkerungsbestand*. <https://www.dresden.de/de/leben/stadtportrait/statistik/bevoelkerung-gebiet/Bevoelkerungsbestand.php>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023c). *Bevölkerungsbestand: Bevölkerungsentwicklung*. https://www.dresden.de/media/pdf/statistik/Statistik_1201_11_E2012-1981-Melderegister.pdf
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023d). *Dresden Themenstadtplan: Stadtbezirke/ Ortschaften und Stadtteile*. https://stadtplan.dresden.de/?bm=VECTOR&th=VA_ORTSAMT&pos-

- box=410679.69671|5650515.57878|430439.69709|5659115.57895;25833&pos-mark=false
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023e). *Gewässersteckbrief Niedersedlitzer Flutgraben*. <https://stadtplan.dresden.de/getimage/image.ashx?w=500&idas-set=1393424&k=056E6627124F5ADC096D9F86BDACAAD2>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023f). *Lage, Fläche, Gebiet*. <https://www.dresden.de/de/leben/stadtportrait/statistik/bevoelkerung-gebiet/lage-flaeche-geografische-daten.php>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023g). *Mit Hightech zur hitzeresilienten Stadt: TemperaturSensorik (KLIPS)*. <https://www.dresden.de/de/wirtschaft/smartcity/projekte/klips-matchup.php>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023h). *OpenDataPortal Dresden*. dl-de/by-2-0, opendata.dresden.de. <https://opendata.dresden.de/informationsportal>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023i). *Versiegelungsklassen: WMS-Dienst*. dl-de/by-2-0, opendata.dresden.de. <https://opendata.dresden.de/informationsportal/?open=1&result=E98C0ACB28A843FEB95675E705229B73#app/mainpage>
- Landeshauptstadt Dresden (Hrsg.) (2023j). *Wie waren die Witterungsverhältnisse in den letzten Jahren in Dresden?* <https://www.dresden.de/de/stadtraum/umwelt/umwelt/klima-und-energie/stadtklima/Witterungsberichte.php>
- Lange, S. & Bender, R. (2001). Median oder Mittelwert? *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 126(Suppl. Statistik), T 25-T 26. <https://doi.org/10.1055/s-2001-12734>
- Li, D. & Bou-Zeid, E. (2013). Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(9), 2051–2064. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-13-02.1>
- Löffler, H. (2012). *Meteorologische Bodenmesstechnik (vormals: Instrumentenkunde)* (3. Aufl.). *Leitfaden für die Ausbildung im Deutschen Wetterdienst: Bd. 6*. Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main.
- Lowe, D., Ebi, K. L. & Forsberg, B. (2011). Heatwave early warning systems and adaptation advice to reduce human health consequences of heatwaves. *International journal of environmental research and public health*, 8(12), 4623–4648. <https://doi.org/10.3390/ijerph8124623>
- Ludwig, F., Well, F., Moseler, E.-M., Eisenberg, B., Deffner, J., Drautz, S., Elnagdy, M. T., Friedrich, R., Jaworski, T., Meyer, S., Minke, R., Morandi, C., Müller, H., Narvaéz Vallejo, A., Richter, P., Schwarz-von Raumer, H.-G., Steger, L., Steinmetz, H., Wasielewski, S. & Winker, M. (2021). *Integrierte Planung blau-grüner Infrastrukturen: Ein Leitfaden*. München. Technische Universität München (TUM). <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1638459/1638459.pdf>

- Masson, V., Heldens, W., Bocher, E., Bonhomme, M., Bucher, B., Burmeister, C., Munck, C. de, Esch, T., Hidalgo, J., Kanani-Sühring, F., Kwok, Y.-T., Lemonsu, A., Lévy, J.-P., Maronga, B., Pavlik, D., Petit, G., See, L., Schoetter, R., Tornay, N., . . . Zeidler, J. (2020). City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges. *Urban Climate*, 31, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100536>
- Matzarakis, A. (2001). Die thermische Komponente des Stadtklimas. *Berichte des Meteorologischen Institutes* (6). https://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/Habil_matzarakis.pdf
- Matzarakis, A. (2013). Stadtklima vor dem Hintergrund des Klimawandels. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft*, 73(3), 115–118. https://www.urbanclimate.net/matzarakis/papers/GFRL_matzarakis_2013.pdf
- Mehler, S. (2011). *Untersuchung der gegenwärtigen und Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der thermischen und bioklimatischen Bedingungen an exemplarisch ausgewählten Klimastationen im Stadtgebiet von Dresden* (Diplomarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Mehra, S.-R. (2021). *Stadtbauphysik: Grundlagen klima- und umweltgerechter Städte*. Springer Fachmedien, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30449-2>
- Middel, A., Hüb, K., Brazel, A. J., Martin, C. A. & Guhathakurta, S. (2014). Impact of urban form and design on mid-afternoon microclimate in Phoenix Local Climate Zones. *Landscape and Urban Planning*, 122, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.004>
- Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz (Hrsg.) (2020). *Schutzwürdige Auenböden in Brandenburg*. https://lfu.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Fachbericht_Auenboden.3995269.pdf
- Minor, K., Bjerre-Nielsen, A., Jonasdottir, S. S., Lehmann, S. & Obradovich, N. (2022). Rising temperatures erode human sleep globally. *One Earth*, 5(5), 534–549. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.04.008>
- Mittag, S. (2014). *Wetterlagenabhängigkeit der nächtlichen Temperaturverteilung in Dresden* (Bachelorarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Molnár, G., Gyöngyösi, A. Z. & Gál, T. (2019). Integration of an LCZ-based classification into WRF to assess the intra-urban temperature pattern under a heatwave period in Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 138(1-2), 1139–1158. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02881-1>
- Murakawa, S., Sekine, T., Narita, K.-I. & Nishina, D. (1991). Study of the effects of a river on the thermal environment in an urban area. *Energy and Buildings*, 16(3-4), 993–1001. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(91\)90094-J](https://doi.org/10.1016/0378-7788(91)90094-J)

- Nicholls, N., Skinner, C., Loughnan, M. & Tapper, N. (2008). A simple heat alert system for Melbourne, Australia. *International journal of biometeorology*, 52(5), 375–384. <https://doi.org/10.1007/s00484-007-0132-5>
- Nishimura, N., Nomura, T., Iyoda, H. & Kimoto, S. (1998). Novel water facilities for creation of comfortable urban micrometeorology. *Solar Energy*, 64(4-6), 197–207. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00116-9](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00116-9)
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment (1967)*, 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2. Aufl.). Methuen, London, UK. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 12(4), 471–508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *WMO Instruments and observing methods* (Report Nr. 81, WMO TD Nr. 1250). <http://www.urban-climate.org/documents/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Onomura, S., Holmer, B., Lindberg, F. & Thorsson, S. (2016). Intra-urban nocturnal cooling rates: development and evaluation of the NOCRA model. *Meteorological Applications*, 23(3), 339–352. <https://doi.org/10.1002/met.1558>
- Pausch, A. & Kühne, H. (2020). *Meteorologische Vergleichsmessungen: Deutscher Wetterdienst – Sächsisches Luftmessnetz*. Dresden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). https://www.luft.sachsen.de/download/luft/Fachbeitrag_Meteorologie_Vergleichsmessung.pdf
- Pausch, A. & Mühlner, M. (2020). *Luftmessnetz Sachsen: Dokumentation der Ortsauswahl gemäß 39. BImSchV*. Dresden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/36866/documents/57105>
- Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva, H. & Taylor, R. A. (2015). Urban Heat Island: Mechanisms, Implications, and Possible Remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, 40(1), 285–307. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021155>
- Pursche, C. (2014). *Stadteinfluss auf die Luftfeuchte in Dresden* (Bachelorarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).

- QGIS Development Team (2023). *QGIS Geographic Information System*. QGIS Association. <http://www.qgis.org>
- R Core Team (2022). *R: A language and environment for statistical computing* (Version 4.2.3, 15.03.2023, "Shortstop Beagle"). R Foundation for Statistical Computing. Wien, Österreich. <https://www.R-project.org/>
- Reuter, U. & Kapp, R. (2012). *Städtebauliche Klimafibel: Hinweise für die Bauleitplanung*. Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg. <https://www.staedtebauliche-klimafibel.de/>
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C. & Groleau, D. (2006). Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, 80(4), 435–447. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.015>
- RStudio Team (2023). *RStudio: Integrated Development for R* (Version 2023.06.1+524, 07.07.2023). Boston, MA, USA. <http://www.rstudio.com/>
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.) (2015). *Klimawandel in Sachsen: Daten und Fakten*. Dresden. https://www.lfulg.sachsen.de/download/lfulg/DuF_Klimawandel_Aktualisierung_Dez_2015_dt.pdf
- Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.) (2021). *Lufttemperatur Dresden: Klimainformationen*. ReKIS KOMMUNAL - Klima-Steckbriefe, Dresden. https://re-kisviewer.hydro.tu-dresden.de/fdm/files/REKISKOMMUNAL/SN/14612000/010_TEMPERATUR.pdf
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) (2008). *Sachsen im Klimawandel: Eine Analyse*. Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/12173/documents/25586>
- Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft (Hrsg.) (2015). *Klimawandel in Sachsen - wir passen uns an!* Dresden. <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/22321/documents/35455>
- Sauer, C. (2014). *Zusammenhang von Oberflächen und Lufttemperatur auf städtischen Nutzflächen in Dresden* (Bachelorarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Schatz, J. & Kucharik, C. J. (2015). Urban climate effects on extreme temperatures in Madison, Wisconsin, USA. *Environmental Research Letters*, 10(9), 94024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094024>
- Seidel, R. (2020). *Abschlussbericht zum Aufbau und zur Betreuung der Klimamessstationen im Projekt „Blaues Band Geberbach“* (Abschlussbericht). Technische Universität Dresden (TU Dresden).

- Sörgel, C., Moldenhauer, A., Flassak, T., Lorentz, H., Düring, I. & Freydank, E. (2008). *Überarbeitung der Klimakarten der Landeshauptstadt Dresden*. Radebeul. Ingenieurbüro Lohmeyer GmbH & Co.KG; Auftraggeber: Landeshauptstadt Dresden.
- Spekat, A. & Enke, W. (2020). *Regionale Klimaprojektionen für Sachsen: WMSax2.0 Bereitstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen für Sachsen* (Schriftenreihe des LfULG, Heft 3/2020). Dresden. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/35082/documents/54484>
- Spengler, R. (2002). *The new Quality Control- and Monitoring System of the Deutscher Wetterdienst* (Proceedings of the WMO Technical Conference on Meteorological and Environmental Instruments and Methods of Observation). Bratislava, Slowakei.
- Spronken-Smith, R. A. & Oke, T. R. (1998). The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates. *International Journal of Remote Sensing*, 19(11), 2085–2104. <https://doi.org/10.1080/014311698214884>
- Staiger, H., Laschewski, G. & Grätz, A. (2012). The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: scientific basics. *International journal of biometeorology*, 56(1), 165–176. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0409-6>
- Stewart, I. D. & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Sugawara, H., Narita, K. & Kim, M. S. (2009). *Cooling effect by urban river* (The seventh International Conference on Urban Climate, 29 June - 3 July 2009). Yokohama, Japan. https://www.researchgate.net/publication/255591689_COOLING_EFFECT_BY_URBAN_RIVER
- Süß, A. (2021). *Das Mikro- und Bioklima des Großen Gartens und seine Wirkung auf die städtische Umgebung* (Bachelorarbeit). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Süß, A. (2022). *Abschlussbericht zur Betreuung der Klimamessstationen im Projekt „Blaues Band Geberbach“* (Abschlussbericht). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Time and Date AS (Hrsg.) (2023). *Dresden, Sachsen, Deutschland — Sonnenaufgang und Sonnenuntergang Juni 2022*. <https://www.timeanddate.de/sonne/deutschland/dresden?month=6&year=2022>
- Tomczyk, A. M. & Sulikowska, A. (2018). Heat waves in lowland Germany and their circulation-related conditions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130, 499–515. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0549-2>
- Trapp, J.-H. & Winker, M. (Hrsg.) (2020). *Blau-grün-graue Infrastrukturen vernetzt planen und umsetzen: Ein Beitrag zur Klimaanpassung in Kommunen*. Berlin. <https://repository.difu.de/handle/difu/281578>

- Umweltbundesamt (Hrsg.) (2021). *Leistungen und Nutzen renaturierter Flüsse*. <https://www.umweltbundesamt.de/leistungen-nutzen-renaturierter-fluesse#okosystemleistungen-von-fluessgewassern>
- Unger, J. (1996). Heat island intensity with different meteorological conditions in a medium-sized town: Szeged, Hungary. *Theoretical and Applied Climatology*, 54(3-4), 147–151. <https://doi.org/10.1007/BF00865157>
- Unger, J. (2004). Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach. *Climate Research*, 27(3), 253–264. <https://doi.org/10.3354/cr027253>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. United Nations, New York. <https://doi.org/10.18356/b9e995fe-en>
- Upmanis, H., Eliasson, I. & Lindqvist, S. (1998). The influence of green areas on nocturnal temperatures in a high latitude city (Göteborg, Sweden). *International Journal of Climatology*, 18(6), 681–700. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199805\)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199805)18:6<681::AID-JOC289>3.0.CO;2-L)
- van Hove, L. W. A., Jacobs, C. M. J., Heusinkveld, B. G., Elbers, J. A., van Driel, B. L. & Holtslag, A. A. M. (2015). Temporal and spatial variability of urban heat island and thermal comfort within the Rotterdam agglomeration. *Building and Environment*, 83, 91–103. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.08.029>
- van Hove, L. W. A., Steeneveld, G. J., Jacobs, C. M. J., Heusinkveld, B. G., Elbers, J. A., Moors, E. J. & Holtslag, A. A. M. (2011). *Exploring the Urban Heat Island Intensity of Dutch cities: Assessment based on a literature review, recent meteorological observations and datasets provided by hobby meteorologists*. Alterra report 2170. Alterra, Wageningen, Niederlande.
- Verein Deutscher Ingenieure (2003). *Umweltmeteorologie - Lokale Kaltluft: VDI-Richtlinie 3787, Blatt 5. VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft: Bd. 1b*. Beuth Verlag, Berlin.
- Völker, S., Baumeister, H., Claßen, T., Hornberg, C. & Kistemann, T. (2013). Evidence for the temperature-mitigating capacity of urban blue space – a health geographic perspective. *Erdkunde*, 67(04), 355–371. <https://doi.org/10.3112/erdkunde.2013.04.05>
- Watson, I. D. & Johnson, G. T. (1987). Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology*, 7(2), 193–197. <https://doi.org/10.1002/joc.3370070210>
- Westermann, J., Baldin, M.-L., Bolsius, J., Brzoska, P., Goldberg, V., Großmann, L., Grunewald, K., Kunze, S., Moderow, U., Naumann, T., Reinfried, F., Schiela, D., Schünemann, C., Sinnig, H., Spohr, G., Ziemann, A., Zweinert, S. & Ortlepp, R. (2021). Schlussbericht des Forschungsverbundes HeatResilientCity: Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten

- Bewohnerorientierte Wissensgenerierung und Umsetzung in Dresden und Erfurt. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2314/KXP:1824119097>
- Westermann, J., Bolsius, J., Kunze, S., Schünemann, C., Sinning, H., Ziemann, A., Baldin, M.-L., Brüggemann, K., Brzoska, P., Ehnert, F., Goldberg, V., Großmann, L., Grunewald, K., Naumann, T., Reinfried, F., Richter, B., Spohr, G. & Ortlepp, R. (2021). Hitzeanpassung von Stadtquartieren: Akteursperspektiven und Umsetzungsansätze. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 30(4), 257–267. <https://doi.org/10.14512/gaia.30.4.9>
- Wicher, M. (2021). *Urbane Wärmeinsel in Dresden: Abhängigkeit von Stadtstruktur und Witterung* (Projektabschlussbericht). Technische Universität Dresden (TU Dresden).
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research*, 114. <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>
- World Meteorological Organization (1983). *Abridged final report of the eighth session: Washington, 19-30 April 1982* (Bd. 600). World Meteorological Organization, Genf, Schweiz.
- Ziemann, A., Moderow, U., Goldberg, V. & Bernhofer, C. (2021). Schlussbericht des Teilprojekts "Meteorologische und humanbiometeorologische Wirkungen in hitzebelasteten Stadtquartieren" im Verbundprojekt HeatResilientCity: HeatResilientCity - Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten - Bewohnerorientierte Wissensgenerierung und Umsetzung in Dresden und Erfurt. "Meteorologische und humanbiometeorologische Wirkungen in hitzebelasteten Stadtquartieren". Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2314/KXP:1820028399>
- Zimmermann, U. (2015). *Amtliches Gutachten über die lokalklimatische Auswirkungen der geplanten Erweiterung des Diabassteinbruchs Rimlasgrund/Bad Berneck: Abbaubereich Schafberg*. Deutscher Wetterdienst (DWD). https://www.regierung.oberfranken.bayern.de/mam/service/planfeststellungen/wirtschaft_landesentwicklung_verkehr/bergbau/rbp_rimlasgrund/5_04_dwd_gutachten.pdf
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J. & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(15), 7575–7580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817561116>

8 Anhang

8.1 Anhang: Stationssteckbriefe

Nachfolgend finden sich die Steckbriefe der zehn ausgewerteten Stationen. Acht Stationen wurden im Zeitraum 18.-19.10.2022 im Rahmen einer Begehung selbst überprüft. Dabei wurden untenstehende Daten, Informationen und Fotos aufgenommen. Bei allen angegeben Himmelsrichtungen in den Steckbriefen handelt es sich um stationsbezogene Angaben. Luftlinienentfernungen und Flächengrößen wurden mit QGIS berechnet. Für die zwei Stationen GEB2 und GEB4 stammen die Informationen und die Fotoaufnahmen aus einer Projektarbeit zum „Blauen Band Geberbach“ (Seidel, 2020). Die Informationen zu Adresse, Höhenlage, Stadtviertel und Stadtbezirk stammen aus dem Themenstadtplan der LHD (LHD, 2023d; Abruf: 23.08.2023). Auch die Informationen zu den Klimafunktionen konnten dort abgerufen werden (LHD, 2022c; Abruf: 15.08.2023). Dort sind einerseits Details zu Kalt- und Frischluftabflussbahnen und deren Fließrichtung enthalten, andererseits auch zu den verschiedenen Klimatopen mit geringen, mäßigen, hohen bzw. keinen Veränderungen der meteorologischen Größen gegenüber dem Umland. Dabei gelten Toleranzen zwischen 50 und 100 m (LHD, 2022d; Sörgel et al., 2008). Tiefergehende Informationen zur Klimafunktionskarte finden sich im Klimagutachten für Dresden von Sörgel et al. (2008). Für die Stationen im Luftmessnetz Sachsen stehen zudem Stationssteckbriefe mit Fokus auf die Lufthygiene zur Verfügung (Pausch & Mühlner, 2020), aus denen Informationen für die Stationen BER, NOR und WIN entnommen wurden. Weitere Informationen wurden bei den entsprechenden Kontaktstellen (Tabelle 22 in Kapitel 8.3 im Anhang) per Mail angefragt.

ID	BER
Name	Dresden-Bergstraße
Betreiber	LfULG
Datum (Informationen, Fotos)	18.10.2022
Adresse	Bergstraße 78/80, 01069 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,73180
Koordinaten Nord [°N]	51,02627
Höhe Grund ü. NN [m]	150
Höhe Sensor über Grund [m]	3,9
davon Höhe über Containerdach [m]	1,3
Höhendifferenz zu HOS [m]	39,9
Stadtviertel	Räcknitz/ Zschernitz
Stadtbezirk	Plauen
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Zeilenbebauung, lockere Bebauung (Einfamilienhäuser, Reihenhäuser)
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	5
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	7
Himmelsrichtung der Bebauung	Im O und W der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	1
Direkte Umgebung der Messstation	stark befahrene Straße am Stadtrand mit Allee (O), Gebäude (W)
Verkehrsart	Hohe Verkehrsbelastung durch vierspurige und stark befahrene Einfall-/ Ausfallstraße B170
Untergrundbeschaffenheit	hauptsächlich asphaltierte Straße, gepflasterter Gehweg, offene Grünfläche/ Wiese unter Alleebäumen (ca. 3 m ²)
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	3
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	Baumreihe im Abstand von je 8-10 m
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Entlang der N-S-Achse
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- Sumpfeiche (<i>Quercus palustris Münchh.</i>) - Stieleiche (<i>Quercus robur L.</i>)
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	Direkte und weitere Umgebung: stark versiegelt - > 200 m zum Südpark - > 350 m zum Volkspark Räcknitz - > 2 km zum Großen Garten
Schattenwurf	Schatten aus S (Baum) und W (Haus)
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 1,5 km zum Kaitzbach/ Naturbad Mockritz - > 2,2 km zum Carolasee (Großer Garten) - > 3,0 km zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Ja, Straßensteigung durchschnittlich 7% Richtung Süden (Pausch & Mühlner, 2020)

	Windrose (Stand 2017): Wind aus NNW-N und S (Pausch & Mühlner, 2020)
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Hügellage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	- Bereich geringer Überwärmung (2-3 °C) bis mittlerer Überwärmung (3-4 °C)



Abbildung 8: Ansicht der Station Bergstraße (Containerdach, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Süden (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).



Abbildung 9: Ansicht der Station Bergstraße (Containerdach, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Norden (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).

ID	BOT
Name	Dresden-Botanischer Garten
Betreiber	LHD und DWD (Mobile Messeinheit)
Datum (Informationen, Fotos)	18.10.2022
Adresse	Stübelallee 2, 01307 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,75928
Koordinaten Nord [°N]	51,04342
Höhe Grund ü. NN [m]	114
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	2,0
Stadtviertel	Seevorstadt-Ost/ Großer Garten
Stadtbezirk	Altstadt
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Park/ Grünfläche, keine Bebauung, einzelne Treibhäuser, entfernt: hohe Zeilenbebauung
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	1
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	10
Himmelsrichtung der Bebauung	Im W-NW der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	> 80 m
Direkte Umgebung der Messstation	offene Grünfläche neben Treibhäusern und kleinem Gebüsch (ca. 25 m, SSW) in der Nähe des Großen Gartens und einer großen Verkehrsachse
Verkehrsart	stark befahrene vierspurige Durchgangsstraße mit begrünten Straßenbahnschienen (> 100 m); von WNW nach OSO
Untergrundbeschaffenheit	Offene Grünfläche, z.T. geschotterter Weg
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0/ Baum: > 25
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	0
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Alle Richtungen (360 °)
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- Spitzahorn (<i>Acer platanoides</i> L.); - Sträucher: Weißer Spierstrauch (<i>Spiraea alba</i> Du Roi), Rankende Waldrebe (<i>Clematis vitalba</i> L.), Rose (<i>Rosaceae</i>), Gew. Traubenkirsche (<i>Prunus padus</i> L.) - Offene Grünfläche mit Wiese
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	- > 50 m zum Botanischen Garten - > 150 m zum Großen Garten - > 450 m: zusammenhängendes grünes Areal aus Blüherpark, Bürgerwiese und Cockerwiese
Schattenwurf	Nein
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	Großer Garten: - > 500 m zu Brunnen/ Wasserspielen - > 700 m zum Palaisteich

	<ul style="list-style-type: none"> - > 1,0 km zum Carolasee - > 1,4 km zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> - Bereich der Kalt- und Frischluftentstehung im Elbtal, auf Grünflächen und daran angrenzende Gebiete - Bereich beginnender Überwärmung (1-2 °C)



Abbildung 10: Ansicht der Station Botanischer Garten (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Nordosten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).



Abbildung 11: Ansicht der Station Botanischer Garten (rechte Station, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Südwesten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).

ID	GEB2
Name	Station 2 – Pferderennbahn („Blaues Band Geberbach“)
Betreiber	TU Dresden und LHD
Datum (Informationen, Fotos)	21.11.2019, 08.01.2020 (R. Seidel)
Adresse	Nahe An d. Rennbahn 1, 01237 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,80541
Koordinaten Nord [°N]	51,01691
Höhe Grund ü. NN [m]	118
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	6,0
Stadtviertel	Seidnitz/ Dobritz
Stadtbezirk	Blasewitz
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Waldstück, keine Bebauung, Pferderennbahn entfernt: Kleingartensiedlung, Gewerbegebiet, Parkplatz
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	1-5
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	65 m (Hütte), 100 m (Gebäude)
Himmelsrichtung der Bebauung	Im O-S der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	- > 80 m zu einem Parkplatz - > 200 m zur nächsten größeren Straße
Direkte Umgebung der Messstation	Laub-Mischwald mit Unterwuchs und Totholz
Verkehrsart	Kein Verkehr, befestigte Fuß-/ Radwege
Untergrundbeschaffenheit	Offener Waldboden
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0/ Baum: 4
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	0
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Alle Richtungen (360°)
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- Laub-Mischwald, u. a. Ahorn - Unterwuchs - Waldboden mit Totholz
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	Direkte und weitere Umgebung (unter anderem Pferderennbahn, Kleingartensiedlungen): nicht/wenig versiegelt
Schattenwurf	Schatten aus allen Richtungen (360°)
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 800 m zum Geberbach - > 900 m zur Kiesgrube Leuben - > 2,6 km zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Leicht erhöhte Lage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	- Wald: Bereich hoher Kalt- und Frischluftproduktion

- Nächster Siedlungsbereich: Bereich mittlerer Überwärmung (3-4 °C)



Abbildung 12: Ansicht der Station Geberbach 2 und ihrer Umgebung (Aufnahme: R. Seidel, 21.11.2019).



Abbildung 13: Ansicht der Station Geberbach 2 und ihrer Umgebung (Aufnahme: R. Seidel, 21.11.2019).

ID	GEB4
Name	Station 4 – Flutgraben („Blaues Band Geberbach“)
Betreiber	TU Dresden und LHD
Datum (Informationen, Fotos)	21.11.2019, 08.01.2020 (R. Seidel)
Adresse	Nahe Toeplerstraße, 01279 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,82284
Koordinaten Nord [°N]	51,02760
Höhe Grund ü. NN [m]	112
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	0
Stadtviertel	Tolkewitz/ Seidnitz-Nord
Stadtbezirk	Blasewitz
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Auenwiese, keine Bebauung, entfernt: Kleingartenanlagen und Wohnsiedlungen
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	-
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	> 120 (Hütten), > 170 (Gebäude)
Himmelsrichtung der Bebauung	Alle Richtungen außer im NO und SW der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	Geteerter Weg: 50, nächste größere Straße: 150
Direkte Umgebung der Messstation	Regelmäßig gemähte Auenwiese, ungemähte Deichoberkante an kleinem Fließgewässer (Flutgraben)
Verkehrsart	Kein Verkehr, befestigter Wirtschaftsweg
Untergrundbeschaffenheit	Offene Grünfläche
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0/ Baum: > 5
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	0
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Alle Richtungen (360°)
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- Vereinzelt Bäume in mehreren Metern Entfernung - Teilweise Gebüsch - Offene Grünfläche/ Wiese, teilweise hoch
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	Direkte und weitere Umgebung: unversiegelt, Toeplerpark angrenzend
Schattenwurf	Nein
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Ja, < 10 m: Geberbach (Niedersedlitzer Flutgraben), im Sommer teilweise ausgetrocknet
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 850 m zur Kiesgrube Leuben - > 1 km zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	- Kalt- und Frischluftabflussbahn (Richtung NO) - Bereich der Kalt- und Frischluftentstehung im Elbtal, auf Grünflächen und daran angrenzende Gebiete

- Bereich beginnender Überwärmung (1-2 °C)



Abbildung 14: Ansicht der Station Geberbach 4 (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Nordosten (Aufnahme: R. Seidel, 21.11.2019).



Abbildung 15: Ansicht der Station Geberbach 4 (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Südwesten (Aufnahme: R. Seidel, 21.11.2019).

ID	HOS
Name	Dresden-Hosterwitz
Betreiber	DWD
Datum (Informationen, Fotos)	19.10.2022
Adresse	Wasserwerkstraße 1, 01326 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,84700
Koordinaten Nord [°N]	51,02210
Höhe Grund ü. NN [m]	112
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	-
Stadtviertel	Hosterwitz/ Pillnitz
Stadtbezirk	Loschwitz
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Ländlich: vereinzelte Dörfer und Gebäude, Felder, Wald
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	1 (Hütte) bzw. 4 (Gebäude)
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	25 bzw. 200
Himmelsrichtung der Bebauung	Im S bzw. O der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	> 400
Direkte Umgebung der Messstation	Wasserwerksgelände: weitläufige offene Grünflächen/ Wiesen, Wasserbecken (2x 3500 m ² , 1x 560 m ² Wasseroberfläche), einzelne Gebäude und Fahrwege, Elbufer direkt hinter dem Damm
Verkehrsart	Kein Verkehr, entfernt: zweispurige Straße
Untergrundbeschaffenheit	Grünfläche/ Wiese, teilweise gepflasterte oder betonierte Fahrwege
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0/ Baum: 60-130
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	0
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Alle Richtungen (360°)
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- keine Bäume - keine Sträucher - offene Grünfläche/ Wiese
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	- nicht/ wenig versiegelt - Bäume entlang der Elbe (WSW) und am Zaunrand (N) - > 650 m zum Waldrand (Hang)
Schattenwurf	Nein
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Wasserbecken des Wasserwerks, Elbe
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 45 m zum nächsten Wasserbecken - > 150 m zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage

Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	<ul style="list-style-type: none">- Kalt- und Frischluftabflussbahn (Richtung NW)- Direkte Umgebung: Bereich hoher Kalt- und Frischluftproduktion- Weitere Umgebung (Wasserflächen): Bereich geringer Überwärmung (2-3 °C)
---	--



Abbildung 16: Ansicht der Station Hosterwitz (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Westen (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).



Abbildung 17: Ansicht der Station Hosterwitz (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Osten (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).

ID	NEU
Name	Dresden-Neustadt
Betreiber	DWD
Datum (Informationen, Fotos)	18.-19.10.2022
Adresse	Jordanstraße 10, 01099 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,75006
Koordinaten Nord [°N]	51,06842
Höhe Grund ü. NN [m]	115
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	3,0
Stadtviertel	Äußere Neustadt
Stadtbezirk	Neustadt
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Innenstadt-Blockbebauung mit Gründerzeit-Altbauten, teilweise Lücken
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	4-5
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	6
Himmelsrichtung der Bebauung	Im WNW der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	9
Direkte Umgebung der Messstation	Schattiger Spielplatz auf Baulücke neben Haus und Gebüsch (Parkgröße ca. 1200 m ²)
Verkehrsart	Kreuzung von Einbahnstraße (+ zwei Parkstreifen) mit zweispuriger Straße (+ ein Parkstreifen)
Untergrundbeschaffenheit	Direkte Umgebung: Grünfläche (35 m ² Wiese), Spielplatz mit offenem Erdboden, geteerte Straßen mit gepflasterten Gehwegen
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	1
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	5
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Im ONO-OSO der Station: Sträucher, SSW: Bäume
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	<ul style="list-style-type: none"> - vereinzelte Parkbäume, unter anderem Gewöhnliche Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i>), Gewöhnliche Esche (<i>Fraxinus excelsior</i>), Hängebirke (<i>Betula pendula Roth</i>), Götterbaum (<i>Ailanthus altissima (Mill.) Swingle</i>) - Sträucher: Hasel (<i>Corylus avellana L.</i>), Gem. Ranunkelstrauch (<i>Kerria japonica L.</i>), Kornelkirsche (<i>Cornus mas L.</i>), - Offene Grünfläche mit Wiese, Erdboden
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	<p>Direkte Umgebung: nicht versiegelt Weitere Umgebung: stark versiegelt</p> <ul style="list-style-type: none"> - > 350 m zum Alaunpark - > 370 m zum Inneren Neustädter Friedhof - > 1,0 km zu Rosengarten, Staudengarten, Königsufer und den Elbauen
Schattenwurf	Schatten v. a. aus W-NW durch Bebauung (abends)

Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 800 m zur Prießnitz - > 1,1 km zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	- Grünfläche: Bereich mittlerer Überwärmung (3-4 °C) - Siedlungsbereich: Bereich hoher Überwärmung (4-5 °C)



Abbildung 18: Ansicht der Station Neustadt (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Osten (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).



Abbildung 19: Ansicht der Station Neustadt (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Südwesten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).

ID	NOR
Name	Dresden-Nord
Betreiber	LfULG
Datum (Informationen, Fotos)	18.10.2022
Adresse	Schlesischer Platz (Bahnhofsvorplatz Dresden-Neustadt), 01097 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,74140
Koordinaten Nord [°N]	51,06486
Höhe Grund ü. NN [m]	112
Höhe Sensor über Grund [m]	4,2
davon Höhe über Containerdach [m]	1,4
Höhendifferenz zu HOS [m]	2,2
Stadtviertel	Innere Neustadt
Stadtbezirk	Neustadt
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Bahnhofsvorplatz innerhalb von Blockbebauung mit Gründerzeit-Altbauten, Glas- und Stahlbauten sowie Bahnhofsumgebung, Innenstadt-Bebauung mit Lücken
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	3-4
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	40
Himmelsrichtung der Bebauung	Im NNW, O und S der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	< 9
Direkte Umgebung der Messstation	Weitläufiger Bahnhofsvorplatz (5000 m ²) inkl. Baumreihen (400 m ²) neben Verkehrsachse, angrenzender Parkplatz (4000 m ² Freifläche); Einzelbebauung im Süden; Blockbebauung im Osten, kleine Grünfläche (100 m ²)
Verkehrsart	N: stehender Verkehr (Parkplatz/ Freifläche), S: vierspurige Straße mit Straßenbahn, W: Bahnhof
Untergrundbeschaffenheit	Versiegelt mit großen Platten bzw. asphaltiert; O: kleine Grünfläche mit offenem Boden
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	20
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	35
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Im N und ONO der Station
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- Blasenesche (<i>Koelreuteria paniculata</i> Laxm.), ca. 20 Stück auf dem Vorplatz - Ginkgo (<i>Ginkgo biloba</i> L.) im Beet - Keine Sträucher - Grünfläche/ Beet
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	Nahezu vollständige Versiegelung, - > 400 m zum Palaisgarten mit angrenzenden Auenwiesen - > 400 m zu Grün-/Brachflächen am Alten Leipziger Bahnhof
Schattenwurf	Nein

Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 650 m zum Neustädter Hafen der Elbe - > 700 m zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein, Windrose (Mittelwert aus 2007-2016): Wind aus OSO-SO, WSW-W, NNO (Pausch & Mühlner, 2020)
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	- Vorplatz: Bereich mittlerer Überwärmung (3-4 °C) bis hoher Überwärmung (4-5 °C) - Bahnhof: Bereich sehr hoher Überwärmung (> 5 °C)



Abbildung 20: Ansicht der Station Nord (Containerdach, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Nordosten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).



Abbildung 21: Ansicht der Station Nord (Containerdach, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Südwesten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).

ID	PIL
Name	Dresden-Pillnitz – Agrarmeteorologische Messstation
Betreiber	LfULG/ BfUL
Datum (Informationen, Fotos)	19.10.2022
Adresse	Lohmener Straße 12, 01326 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,88403
Koordinaten Nord [°N]	51,00444
Höhe Grund ü. NN [m]	116
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	4,0
Stadtviertel	Hosterwitz/ Pillnitz
Stadtbezirk	Loschwitz
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Ländlich – Gewächshäuser der HTW, Agrarinstitut mit Versuchsfeldern, Blumenbeeten, Spalierobst und weiterer Landwirtschaft, Wirtschaftshäuser, Lage zwischen bewaldetem Hang und Elbauen mit Elbe
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	3 (1 Gebäude)
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	40
Himmelsrichtung der Bebauung	Im SSO der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	> 110
Direkte Umgebung der Messstation	Offene Grünfläche/ Wiese, Spalierobst (2,5 m hoch), Beete, freistehendes Wirtschaftsgebäude
Verkehrsart	Wenig frequentierte, zweispurige Ortsverbindungsstraße
Untergrundbeschaffenheit	Offene Grünfläche/ Wiese und Beete, wenige betonierte Fahrwege
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0/ Beete: 5/ Spalierobst: 40
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	0
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Alle Richtungen (360°)
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	<ul style="list-style-type: none"> - keine Bäume - Spalierobst (Elstar-Äpfel (<i>Malus domestica</i>)) - Grasfläche - Zierbeete, unter anderem mit Rosen (<i>Rosaceae</i>) und Studentenblume (<i>Tagetes</i>)
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	Unversiegelte Umgebung, > 350 m zum Waldrand (Hang)
Schattenwurf	Nein
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	> 650 m zur Elbe
Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage

Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)

- Kalt- und Frischluftabflussbahn (Richtung NW)
- Bereich der Kalt- und Frischluftentstehung im Elbtal, auf Grünflächen und daran angrenzende Gebiete

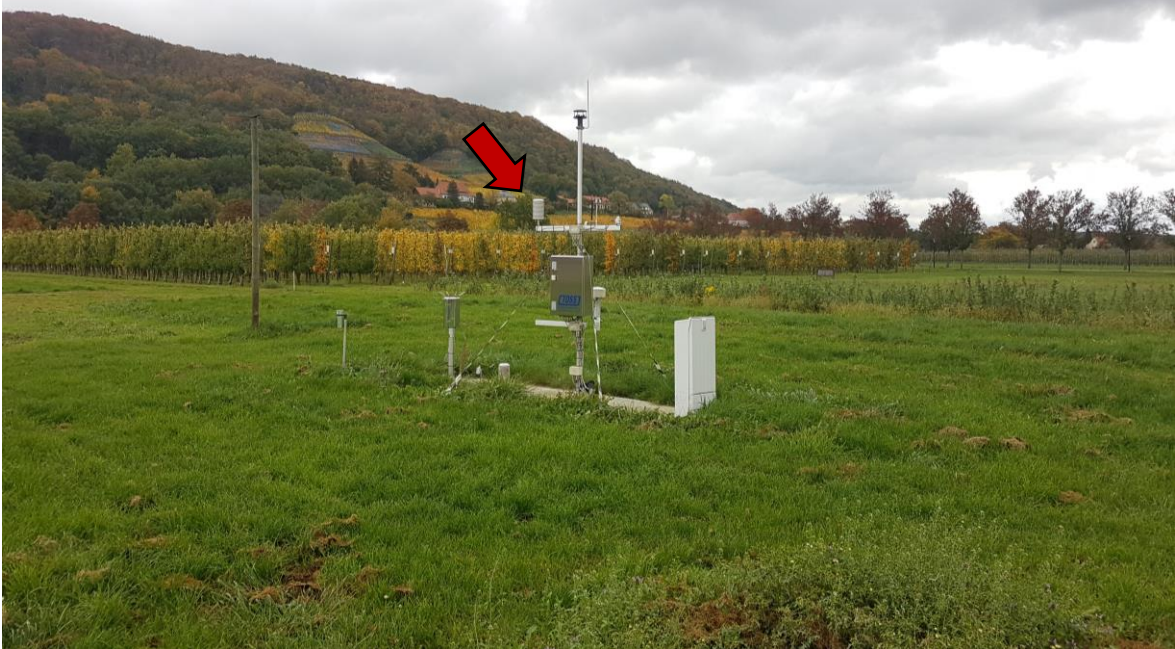


Abbildung 22: Ansicht der Station Pillnitz (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Südwesten (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).



Abbildung 23: Ansicht der Station Pillnitz (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Norden (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).

ID	STR
Name	Dresden-Strehlen
Betreiber	DWD
Datum (Informationen, Fotos)	19.10.2022
Adresse	Eugen-Bracht-Straße 12, 01219 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,77510
Koordinaten Nord [°N]	51,02491
Höhe Grund ü. NN [m]	119
Höhe Sensor über Grund [m]	2,0
davon Höhe über Containerdach [m]	-
Höhendifferenz zu HOS [m]	7,0
Stadtviertel	Strehlen
Stadtbezirk	Prohlis
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Ländliche Einzelbebauung/ Siedlung, Kleingartenanlage, Brachflächen
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	1-2
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	10
Himmelsrichtung der Bebauung	Im O der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	> 5 (Weg), > 210 (größere Straße)
Direkte Umgebung der Messstation	Gärtnerei - niedrige Gewächshäuser (NO-O), Kleingartenanlage (W), > 100 m), Bahndamm (NNO, > 120 m), große Brachfläche/ Lagerplatz, Erddämme/ -aushub
Verkehrsart	Kein Verkehr, entfernt: zweispurige Straße
Untergrundbeschaffenheit	Erde/ offener Boden, innerhalb des Zaunes Wiese, Gewächshäuser mit überdachten Beeten, betonierter Zufahrtsweg
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	0
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Alle Richtungen (360°)
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	- keine Bäume - keine Sträucher - offene Grünfläche mit Wiese und offenem Erdboden
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	- wenig bis kaum versiegelte Umgebung - > 100 m zu Kleingartenanlagen - > 450 m zu Waldstück am Koitzschgraben - > 650 m zum Großen Garten
Schattenwurf	Nein, evtl. morgens von Treibhäusern (aus N-O)
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein, evtl. Bewässerung der Gärtnerei
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	- > 1,1 km zum Carolasee (Großer Garten) - > 3,1 km zur Kiesgrube Leuben - > 3,5 km zur Elbe

Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Leicht erhöhte Lage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	<ul style="list-style-type: none"> - Grünflächen: Bereich der Kalt- und Frischluftentstehung im Elbtal, auf Grünflächen und daran angrenzende Gebiete - Siedlungsflächen: Bereich beginnender Überwärmung (1-2 °C)



Abbildung 24: Ansicht der Station Strehlen (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Südwesten (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).



Abbildung 25: Ansicht der Station Strehlen (roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Nordosten (Aufnahme: J. Glaß, 19.10.2022).

ID	WIN
Name	Dresden-Winckelmannstraße
Betreiber	LfULG
Datum (Informationen, Fotos)	19.10.2022
Adresse	Winckelmannstr./ Schnorrstraße 8, 01069 Dresden
Koordinaten Ost [°O]	13,73030
Koordinaten Nord [°N]	51,03620
Höhe Grund ü. NN [m]	116
Höhe Sensor über Grund [m]	3,3
davon Höhe über Containerdach [m]	0,9
Höhendifferenz zu HOS [m]	5,3
Stadtviertel	Südvorstadt-West
Stadtbezirk	Plauen
Graue Infrastruktur:	
Bebauungstyp im Viertel	Siedlungsgebiet der Vorstadt mit Zeilenbebauung und Grünflächen, Parkplatzflächen, Glas- und Stahlbauten
Anzahl Stockwerke der umliegenden Gebäude	Unterschiedlich (3-8)
Abstand zum nächsten Gebäude [m]	25, hohe Gebäude > 50
Himmelsrichtung der Bebauung	Im ONO, O, SW und NW der Station
Abstand zur nächsten Straße [m]	> 10
Direkte Umgebung der Messstation	Wiese mit begrünter Hütte unter großen Bäumen neben Parkplatz und Siedlungsstraßen
Verkehrsart	Ruhig: Parkplatz, einspurige Straße, Parkstreifen
Untergrundbeschaffenheit	Asphaltierte Straße mit gepflasterten Gehwegen, Parkplatz mit Rasengittersteinen, Wiese
Grüne Infrastruktur:	
Entfernung der nächsten Begrünung [m]	0
Entfernung der meisten umgebenden Begrünung [m]	10
Himmelsrichtungen der Begrünungen	Im O-S-W der Station
Art der Begrünung/ Vegetationsstruktur + Arten	<ul style="list-style-type: none"> - Rotahorn (<i>Acer rubrum L.</i>) - Eberesche (<i>Sorbus aucuparia L.</i>) - Hängebirke (<i>Betula pendula Roth</i>) - Wilder Wein (<i>Parthenocissus quiquefolia (L.) Planch.</i>) - Offene Grünfläche/ Wiese - Parkplatz mit durchgrüntem Rasengittersteinen
Versiegelungsgrad und Entfernung zur nächsten großflächigen Begrünung	<ul style="list-style-type: none"> - Teilweise versiegelt - > 20 m zu größeren Baumgruppen - > 250 m zu Friedrich-List-Platz (Park) - > 1 km zu Großem Garten/ weiteren Grünflächen
Schattenwurf	Schatten aus O-S-W
Blaue Infrastruktur:	
Blaue Infrastruktur in direkter Umgebung	Nein
Nähe zum nächsten Gewässer (Luftlinie)	<ul style="list-style-type: none"> - > 2,0 km zum Carolasee (Großer Garten) - > 2,1 km zur Elbe

Topografie:	
Neigung/ Hanglage erkennbar	Nein, Windrose (Mittelwert aus 2008-2016): Wind aus SSO, SW-WSW, NW (Pausch & Mühlner, 2020)
Höhenunterschied zur Elbe (Tal-/ Hügellage)	Tallage
Klimafunktionen (Grundlage: synthetische Klimafunktionskarte mit Klimatopen und Kalt-/ Frischluftbahnen; LHD, 2023)	Grünflächen: <ul style="list-style-type: none"> - Bereich hoher Kalt- und Frischluftproduktion - Bereich der Kalt- und Frischluftentstehung im Elbtal, auf Grünflächen und daran angrenzende Gebiete Siedlungsflächen und Parkplätze: <ul style="list-style-type: none"> - Bereich beginnender Überwärmung (1-2 °C) - Bereich geringer Überwärmung (2-3 °C)

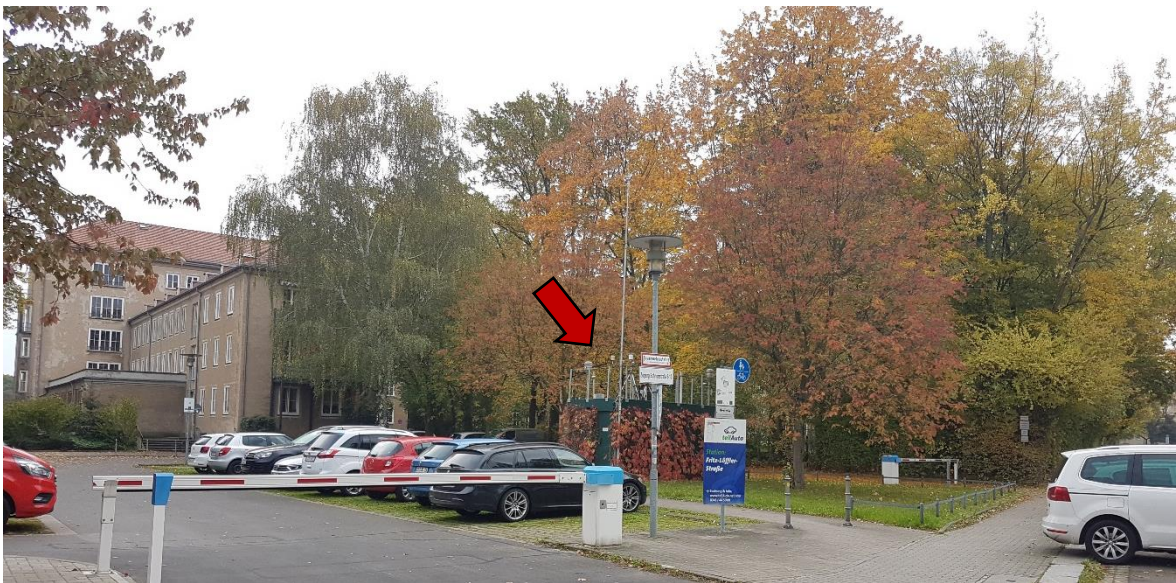


Abbildung 26: Ansicht der Station Winckelmannstraße (Containerdach, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Nordwesten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).



Abbildung 27: Ansicht der Station Winckelmannstraße (Containerdach, roter Pfeil) und ihrer Umgebung von Osten (Aufnahme: J. Glaß, 18.10.2022).

8.2 Anhang: Windeinfluss

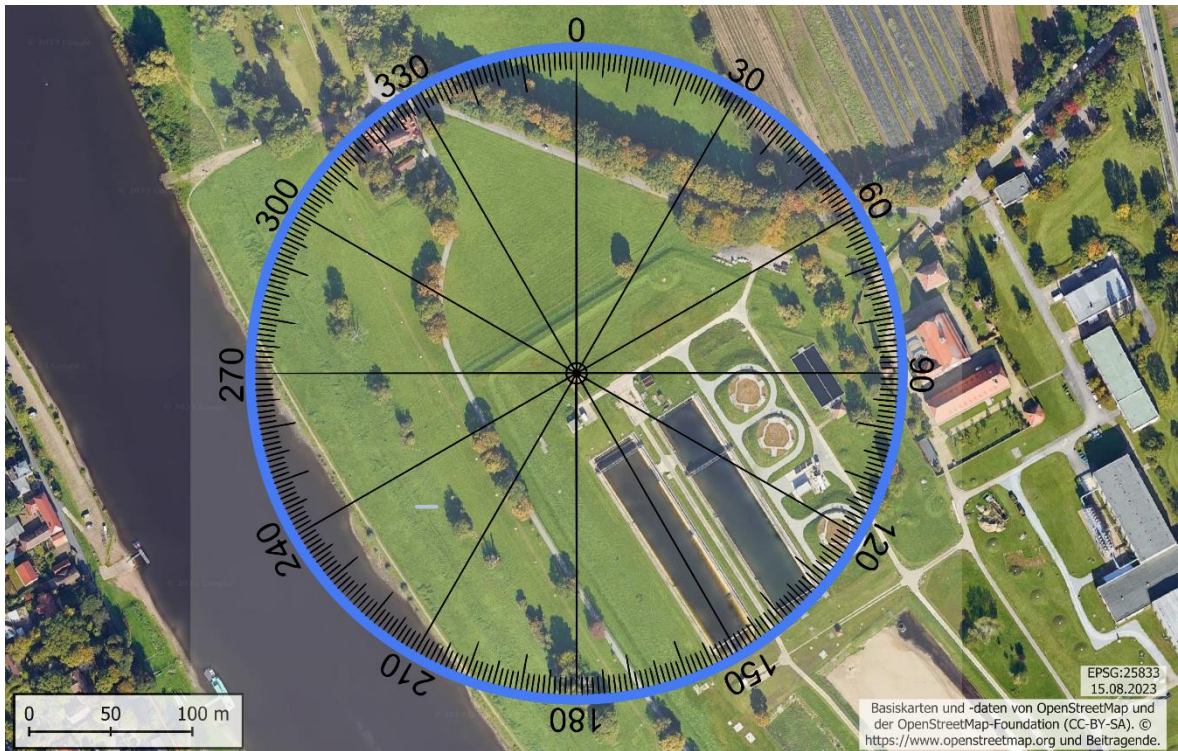


Abbildung 28: Windrose um die Station HOS. Blauer Kreis: 200 m-Radius.

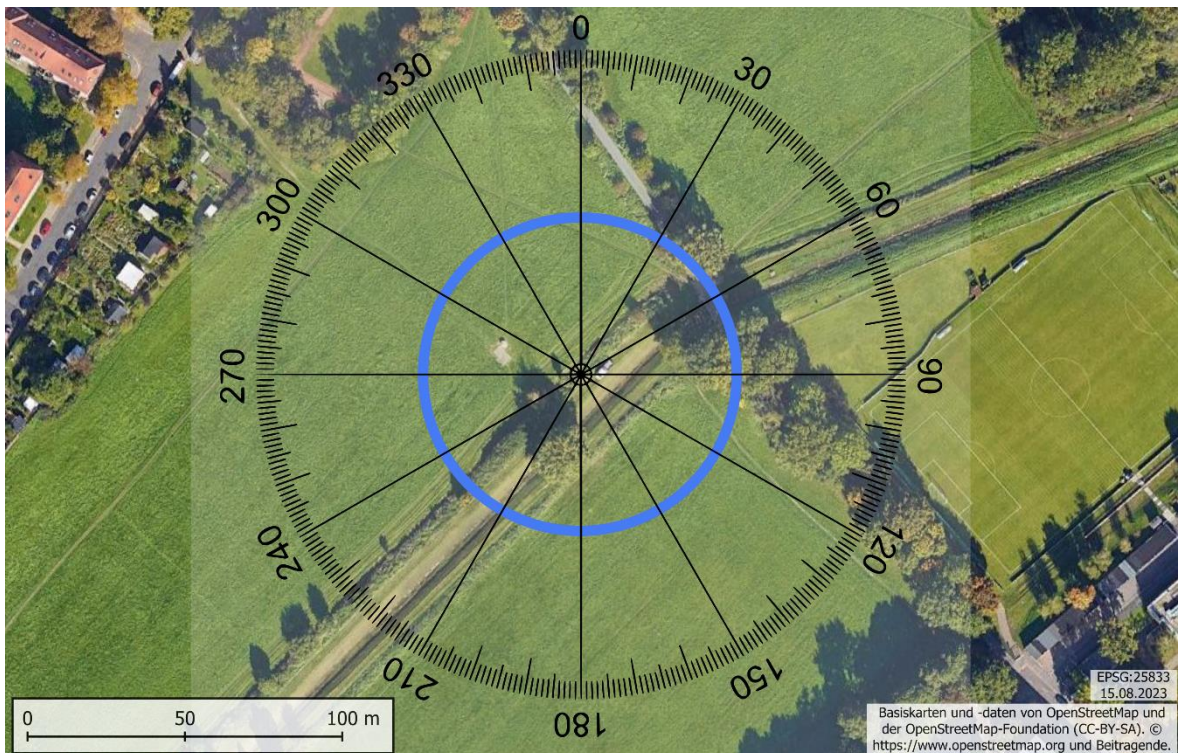


Abbildung 29: Windrose um die Station GEB4. Blauer Kreis: 50 m-Radius.

8.3 Anhang: Übersicht Datensätze

Tabelle 22: Übersicht aller Messstationen mit Informationen zu verfügbaren Datenzeiträumen, Betreibern, Datenformaten und der verwendeten Mess-Sensorik. Die Informationen zu Messgeräten beziehen sich auf den untersuchten Zeitraum 2018-2022. Die Informationen zu Messgeräten und Herstellern zu Stationen des DWD stammen aus den frei verfügbaren Metadaten der DWD-Stationen aus dem Climate Data Center des DWD (DWD, 2023) und aus Löffler (2012). Alle weiteren Informationen wurden aus den angefragten Datenblättern entnommen (Ordner 2 im elektronischen Anhang). Die verschiedenen Messnetze verfolgen unterschiedliche Zwecke und unterliegen damit gegebenenfalls unterschiedlichen Standards und Qualitätsanforderungen.

Betreiber	Station	Startdatum	Enddatum	Datenquelle	Auflösung	Zeitzone (Endwert)	Intervallbezug	Messgerät	Hersteller	Kontakt
DWD	KLO	DD_10, FF_10, TT_10: 22.11.1991 TT_h: 01.01.1973 BG_h, RF_h: 01.07.1975 GS_10: 04.07.2009 SD_10: 22.05.1992	heute	TT: DWD vom 21.02.23 BG, DD, FF, GS, SD: DWD vom 06.- 09.03.2023 RF: DWD vom 19.06.2023	DD, FF, GS, SD, TT_10: 10 min BG, RF, TT_h: 1 h	UTC	TT_10 = Endwert aus Mittelwert über die letzte 1x 1 min (xx:00, xx:10, xx:20, xx:30, xx:40, xx:50; x-s-Auflösung) TT_h = Endwert aus Mittelwert über 6x 1 min; selbst gemittelt	TT (alle): PT 100 Wider- standsthermometer (Luft) – 4-Leiterschaltung BG (KLO): Ceilometer CHM 15k "NIMBUS" DD (KLO): Windrichtungs- sensor Classic 4.3121 FF (KLO): Windsensor Classic 4.3303; GS (KLO): Pyranometer CM11, ab 17.11.2021: CM21 RF (KLO): Feuchtesensor EE33 SD (KLO): SONie Sonnen- energie-Sensor, ab 14.08.2019: SONie Son- nenenergie-Sensor e2 DD+FF: Messung in 10 m ü. Grund Alle weiteren Größen: 2 m ü. Grund	TT (Sensor, Schutz): v. a. Friedrichs BG: Jenoptik DD + FF: Thies GS: Kipp & Zo- nen RF: E+E Elektro- nik SD: Siggelkow Gerätebau	Deutscher Wetter- dienst klima.ver- trieb@dwd.de https://open- data.dwd.de/cli- mate environ- ment/CDC/observati- ons_germany/climate/
	HOS	01.04.2006								
	STR	01.03.2007								
	NEU	28.08.2020			1 h					
LfULG	BER	02.03.2005	heute	LfULG vom 06.02.23	1 h	UTC+1	TT_h = Endwert aus Mittelwert über 60x	Hygro-/Thermogeber KRC3/5-ME (min. seit 09- 2021, davor unklar)	Sensor: Galltec + Mela;	Anette Pausch LfULG Sachsen

	NOR	01.01.2000					1 min (xx:00 - xx:59; 5 s-Auflösung); nicht selbst gemittelt	Hygro-/Thermogeber KRC3/5-ME (min. seit 09- 2019, davor unklar)	Schutz: Thies, 1.1025.55.00x	Annette.Pausch@sme-kul.sachsen.de
	WIN	20.06.2008						Hygro-/Thermogeber KRC3/5-ME (seit 09-2021), 2014- 2021: Hygrothermogeber 1.1005.54.241		https://www.lfulg.sachsen.de
LfULG/ BfUL	PIL	03.01.2009	heute	OSW vom 07.02.2023	1 h	UTC-1	TT_h = Anfangswert aus Mittelwert über 60x 1 min (xx:00 - xx:59; 1 s-Auflö- sung); nicht selbst gemittelt	Sensorkombination Luft- temperatur/ rel. Luft- feuchte: Lufttemperatur- sensor LT1 (10103/10105)	Sensor + Schutz: Toss	Dr. Matthias Müller OpenSensorWeb info@pikobytes.de https://data.opensensorweb.de Dr. Michael Kraatz Mi- chael.Kraatz@smul.sachsen.de https://www.landwirtschaft.sachsen.de/Wetter09/
LHD/ DWD	BOT	03.12.2019	heute	LHD vom 16.06.2023	10 min	UTC	TT_10 = Endwert aus Mittelwert über die letzte 10x 1 min (1 s-Auflösung) TT_h = Endwert aus Mittelwert über 60x 1 min; selbst gemittelt	PT 100 Widerstandsther- mometer (Luft) – 4-Lei- terschaltung	Sensor + Schutz: Friedrichs	Franziska Reinfried Landeshauptstadt Dresden FReinfried@dres- den.de Sabine Püttker sabine.puett- ker@dwd.de
TU + LHD	GEB2	15.11.2019	21.12.2022	TU Dresden vom 02.03.2023	10 min	UTC+1	TT_10 = Endwert aus 10x 1 min Ter- mindaten (1 min- Auflösung) TT_h = Endwert aus Mittelwert über 60 x 1 min Terminda- ten; selbst gemittelt	Temperatur-/ Feuchte- Messfühler Nr. 3032.0300, PT 100-Mes- selement	Sensor + Schutz: Friedrichs	Dr. Astrid Ziemann TU Dresden astrid.ziemann@tu- dresden.de
	GEB4		25.06.2022							

8.4 Anhang: Ergebnisse

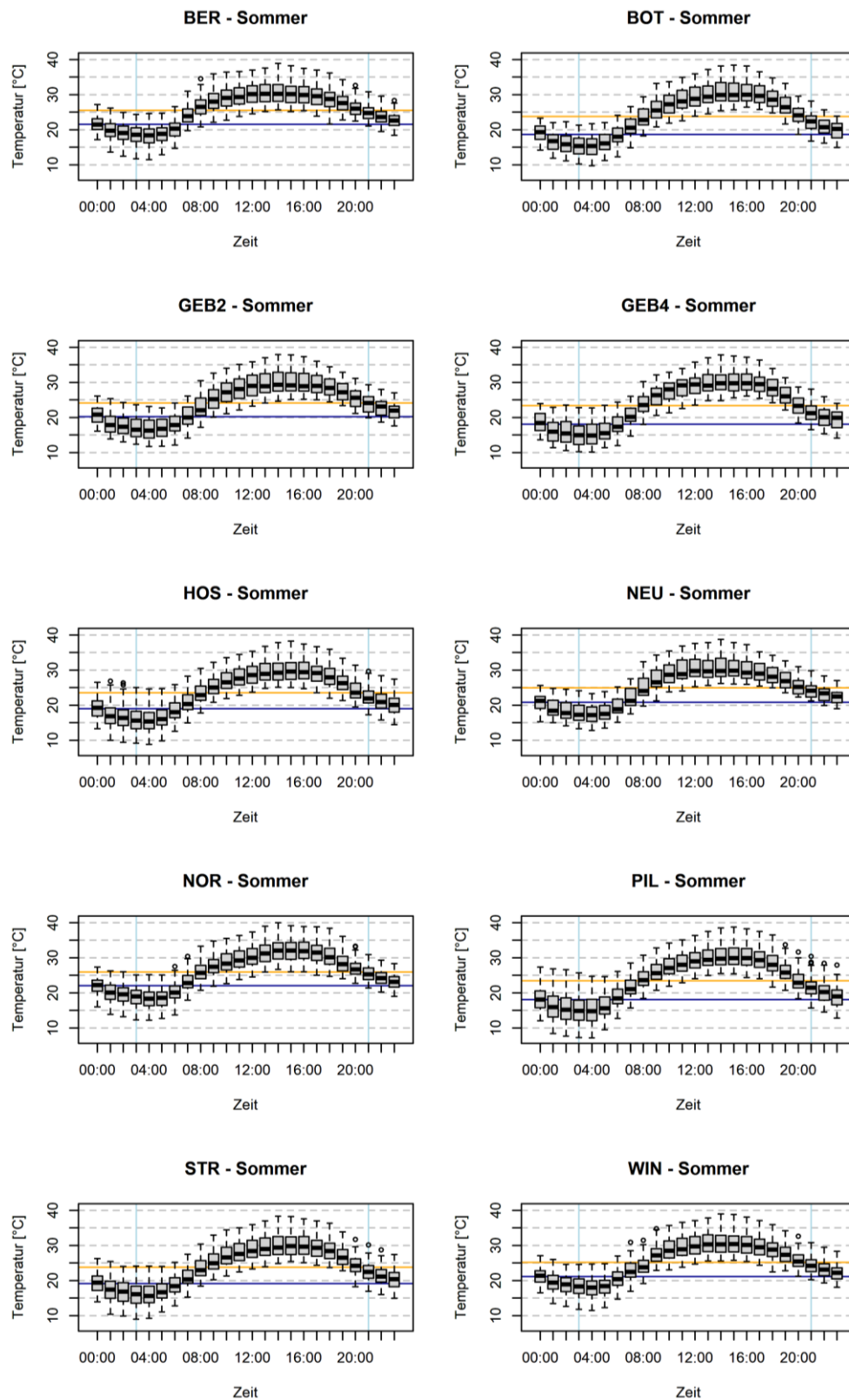


Abbildung 30: Boxplots mit statistisch ermitteltem Tagesgang jeder Station pro Monat bzw. Sommer. Blau: Temperaturmittelwert über die Nachtstunden (NMW), Orange: Temperaturmittelwert über den ganzen Tag (TMW). Senkrechte hellblaue Linien: Beginn und Ende der Nachtstunden. Die Boxplots beginnen mit dem Endwert um 0 Uhr UTC. Die Station GEB4 weist insbesondere im Juli sehr wenig Daten auf, was nicht mit einer höheren Übereinstimmung der Daten verwechselt werden darf.

Tabelle 23: Statistische Auswertung der nächtlichen Temperaturverläufe. Rot: Maximaltemperatur [°C], Blau: Minimaltemperatur [°C], Gelb: maximale Abkühlungsrate pro Nachtstunde [K], Grün: nächtliche Abkühlungsrate zwischen Maximum und Minimum [°C/ h].

Statistik-Bezug	Stationsname	BER	BOT	GEB2	GEB4	HOS	NEU	NOR	PIL	STR	WIN
SOMMER	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	25,0	22,3	24,1	21,6	22,4	24,3	25,6	21,5	22,7	24,4
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	18,7	15,6	17,1	15,5	16,2	17,8	19,0	15,5	16,3	18,4
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	1,1	1,4	1,4	1,3	1,3	1,1	1,2	1,5	1,4	1,1
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	1,1	1,0	1,1	0,8	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	1,0	0,8	1,0	0,8	0,9	1,1	1,1	0,7	0,9	0,9
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	0,8	0,9	1,0	0,9	0,6	0,8	0,9	0,3	0,6	0,7
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,7	0,5	0,6	0,3	0,6	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,6	0,5
	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	6,3	6,7	7,1	6,1	6,2	6,5	6,7	5,9	6,4	5,9
Mittlere nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	1,0	1,1	1,2	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1	1,0	
JUNI	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	24,9	22,5	24,1	21,5	22,5	24,4	25,6	21,3	23,0	24,7
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	18,2	15,3	16,8	15,1	16,1	17,6	18,5	15,5	16,0	18,1
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	1,3	1,5	1,3	1,3	1,4	1,1	1,4	1,5	1,6	1,3
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	1,2	0,9	1,2	0,9	0,9	1,0	1,2	1,0	1,1	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	1,0	0,9	1,0	0,9	0,7	1,0	1,0	0,3	0,8	0,9
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	0,8	1,1	0,9	1,0	0,5	0,8	0,8	0,3	0,7	0,8
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,6	0,6	0,6	0,2	0,5	0,7	0,6	0,5	0,6	0,6
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5

	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	6,8	7,3	7,3	6,4	6,4	6,8	7,1	5,8	7,0	6,6
	Mittlere nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	1,1	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,0	1,2	1,1
JULI	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	25,0	22,0	23,8	20,1	22,5	24,5	25,5	21,9	22,6	24,2
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	18,4	14,6	16,0	12,9	15,4	17,0	18,6	14,5	15,8	18,1
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	1,2	1,4	1,5	1,6	1,5	1,0	1,2	1,9	1,6	1,2
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	1,1	0,9	1,0	1,1	1,4	1,1	1,1	1,6	1,0	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	1,1	0,9	1,1	0,6	1,1	1,5	1,3	0,9	1,1	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	0,9	1,2	1,3	1,4	0,9	1,0	1,0	0,5	0,7	0,8
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,8	0,5	0,7	0,4	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	0,6	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,4	0,7	0,5
	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	6,5	7,4	7,8	7,2	7,1	7,5	6,9	7,3	6,8	6,1
Mittlere nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	1,1	1,2	1,3	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,1	1,0	
AUGUST	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	24,9	22,3	24,2	21,8	22,1	24,0	25,7	21,3	22,4	24,2
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	19,2	16,3	17,7	16,2	16,8	18,5	19,5	16,2	16,7	18,8
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	0,9	1,3	1,3	1,2	0,9	1,0	1,1	1,0	1,1	0,9
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	1,0	1,0	1,0	0,8	0,9	0,9	1,1	0,8	1,0	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	0,9	0,7	0,9	0,7	0,8	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	0,5	0,5	0,9	0,6	0,5	0,7	0,7	0,2	0,5	0,4
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,6	0,5	0,6	0,3	0,5	0,7	0,6	0,5	0,6	0,5
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	0,5	0,7	0,7	0,5	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5
	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	5,7	6,0	6,5	5,6	5,4	5,4	6,2	5,0	5,7	5,4
Mittlere nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	0,9	1,0	1,1	0,9	0,9	0,9	1,0	0,8	0,9	0,9	

Tabelle 24: Auswertung der nächtlichen Temperaturverläufe der drei Einzelfälle mit jeweils allen Stationen. Rot: Maximaltemperatur [°C], Blau: Minimaltemperatur [°C], Gelb: maximale Abkühlungsrate pro Nachtstunde [K], Grün: nächtliche Abkühlungsrate zwischen Maximum und Minimum [°C/ h].

Einzelfall-Bezug	Stationsname	BER	BOT	GEB2	GEB4	HOS	NEU	NOR	PIL	STR	WIN
JUN10	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	24,3	23,3	22,3	21,4	22,8	23,0	24,7	21,7	23,5	24,2
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	16,3	13,4	14,4	11,0	12,7	16,0	16,6	10,6	12,9	16,1
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	1,7	4,1	1,4	2,3	1,7	1,6	1,9	1,4	2,6	2,5
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	1,4	2,1	1,1	3,8	3,6	1,0	0,3	4,2	2,5	1,6
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	1,3	1,6	1,9	1,6	1,9	1,3	1,7	1,8	2,3	1,2
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	1,7	1,5	1,5	1,2	1,1	1,2	1,7	1,6	1,7	1,3
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,9	1,1	1,0	0,2	1,0	1,3	1,6	1,5	0,9	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	1,0	0,8	1,0	1,3	0,8	0,6	0,9	0,6	0,6	0,5
	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	8,0	11,0	7,9	10,4	10,1	7,0	8,1	11,1	10,5	8,1
	Nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	1,3	1,8	1,3	1,7	1,7	1,2	1,4	1,9	1,8	1,4
JUL10	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	23,2	20,2	21,2	19,4	20,9	22,3	23,5	18,1	20,8	22,5
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	02:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	17,9	15,1	15,7	14,0	14,4	16,6	17,8	13,7	14,1	17,3
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	5	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	1,2	1,7	1,3	2,2	2,7	1,0	0,7	1,7	2,8	1,3
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	1,1	1,0	1,3	0,1	0,9	1,5	1,5	1,0	0,4	0,8
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	1,3	0,9	0,9	0,4	0,3	1,1	1,3	0,6	0,6	0,9
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	0,8	0,8	1,0	1,3	1,4	0,9	1,0	0,3	1,1	1,0
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,7	0,7	0,8	1,0	0,8	0,4	0,9	0,8	0,4	0,7
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	0,2	0,6	0,2	0,5	0,4	0,8	0,3	-2,0	1,3	0,5

	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	5,3	5,6	5,5	5,4	6,4	5,7	5,7	4,4	6,7	5,2
	Nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	0,9	0,9	0,9	0,9	1,1	1,0	1,0	0,9	1,1	0,9
AUG10	Zeitpunkt der nächtlichen Maximum-Temperatur (Endwert)	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00	21:00
	Mittlere nächtliche Maximum-Temperatur [°C]	21,6	20,1	20,6	18,3	19,1	21,2	22,2	17,3	19,6	21,1
	Zeitpunkt der nächtlichen Minimum-Temperatur (Endwert)	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	03:00	22:00	03:00	03:00
	Mittlere nächtliche Minimum-Temperatur [°C]	18,3	16,3	17,2	15,0	15,8	17,3	18,6	16,6	16,7	18,3
	Zeitdifferenz zwischen Maximum und Minimum [h]	6	6	6	6	6	6	6	1	6	6
	Temperaturdifferenz zwischen 21 UTC und 22 UTC [K]	0,6	1,9	0,8	0,6	1,1	0,9	0,8	0,7	0,5	0,7
	Temperaturdifferenz zwischen 22 UTC und 23 UTC [K]	0,9	1,1	0,7	1,2	0,3	0,8	0,7	-0,4	0,8	0,5
	Temperaturdifferenz zwischen 23 UTC und 00 UTC [K]	0,8	0,0	0,7	0,2	1,0	0,5	0,9	-0,4	0,4	0,6
	Temperaturdifferenz zwischen 00 UTC und 01 UTC [K]	0,5	-0,2	0,4	0,0	-0,1	0,5	0,5	-0,7	0,3	0,4
	Temperaturdifferenz zwischen 01 UTC und 02 UTC [K]	0,4	0,5	0,5	0,3	0,5	0,5	0,5	0,1	0,4	0,4
	Temperaturdifferenz zwischen 02 UTC und 03 UTC [K]	0,1	0,6	0,4	1,0	0,5	0,7	0,2	0,5	0,4	0,2
	Temperaturdifferenz zwischen Maximum und Minimum [K]	3,3	3,9	3,4	3,2	3,3	3,9	3,6	0,7	2,9	2,8
	Nächtliche Abkühlungsrate [°C/ h]	0,6	0,6	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	0,5

Tabelle 25: Messdaten zu Temperatur, relativer Feuchte, mittlerer und maximaler Windgeschwindigkeit sowie zur Niederschlagssumme der Station BOT in der Nacht zwischen 05. und 06.07.2022 in 10 min-Auflösung. Ein Wetterumschwung durch ein Regenereignis hat einen raschen Temperaturabfall zur Folge. Fett: hervorzuhebende Ergebnisse.

Datum	Zeit (UTC)	TT_10 [°C]	RF_10 [%]	FF_10 [m/s]	FF_10_max [m/s]	RR_10 [mm]
05.07.2022	22:00	21,2	46,1	0,5	1,5	0
05.07.2022	22:10	21,0	46,8	0,3	1,0	0
05.07.2022	22:20	20,7	47,4	0,3	1,0	0
05.07.2022	22:30	20,5	48,5	0,4	1,4	0
05.07.2022	22:40	20,2	50,1	0,4	1,1	0
05.07.2022	22:50	20,0	51,7	0,6	1,8	0
05.07.2022	23:00	20,3	48,3	2,7	11,0	0
05.07.2022	23:10	18,6	58,1	2,5	9,0	0,1

05.07.2022	23:20	16,6	74,8	1,3	4,2	0,2
05.07.2022	23:30	15,9	81,2	1,7	6,3	0,4
05.07.2022	23:40	15,5	84,8	0,7	2,2	0,3
05.07.2022	23:50	14,9	89,1	0,3	0,8	0,9
06.07.2022	00:00	14,7	91,2	0,3	0,5	0,7

Tabelle 26: Übersicht der Folgen des in Tabelle 25 dargestellten Wetterereignisses auf die Temperaturstundenmittel aller vorhandener Stationen. Der obere Teil enthält die absoluten Stundenmitteltemperaturen [°C], der untere Teil die jeweiligen stündlichen Differenzen [K]. Fettdruck: maximale Differenzen.

Datum und Zeit (UTC)	BER TT_h	BOT TT_h	GEB2 TT_h	HOS TT_h	NEU TT_h	NOR TT_h	PIL TT_h	STR TT_h	WIN TT_h
05.07.2022, 21:00:00	22,7	22,3	21,4	21,3	22,0	22,9	19,6	22,2	22,6
05.07.2022, 22:00:00	22,1	21,4	20,6	20,7	21,5	22,4	20,5	21,3	22,1
05.07.2022, 23:00:00	21,3	20,6	19,7	19,4	20,8	21,9	18,7	20,5	21,2
06.07.2022, 00:00:00	17,2	17,0	16,4	17,0	15,3	16,0	16,8	16,7	16,5
Differenz 21-22 UTC [K]	0,6	0,9	0,8	0,6	0,5	0,5	-0,9	0,9	0,5
Differenz 22-23 UTC [K]	0,8	0,8	0,8	1,4	0,7	0,5	1,8	0,8	0,9
Differenz 23-00 UTC [K]	4,1	3,6	3,3	2,4	5,5	5,9	1,9	3,8	4,7





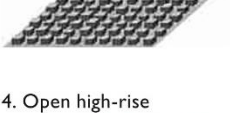




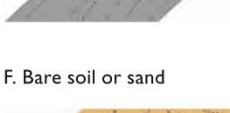

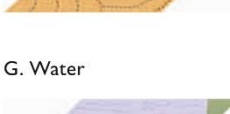




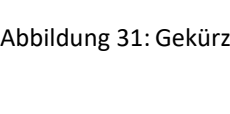
Built types	Definition	Land cover types	Definition
 <p>1. Compact high-rise</p>	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>A. Dense trees</p>	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>2. Compact midrise</p>	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>B. Scattered trees</p>	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
 <p>3. Compact low-rise</p>	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	 <p>C. Bush, scrub</p>	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
 <p>4. Open high-rise</p>	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>D. Low plants</p>	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
 <p>5. Open midrise</p>	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	 <p>E. Bare rock or paved</p>	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
 <p>6. Open low-rise</p>	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	 <p>F. Bare soil or sand</p>	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
 <p>7. Lightweight low-rise</p>	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	 <p>G. Water</p>	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
 <p>8. Large low-rise</p>	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	VARIABLE LAND COVER PROPERTIES	
 <p>9. Sparsely built</p>	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
 <p>10. Heavy industry</p>	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	<p><i>b. bare trees</i></p> <p><i>s. snow cover</i></p> <p><i>d. dry ground</i></p> <p><i>w. wet ground</i></p>	<p>Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.</p> <p>Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.</p> <p>Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.</p> <p>Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.</p>

Abbildung 31: Gekürzte Definitionen für lokale Klimazonen, entnommen aus Stewart und Oke (2012, S. 1885).

8.5 Anhang: Übersicht über den elektronischen Anhang

Im elektronischen Anhang sind folgende Informationen enthalten:

Ordner 1: Rohdaten (Stand 16.06.2023)

Ordner 2: Metadaten zur Sensorik (Stand 03.10.2023)

Ordner 3: Auswertung

- Kapitel 3.4: Auswahl Datenzeiträume (Tabelle, Stand 03.11.2023)
- Kapitel 3.5.5: Darstellung der ausgewählten Einzelfälle (15 Abbildungen, Stand 07.07.2023)
- Kapitel 3.5.6: Auswertung Windeinfluss (Tabelle mit 16 Abbildungen, Stand 15.10.2023)
- Kapitel 3.5.7: Auswahl geeigneter längerer Hitzeperioden (Tabelle mit 18 Abbildungen, Stand 03.11.2023)

Ordner 4: Ergebnisse

- Kapitel 4.1.1: Auswertung des gesamten Tagesverlaufs, Statistik (R-Skript mit vier Abbildungen, Stand 07.07.2023)
- Kapitel 4.2: Einfluss blauer Infrastruktur auf lokale Temperaturen – Hypothese 1, Einzelfälle (15 Abbildungen, Stand 02.08.2023)
- Kapitel 4.3: Kaltlufteinfluss auf lokale Temperaturen – Hypothese 2, Statistik (vier Abbildungen, Stand 02.08.2023) und Einzelfälle (15 Abbildungen, Stand, 02.08.2023)
- Kapitel 4.4.1: Plausibilitätsprüfung: Repräsentativität der Referenzstation, Statistik (vier Abbildungen, Stand 27.06.2023)
- Kapitel 4.4.2: Plausibilitätsprüfung: Typische Stadtstation, Statistik (vier Abbildungen, Stand 27.06.2023)
- Kapitel 4.5.3.2: Einfluss grüner Infrastruktur – Hypothese 3, Statistik (vier Abbildungen, Stand 02.08.2023) und Einzelfälle (15 Abbildungen, Stand, 02.08.2023)
- Kapitel 4.5.4: Veränderung des UHI-Effekts über eine längere Hitzeperiode, Einzelfälle (Tabelle, Stand 06.10.2023)
- Kapitel 4.6: Bewertung der Stationen anhand lokaler Klimazonen (TIF-Datei, Stand 30.10.2023)

Ordner 5: 3D-Ansichten der Stationen

- 3D-Ansichten der näheren und weiteren Stationsumgebungen (16 Abbildungen, entnommen aus dem virtuellen 3D-Stadtmodell (LHD, 2023a), Stand 16.08.2023)

Ordner 6: Digitale Version der vorliegenden Arbeit (Stand 04.12.2023)