



UNIVERSITÄT  
BAYREUTH



UNIVERSITÄT BAYREUTH - MIKROMETEOROLOGIE

Bachelorarbeit

# Analyse der Ausprägung des Mikroklimas im Bayreuther Süden mithilfe von stationären und mobilen Messungen



Oliver Schappacher  
Geoökologie B.Sc., 7. FS

betreut von  
Prof. Dr. Christoph Thomas

Matrikelnummer: 1786370  
Abgabedatum: Februar 2024



# Abstract

The atmospheric conditions in urban areas are different from those in rural areas due to various mechanisms that result in an urban heat island effect (UHI). This effect causes higher air temperatures in urban areas, leading to less snowfall in winter and a longer growing season. In addition, it enables the cultivation of species that are typically found in southern regions. However, high night-time air temperatures may pose a general health risk, especially for vulnerable groups. Within a city, night-time air temperatures are spatially heterogeneous. Particularly in areas with cold air drainages (CAD), a reduction in nocturnal air temperatures can be observed. However, these cold air drainages are obstructed by barriers that prevent them from reaching the city center. The main objective of this study is to investigate the dynamics of cold air in urban areas and to improve the understanding of flow barriers in urban areas. It is hypothesised that the dam restricts cold air from the south-south-east from the Sophienberg to the Quartier Kreuzstein, leading to the formation of a cold air pool on the south-east side of the dam. It is assumed that the dam between the Quartier Kreuzstein and the pond Glasenweiher is an obstacle for the drainage of cold air at night, and that the cold air can't flow over it. In order to place the situation of the Quartier Kreuzstein and the Glasenweiher into the wider picture of the city, it was further assumed that the entire south of Bayreuth benefits from the cold air outflows from the Sophienberg. This means that there is a uniform spatial air temperature distribution and no urban heat island is formed in this area. The hypotheses were evaluated using meteorological measurements in Bayreuth. The first measurement approach used data from the citywide meteorological measurement network, which was established as part of the MiSKOR research project. Within this thesis, this network was extended by an additional micro-weather station at the Glasenweiher pond. In addition to these stationary measurements, mobile bicycle-based measurements were conducted to measure spatial air temperature distributions.

It was found that the cold air pool in the Quartier Kreuzstein is only slightly developed, which means that the dam, with a height of 8-10 meter, can't be flown over. During cold air nights, no difference in air temperature was found between the south and north of the dam. This points to a local formation of cold air at the pond or in the surrounding green areas, or to an additional drainage path for the cold air. Nevertheless, there is a significant difference in specific humidity between unsaturated conditions regarding to water vapor during cold air nights. The specific humidity at Glasenweiher is consistently higher, indicating a well-defined microclimate spatially separated by the dam. Air temperature is significantly influenced by small green or shaded areas. In the afternoon, areas with dense vegetation has significantly reduced air temperature at ground level. This thesis shows that CAD's have a significant influence on ground-level air temperatures in the suburban areas of a medium-sized city. Due to the lower gradient, cold air drainages have difficulty entering densely built-up areas. Even minor obstacles along the flow paths of the cold air can reduce the flow of cold air. This results, among other effects, in a lower decrease of the air temperature during the night in densely built up areas. Inner-city green spaces have the potential to decrease air temperatures in the afternoon and evening. To improve the quality of urban life, especially during heat waves, sustainable urban planning should maintain cold air flow paths to reduce nighttime temperatures.



# Zusammenfassung

In Städten herrschen andere atmosphärische Bedingungen als in der ländlichen Umgebung. Ursachen hierfür sind verschiedene Mechanismen, die dazu führen, dass städtische Gebiete häufig wärmer sind als ländliche. Dieses Phänomen wird als Urbane Wärmeinsel (UWI) bezeichnet. Dieser Effekt bewirkt höhere Lufttemperaturen in städtischen Gebieten, was zu weniger Schneefall im Winter und einer längeren Vegetationsperiode führt. Außerdem ermöglicht er den Anbau von Arten, die normalerweise in südlichen Regionen vorkommen. Hohe nächtliche Lufttemperaturen stellen insbesondere für vorbelastete Personen ein generelles Gesundheitsrisiko dar. Die nächtliche Wärmebelastung ist in einer Stadt räumlich ungleich verteilt, insbesondere in Gebieten mit Kaltluftzufuhr ist eine Verringerung der Belastung zu beobachten. Diese Kaltluftströme werden jedoch durch Barrieren daran gehindert, in das Zentrum der Stadt vorzudringen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss von Strömungshindernissen auf die Kaltluftdynamik zu quantifizieren. Außerdem sollen die Auswirkungen auf die Verteilung der städtischen Lufttemperatur untersucht werden. Es wird vermutet, dass sich die Kaltluft, die vom Sophienberg in nord-nordöstlicher Richtung abfließt, sich aufgrund des Damms im Quartier Kreuzstein sammelt und so zur Bildung eines Kaltluftsees auf der südöstlichen Seite des Damms führt. Außerdem wird angenommen, dass der Damm zwischen dem Quartier Kreuzstein und dem Glasenweiher ein Strömungshindernis für den nächtlichen Kaltluftabfluss darstellt, das von der Kaltluft nicht überwunden werden kann. Um die Situation im Quartier Kreuzstein und Glasenweiher in das Gesamtbild der Stadt zu einzuordnen, wurde darüber hinaus angenommen, dass der gesamte Süden Bayreuths von den Kaltluftabflüssen des Sophienberges profitiert, so dass es zu einer ausgeglichenen räumlichen Temperaturverteilung kommt und sich in diesem Bereich keine städtische Wärmeinsel ausbildet.

Diese Hypothesen wurden mit Hilfe von meteorologischen Messungen in Bayreuth überprüft. Für den ersten Messansatz wurden die Daten des stadtweiten meteorologischen Messnetzes verwendet, welches aus dem MiSKOR Forschungsprojekt hervorgegangen ist. Dieses wurde im Rahmen dieser Arbeit um eine weitere Mikro-Wetterstation am Glasenweiher erweitert. Zusätzlich zu diesen stationären Messungen wurden mobile Messungen der Lufttemperatur mit dem Fahrrad durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass der Kaltluftsee im Quartier Kreuzstein nur gering ausgeprägt ist, daraus folgt, dass der Damm mit einer Höhe von 8-10 Meter nicht überströmt werden kann. Es wurde keine Differenz in der Lufttemperatur vor und hinter dem untersuchten Damm während Kaltluftnächten festgestellt. Dies deutet auf eine lokale Kaltluftentstehung am Weiher beziehungsweise den umliegenden Grünflächen oder eine weitere Kaltluftabflussbahn hin. Die spezifische Luftfeuchte unterscheidet sich jedoch in Kaltluftnächten und bei ungesättigten Verhältnissen gegenüber Wasserdampf stark. Die spezifische Feuchte am Glasenweiher ist stets höher, was auf ein ausgeprägtes, durch den Damm räumlich begrenztes Mikroklima hindeutet. Bereits kleine begrünte oder beschattete Flächen haben einen deutlichen Einfluss auf die Lufttemperatur. In den Nachmittagsstunden haben Flächen mit einem hohen Anteil an Vegetation einen kühlenden Effekt.

Diese Arbeit zeigt, dass Kaltluftabflüsse einen signifikanten Einfluss auf die bodennahen

Lufttemperaturen am Stadtrand einer mittelgroßen Stadt haben. Kaltluftströmungen können in dicht bebaute Gebiete aufgrund des geringeren Gefälles nur schwer eindringen. Bereits kleine Strömungshindernisse entlang der Fließwege der Kaltluft können zu einer Begrenzung des Kaltluftabflusses führen. Dies führt zu unter anderem zu einer geringeren nächtlichen Abnahme der Lufttemperatur in dichter bebaute Gebieten. Insbesondere innerstädtische Grünflächen haben ein großes Potenzial, die Lufttemperaturen am Nachmittag und Abend zu senken. Die Erhaltung von Kaltluftabflussbahnen durch eine angepasste nachhaltige Stadtplanung führt zu einer Senkung der Lufttemperaturen in der Nacht und damit zu einer Verbesserung der Lebensqualität in der Stadt, insbesondere während Hitzeperioden.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>I</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>II</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Theorie</b>	<b>5</b>
2.1. Urbaner Wärmeinseleffekt . . . . .	5
2.2. Kaltluftabfluss . . . . .	6
<b>3. Methoden</b>	<b>9</b>
3.1. Kaltluftanalyse . . . . .	13
3.2. Mobiles Messgerät . . . . .	15
3.2.1. Thermoelement . . . . .	15
3.2.2. Positionsbestimmung . . . . .	16
3.2.3. Fahrtstrecke und Datenaufzeichnung . . . . .	20
3.3. Datenbearbeitung . . . . .	21
3.3.1. Ausschluss vom Messdaten . . . . .	21
3.3.2. Umrechnung der Koordinaten in das Dezimalminutenformat . . . . .	21
3.3.3. Kompensation der zeitlichen Instationarität . . . . .	22
3.3.4. Weitere Bearbeitung der Messdaten . . . . .	23
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>27</b>
4.1. Kaltluftsee am Quartier Kreuzstein . . . . .	28
4.2. Mikroklima am Quartier Kreuzstein und Glasenweiher . . . . .	31
4.3. Räumliche Variabilität der Lufttemperaturabweichungen und -differenzen . . . . .	36
<b>5. Diskussion</b>	<b>41</b>
5.1. Kaltlufteinfluss am Quartier Kreuzstein . . . . .	41
5.2. Quantifizierung des Seeklimas . . . . .	42
5.3. Großräumige Einordnung in das südliche Stadtgebiet . . . . .	46
<b>6. Schlussfolgerungen</b>	<b>49</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>51</b>
<b>Anhang</b>	<b>55</b>
A. Sensorvergleich . . . . .	55
B. Zusätzliche Tabellen und Abbildungen . . . . .	58



# Abbildungsverzeichnis

3.1.	Übersichtskarte Untersuchungsgebiet Bayreuther Süden . . . . .	9
3.2.	Übersichtskarte der Mikro-Wetterstationen im gesamten Stadtgebiet von Bayreuth . . . . .	10
3.3.	Mikrowetterstation am Südufer des Glasenweiher. Blickrichtung nach NNW.	12
3.4.	Lufttemperaturdifferenz zwischen den Standorten Mistel und Kämmerei in Abhängigkeit der Windböengeschwindigkeit . . . . .	14
3.5.	Klassifikation der Kaltluftbildungsbedingungen an der Station Quartier Kreuzstein. . . . .	15
3.6.	Mit einem Hitzedrahtanemometer gemessene Strömungsgeschwindigkeit im Strahlungsschutz bei unterschiedlichen Spannungen am Lüfter. Das Messintervall beträgt eine Sekunde. . . . .	17
3.7.	Aufbau des Messfahrrads mit aktiv aspiriertem Strahlungsschutz. Das Thermoelement ist vertikal im Strahlungsschutz montiert. Der Abstand zwischen den beiden Antennen beträgt 60 Zentimeter. . . . .	18
3.8.	Mittlere räumliche GPS-Ungenauigkeit entlang der Messroute. Datengrundlage ist der Mittelwert der vom Ellipse-D-System im 1-Sekunden-Intervall gemessenen Abweichung von Längengrad und Breitengrad (NMEA/GST) auf einem Mittelungsintervall von 5 m. Einbezogen werden alle Messfahrten am Abend. . . . .	19
3.9.	Messroute . . . . .	20
3.10.	Räumliche Darstellung von $\widehat{\Delta T}$ während der Morgenfahrt am 11.08.2023 zwischen 5:10 und 5:57 Uhr entlang der Messroute. Die Route wurde vom Startpunkt am GEO III (bei Uni1) im Uhrzeigersinn zunächst in Richtung Röhrensee abgefahren. Die grünen Punkte zeigen die Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation am ÖBG. . . . .	23
3.11.	Darstellung der Messpunkte mehrerer Messfahrten am Übergang zwischen Universität und Quartier Kreuzstein. Die Unterschiede zwischen den Messfahrten sind auf unterschiedliche Fahrstrecken zurückzuführen und nicht auf Messungenauigkeiten des Trägheitsnavigationssystems. . . . .	24
3.12.	Die Strecke am Quartier Kreuzstein (QKS Nord) wurde unterschiedlich weit ausgefahren, wodurch Abweichungen in der tatsächlich gefahrenen Distanz auftreten. Durch das Verschieben der Messpunkte auf die ideale Route können je nach gefahrener Strecke keine oder mehrere Punkte einem Streckenabschnitt zugeordnet werden. . . . .	25
4.1.	Lufttemperatur im ÖBG im Sommer 2023 . . . . .	27
4.2.	Dauer des nächtlichen Kaltluftabfluss von Mai bis Oktober 2023 . . . . .	28

4.3.	Darstellung der Windböengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Windrichtung für die Mikrowetter-Stationen Hohlmühlleite, Dr. Konrad Pöhner Straße und Quartier Kreuzstein entlang der Fließbahn der Kaltluftströmung in Kaltlufternächten. Zusätzlich ist die häufigste Windrichtung angegeben. Ausgewählt sind 5-Minuten-Werte in Kaltlufternächten vom 6.10 bis 28.10.2021 (N = 2204). In diesem Zeitraum sind alle drei Mikro-Wetterstationen aktiv gewesen. . . . .	29
4.4.	Zunahme der spezifische Luftfeuchte am Quartier Kreuzstein gegenüber dem Glasenweiher bei Kaltlufternächten . . . . .	30
4.5.	Lufttemperaturdifferenz zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher bei Kaltlufternächten und keinen Kaltlufternächten . . . . .	31
4.6.	Gemessene Lufttemperatur, Änderungsrate der Lufttemperatur im 5 Minutenintervall an den Stationen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher und die Differenz der Lufttemperatur zwischen den beiden Standorten. . . . .	33
4.7.	Wasserdampfdruck zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher bei Kaltlufternächten . . . . .	34
4.8.	Spezifische Luftfeuchte zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher bei Kaltlufternächten . . . . .	35
4.9.	Räumliche Darstellung von dem $\widehat{\Delta T}$ aller Abfahrten bei einem Mittelungsintervall von 5 m entlang der Messroute und über Inverse Distance Weighting interpolierte Bereiche. Mit blauen Pfeilen sind vermutete Fließwege der Kaltluft eingezeichnet. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt. . . . .	37
4.10.	Räumliche Darstellung von dem $\widehat{\Delta T}$ aller Fahrten am Nachmittag bei einem Mittelungsintervall von 5 m entlang der Messroute und über Inverse Distance Weighting interpolierte Bereiche. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt. . . . .	38
4.11.	Mittlere Abweichung und Standardabweichung der Lufttemperatur vom der mittleren Lufttemperatur des Stadtmittels entlang der Messroute bei Messungen am Morgen, Nachmittag und Abend. . . . .	39
A.1.	Aufbau des Instrumentenvergleichs in der ersten Phase im Juni 2023 . . . .	55
A.2.	Aufbau des Instrumentenvergleichs in der zweiten Phase im Juni 2023 . . .	55
A.3.	Vergleich der Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte der Vergleichsmessung . . . . .	56
A.4.	Vergleich der Wind und Windböengeschwindigkeit der Vergleichsmessung .	57
A.5.	Vergleich der Windgeschwindigkeit und Windrichtung der Vergleichsmessung	57
B.1.	Windrose mit Windrichtung und Windböengeschwindigkeit der Mikro-Wetterstation Quartier Kreuzstein zwischen dem 01.09.2021 und dem 16.10.2023. Die Mikro-Wetterstation wurde am 09.12.2022 von Standort 1 an Standort 2 versetzt. . . . .	58
B.2.	Windrose mit Windrichtung und Windböengeschwindigkeit der Mikro-Wetterstation Glasenweiher zwischen dem 04.07 und dem 16.10.2023. Unterscheidung Kaltlufternächten (N = 6654) und keinen Kaltlufternächten (N = 6287) auf Basis von 5-Minuten-Intervallen. . . . .	59

---

B.3. Abweichung der Lufttemperatur an den Mikro-Wetterstationen während den Messfahrten vom Stadtmittel . . . . .	61
B.4. Mittlere Fahrtgeschwindigkeit während der Messfahrten am Morgen (N = 4), Nachmittag (N = 3) und Abend (N = 5) in Abhängigkeit von der Distanz entlang der Messroute in einem Streckenabschnitt von 5 Metern sowie die mittels der Glättungsfunktion GAM gemittelten Werte. . . . .	61
B.5. Räumliche Darstellung von dem $\widehat{\Delta T}$ aller Morgenfahrten bei einem Mittelungsintervall von 5 m entlang der Messroute und über Inverse Distance Weighting interpolierte Bereiche. Mit blauen Pfeilen sind vermutete Fließwege der Kaltluft eingezeichnet. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt. . . . .	62
B.6. Räumliche Darstellung der GNSS Genauigkeit entlang der Messroute Morgen. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt. . . . .	62
B.7. Räumliche Darstellung der GNSS Genauigkeit entlang der Messroute Nachmittag. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt. . . . .	63



# Tabellenverzeichnis

3.1. Übersicht der verwendeten Datenquellen der stationären und mobilen Messungen. Für die Auswertung der mobilen Lufttemperaturmessungen werden alle zur Messzeit aktiven MWS als auch die Wetterstation ÖBG herangezogen. . . . .	10
3.2. In dieser Arbeit verwendete Klimaelemente der Mikro-Wetterstationen vom Typ ATMOS 41 mit Auflösung, Messgenauigkeit und Aggregationsfunktion. Mithilfe der internen Aggregationsfunktion werden die Messwerte über den Zeitraum des Aggregationsintervalls auf die Ausgabewerte umgerechnet. Die Angaben basieren auf dem Datenblatt der ATMOS 41 Mikrowetterstation der METER Group, Inc. USA. * Es gilt der größere Wert. ** Variiert mit Temperatur und Luftfeuchte. . . . .	11
3.3. Vergleich der Kaltluftsituation zwischen der Mikro-Wetterstation Mistel und Quartier Kreuzstein . . . . .	14
3.4. Zeitpunkte von Lufttemperaturmaximum, Lufttemperaturminimum und der stärksten Abkühlungsrate in MESZ für den Monat August. Datengrundlage sind Lufttemperaturmessungen an allen Mikrowetterstationen im Stadtmessnetz in den Monaten August 2021 und 2022. Dafür wurden Tage mit Kaltluftabfluss von mindestens sieben Stunden selektiert und daraus die mittlere Lufttemperatur berechnet. . . . .	20
B.1. Übersicht der Messfahrten mit Datum, Fahrtbeginn, Ende der Fahrt, Fahrtrichtung, Verwendung der Fahrt in der Auswertung und sonstige Bemerkungen. Die Daten bis auf 'verwendet' stammen aus dem Fahrtenprotokoll, das zu Beginn und Ende jeder Fahrt ausgefüllt wurde. Beginn und Ende beziehen sich auf den ungefähren Start des Messsystems und nicht auf den tatsächlichen Beginn der Messung. . . . .	60



# 1. Einleitung

Vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels und der damit einhergehenden Zunahme der Intensität und Dauer von Hitzewellen (IPCC, 2023), besteht die Notwendigkeit, die Auswirkungen von Kaltluftabflüssen auf die urbane Wärmeinsel (UWI) näher zu untersuchen. Der UWI-Effekt beschreibt den Effekt erhöhter durchschnittlicher Lufttemperaturen in städtischen Gebieten im Vergleich zu ländlichen Gebieten aufgrund veränderter Strahlungs- und Energiebilanz (Oke, 1973). Die höheren Lufttemperaturen bedingen eine längere Vegetationsperiode und weniger schneebedeckte Flächen. Außerdem können Pflanzen wachsen, die sonst nur in wärmeren Regionen beheimatet sind. Die größten Temperaturunterschiede zwischen Stadt und Umland treten in der Nacht auf (Oke, 1982). Dies führt nicht nur zu höheren Extremtemperaturen während des Tages, sondern auch zum Ausbleiben nächtlicher Abkühlungsperioden, das wiederum eine erhebliche Belastung für die Stadtbevölkerung darstellt (Wicki et al., 2018). Zahlreiche Studien zeigen, dass der UWI-Effekt das hitzebedingte Gesundheitsrisiko erhöht (Gabriel und Endlicher, 2011; He et al., 2022; Huang et al., 2023; Kovats und Hajat, 2008; Royé, 2017). Wobei ältere Bevölkerungsgruppen besonders betroffen sind (Huang et al., 2023). Während austauscharmen autochthonen Wetterlagen in Sommermonaten, in denen häufig Hitzewellen auftreten, ist das Gesundheitsrisiko höher, weil der Austausch mit kühler Luft in das Stadtzentrum verringert ist (Peng et al., 2011). Insbesondere Kaltluftabflüsse können nachts während autochthoner Wetterlagen dazu beitragen, die städtischen Lufttemperaturen zu reduzieren (Nkemdirim, 1980). Daraus ergibt sich ein wachsendes Interesse, den Einfluss von Kaltluftabflüssen auf die städtische Lufttemperaturverteilung zu untersuchen, um stadtplanerische Maßnahmen zur Verbesserung des Luftaustausches ergreifen zu können. Ebenso hat das Mikroklima einen erheblichen Einfluss auf die Lufttemperaturen an einem Standort. Es wird durch die kleinräumigen Einflüsse der Erdoberfläche geprägt und durch lokale Bedingungen wie Bodeneigenschaften sowie Art und Dichte der Vegetation beeinflusst (Deutscher Wetterdienst, 2023). Das Mikroklima in der Nähe eines Gewässers ist durch niedrigere Lufttemperaturen tagsüber und im Sommerhalbjahr sowie höhere Lufttemperaturen nachts und im Winterhalbjahr im Vergleich zu einem gewässerfernen Gebiet gekennzeichnet. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Wasserfläche, da sich Wasser aufgrund seiner hohen Wärmekapazität bei gleichem Energieeintrag langsamer erwärmt, bzw. abkühlt.

Die bisherigen Forschungsarbeiten im Stadtgebiet von Bayreuth, die eine wichtige Grundlage für diese Arbeit darstellen, konzentrieren sich vor allem auf die Untersuchung der gesamtstädtischen Situation (Spies, 2019; Thomas und Samimi, 2021; Tschuschke, 2019), während der Fokus dieser Arbeit auf dem Bayreuther Süden liegt. Es besteht jedoch noch ein deutlicher Forschungsbedarf hinsichtlich der Auswirkungen von Barrieren in Zusammenhang mit Kaltluftabflüssen. Aus diesem Grund ist es von besonderem Interesse, den Einfluss von Strömungshindernissen auf die Kaltluftdynamik zu quantifizieren und die Auswirkungen auf die städtische Lufttemperaturverteilung zu untersuchen. Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen eines Dammes auf die Kaltluftdynamik und das Mikroklima im Quartier Kreuzstein und im Bereich des Glasenweiher in Bay-

reuth. Erweitert werden die Ergebnisse der Kaltluftdynamik durch mobile Messungen der Lufttemperatur im Süden von Bayreuth. Das Hauptziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Wissenslücke bezüglich der Kaltluftdynamik in städtischen Gebieten zu verkleinern und ein besseres Verständnis über Strömungshindernisse in urbanen Gebieten zu erlangen. Eine detaillierte Untersuchung dieser Aspekte ermöglicht die Entwicklung von stadtplanerischen Maßnahmen zur Verbesserung der Kaltluftströmung und damit zur Reduzierung der Wärmebelastung in urbanen Gebieten.

Durch die Lage Bayreuths sind günstige Voraussetzungen für Kaltluftabflüsse aus den umliegenden Höhenlagen in das Stadtgebiet gegeben. Die Stadt verfügt über effektive Kaltlufttrassen, die in den letzten Jahrzehnten durch Baumaßnahmen jedoch teilweise in ihrer Funktion eingeschränkt wurden (Foken, 2007). Besonders seit dem Bau der Autobahn in den 1930er Jahren wurden viele dieser Kaltlufttrassen in ihrer Funktion beeinträchtigt (Foken, 2007). Derzeit ist eine ausgeprägte UWI in Bayreuth zu beobachten (Spies, 2019; Thomas und Samimi, 2021). Inzwischen wird im Rahmen der klimaangepassten Stadtplanung die Wiederherstellung von Kaltluftabflussbahnen angestrebt. Durch die Verlagerung der Betonfertigteilproduktion der Firma Zapf von Bayreuth an einen anderen Standort und die Aufgabe der Steinproduktion der Firma Ehl im Gewerbegebiet Nürnberger Straße (Oppold, 2020) wird eine Fläche von 68 000 m<sup>2</sup> am Stadtrand von Bayreuth frei, die bisher am südlichen Rand eine Barriere für den Kaltluftabfluss darstellte (Tschuschke, 2019). Laut ZAPF-Projektleiter Dieter Zehner soll das Gewerbegebiet Nürnberger Straße langfristig in das Wohn- und Gewerbegebiet Quartier Kreuzstein umgewandelt werden. Dies bietet die Möglichkeit, den Kaltlufteinfluss in diesem Gebiet näher zu untersuchen und neue Erkenntnisse über Kaltluftflüsse im städtischen Raum zu erlangen.

Vorangegangene Arbeiten im Rahmen des MiSKOR-Projekts bilden die Grundlage dieser Untersuchung. Tschuschke (2019) untersuchte mit mobilen fahrradgestützten Temperaturmessungen den Einfluss von Topografie, Fließgewässern und Bebauung auf die Temperaturverteilung und Luftströme im Bayreuther Stadtgebiet. Dabei wurden die allgemeine Temperaturverteilung in der Stadt sowie bedeutende Kaltluftflüsse und Barrieren für diese aufgezeigt. Das Gewerbegebiet Nürnberger Straße stellt gemäß Tschuschke (2019) zum Zeitpunkt der Messung im Sommer 2019 eine bedeutende Barriere für die Kaltluftströmung vom Sophienberg dar. Des Weiteren wird das Gebiet, in dem sich die Universität und der Stadtteil Birken befinden, in Tschuschke (2019) als „kalt“ eingestuft.

Spies (2019) quantifizierte die Temperaturunterschiede in Bayreuth und identifizierte ihre Ursachen. Durch den Vergleich der mittleren Tagesgänge von UWI und PCI (Park Cool Island) konnte gezeigt werden, dass die innerstädtischen Parkanlagen in der ersten Nachthälfte wärmer sind als das ländliche Umland (Spies, 2019). Die Erwärmung eines Standortes hängt von verschiedenen städtebaulichen Parametern ab: Hohe Versiegelungsgrade und hohe Bebauungsdichten tragen signifikant zu erhöhten Lufttemperaturen bei. Die Untersuchungen zeigen, dass eine signifikante Korrelation zwischen der Temperatur an einem Standort und dem Vegetationsanteil sowie der Entfernung zum Stadtzentrum besteht. Ein höherer Vegetationsanteil und eine größere Entfernung vom Stadtzentrum sind mit niedrigeren Lufttemperaturen verbunden. Wesentlich für diese Beobachtung ist hierfür die effektive Durchlüftung mit kühlerer Umlandluft, welche die Hitzebelastung in der Stadt reduziert.

Erlangtes Wissen kann in der lokalen Stadtplanung berücksichtigt werden und für weitere Stadtplanungsprojekte herangezogen werden. Um die übergeordnete Fragestellung zu beantworten werden folgende Hypothesen aufgestellt:

- 
- Die in Kaltluftnächten vom Sophienberg nach NNO fließende Kaltluft sammelt sich aufgrund des Dammes am Quartier Kreuzstein und führt zu einer Ansammlung von kalter, dichter Luft auf der SO-Seite des Dammes und somit zur Bildung eines Kaltluftsees. Der Kaltluftsee ist, im Vergleich zur Umgebung, durch eine Temperaturabnahme und umstreichenden Winden mit geringer Geschwindigkeit quantifizierbar.
  - Der Damm zwischen dem Quartier Kreuzstein und dem Glasenweiher stellt ein Strömungshindernis für den nächtliche Kaltluftfluss dar. Die von Süden anströmende Kaltluft kann den Damm aufgrund seiner Höhe von 8-10 Metern nicht überströmen, so dass in Kaltluftnächten das Seenklima stärker ausprägt ist als in keinen Kaltluftnächten.
  - Der gesamte Bayreuther Süden steht unter dem Einfluss vom Kaltluftabstrom des Sophienbergs, wodurch die räumliche Lufttemperaturverteilung ausgeglichen ist und sich keine urbane Wärmeinsel ausbildet.



## 2. Theorie

In diesem Kapitel wird der theoretische Hintergrund für diese Arbeit gegeben. Der Fokus liegt dabei auf dem urbanen Wärmeinseleffekt (UWI) und den nächtlichen Kaltluftabflüssen.

### 2.1. Urbaner Wärmeinseleffekt

Im Vergleich zu ländlichen Gebieten weisen städtische Gebiete häufig höhere Temperaturen auf (Oke et al., 2017). Dies ist auf Veränderungen der Oberfläche und der Atmosphäre zurückzuführen, die sich in der Veränderung der Energiebilanz (Gl. 2.1) ausdrückt (Oke et al., 2017; Oke, 1982). Für dieses Phänomen hat sich der Begriff „urbane Wärmeinsel“ (UWI; Urban Heat Island, UHI) etabliert, da Städte wie warme Inseln in einem kühleren Meer von ländlichen Gebieten erscheinen (Oke, 1969). Der urbane Wärmeinseleffekt beschreibt die Temperaturunterschiede zwischen städtischen und ländlichen Gebieten sowie innerhalb städtischer Gebiete. Urbane Wärmeinseln treten in allen Klimaregionen auf und gelten als eines der am besten dokumentierten Beispiele für anthropogene Klimaveränderungen (Arnfield, 2003; Oke et al., 2017).

Je nach Fragestellung wird zur Bestimmung der UWI die höchste Lufttemperatur im städtischen Gebiet gemessen, wobei der horizontal-Abstand zum Referenzpunkt auf dem Land zwischen 10 m und 10 000 m liegen sollte (Stewart, 2011). Dieser Referenzpunkt dient als Kontrollpunkt für die Messungen in der Stadt und muss daher für die unbeeinflusste Umgebung der Stadt repräsentativ sein. Die Definition der städtischen Wärmeinsel ist allgemein gefasst, da sich je nach Fragestellung und Methode unterschiedliche Wärmeinseln identifizieren lassen (Oke et al., 2017; Oke, 1995). Untersuchungen zeigen, dass Bereiche mit niedrigeren Lufttemperaturen in wärmeren städtischen Umgebungen oft in städtischen Parks liegen und eine sogenannte Park cool islands (PCI) bilden (Oke et al., 2017; Oke, 1982; Spronken-Smith und Oke, 1998). Die Lufttemperatur in der Stadtgrenzschicht (Urban Canopy Layer) unterhalb des Dachniveaus (Canopy Layer) ist das Ergebnis der lokalen Standorteigenschaften, während die Lufttemperatur oberhalb der Stadtgrenzschicht, in der Urban Boundary Layer, von einem größeren Gebiet beeinflusst wird (Hupfer et al., 2005; Oke, 1976). Die durchschnittliche Intensität des städtischen Wärmeinseleffekts hängt im Allgemeinen von der Bebauungsdichte, der Größe der Stadt und damit von der Bevölkerungszahl ab (Oke, 1973). Diese lassen sich in der Energiebilanzgleichung ausdrücken (Gl. 2.1). Tagsüber ist die Nettostrahlung  $Q_s$  etwas geringer, da mehr Gase und Partikel freigesetzt werden, die zur Dunstbildung beitragen. Viele künstliche Oberflächen wie Beton, Asphalt und Stein haben eine relativ hohe Wärmekapazität und eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit, d.h. sie erwärmen sich tagsüber stark und strahlen nachts wieder ab, das zu einem deutlich höheren Speicheränderungsterm  $\Delta Q_S$  im Vergleich zum Umland führt. Zusätzlich tragen der hohe Versiegelungsgrad und der oft geringe Vegetationsanteil zu einer geringen Evapotranspiration bei, wodurch der latente Wärmestrom gegenüber dem Umland deutlich reduziert ist. Dagegen ist der sensible Wärmestrom deutlich erhöht. Zusätzlich stellen anthropogene Wärmeemissionen während der Heizperiode und zunehmend auch an heißen Tagen aufgrund der Innenraumklimatisierung eine Wärmequelle gegenüber

dem Umland dar. In der Nacht ergeben sich die wesentlichen Unterschiede aus dem deutlich höheren  $\Delta Q_S$ , der Abgabe der tagsüber gespeicherten Energie und der weiterhin vorhandenen anthropogenen Wärme.

$$-Q^* = Q_H + Q_E + Q_G + Q_{anthr} + \Delta Q_S \quad (2.1)$$

$Q^*$ : Nettostrahlung

$Q_H$ : fühlbare Wärme

$Q_E$ : latente Wärme

$Q_G$ : Bodenwärme

$Q_{anthr}$ : anthropogene Wärme

$\Delta Q_S$ : Speicheränderungsterm

## 2.2. Kaltluftabfluss

Kaltluftabflüsse treten unter antizyklonalen Wetterlagen in Nächten mit Windstille oder schwachen synoptischen Winden auf. Die Entstehung von Kaltluftabflüssen lässt sich über die Strahlungsbilanz erklären (Gl. 2.2). Die kurzwelligen Terme der Strahlungsbilanzgleichung ( $K \downarrow$  und  $K \uparrow$ ) sind aufgrund der nächtlichen Bedingungen nicht von Bedeutung. Unter antizyklonalen Wetterlagen ist die Bewölkung gering, wodurch auch die atmosphärische Gegenstrahlung gering ist. Somit ist die Emission langwelliger Strahlung größer als die Absorption ( $L \uparrow > L \downarrow$ ). In der Konsequenz ist die Bilanz der langwelliger Strahlung ( $|I_{net}|$ ) positiv, was zu einem Nettoenergieverlust an der Erdoberfläche führt, wodurch sich die Erdoberfläche abkühlt (Häckel, 2021; Rochette Cordeiro et al., 2023; Tonkin, 1986). Die Luft in direktem Kontakt mit dem Boden kühlt sich durch Konduktion ab. Es bildet sich eine dünne Kaltluftschicht, die durch Konvektion mächtiger wird. Dieser Prozess führt zu einem negativen, zum Boden gerichteten, fühlbarer Wärmestrom. Aufgrund der hohen Dichte der kälteren Luft und der Hangneigung entsteht eine gravitationsgetriebene, geländefolgende katabatische Strömung der Kaltluft. Diese wird als Kaltluftfluss bezeichnet. Die Kaltluft bewegt sich nicht wie eine Wasserströmung, sondern fließt in einzelnen „Paketen“ ab (Häckel, 2021). Aufgrund der Reibung am Boden bildet sich oft ein zungenförmiges Profil aus (Häckel, 2021; Nadeau et al., 2013; Tonkin, 1986). Nimmt die Neigung der Oberfläche im Tal ab oder wird aufgrund des Reliefs am weiteren Absinken gehindert, sammelt sich dort die Kaltluft (Gustavsson et al., 1998). Dies führt zur Ausbildung eines Kaltluftsees (cold-air pool, CAP).

Bei schwachen bis starken Umgebungswinden werden Kaltluftabflüsse und -ansammlungen durch das scherungsinduzierte turbulente Durchmischen von einer größeren Höhe unterbrochen oder eliminiert (Geiss und Mahrt, 2015). Bei Bewölkung ist die langwellige atmosphärische Gegenstrahlung aufgrund von Absorption und Reemission der langwelliger Strahlung an der Wolkenunterseite wesentlich höher. Unter solchen Bedingungen kann die Kaltluftschicht in Tälern um 75 % reduziert werden (Barr und Orgill, 1989). Zudem sind die Lufttemperaturgradienten in Bodennähe viel geringer (Geiger et al., 1995), wodurch der Kaltluftfluss reduziert ist.

Der Abfluss von Kaltluft an einem Hang oder in einem Tal hängt stark von der Topografie ab (Haiden und Whiteman, 2005). Als Quellgebiete für die Kaltluftentstehung und den Kaltluftabfluss dienen insbesondere offene Bergkuppen, bewaldete Hänge und andere geneigte Flächen (Foken und Nappo, 2008; Gustavsson et al., 1998). Die typische Mächtigkeit der Kaltluftschicht beträgt meist nicht mehr als 10 m (Häckel, 2021) und

entspricht etwa 5 % der vertikalen Fallhöhe von der Kuppe (Tonkin, 1986). Die Geschwindigkeit ist meistens kaum größer als  $2 \text{ m s}^{-1}$  bis  $3 \text{ m s}^{-1}$ . Somit können bereits geringe topographische Erhebungen und andere Barrieren den Kaltluftabfluss räumlich begrenzen. In langen Tälern können auch Mächtigkeiten der Kaltluftschicht zwischen 10 m und 100 m und Windböengeschwindigkeiten von  $3 \text{ m s}^{-1}$  bis  $8 \text{ m s}^{-1}$  erreicht werden (Tonkin, 1986). Die Geschwindigkeit und Mächtigkeit sind von der Temperatur der Kaltluft, dem Gefälle und der Bodenreibung abhängig (Häckel, 2021; Tonkin, 1986).

Kaltluftflüsse sind der Schlüssel zur Aufrechterhaltung einer gewissen nächtlichen Ventilation (z.B. Langeron 2010; Nadeau et al., 2013) in einem Stadtkörper. Nkemdirim (1980) gibt an, dass Kaltluftflüsse die Ausdehnung von städtischen Wärmeinseln um etwa 40 % reduzieren können. Da der Kaltluftabfluss an einen klaren Himmel gekoppelt ist, der im Sommer häufig mit heißen Wetterlagen einhergeht, ist dieser kühlende Effekt für die Abmilderung von Hitzebelastungsspitzen in Städten wichtig (Sachsen et al., 2014).

$$K \downarrow + K \uparrow + L \downarrow + L \uparrow = -Q^* \quad (2.2)$$

$K \downarrow$  : Globalstrahlung

$K \uparrow$  : Reflexstrahlung

$L \downarrow$  : Atmosphärische Gegenstrahlung

$L \uparrow$  : Langwellige Ausstrahlung

$Q^*$  : Nettostrahlung

Gemäß der Vorzeichenkonvention bei Strahlungs- und Energieflüssen sind diese positiv, wenn sie von der Erdoberfläche Energie abführen in die Atmosphäre oder in den Boden), anderenfalls sind sie negativ.



### 3. Methoden

Die Messungen der vorliegenden Arbeit werden im Stadtgebiet von Bayreuth, Deutschland (49,95° N, 11,58° E) durchgeführt (Abb. 3.1). Bayreuth ist eine mittelgroße Stadt mit einer Bevölkerungszahl von knapp 74 000 Einwohnern (Stand: 31.12.2021) und einer Gesamtfläche von knapp 67 km<sup>2</sup> (Stand: 01.01.2022) (Bayerisches Landesamt für Statistik, 2023). Bayreuth liegt in einem breiten Tal, das von mehreren Hügeln umgeben ist. Der Höhenunterschied innerhalb des Stadtgebiets inklusive der umliegenden Hügel beträgt ungefähr 100 Meter. Das Untersuchungsgebiet im Bayreuther Süden ist aufgrund der heterogenen Landnutzung und Bebauung sowie der Lage am Stadtrand mit Kaltluftzufüssen von Süden von den umliegenden Hügeln aus mikrometeorologischer Sicht sehr interessant (Abb. 3.1).

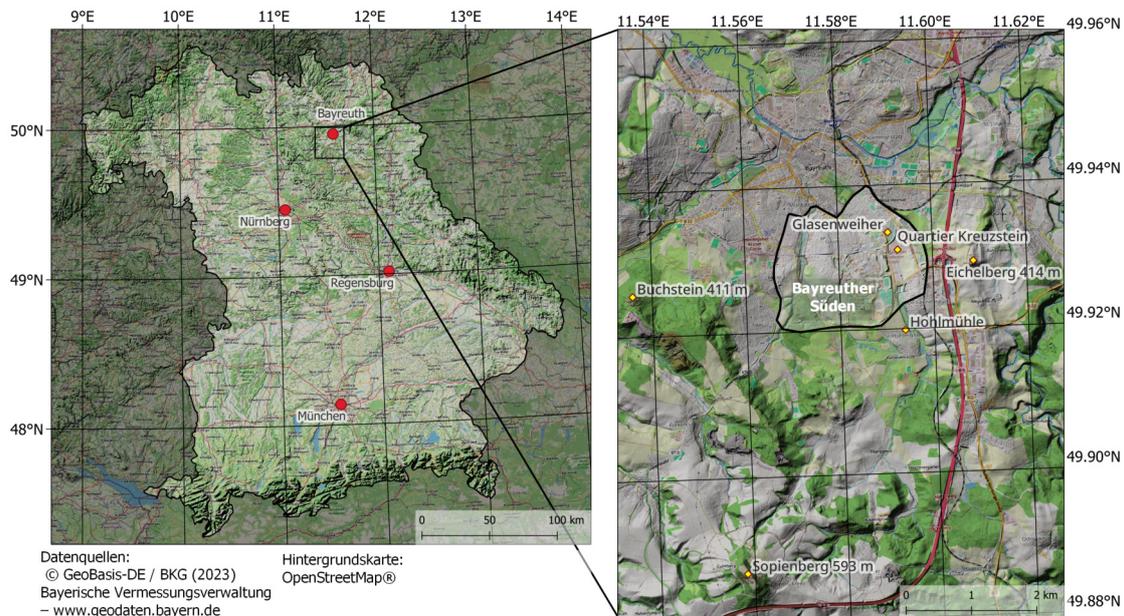


Abbildung 3.1.: Links: Topographische Karte von Bayern (Deutschland) mit dem Untersuchungsstandort Bayreuth. Rechts: Stadt Bayreuth mit Umland und dem Hauptuntersuchungsgebiet Bayreuther Süden, sowie wichtigen Orientierungspunkten. Die Höheninformation ist mittels Schummerung dargestellt. Die Koordinaten am Kartenrand sind beziehen sich auf das Koordinatenreferenzsystem WGS 84.

In dieser Arbeit werden verschiedene Datenquellen verwendet. Es werden Daten aus vollautomatischen Langzeitmessungen mit stationären Mikro-Wetterstationen (MWS) verwendet. Die MWS stammen aus dem Projekt Minderung städtischer Klima- und Ozonrisiken (MiSKOR, 01.04.2018 - 31.12.2020). Ziel des Projektes war es, den Stadtklimaeffekt und den Zusammenhang mit der Ozonbelastung raumzeitlich zu quantifizieren und insbesondere die innerstädtische Differenzierung aufzuzeigen, um die negativen Folgen des UWI-Effektes und damit die Gesundheitsrisiken für die Einwohner zu reduzieren (Thomas & Samimi, 2021). Seit 2021 werden die Mikrowetterstationen vom Lehrstuhl für Mikrometeorologie

der Universität Bayreuth weiter betrieben. Eine Übersicht aller verwendeten Datenquellen inklusive der Zeiträume ist in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Zusätzlich wurden im Rahmen dieser Arbeit Anfang August und Oktober mobile Messungen der Lufttemperatur mit dem Fahrrad durchgeführt, welche in Tabelle B.1 zusammengefasst sind.

Tabelle 3.1.: Übersicht der verwendeten Datenquellen der stationären und mobilen Messungen. Für die Auswertung der mobilen Lufttemperaturmessungen werden alle zur Messzeit aktiven MWS als auch die Wetterstation ÖBG herangezogen.

Datenquelle	Zeitraum
MWS Mistel, Kämmerei, Quartier Kreuzstein	01.09.2021 - 15.10.2023
MWS Glasenweiher	04.07.2023 - 15.10.2023
Mobile Lufttemperaturmessungen	
MWS Altstadt, Glasenweiher, Hofgarten, Kämmerei, Markt, Spinnerei, Mistel, Quartier Kreuzstein	09.08.2023 - 13.8.2023
Wetterstation ÖBG	

Im Stadtgebiet von Bayreuth wurden an verschiedenen Standorten Mikro-Wetterstation vom Typ ATMOS 41 in Verbindung mit einem EM60G-Datenlogger (METER Group, Inc. USA) installiert (Abb. 3.2). Die Mikro-Wetterstationen wurden in der Regel an Straßenlaternen angebracht und befinden sich in einer Höhe von 3,5 m über dem Boden. Die Echtzeit-Datenübertragung erfolgt über ein Mobilfunknetz (METER, 2019).

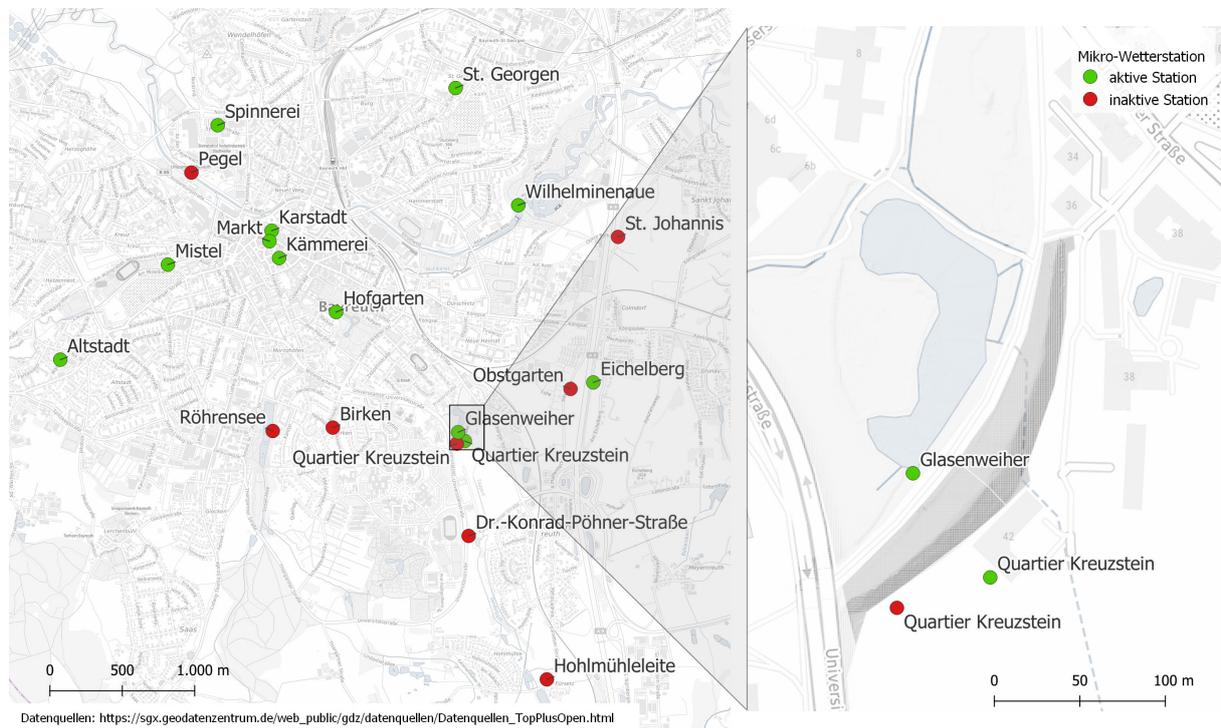


Abbildung 3.2.: Übersichtskarte der Mikro-Wetterstationen im gesamten Stadtgebiet von Bayreuth. Mit einem grünen Punkt sind alle aktiven Stationen und mit einem roten Punkt alle inaktiven Stationen dargestellt (Stand 4. Juni 2023). Die Station Quartier Kreuzstein wurde am 9. Dezember 2022 aufgrund von Bauarbeiten versetzt.

Alle Mikro-Wetterstationen des Stadtmessnetzes zeichnen die Klimaelemente mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten (Aggregationsintervall) auf. Um die Genauigkeit und Belastbarkeit der Daten zu erhöhen, ist das Messintervall kleiner als das Aggregationsintervall. Das Messintervall ist für die meisten Klimaelemente auf 10 Sekunden festgelegt, für den Luftdruck auf 60 Sekunden. Mit Hilfe der jeweiligen Aggregationsfunktion werden die Momentanmessungen im Aggregationsintervall auf den Ausgabewert umgerechnet (Tab. 3.2). Aufgrund der hohen Instationarität von Horizontal-Windgeschwindigkeit, Windböengeschwindigkeit und Windrichtung speichert die Mikro-Wetterstation für die Horizontal-Windgeschwindigkeit einen gleitenden Mittelwert der letzten zehn Messungen. Als Windböengeschwindigkeit wird die im Aggregationsintervall maximal gemessene horizontale Windgeschwindigkeit gespeichert. Wenn jedoch eine Messung mehr als das Achtfache des laufenden Mittelwertes der Windgeschwindigkeit beträgt, wird die Messung verworfen und nicht als maximale Windböe in die Daten aufgenommen.

In dieser Arbeit werden die Messungen der Lufttemperatur ( $T$ ), der Windgeschwindigkeit ( $u$ ), der Windböengeschwindigkeit ( $u_g$ ) und Windrichtung ( $\varphi$ ), der relativen Luftfeuchte ( $rF$ ), des barometrischen Druckes ( $p$ ) und der Globalstrahlung ( $K \downarrow$ ) genutzt. Die Auflösung und maximale Genauigkeit sowie die verwendete Aggregationsfunktion sind für jeden dieser Klimaelemente in Tabelle 3.2 dargestellt.

Tabelle 3.2.: In dieser Arbeit verwendete Klimaelemente der Mikro-Wetterstationen vom Typ ATMOS 41 mit Auflösung, Messgenauigkeit und Aggregationsfunktion. Mithilfe der internen Aggregationsfunktion werden die Messwerte über den Zeitraum des Aggregationsintervalls auf die Ausgabewerte umgerechnet. Die Angaben basieren auf dem Datenblatt der ATMOS 41 Mikrowetterstation der METER Group, Inc. USA.

\* Es gilt der größere Wert. \*\* Variiert mit Temperatur und Luftfeuchte.

Klimaelement	Auflösung	Messgenauigkeit	Aggregationsfunktion
$T$	0,01 °C	$\pm 0,60$ °C	Mittelwert
$u$	0,01 m s <sup>-1</sup>	$\pm 0,3$ m s <sup>-1</sup> oder $\pm 0,3$ % *	Mittelwert
$u_g$	0,01 m s <sup>-1</sup>	$\pm 0,3$ m s <sup>-1</sup> oder $\pm 0,3$ % *	Maximum
$\phi$	1 deg	$\pm 5$ deg	gewichteter Mittelwert
$e$	0,01 kPa	$\pm 0,2$ kPa unter 40 °C	Mittelwert
$rF$	0,1 %	$\pm 1,5$ % - $\pm 2$ % **	Mittelwert
$p$	0,01 kPa	$\pm 0,05$ kPa bei 25 °C	Mittelwert
$K \downarrow$	1 W m <sup>-2</sup>	$\pm 5$ %	Mittelwert

Die MWS gibt je nach Konfiguration die relative Feuchte  $rF$  oder den Wasserdampfdruck  $e$  aus. Mit Hilfe Gleichung 3.1 wird die relative Feuchte in Wasserdampfdruck umgerechnet.

$$e = e_s \cdot rH \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

Für weitere Berechnungen wird die temperaturabhängige relative Feuchte in die temperaturinvariante spezifische Feuchte  $q$  umgerechnet. Dafür wird mithilfe von Gleichung 3.1 der Wasserdampfdruck berechnet. Der dafür notwendige Sättigungsdampfdruck  $e_s$  wird mit der Magnus-Formel in hPa angenähert (Gl. 3.2). Mithilfe des Luftdruckes  $p$  und Sättigungsdampfdruck  $e_s$  wird die spezifische Feuchte  $q$  berechnet (Gl. 3.3).

$$e_s(T) = 6,112 \text{ hPa} \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot T}{243,12 \text{ °C} + T}\right) \quad (3.2)$$

$$q = 0,622 \cdot \frac{e}{p - 0,378 e} \quad (3.3)$$

Um das Mikroklima auf beiden Seiten des Damms über den gesamten Zeitraum erfassen zu können, wurde eine weitere Mikro-Wetterstation auf der Nordseite des Damms am Glasenweiher (Abb. 3.3) installiert. Der Standort der zusätzlichen Mikro-Wetterstation am Glasenweiher wurde anhand mehrerer Kriterien ausgewählt. Die Positionierung der Station sollte entlang der vermuteten Fließbahn der Kaltluft erfolgen. Dabei ist der Abstand zum Damm ein entscheidendes Kriterium. Ein geringer Abstand zum Damm ermöglicht es, andere Einflüsse auf den Kaltluftabfluss, wie z.B. die warme Wasseroberfläche, zu minimieren. Darüber hinaus wurden mögliche Strömungshindernisse in der unmittelbaren Umgebung des Standortes berücksichtigt. Diese Hindernisse, wie beispielsweise dichte Vegetation, stellen eine effektive Barriere für den Kaltluftfluss dar und beeinflussen somit die Strömungsverhältnisse. Ein Ausschlusskriterium bei der Standortwahl ist, dass die Station außerhalb von Gebieten mit erhöhter Bautätigkeit liegen muss. Aufgrund dieser Kriterien und nach Rücksprache mit dem Gartenbauamt Bayreuth wurde die Station Glasenweiher am Südufer des Glasenweiher als idealer Standort ausgewählt. Die Mikro-Wetterstation wurde am 04.07.2023 in Betrieb genommen.



Abbildung 3.3.: Mikrowetterstation am Südufer des Glasenweiher. Blickrichtung nach NNW.

Zuvor wurden noch Vergleichsmessungen gegenüber der Mikro-Wetterstation QKS durchgeführt mit dem Ziel sicherzustellen, dass die beiden MWS keine Abweichungen in den Messwerten der untersuchten Parameter aufweisen. Die Vergleichsmessungen fanden vom 07.06.2023 bis zum 04.07.2023 statt. Hierfür wurden die beiden Stationen in einem Abstand von 0,35 m direkt nebeneinander aufgebaut (Abb. A.1). Aufgrund von großer Ungenauigkeit der Windparameter wurden der Aufbau der Stationen am 16.06.2023 verändert und auch die MWS ersetzt (Abb. A.2). Nachdem sichergestellt wurde, dass die Messwerte beider Stationen übereinstimmen, wurde die Station Glasenweiher an den vorgesehenen Standort versetzt. Die Ergebnisse der Vergleichsmessung sind im Anhang A. Sensorvergleich dargestellt.

## 3.1. Kaltluftanalyse

Die Analyse von Kaltluftnächten kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. In anderen Arbeiten wird entweder die großräumige Klassifikation über Großwetterlagen angewandt oder über die Strahlungsbilanz von Nächten mit intensiver langwelliger Ausstrahlung ausgewählt. Erstere bietet einen schnellen Überblick und ermöglicht eine grobe Kategorisierung. Inversionbedingungen können von großräumigen Wettermodellen nur in wenigen Fällen richtig klassifiziert werden, zudem spiegelt sie nicht die lokale Situation wider. Zweitere wird häufig angewendet und bietet prozessbezogene Daten. Diese Methode ist mit hohem Material- und Kostenaufwand verbunden und kann die tatsächliche Kaltluftbildung nicht erfassen. In dieser Arbeit erfolgt die Analyse von Kaltluftnächten auf Basis von Lufttemperaturgradienten zwischen kaltluftbeeinflussten und vor Kaltluft geschützten Mikro-Wetterstationen und der Windböengeschwindigkeit. Dies hat den Vorteil, dass die Analyse der tatsächlich ausgeprägten lokalen Wettersituation beruht. Auf Basis der gemessenen Wetterelemente kann auf das aktuelle Wettergeschehen geschlossen werden. Die Messungen der Klimatelemente in der Bodenschicht (Prandtlschicht) ist stark von den lokalen Umgebungsbedingungen abhängig. Dies wird bei der Auswahl der Wetterstation berücksichtigt. Innerhalb eines heterogenen Nutzungsraumes, wie einer Stadt, treten während autochthonen Wetterlagen die größten Lufttemperaturunterschiede infolge der urbanen Wärmeinsel auf. In dieser ist der Energieaustausch aufgrund reduzierter Windgeschwindigkeiten gering. Die Unterschiede der UWI können sehr präzise durch die Messung der Lufttemperatur verglichen werden. Große Unterschiede der Lufttemperatur sind ein guter Indikator für ein stark ausgeprägte UWI und somit autochthone Wetterlagen. Da Kaltluftabfluss in diesen Wetterlagen auftritt und vielmehr die Ausprägung der UWI verantwortlich ist, ist die Lufttemperaturdifferenz als Indikator für Strahlungsnächte geeignet. Die Lufttemperaturdifferenz wird zwischen zwei Stationen mit unterschiedlichem Mikroklima berechnet. Die MWS Kämmerei im Stadtzentrum ist aufgrund ihrer Lage unbeeinflusst von Kaltluftflüssen und daher als Referenzstation geeignet. Die MWS Mistel wird aufgrund ihrer Lage an der Mistel, einer Kaltluftfließbahn, und der geringen Entfernung zur MWS Kämmerei bevorzugt.

Zur Identifikation der Kaltluftnächte werden bestimmte Schwellenwerte für die Differenz der Lufttemperatur ( $-2,0\text{ K}$ ) und der Windböengeschwindigkeit ( $2,2\text{ m s}^{-1}$ ) festgelegt (Abb. 3.4). Dieser Schwellenwert für die Windböengeschwindigkeit wird gewählt, um Zeiträume mit geringer Windgeschwindigkeit zu erfassen. Höhere Windgeschwindigkeiten bedingen eine stärkere Durchmischung der bodennahen Luftschichten und der gravitativ getriebenen Fluss der Kaltluft wird reduziert. Mit einer minimalen Lufttemperaturdifferenz zur Kämmerei  $-2,0\text{ K}$  werden 5-Minuten-Intervalle mit signifikanten Lufttemperaturunterschieden zwischen den beiden Stationen selektiert. Zur Einschränkung auf nächtliche Kaltluftflüsse werden nur 5-Minuten-Intervalle mit einer Globalstrahlung von unter  $10\text{ W m}^{-2}$  gewählt.

Durch den Vergleich der Kaltluftbildung im Untersuchungsgebiet (Abb. 3.5) ist ersichtlich, dass an den Standorten Mistel und Quartier Kreuzstein, vergleichbare Bedingungen vorherrschen. Die geringen Unterschiede in der Verteilung der Datenpunktdichte zwischen Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 bestätigt eine ähnliche Beeinflussung von nächtlicher Kaltluft. In 90 % der Fälle stimmt die Detektion der Kaltluft zwischen Mistel und Kämmerei mit Quartier Kreuzstein überein (Tab. 3.3). Unterschiedliche Kategorisierung ist auf eine höhere Lufttemperatur in Kaltluftnächten am Quartier Kreuzstein gegenüber Mistel zurückzuführen (Abb. 3.5). Die negativste Lufttemperaturdifferenz wird unter besonders windschwachen Bedingungen ( $u_g < 1\text{ m s}^{-1}$ ) erreicht. Es sind zwei Cluster mit hoher

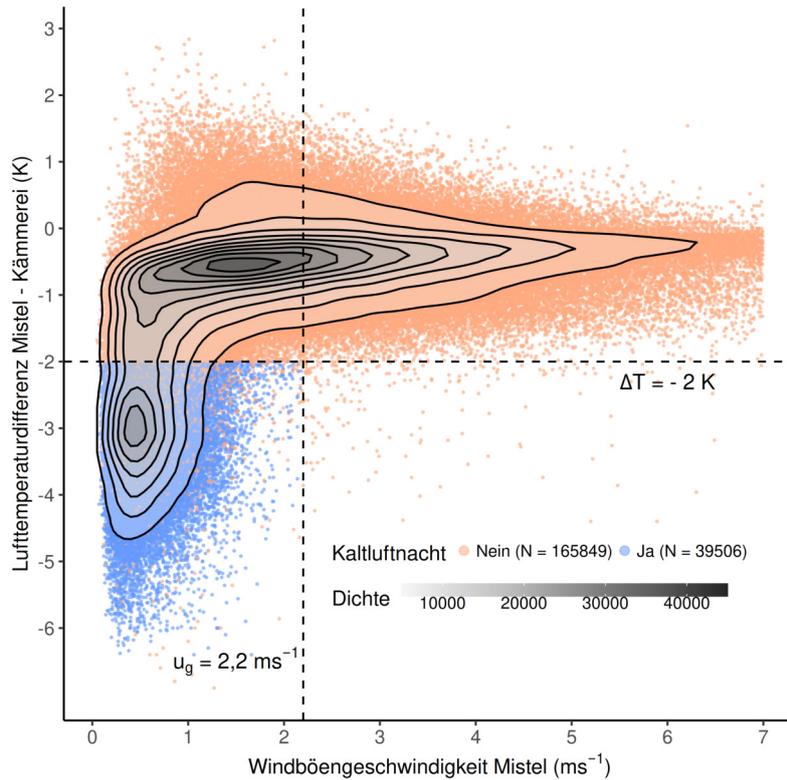


Abbildung 3.4.: Dargestellt ist die Lufttemperaturdifferenz zwischen den MWS Mistel und Kämmerlei in Abhängigkeit der Windböengeschwindigkeit an der MWS Mistel. Die blauen Punkte entsprechen 5-Minutenintervallen mit nächtlichem Kaltluftabfluss, die orangen jenen ohne Kaltluftabfluss. Grundlage der Kategorisierung ist die Windböengeschwindigkeit  $u_g$ , Lufttemperaturdifferenz  $\Delta T_{\text{Mistel-Kämmerlei}}$  und Globalstrahlung. Für nächtlichen Kaltluftabfluss muss die Globalstrahlung geringer als  $10 \text{ W m}^{-2}$  sein. Die Dichte gibt die Anzahl an Datenpunkten je Gruppe an. Datengrundlage sind 5-Minuten Messwerte der MWS an den Standorten Mistel und Kämmerlei von September 2021 bis Oktober 2023 mit Windböengeschwindigkeiten unter  $7 \text{ m s}^{-1}$ . Die Globalstrahlung wird an der MWS Mistel erfasst.

Datendichte ersichtlich, die mithilfe der gewählten Grenzwerte gut voneinander abgegrenzt werden (Abb. 3.5). Der Vergleichsstandort Mistel wird Quartier Kreuzstein vorgezogen, da dieser unabhängig von den derzeitigen Bauarbeiten und geringere Ausfallzeiten aufweist und bereits sich in anderen Untersuchungen als sehr geeignet für die Detektion von Kaltluftnächten erwiesen hat.

Tabelle 3.3.: Vergleich der Kaltluftsituation zwischen der Mikro-Wetterstation Mistel und Quartier Kreuzstein (QKS). Dargestellt ist die absolute und relative Anzahl der 5-Minuten-Intervalle in Nächten mit Kaltluftbildung und ohne Kaltluftbildung zwischen dem 01.09.2021 und dem 29.07.2023 ( $N = 96\,923$ ).

		Kämmerlei - QKS	
		Kaltluft	keine Kaltluft
Kämmerlei - Mistel	Kaltluft	23 783 (24,5 %)	7770 (8,0 %)
	keine Kaltluft	2104 (2,1 %)	63 266 (65,2 %)

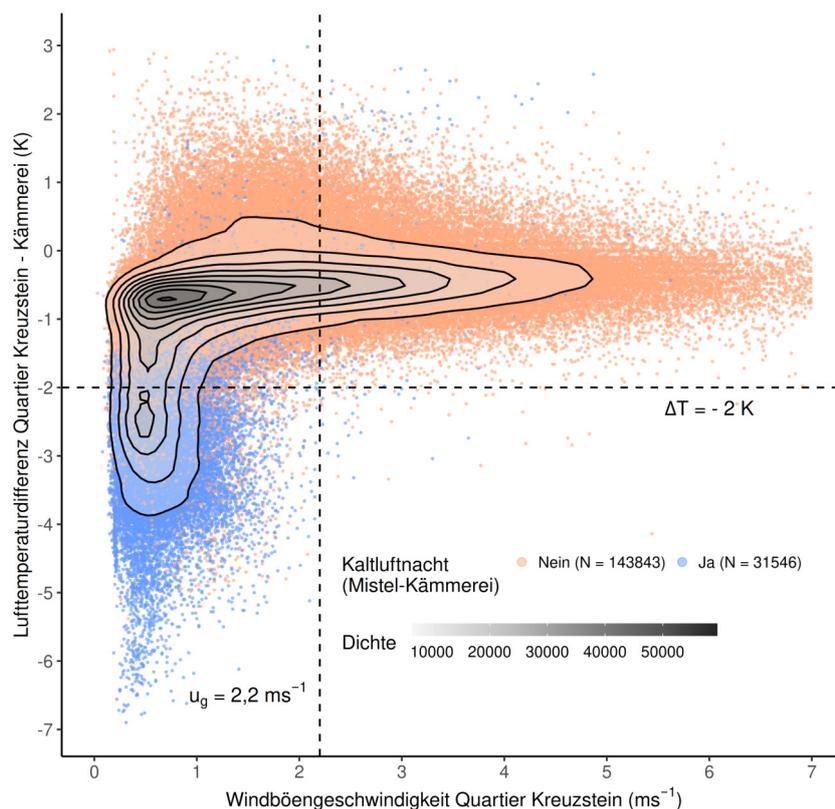


Abbildung 3.5.: Dargestellt ist die Lufttemperaturdifferenz zwischen den Mikrowetterstation Mistel und Quartier Kreuzstein in Abhängigkeit der Windböengeschwindigkeit an der Mikrowetterstation Quartier Kreuzstein. Die Farbe spiegelt die Kaltluftklassifikation zwischen Mistel und Kämmerlei wieder (Abb. 3.4). Die blauen Punkte entsprechen 5-Minutenintervallen in Kaltluftnächten kategorisiert zwischen Mistel und Kämmerlei, die orangen repräsentieren keine Kaltluftnächte. Die Dichte gibt die Anzahl an Datenpunkten je Gruppe an. Die Daten basieren auf Messungen im 5-Minutenintervall von September 2021 bis Oktober 2023.

## 3.2. Mobiles Messgerät

Die stationären Messungen an den Mikro-Wetterstationen des Stadtmessnetzes wurden durch mobile, fahrradgestützte Messungen mit dem Ziel der räumlichen Erfassung von Kaltluftabflüssen und Kaltluftseen ergänzt. Der Fluss von Kaltluft kann sehr gut über die Lufttemperatur erfasst werden (z.B. Gustavsson et al., 1998; Haiden und Whiteman, 2005; Rochette Cordeiro et al., 2023). Aus diesem Grund ist die Messung der Lufttemperatur mit dem mobilen Messgerät der einzige meteorologische Messparameter.

### 3.2.1. Thermoelement

Thermoelemente basieren auf dem Grundprinzip des Seebeck-Effekts, bei dem aus einer Temperaturdifferenz zwischen den Verbindungsstellen eines Materialpaares eine elektrische Spannung erzeugt wird (Irrgang, 2023). Der Seebeck-Effekt basiert darauf, dass verschiedene Materialien unterschiedliche elektrische Leitwerte und thermoelektrische Eigenschaften haben (Irrgang, 2023). In einem Thermoelement werden zwei verschiedene Metalle oder Legierungen verwendet, die als Thermopaar bezeichnet werden. Diese Materialkombination

erzeugt eine messbare thermoelektrische Spannung, wenn an den Kontaktstellen ein Temperaturunterschied vorherrscht. Die an den Verbindungsstellen des Thermoelements gemessene Thermospannung ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen den beiden Stellen. Diese Spannung kann mit einem geeigneten Messgerät gemessen werden. Bei Kenntnis der Kennlinie des Thermoelementes kann aus der gemessenen Spannung auf die Temperaturdifferenz zwischen den Verbindungsstellen geschlossen werden. Für kleine Temperaturdifferenzen können die Seebeck-Koeffizienten als konstant angenommen werden (Gl. 3.4). Die Seebeck-Koeffizienten  $S_A$  und  $S_B$  sind Materialeigenschaften, die auch von der Temperatur abhängen.

$$U = (S_B - S_A) \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.4)$$

Da die Lufttemperatur an einem Punkt entlang der Messroute zeitlich instationär ist, muss die Messstrecke in möglichst kurzer Zeit durchfahren werden. Die Messungen werden mit einem Fahrrad durchgeführt, sodass die Strecke nicht auf Hauptverkehrsstraßen für Autoverkehr beschränkt ist. Räumlich hochauflösende Messungen erfordern bei höheren Geschwindigkeiten Temperatursensoren mit einer kleinen Zeitkonstante. Nur so können kleinräumige Lufttemperaturgradienten erfasst werden.

Für die Temperaturmessung wird ein Thermoelement vom Typ K (Material A: Nickel-Chrom-Legierung, Material B: Nickel) von Testo (Bestellnummer (Testo): 0602 1793) verwendet (Testo SE & Co. KGaA, Lenzkirch, Germany). Dasselbe Thermoelement wurde in Tschuschke (2019) verwendet. Die durchschnittliche Zeitkonstante von sechs Messungen wurde auf 1,7 s bestimmt (Tschuschke, 2019). Die Messhöhe der Lufttemperatur mit dem Thermoelement beträgt etwa 2 m über dem Boden.

Um einen Strahlungsfehler durch Sonneneinstrahlung zu verhindern, wurde ein Strahlungsschutz um den Temperatursensor gebaut. Dieser aktiv aspiriert, wodurch die Zeitkonstante des Temperatursensors verringert wird und somit höhere Fahrgeschwindigkeiten bei gleichbleibender räumlicher Auflösung möglich sind (Burt und de Podesta, 2020; De Podesta et al., 2018; Harrison, 2014; Wildmann et al., 2013). Darüber hinaus ist auch bei geringen Fahrgeschwindigkeiten eine ausreichende Strömungsgeschwindigkeit um das Thermoelement gewährleistet und der Strahlungsfehler gering (De Podesta et al., 2018; Wildmann et al., 2013). Um die Zeitkonstante weiter zu reduzieren, wurde die Öffnung des Strahlungsschutzes in Fahrtrichtung montiert, so dass die Strömungsgeschwindigkeit im Strahlungsschutz durch den Fahrtwind erhöht wurde, was die Zeitkonstante weiter reduzierte. Mit einem Hitzdrahtanemometer wurde die Strömungsgeschwindigkeit im Strahlungsschutz im Stand bei eingeschaltetem Lüfter gemessen. Dabei wurde eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von  $6,76 \text{ m s}^{-1}$  bestimmt (Abb. 3.6).

### 3.2.2. Positionsbestimmung

Gegenüber früherer Arbeiten von Spies (2019) und Tschuschke (2019) wird anstatt eines Smartphones oder GPS-Gerätes (Garmin etrex10 und Garmin etrexHCx) zur Erfassung der aktuellen Position das Trägheitsnavigationssystem Ellipse Model D von SBG Systems verwendet. Dieses verfügt über zwei Antennen, welche im Abstand von 60 cm zueinander über der hinteren Achse in 85 cm über dem Boden montiert sind (Abb. 3.7). Die Kommunikation zwischen dem Ellipse Model D und dem Datenlogger CR6 erfolgt über das NMEA 0183-Protokoll. Dies ist ein Standard für die Kommunikation zwischen GPS-Empfänger und mobilen Endgeräten, der von der National Marine Electronics Association (NMEA) definiert wurde (de Lange, 2020). Bei den NMEA-Daten handelt es sich um ASCII-basierte Datensätze (de Lange, 2020). Die von NMEA 0183 verwendeten Positionsdaten basieren

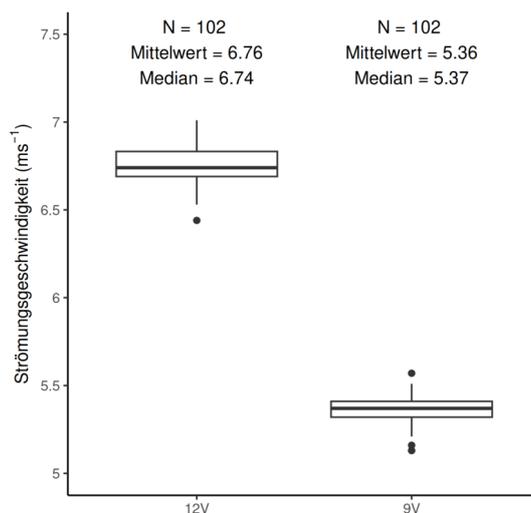


Abbildung 3.6.: Mit einem Hitzedrahtanemometer gemessene Strömungsgeschwindigkeit im Strahlungsschutz bei unterschiedlichen Spannungen am Lüfter. Das Messintervall beträgt eine Sekunde.

auf dem World Geodetic System 1984 (WGS 84) (de Lange, 2020). Bei WGS 84 handelt es sich um ein der Erdoberfläche angenähertes Referenzellipsoid, das die geodätische Grundlage des Global Positioning Systems (GPS) darstellt. Für die Aufzeichnung folgende Datenfelder aus den Datensätzen abgespeichert.

- ZDA - Time & Date
  - Zeit in UTC (Universal Time Coordinated)
  - Tag, Monat, Jahr
- RMC - Recommended Minimum Navigation Information
  - Status (A für OK, V bei Warnungen)
  - Breitengrad
  - Ausrichtung (N für North, nördlich; S für South, südlich)
  - Längengrad
  - Ausrichtung (E für East, östlich; W für West, westlich)
  - Geschwindigkeit über Grund in Knoten
  - Track made good, degrees true
- VTG - Track made good and Ground speed
  - Geschwindigkeit über Grund in Kilometer pro Stunde
- GST - GNSS Pseudorange Error Statistics
  - Standardabweichung des Breitengradfehlers (Meter)
  - Standardabweichung des Längengradfehlers (Meter)
  - Standardabweichung des Höhenfehlers (Meter)

Im Vergleich zur Datenspeicherung bei Spies (2019) und Tschuschke (2019), bei denen die Positions- und Lufttemperaturdaten auf unterschiedlichen Geräten gespeichert werden, werden hier die Datenströme von Thermoelement und GPS-Sensor werden auf einem Datenlogger (Campbell Scientific, Inc.) zusammengeführt und mit der aktuellen Uhrzeit (MESZ) gespeichert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Datensätze korrekt zusammengefügt werden und keine Zeitverschiebungen oder andere Fehler auftreten. Die Spannungsversorgung des Messsystems erfolgt über einen 12 V Lithium-Ionen-Akku. Die aktuellen Messdaten werden regelmäßig während den Messfahrten über den Monitor von Campbell Scientific, Inc. (CR1000KD) überprüft. Die zusätzliche Messausrüstung, bestehend aus einem CR6 mit Monitor und der Stromversorgung wird in einem Koffer an der Position der Gepäcktaschen montiert (Abb. 3.7).

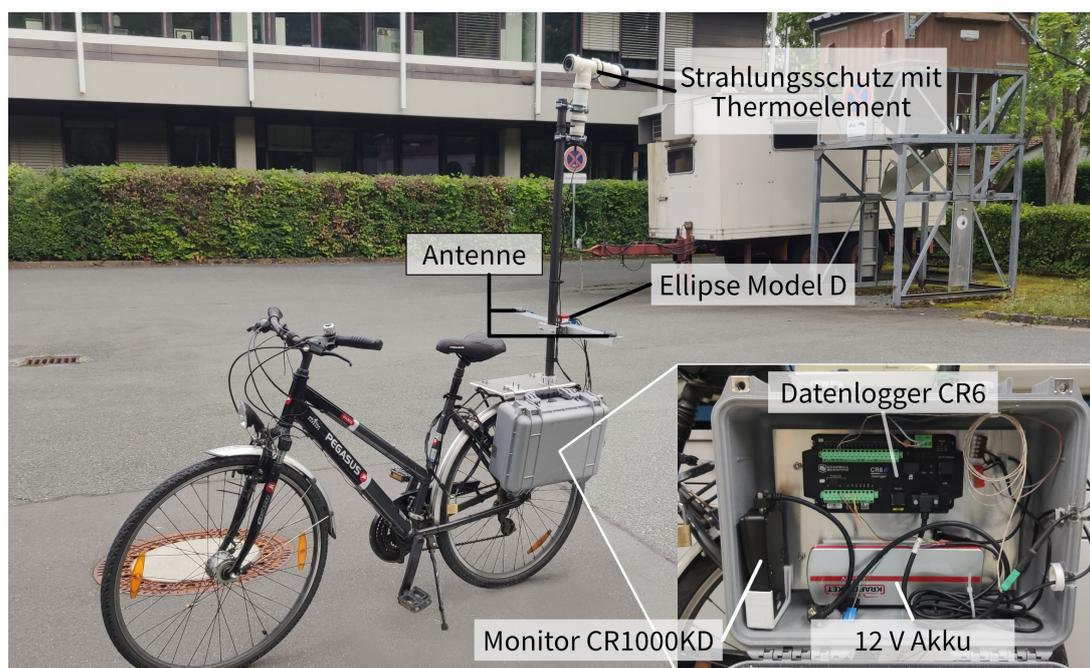


Abbildung 3.7.: Aufbau des Messfahrrads mit aktiv aspiriertem Strahlungsschutz. Das Thermoelement ist vertikal im Strahlungsschutz montiert. Der Abstand zwischen den beiden Antennen beträgt 60 Zentimeter.

Das Ellipse Model D ermöglicht die Bestimmung der aktuellen Position mit einer Mittleren Genauigkeit von ca. 0,5 m (Abb. 3.8, Abb. B.6, Abb. B.7). Dies ist für den Anwendungsfall dieser Arbeit ausreichend. Die Auswertung der Daten aus dem GST-Datenpaket des NMEA-Datenprotokoll zeigt im Allgemeinen eine geringe räumliche Abweichung und somit eine hohe Genauigkeit der bestimmten Position. Eine besonders geringe Abweichung offenen und unbebauten Gebieten festzustellen. Größere Abweichungen zwischen 0,7 m und 0,8 m treten in bewaldeten und dicht bebauten Gebieten auf. Die größte Abweichung tritt in Unterführungen und unter Brücken auf. Dennoch ist die Abweichung hier unter 1 m.

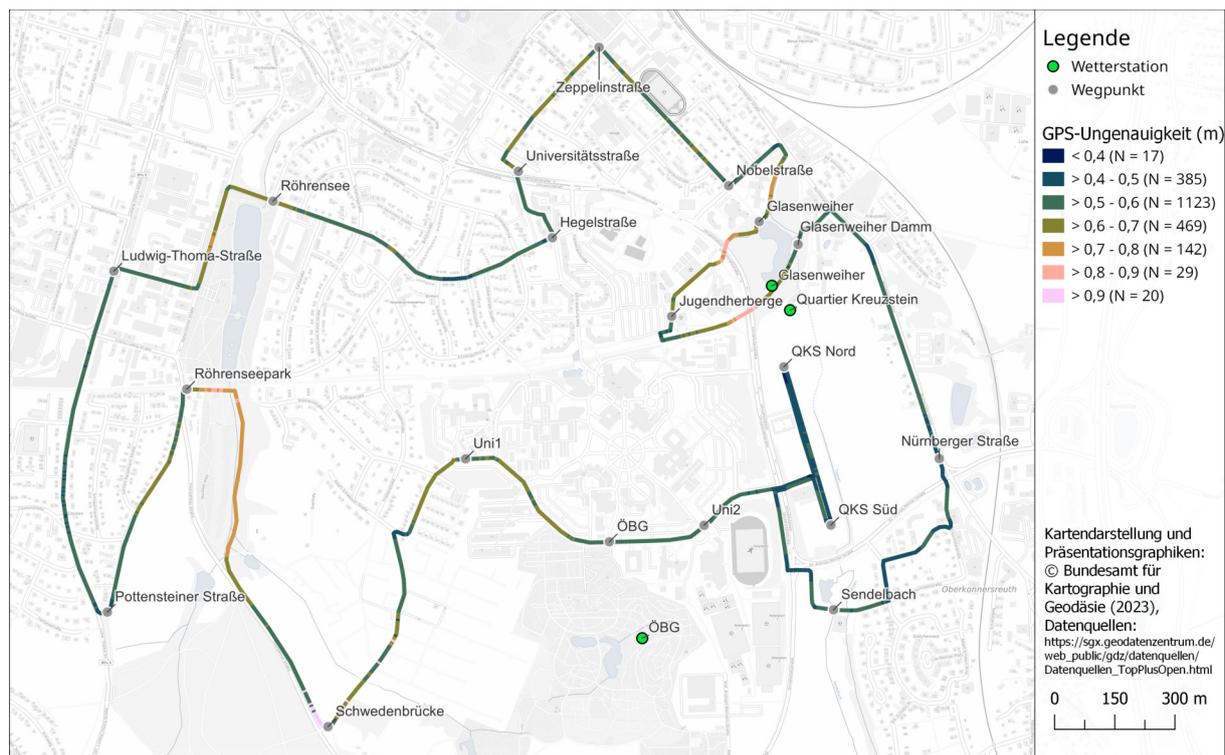


Abbildung 3.8.: Mittlere räumliche GPS-Ungenauigkeit entlang der Messroute. Datengrundlage ist der Mittelwert der vom Ellipse-D-System im 1-Sekunden-Intervall gemessenen Abweichung von Längengrad und Breitengrad (NMEA/GST) auf einem Mittelungsintervall von 5 m. Einbezogen werden alle Messfahrten am Abend.

### 3.2.3. Fahrtstrecke und Datenaufzeichnung

Die Lufttemperatur wird auf einer vordefinierten 11,5 km langen Route aufgezeichnet (Abb. 3.9). Während des Radfahrens entlang dieser Route mit einer Geschwindigkeit von etwa  $5 \text{ m s}^{-1}$  ( $18 \text{ km h}^{-1}$ ) wurde die Lufttemperatur mit einer Mess-Frequenz von 1 Hz aufgezeichnet. Die Messungen fanden während eines Zeitraums mit Strahlungsnächten bei geringer Bewölkung und schwachen synoptischen Winden statt. Es wurden Messungen zu drei verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt: morgens, nachmittags und abends ((Tab. 3.4)). Dabei wurde die Route, sofern möglich auch mehrmals direkt nacheinander gefahren. Um systematische Effekte durch die Abkühlung oder Erwärmung auszuschließen, wurde die Route in beide Richtungen abgefahren. Start- und Endpunkt der Messfahrten war der Parkplatz hinter dem GEO III-Gebäude.

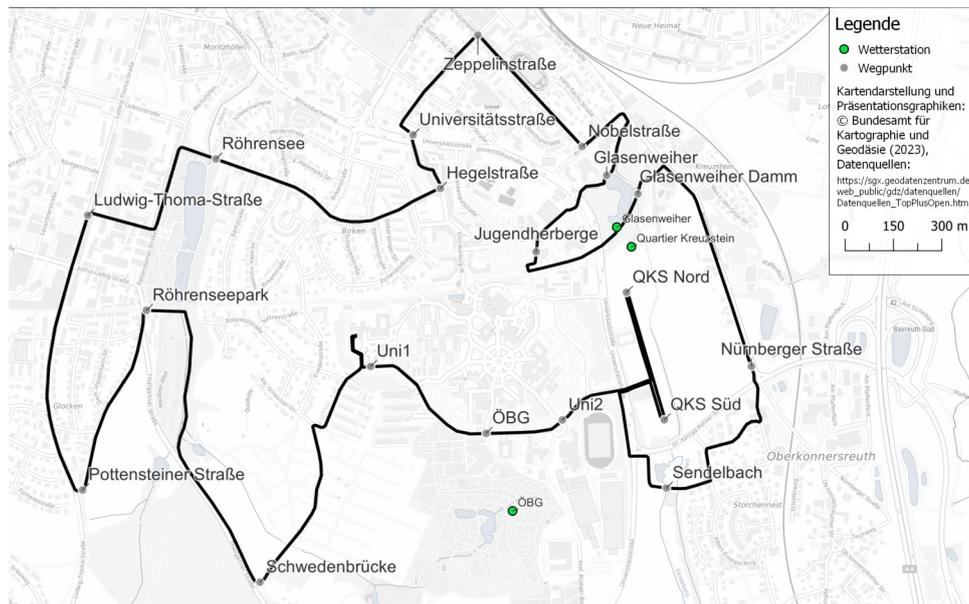


Abbildung 3.9.: Verlauf der 11,5 km langen Messroute im Untersuchungsgebiet mit Wegpunkten. Start und Endpunkt ist am Parkplatz am GEO III-Gebäude, in der Nähe von Wegpunkt Uni1.

Tabelle 3.4.: Zeitpunkte von Lufttemperaturmaximum, Lufttemperaturminimum und der stärksten Abkühlungsrate in MESZ für den Monat August. Datengrundlage sind Lufttemperaturmessungen an allen Mikrowetterstationen im Stadtmessnetz in den Monaten August 2021 und 2022. Dafür wurden Tage mit Kaltluftabfluss von mindestens sieben Stunden selektiert und daraus die mittlere Lufttemperatur berechnet.

<b>Bedingung</b>	<b>Zeitpunkt</b>
Lufttemperaturmaximum	16:00 Uhr
stärkste Abkühlung	21:30 Uhr
Lufttemperaturminimum	05:30 Uhr

### 3.3. Datenbearbeitung

Um die Daten der Messfahrten vergleichen zu können, müssen sie bearbeitet werden. Aufgrund unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten und -richtungen sowie GPS-Ungenauigkeiten ergeben sich unterschiedlich viele Datenpunkte pro Fahrt. Um eine aussagekräftige Analyse zu ermöglichen, ist eine räumliche Mittelung über ein Streckenintervall notwendig. Für die Bearbeitung werden die Programme R in der Version 4.3.1 zur Zusammenführung der Messdaten und Kompensation der Instationarität sowie QGIS in der Version 3.28.13 des Entwicklers QGIS Development Team zur räumlichen Mittelung und Erstellung des Kartenmaterials verwendet.

Die Messungen werden sowohl auf zeitlicher als auch auf räumlicher Ebene durchgeführt. Aus Gründen der Vergleichbarkeit werden die Daten in Mittelwert und Perturbation auf beiden Skalen unterteilt. Hierfür werden die folgenden Symbole verwendet:

$$\begin{aligned} \text{Wert} &= \text{Mittelwert} + \text{Perturbation} \\ \text{zeitliche Skala : } X &= \bar{X} + X' \\ \text{räumliche Skala : } X &= \langle X \rangle + \hat{X} \end{aligned} \tag{3.5}$$

Für alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten räumlich-zeitlichen Messungen wird diese Nomenklatur konsistent verwendet. Bei räumlichen Daten ist  $\hat{X}$  die Abweichung vom räumlichen Mittelwert. Als Referenztemperatur wird der räumliche Mittelwert der Wetterstationen im Stadtgebiet verwendet ( $\langle T_{\text{ref}} \rangle$ ).  $\langle T_{\text{ref}} \rangle$  ist also das räumliche Mittel der Wetterstationen im Stadtgebiet über einen bestimmten Zeitraum, hier meistens die Dauer einer Messfahrt. Um stationäre und mobile Messungen eindeutig unterscheiden zu können, erhalten alle mit mobilen Messsystemen erhobenen Daten den Subindex „mob“ für „mobil“. Bei räumlicher Mittelung wird das Mittelungsintervall als oberer Index ergänzt. So wird beispielsweise  $\langle T_{\text{mob}}^5 \rangle$  als die mit dem mobilen Messsystem gemessene mittlere Lufttemperatur über ein Mittelungsintervall von fünf Metern bezeichnet.

#### 3.3.1. Ausschluss vom Messdaten

Während einiger Messfahrten kam es aus ungeklärten Gründen zu einer sehr hohen Ungenauigkeit bei der Bestimmung der geographischen Positionen mit dem Trägheitsnavigationssystem Ellipse D. Die Abweichung betrug mehrere Kilometer, wodurch eine weitere Nutzung der Daten nicht mehr möglich war. Die Fahrten wurden bis zum Auftreten des Fehlers verwendet, sofern für mehr als die Hälfte der Strecke präzise Positionsdaten vorlagen. Andernfalls wurden die Daten der gesamten Fahrt verworfen. Die für die Auswertung relevanten Fahrten sowie die ausgeschlossenen Fahrten sind in Tabelle B.1 aufgeführt. Zu Beginn wurden einzelne Datenpunkte entfernt, bei denen im RMC-Datensatz im Datenfeld Status 'Warnung' gesetzt ist. Dieses Problem trat nach der erstmaligen Bewegung nach Start des Messsystems nicht mehr auf.

#### 3.3.2. Umrechnung der Koordinaten in das Dezimalminutenformat

Um Koordinaten vom Dezimalminutenformat (DMF) in das gebräuchlichere Dezimalgradformat (DGF) umzuwandeln, wird die folgende Berechnung durchgeführt (Gl. 3.6). Die Minutenzahl wird durch 60 dividiert, um den Anteil in Dezimalgrad zu berechnen. Anschließend wird die Gradzahl zum resultierenden Wert addiert (Baddeley, 2001). Das Ergebnis entspricht der Koordinate im Dezimalgradformat (Baddeley, 2001).

$$\begin{pmatrix} \text{Breitengrad}_{\text{DMF}} \\ \text{Längengrad}_{\text{DMF}} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \text{Breitengrad}_{\text{DGF}} \\ \text{Längengrad}_{\text{DGF}} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

$$\text{Bsp.:} \begin{pmatrix} 4957,256\ 27^\circ\text{N} \\ 1131,212\ 45^\circ\text{E} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} 49 + \frac{5725627}{60} \\ 11 + \frac{3121245}{60} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 49,954\ 27^\circ\text{N} \\ 11,520\ 21^\circ\text{E} \end{pmatrix}$$

### 3.3.3. Kompensation der zeitlichen Instationarität

Um den Einfluss der Instationarität der Lufttemperatur während den Messfahrten auf die gemessenen Lufttemperaturen zu minimieren, wurde diese mit Hilfe der räumlich gemittelten Lufttemperatur der Wetterstationen im gesamten Stadtgebiet von Bayreuth korrigiert. Das räumliche Mittel der Lufttemperatur im Stadtmessnetz ( $\langle T_{\text{ref}}(t) \rangle$ ) wurde auf Basis aller zur Zeit der mobilen Messungen im Stadtgebiet von Bayreuth aktiven Mikro-Wetterstationen (Altstadt, Glaserweiher, Hofgarten, Kämmerei, Markt, Spinnerei, Mistel, Quartier Kreuzstein) und der Wetterstation im ökologisch botanischen Garten der Universität Bayreuth (ÖBG) berechnet. Dazu wurden die 5-Minuten-Mittelwerte der Lufttemperatur der Mikro-Wetterstationen und die 10-Minuten-Messwerte der Wetterstation im ÖBG auf 1-Sekunden-Werte linear interpoliert. Die beiden Datensätze wurden auf Basis des GPS-Zeitstempels zusammengeführt. Dieser wurde sowohl vom Ellipse-D als auch vom EM60G Datenlogger empfangen und gewährleistet somit die zeitliche Synchronität (Barnaba, 2020; METER, 2019). Die Wetterstation im ÖBG ist über das Uni-Netzwerk mit dem Internet verbunden und erhält darüber die aktuelle Uhrzeit.

Als Referenztemperatur wurde  $\langle T_{\text{ref}}(t) \rangle$  zum Startzeitpunkt der Messfahrt ( $\langle T_{\text{ref}}(t = 0) \rangle$ ) festgelegt. Der Startzeitpunkt ( $t = 0$ ) ist durch das erste Auftreten von „A“ für OK im RMC-Datensatz im Datenfeld „Status“ definiert und kennzeichnet die initiale Bewegung des Ellipse-D nach dem Start des Messsystems. Die Differenz zwischen  $\langle T_{\text{ref}}(t) \rangle$  und  $\langle T_{\text{ref}}(t = 0) \rangle$  gibt die zeitliche Lufttemperaturabweichung während der Messfahrt im Stadtgebiet an (Gl. 3.7). Diese wird für jeden Zeitpunkt der Messfahrt von der momentanen mobilen Lufttemperatur ( $T_{\text{mob}}(t)$ ) abgezogen, um Instationarität der Lufttemperatur während den Messfahrten auszugleichen (Gl. 3.7). Um die Abweichung zum Stadtmessnetz zu berechnen wird von dieser die räumlich gemittelte Lufttemperatur des Stadtmessnetzes zum Startzeitpunkt abgezogen.

$$\begin{aligned} \widehat{\Delta T}(t) &= T_{\text{mob}}(t) - \left( \langle T_{\text{ref}}(t) \rangle - \langle T_{\text{ref}}(t = 0) \rangle \right) - \langle T_{\text{ref}}(t = 0) \rangle & (3.7) \\ &= T_{\text{mob}}(t) - \langle T_{\text{ref}}(t) \rangle + \langle T_{\text{ref}}(t = 0) \rangle - \langle T_{\text{ref}}(t = 0) \rangle \\ &= T_{\text{mob}}(t) - \langle T_{\text{ref}}(t) \rangle \end{aligned}$$

Somit kann die Abweichung der Lufttemperatur an einem Punkt entlang der Messroute relativ zur mittleren Lufttemperatur im des Stadtmessnetzes von Bayreuth als  $\widehat{\Delta T}(t)$  ausgedrückt (Gl. 3.7). Auf diese Weise können einzelne Messfahrten dargestellt werden (Abb. 3.10), für die Betrachtung mehrerer Messfahrten unter einen gemeinsamen Kriterium, wie der Tageszeit ist allerdings die räumliche Aggregation der Daten nötig.

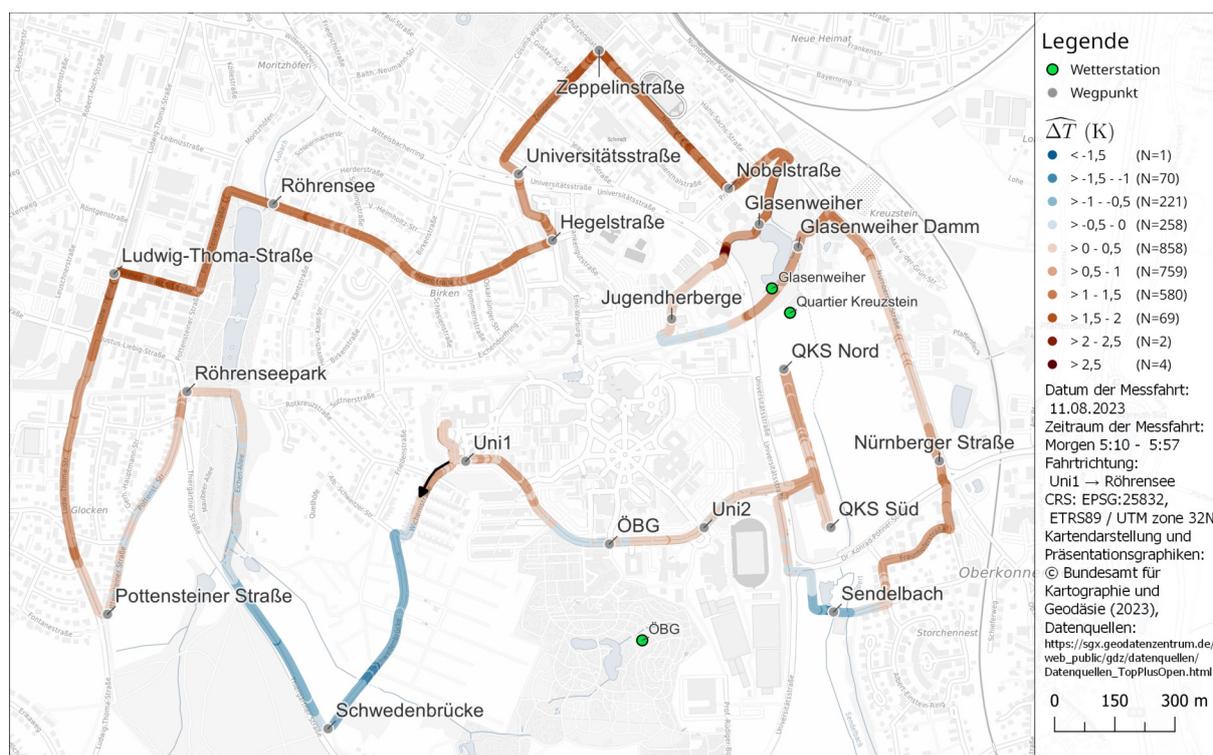


Abbildung 3.10.: Räumliche Darstellung von  $\widehat{\Delta T}$  während der Morgenfahrt am 11.08.2023 zwischen 5:10 und 5:57 Uhr entlang der Messroute. Die Route wurde vom Startpunkt am GEO III (bei Uni1) im Uhrzeigersinn zunächst in Richtung Röhrensee abgefahren. Die grünen Punkte zeigen die Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation am ÖBG.

### 3.3.4. Weitere Bearbeitung der Messdaten

Für die Auswertung mit der Software QGIS werden die im geographischen Koordinatenreferenzsystem WGS 84 (EPSG: 4326) gespeicherten Koordinaten in Koordinaten des Universal Transverse Mercator (UTM) Zone 32N (EPSG: 25832) transformiert. Dadurch sind metrische Streckenberechnungen möglich. Alle weiteren Berechnungen werden in diesem Koordinatenreferenzsystem durchgeführt. Um die Messpunkte nicht nur als Funktion der Zeit, sondern auch in Abhängigkeit von der gefahrenen Wegstrecke auszudrücken, wird ein Algorithmus in QGIS entwickelt. Dieser verknüpft die geografische Position der Datenpunkte mit der Distanz entlang der Wegstrecke und führt eine räumliche Mittelung durch. Für jede Messfahrt werden die Messpunkte auf die ideale Messstrecke (Abb. 3.9) verschoben. Dies ist nahezu verlustfrei möglich, da die Genauigkeit des GNSS meistens unter einem Meter liegt (Abb. B.7). Die Abweichungen von der idealen Messstrecke sind durch die unterschiedliche Fahrtrichtung bei Einhaltung des Rechtsfahrgebots zu begründen (Abb. 3.11).

Die Messstrecke wird in Abschnitte von 5 m (Mittelungsintervall) unterteilt und mit der Position auf der Messstrecke gespeichert. Anschließend werden diese mit den Messpunkten auf dem jeweiligen Streckenabschnitt zusammengefügt. Somit ist für jeden Messpunkt die Position auf der Messstrecke bestimmt. Dies ermöglicht die Darstellung aller gemessenen Parameter unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit und -richtung, sondern ausschließlich anhand der Position auf der definierten Route. Diese kann entweder in Abhängigkeit der Distanz  $d$  zum normierten Startpunkt am GEO III-Parkplatz ( $\widehat{\Delta T}(d)$ ) oder von UTM-Koordinaten ( $\widehat{\Delta T}(\text{Rechtswert}, \text{Hochwert})$ ) ausgedrückt werden. Vereinfacht werden diese

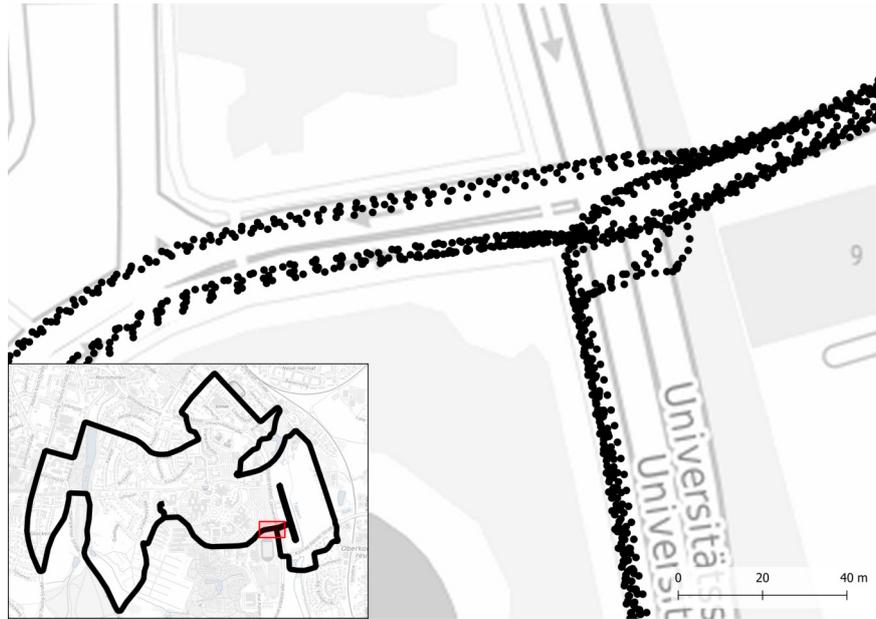


Abbildung 3.11.: Darstellung der Messpunkte mehrerer Messfahrten am Übergang zwischen Universität und Quartier Kreuzstein. Die Unterschiede zwischen den Messfahrten sind auf unterschiedliche Fahrstrecken zurückzuführen und nicht auf Messungenauigkeiten des Trägheitsnavigationssystems.

nun als  $\widehat{\Delta T}$  ausgedrückt. Werden alle Fahrten zu einer Tageszeit zusammengefasst, wird dies im Folgenden durch den ensemble average von  $\widehat{\Delta T}$  als  $[\widehat{\Delta T}]$  ausgedrückt. Diese Methode zur Berechnung der gefahrenen Distanz wird gegenüber der Berechnung über Integration der Geschwindigkeit über das Zeitintervall bevorzugt, da die Fahrstrecken der einzelnen Messfahrten nicht exakt übereinstimmen. Insbesondere an Kreuzungen und im Quartier Kreuzstein wurde die Strecke unterschiedlich weit ausgefahren. Dies führe zu großen Abweichungen, die mit zunehmender Fahrstrecke größer würden (Abb. 3.12). Wenn mehrere Messpunkte innerhalb eines Mittelungsintervalls erfasst werden, wird das arithmetische Mittel und die Standardabweichung aller erfassten Parameter berechnet. Bei der Betrachtung mehrerer Messfahrten unter Berücksichtigung eines gemeinsamen Kriteriums, z. B. der Tageszeit, werden die statistischen Kennwerte nach dem gleichen Verfahren berechnet. Wird ein Streckenabschnitt während einer Messfahrt mehrmals befahren, ist es nur mit großem Aufwand möglich, einen Messpunkt einer bestimmten Fahrtrichtung zuzuordnen. Aus diesem Grund wurde bei der Planung der Route darauf geachtet, dass das mehrmalige Befahren desselben Streckenabschnitts vermieden wird. An zwei Streckenabschnitten ist dies nicht möglich. Zum einen befindet sich der Start- und Endpunkt der Route auf dem Geo-Parkplatz. Um ungewollte Artefakte aufgrund des langen zeitlichen Abstands zwischen den Messungen zu vermeiden, wurden Messpunkte in diesem Bereich vorsorglich entfernt. Des Weiteren wurde das Gebiet Quartier Kreuzstein noch nie messtechnisch erfasst und ist für die Quantifizierung des Kaltluftdynamik sehr interessant. Aufgrund von Bauarbeiten gibt es nur eine Zufahrtsmöglichkeit, die sowohl für die Hin- als auch für die Rückfahrt genutzt wird. Da die Zeitdifferenz zwischen Hin- und Rückfahrt weniger als fünf Minuten beträgt, wird hier auf eine Differenzierung der Fahrtrichtung verzichtet. In diesem Gebiet sind einige Fahrfehler aufgetreten. In den meisten Fällen wurde unabhängig von der Fahrtrichtung zuerst nach QKS Süd, anstatt nach QKS Nord gefahren. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die gewählte Auswertung, führt jedoch im Vergleich zur über Integration der Geschwindigkeit berechneten Distanz zu großen Differenzen. Bei



Abbildung 3.12.: Die Strecke am Quartier Kreuzstein (QKS Nord) wurde unterschiedlich weit ausgefahren, wodurch Abweichungen in der tatsächlich gefahrenen Distanz auftreten. Durch das Verschieben der Messpunkte auf die ideale Route können je nach gefahrener Strecke keine oder mehrere Punkte einem Streckenabschnitt zugeordnet werden.

der Darstellung der Temperatur als Funktion der Wegstrecke ist der Streckenabschnitt zwischen QKS Süd und QKS Nord aufgrund der Hin- und Rückfahrt doppelt enthalten. Wenn mehrere Messpunkte innerhalb eines Mittelungsintervalls erfasst werden, wird das arithmetische Mittel und die Standardabweichung aller erfassten Parameter berechnet. Bei der Betrachtung mehrerer Messfahrten unter Berücksichtigung eines gemeinsamen Kriteriums, z. B. der Tageszeit, werden die statistischen Kennwerte nach dem gleichen Verfahren berechnet. Wird ein Streckenabschnitt während einer Messfahrt mehrmals befahren, ist es nur mit großem Aufwand möglich, einen Messpunkt einer bestimmten Fahrtrichtung zuzuordnen. Aus diesem Grund wurde bei der Planung der Route darauf geachtet, dass das mehrmalige Befahren desselben Streckenabschnitts vermieden wird. An zwei Streckenabschnitten ist dies nicht möglich. Zum einen befindet sich der Start- und Endpunkt der Route auf dem Geo-Parkplatz. Um ungewollte Artefakte aufgrund des langen zeitlichen Abstands zwischen den Messungen zu vermeiden, wurden Messpunkte in diesem Bereich vorsorglich entfernt. Des Weiteren wurde das Gebiet Quartier Kreuzstein noch nie messtechnisch erfasst und ist für die Quantifizierung des Kaltluftdynamik sehr interessant. Aufgrund von Bauarbeiten gibt es nur eine Zufahrtsmöglichkeit, die sowohl für die Hin- als auch für die Rückfahrt genutzt wird. Da die Zeitdifferenz zwischen Hin- und Rückfahrt weniger als fünf Minuten beträgt, wird hier auf eine Differenzierung der Fahrtrichtung verzichtet. In diesem Gebiet sind einige Fahrfehler aufgetreten. In den meisten Fällen wurde unabhängig von der Fahrtrichtung zuerst nach QKS Süd, anstatt nach QKS Nord gefahren. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die gewählte Auswertung, führt jedoch im Vergleich zur über Integration der Geschwindigkeit berechneten Distanz zu großen Differenzen. Bei der Darstellung der Temperatur als Funktion der Wegstrecke ist der Streckenabschnitt zwischen QKS Süd und QKS Nord aufgrund der Hin- und Rückfahrt doppelt enthalten.



## 4. Ergebnisse

Während des viermonatigen Beobachtungszeitraumes von Juli bis Oktober 2023 wurde das Wetter in Bayreuth von unterschiedlichen Wetterlagen beeinflusst. Die Lufttemperatur an der Wetterstation im ökologisch botanischen Garten (ÖBG) variierte zwischen  $35,6^{\circ}\text{C}$  im Juli und  $-3,3^{\circ}\text{C}$  im Oktober (Abb. 4.1). Von Mitte Juli bis Mitte August war ein, für diese Jahreszeit ungewöhnlich hoher Einfluss von kühler, feuchter Luft mit zahlreichen Niederschlägen zu verzeichnen (Abb. 4.1). In diesem Zeitraum sind in den meisten Nächten die Bedingungen für Kaltluftabfluss nicht gegeben (Abb. 4.2).

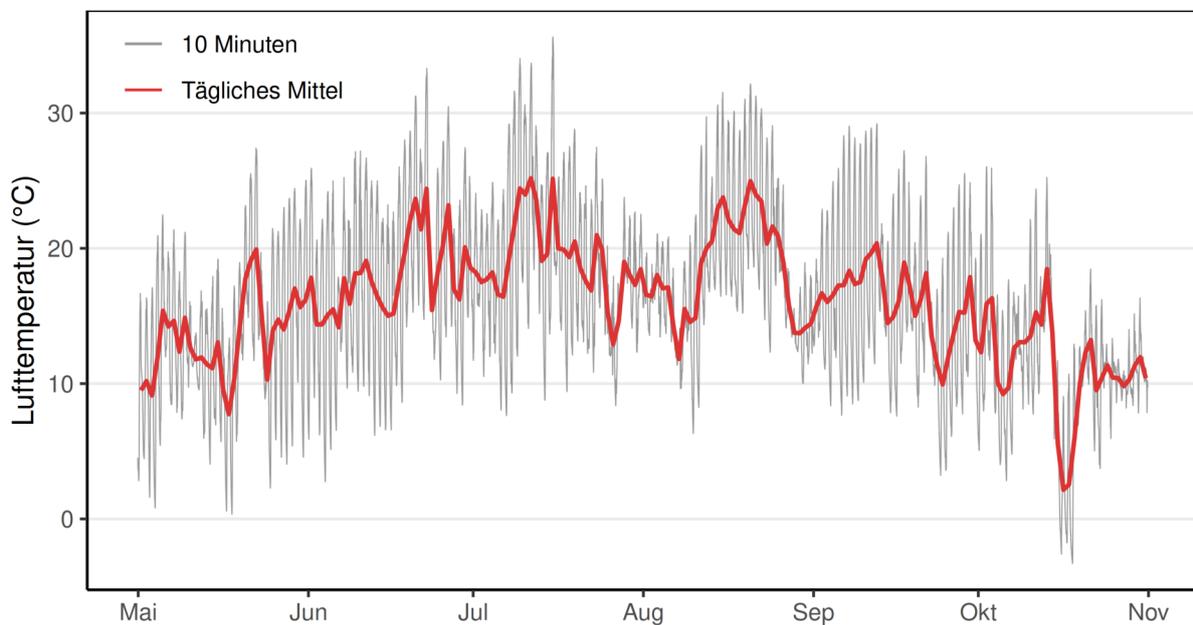


Abbildung 4.1.: Zeitreihe der Lufttemperatur im ÖBG von Mai bis Oktober. Gemessen in 2 m über Grund mit einem Thermohygrometer vom Typ HC2A (ventiliert). (Daten-Auflösung: 10 Minuten ( $N = 26492$ )).

	Mai					Juni				Juli				
Montag	34	32	40	88	63	86	88	100	64	83	81	94	36	43
Dienstag	63	55	57	34	7	61	92	100	18	100	94	97	22	
Mittwoch	36	0	65	10	74	26	87	75	70	95	39	71	4	
Donnerstag	98	0	55	59	82	64	90	68	78	100	72	66	37	
Freitag	63	7	41	19	8	35	64	0	69	100	100	59	0	
Samstag	33	15	0	42	57	96	52	34	27	100	76	55	0	
Sonntag	51	93	96	67	76	74	100	100	31	100	33	85	35	

	August				September				Oktober				
Montag		0	41	81	0	97	100	60	99	99	21		
Dienstag	0	11	82	89	1	94	100	59	98	30	61		
Mittwoch	0	40	77	54	33	97	85	99	85	78	99		
Donnerstag	12	100	31	76	39	97	44	76	100	99	56		
Freitag	4	100	37	30	9	100	85	0	68	97	23		
Samstag	0	60	100	0	39	100	100	45	48	61	5		
Sonntag	0	0	37	0	69	100	98	95	100	33			

Abbildung 4.2.: Dauer von Kaltluftbedingungen in Nächten in Prozent zwischen Mai und Oktober 2023. Zudem ist der Zeitraum der mobilen Messungen in der zweiten Augustwoche eingezeichnet. Grundlage der Beurteilung sind Messungen der Lufttemperatur, Windböengeschwindigkeit und Globalstrahlung an den Mikro-Wetterstationen Mistel und Kämmerei im 5-Minuten-Intervall (Kap. 3.1) Nächtliche Bedingungen werden mit einer Globalstrahlung von unter  $10 \text{ W m}^{-2}$  festgelegt.

## 4.1. Kaltluftsee am Quartier Kreuzstein

Mithilfe der Mikro-Wetterstation am Quartier Kreuzstein und den nächstgelegenen Mikro-Wetterstationen werden thermische und aerologische Unterschiede untersucht. Dafür wird die Veränderung der Windrichtung und Windgeschwindigkeit entlang der vermuteten Kaltluftfließbahn untersucht, um Hinweise auf Kaltluftabfluss und Kaltluftstau zu erhalten. Die Kaltluft fließt vom Sophienberg über die Hohlmühlleite über die Dr. Konrad-Pöhner-Straße ins Quartier Kreuzstein. Die Hauptströmungsrichtung ist an der Station Hohlmühlleite  $136^\circ$  (SSW), was auf eine dominante Kaltluftströmung aus dieser Richtung hinweist. Die Strömung setzt sich dann in Richtung Dr. Konrad-Pöhner-Straße fort und bleibt weiterhin sehr gerichtet, wobei sich die Windrichtung auf etwa  $167^\circ$  stabilisiert. An der Station Quartier Kreuzstein zeigt sich eine markante Veränderung. Hier ist die Windgeschwindigkeit deutlich reduziert, das auf die Bildung eines Kaltluftsees hindeutet. Zusätzlich ist die Windrichtung am QKS nicht mehr gerichtet wie zuvor. Stattdessen erstreckt sie sich über den gesamten Bereich, wobei die Wahrscheinlichkeit von Wind aus Richtungen zwischen  $180$  bis  $290^\circ$  Grad geringer ist. Diese Messungen legen nahe, dass sich am Quartier Kreuzstein in Situationen mit nächtlichem Kaltluftabfluss vom Sophienberg ein Kaltluftsee bildet.

Dies soll im Folgenden durch die Veränderung der Luftfeuchte bestätigt werden. Für einen Zeitraum von Ende Juli bis Ende August mit regelmäßigen Niederschlägen ist in

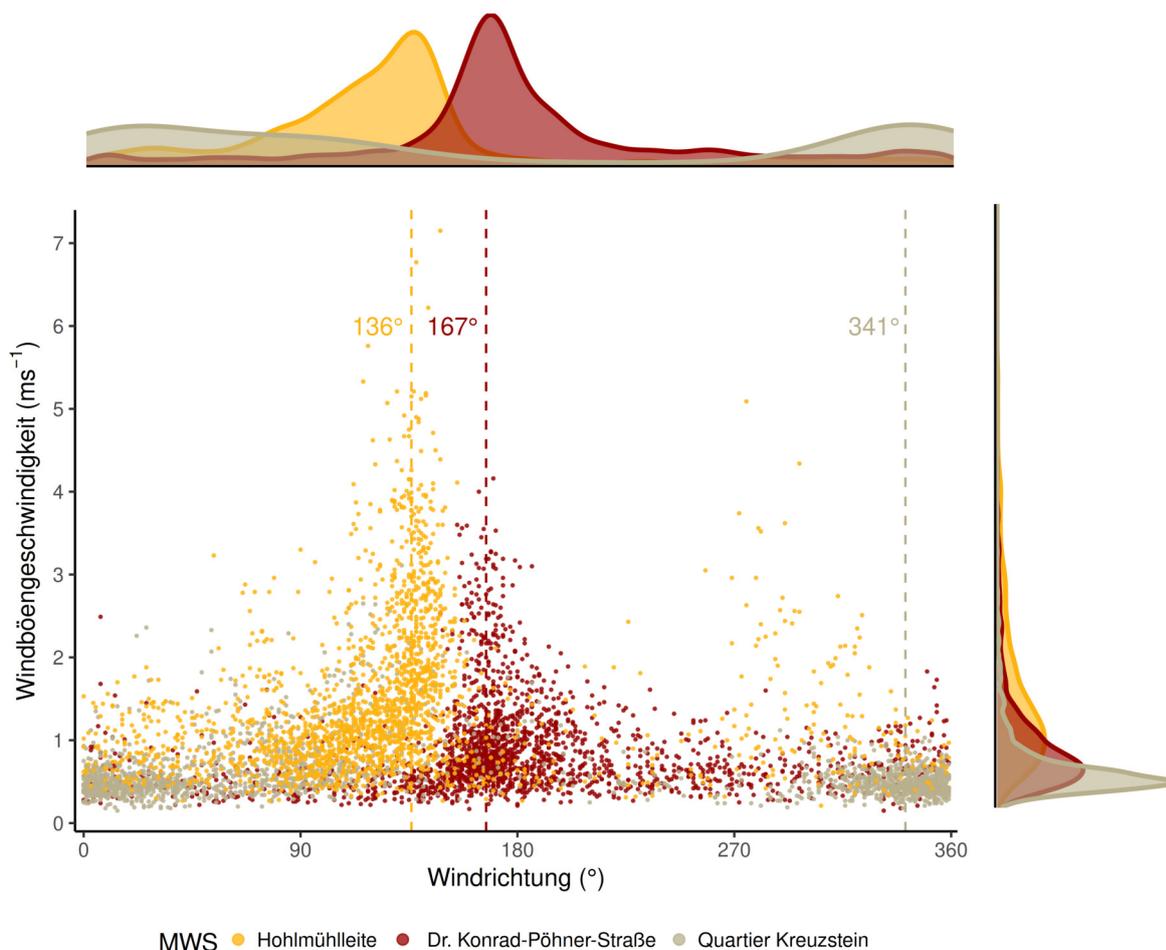


Abbildung 4.3.: Darstellung der Windböengeschwindigkeit in Abhängigkeit der Windrichtung für die Mikrowetter-Stationen Hohlmühlleite, Dr. Konrad Pöhner Straße und Quartier Kreuzstein entlang der Fließbahn der Kaltluftströmung in Kaltluftnächten. Zusätzlich ist die häufigste Windrichtung angegeben. Ausgewählt sind 5-Minuten-Werte in Kaltluftnächten vom 6.10 bis 28.10.2021 ( $N = 2204$ ). In diesem Zeitraum sind alle drei Mikrowetterstationen aktiv gewesen.

Kaltluftnächten eine stärkere Auffeuchtung der Luft zu beobachten als in Nächten ohne Kaltluft (Abb. 4.4). Die relative Feuchte ist zu Beginn von Kaltluftnächten niedriger als in Nicht-Kaltluftnächten, das hauptsächlich auf die stärkere Erwärmung während des Tages und die stärkere Abnahme der Lufttemperatur während der Nacht infolge der geringeren atmosphärischen Gegenstrahlung zurückzuführen ist. Die relative Feuchte steigt im Laufe der Nacht aufgrund der abnehmenden Lufttemperatur an und erreicht in den frühen Morgenstunden vor Sonnenaufgang gesättigte Bedingungen. Neben dem stärkeren Anstieg der relativen Feuchte ist in Kaltluftnächten ein Anstieg der spezifischen Feuchte im Quartier Kreuzstein zwischen 23.00 und 02.00 Uhr zu beobachten, ein weiterer Anstieg der spezifischen Feuchte wird anschließend durch die gesättigten Bedingungen begrenzt.

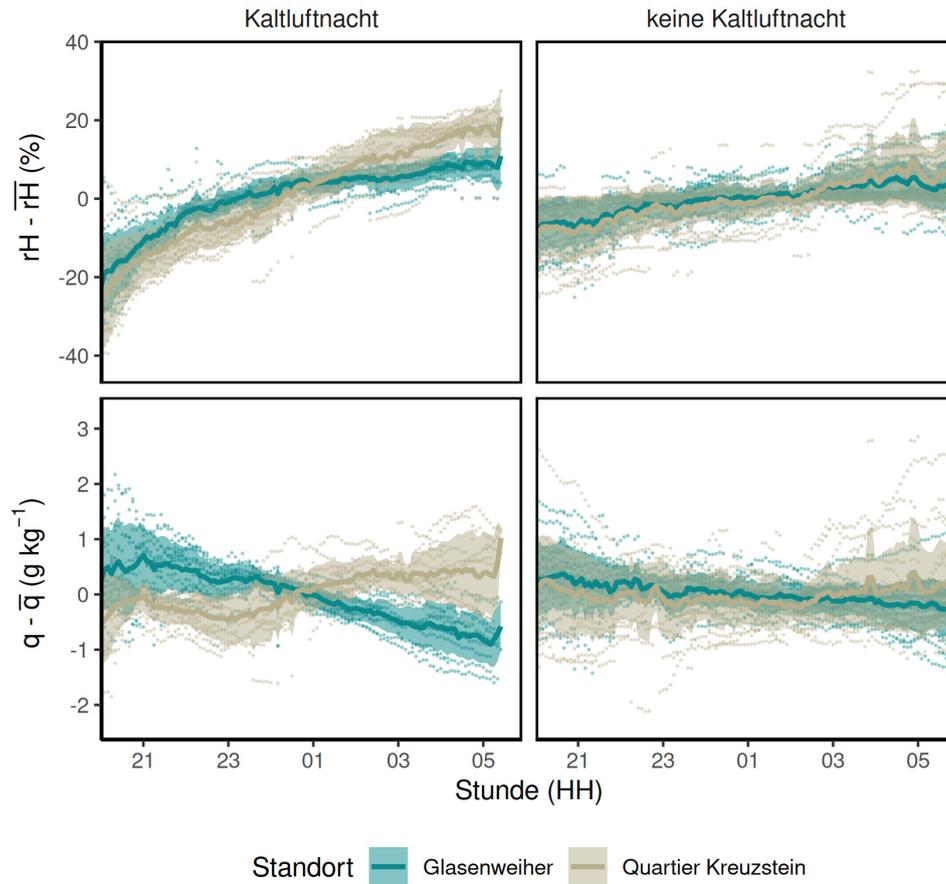


Abbildung 4.4.: Zeitlicher Verlauf der relativen und spezifischen Luftfeuchte  $q$  an den Standorten Quartier Kreuzstein und Glasenweiher in Nächten mit Kaltluftabfluss ( $N = 5236$ ) und ohne Kaltluftabfluss ( $N = 8880$ ). Das zeitliche Mittel bezieht sich auf den Zeitraum einer Nacht. Dargestellt ist der Mittelwert und die Standardabweichung und die ursprünglichen Werte. Datengrundlage sind 5-Minuten Daten der Mikro-Wetterstationen Glasenweiher und Quartier Kreuzstein vom 25. Juli 2023 bis zum 30. August 2023.

## 4.2. Mikroklima am Quartier Kreuzstein und Glasenweiher

Zum Vergleich dient die Station Quartier Kreuzstein, die in geringer Entfernung von ca. 70 Meter zur Station Glasenweiher liegt, aber durch den Damm getrennt ist. Große Unterschiede zwischen den Stationen weisen auf ein ausgeprägtes Mikroklima und eine abschirmende Wirkung des Dammes hin. Beim Vergleich der Lufttemperaturen ist die Lufttemperatur am Quartier Kreuzstein höher als am Glasenweiher (Abb. 4.5, Abb. 4.6). Besonders hoch ist die Abweichung in den frühen Abendstunden, etwa eine Stunde vor Sonnenuntergang. Im weiteren Verlauf der Nacht nähert sich die Lufttemperatur am Glasenweiher der am Quartier Kreuzstein an. Ab etwa zwei Stunden nach Sonnenuntergang sind keine nennenswerten Unterschiede in der Lufttemperatur zwischen beiden Standorten mehr festzustellen (Abb. 4.5, Abb. 4.6).

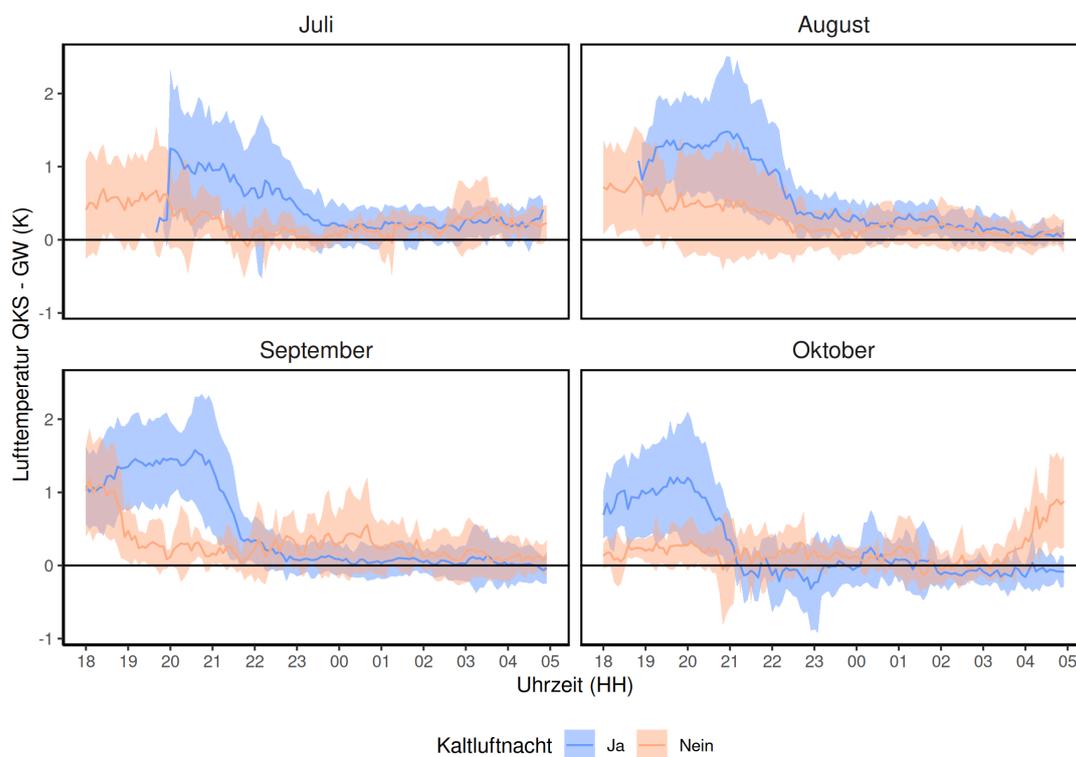


Abbildung 4.5.: Zeitlicher Verlauf der Lufttemperaturdifferenz zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher von 18 bis 5 Uhr (MEST) bei Kaltluftnächten und Nicht-Kaltluftnächten. Dargestellt ist der Mittelwert und die Standardabweichung. Datengrundlage sind 5-Minuten Daten der Mikrowetterstationen vom 04. Juli 2023 bis zum 16. Oktober 2023.

Während autochthonen Wetterlagen ist das Mikroklima besonders stark ausgeprägt. Dabei können größere räumliche Unterschiede auftreten. In einer ausgewählten Hochdruck dominierten Wetterlage Anfang September 2023 liegen tagsüber und nachts nahezu wolkenfreie Bedingungen vor (vgl. Abb. 4.2). Während dieser Witterungsperiode ist am Quartier Kreuzstein eine mittlere Maximallufttemperatur von  $29,2^{\circ}\text{C}$  und eine mittlere Minimallufttemperatur von  $10,8^{\circ}\text{C}$  und somit eine mittlere Tagesamplitude der Lufttemperatur von  $18,4\text{K}$  festzustellen (Abb. 4.6). Am Glasenweiher ist die mittlere Maximallufttemperatur mit  $27,5^{\circ}\text{C}$  geringer und die mittlere Minimallufttemperatur von  $10,8^{\circ}\text{C}$  identisch, somit

ergibt sich eine mittlere Tagesamplitude der Lufttemperatur von 16,6 K (Abb. 4.6). Diese ist somit um 1,8 K geringer als am Quartier Kreuzstein. Bei Betrachtung der Lufttemperatur in Abb. 4.6 ist ersichtlich, dass sich die Luft im Quartier Kreuzstein am Mittag stärker erwärmt als am Glasenweiher. Dieser Unterschied der Lufttemperatur bleibt bis in die Abendstunden erhalten. Nach Sonnenuntergang (19:40 Uhr) ist die Abkühlungsrate  $\frac{\delta T}{\delta t} < 0$  am Quartier Kreuzstein höher als am Glasenweiher, das zu einer raschen Angleichung der Lufttemperatur zwischen beiden Standorten führt. Gegen 20 Uhr ist die mittlere Differenz zwischen beiden Standorten geringer als 0,5 K (Abb. 4.6). Dies ist zudem identisch mit den Beobachtungen über den gesamten Untersuchungszeitraum (Abb. 4.5). Kurz vor Sonnenaufgang ist  $\Delta T_{QKS-GW}$  mit  $-0,1$  K leicht negativ und somit die Lufttemperatur am Glasenweiher seit Sonnenuntergang erstmals höher als am Quartier Kreuzstein. Nach Sonnenaufgang gegen 06:40 Uhr erwärmt sich die Luft, wodurch  $\frac{\delta T}{\delta t} > 0$  ist. Dabei erwärmt sich Quartier Kreuzstein in den Morgenstunden stärker, wodurch sich eine Lufttemperaturdifferenz von 1 K um 09:30 Uhr resultiert. Diese nimmt im folgenden stark ab, da sich die Luft am Glasenweiher stärker erwärmt, wodurch gegen 10 Uhr die Luft am Glasenweiher wärmer ist als am Quartier Kreuzstein. Im weiteren Tagesverlauf ist  $\frac{\delta T_{QKS}}{\delta t} > \frac{\delta T_{GW}}{\delta t}$ , weshalb  $\Delta T_{QKS-GW}$  bis auf 1,6 K in den frühen Abendstunden ansteigt. Nach Sonnenuntergang ist die Abkühlungsrate maximal und nimmt bis zum Sonnenaufgang ab (Abb. 4.6). Nachdem die Lufttemperatur sich gegen 20 Uhr an beiden Standorten angeglichen hat, sind keine signifikanten Unterschiede in der Abkühlungsrate der Lufttemperatur zwischen den Standorten festzustellen ( $\frac{\delta T_{QKS}}{\delta t} \approx \frac{\delta T_{GW}}{\delta t}$ ).

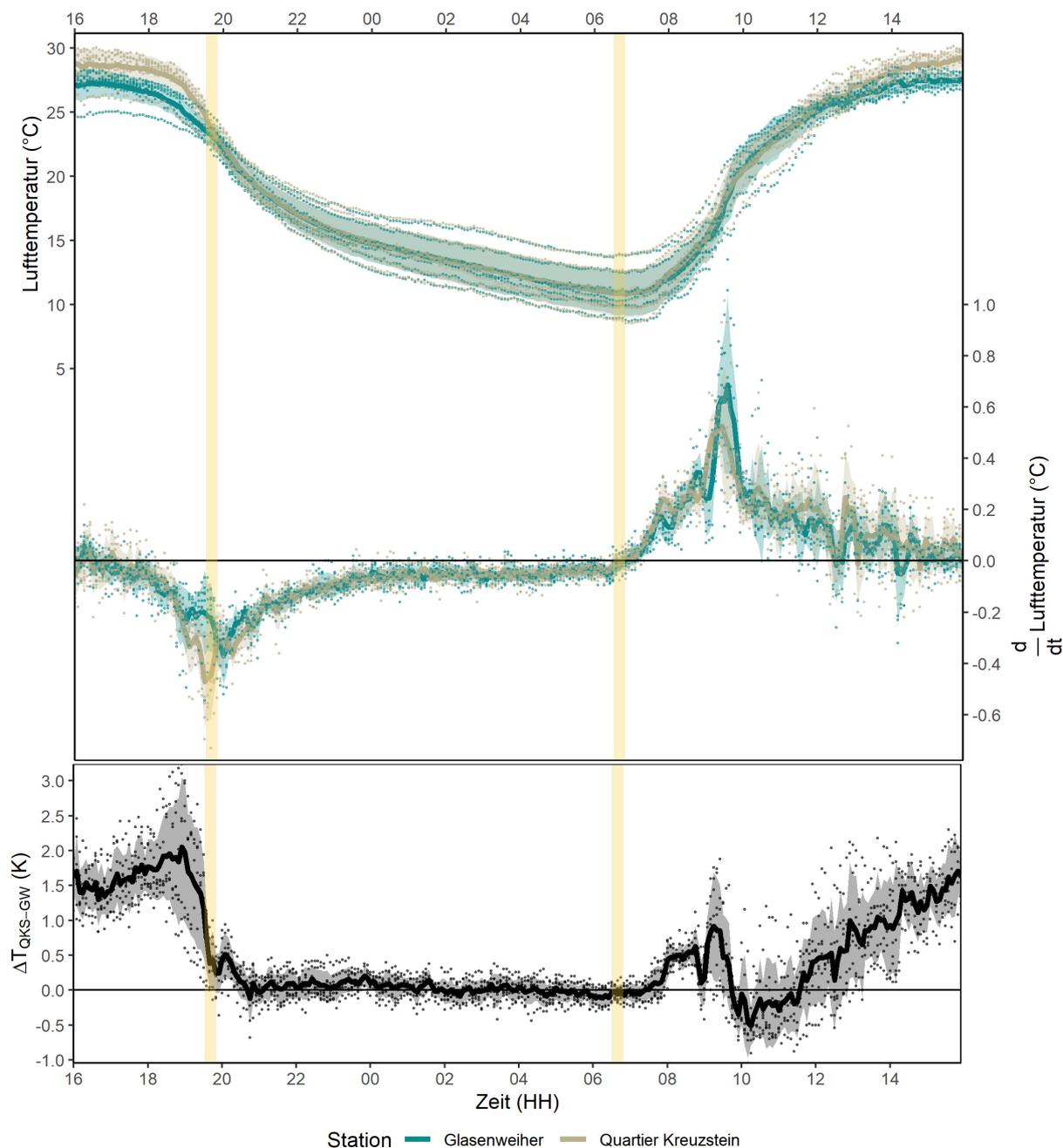


Abbildung 4.6.: Gemessene Lufttemperatur, Änderungsrate der Lufttemperatur im 5 Minutenintervall an den Stationen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher und die Differenz der Lufttemperatur zwischen den beiden Standorten. Zusätzlich ist jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung dargestellt. Die senkrechten gelben Balken geben den Zeitraum von Sonnenuntergang (19:49-19:36 Uhr) und Sonnenaufgang (6:34-6:44 Uhr) während des dargestellten Messzeitraumes an. Datengrundlage sind Lufttemperaturmessungen der Mikro-Wetterstationen Glasenweiher und Quartier Kreuzstein im 5-Minuten Intervall an ausgewählten Strahlungstagen im September (05.09. - 12.09. 2023).

Neben der Lufttemperatur ist auch die Luftfeuchtigkeit für eine unterschiedliche Ausprägung des Mikroklimas ursächlich. Die Differenz des Wasserdampfdruckes zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher ( $e_{QKS-GW}$ ) zeigt eine bimodale Verteilung (Abb. 4.7). Diese ist unabhängig von der Kaltluftsituation. Die bimodale Verteilung von  $e_{QKS-GW}$  kann durch einen Grenzwert  $rF = 80\%$  separiert werden. Ist die relative Feuchte  $\geq 80\%$ , so ist die Luft im Bereich der Sättigung. In diesem Messbereich nimmt die Genauigkeit des Sensors ab, sodass angenommen werden muss, dass für einen oder beide Sensoren die relative Feuchte bei  $100\%$  liegt. Ist die relative Feuchte  $< 80\%$  so wird von ungesättigten Bedingungen ausgegangen. Ist in Kaltluftnächten die relative Feuchte  $\geq 80\%$ , so ist  $e_{QKS-GW}$  im zeitlichen Mittel nahezu  $0 \text{ g kg}^{-1}$  (Abb. 4.7). Dies liegt unter anderem an der sehr geringen nächtlichen Lufttemperaturdifferenz zwischen beiden Stationen. Daher ist bei gesättigten oder nahezu gesättigten Bedingungen die Unterschiede im Wasserdampfdruck nur auf die Lufttemperatur zurückzuführen, da sie den Sättigungsdampfdruck bestimmt. In Abb. 4.7 ist der Großteil von  $e_{QKS-GW}$  für den Fall  $rF \geq 80\%$  positiv. Somit ist unter diesen Bedingungen die Luft am Quartier Kreuzstein etwas feuchter als am Glasenweiher. Die Wasserdampfdruckdifferenz im gesättigten Fall ( $rF \geq 80\%$ ) fällt gegenüber dem ungesättigten Fall ( $rF < 80\%$ ) gering aus (Abb. 4.7). Im ungesättigten Fall ist  $e_{QKS-GW}$  stets kleiner als  $-100 \text{ Pa}$  und nimmt mit zunehmenden Wasserdampfdruck ab (Abb. 4.7). Dabei wird in einzelnen Fällen ein Wasserdampfdruck von über  $2000 \text{ Pa}$  erreicht, was einer Taupunkttemperatur von über  $17,54^\circ\text{C}$  entspricht. Die Luftfeuchtigkeit ist unter ungesättigten Bedingungen während Kaltluftnächten am Glasenweiher feuchter als am Quartier Kreuzstein.

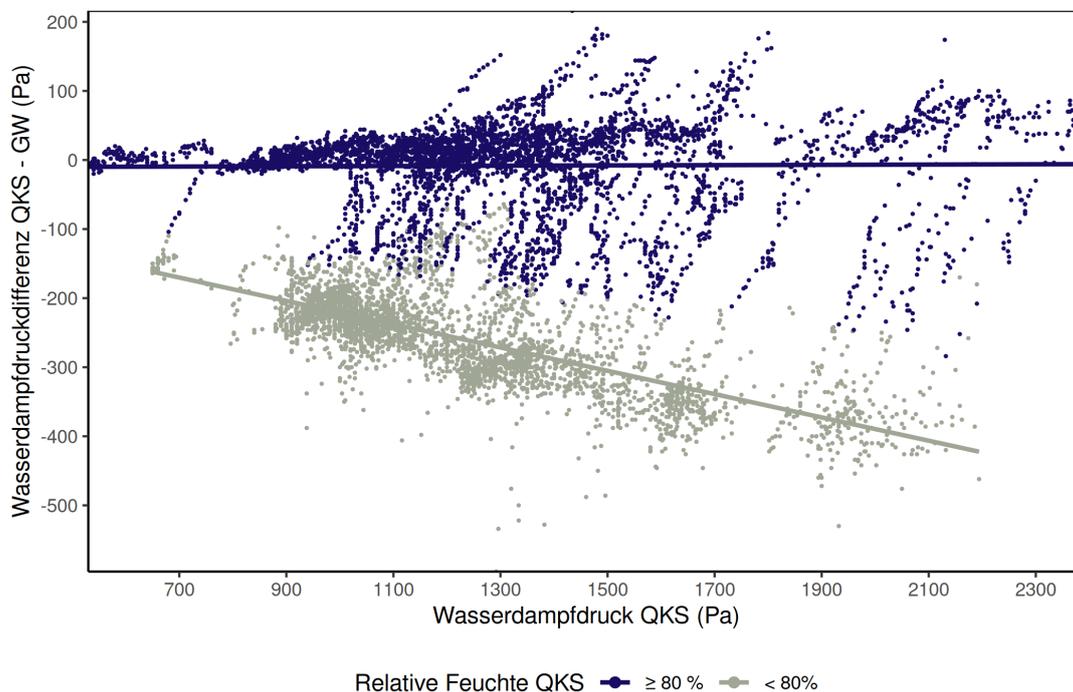


Abbildung 4.7.: Verhältnis aus Wasserdampfdruckdifferenz zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher zu dem absoluten Wasserdampfdruck am Quartier Kreuzstein in Kaltluftnächten. Zur Unterscheidung von nahezu gesättigten Bedingungen wird ein Grenzwert der relativen Luftfeuchte von  $80\%$  festgelegt. Datengrundlage sind 5-Minuten Daten der MWS Glasenweiher und Quartier Kreuzstein vom 04. Juli 2023 bis zum 16. Oktober 2023. In 3505 Intervallen ist  $rF < 80\%$  und in 4286 Intervallen  $\geq 80\%$ .

Diese Dynamik ist über den gesamten Untersuchungszeitraum zu beobachten (Abb. 4.7, Abb. 4.8). Es ist allerdings eine Verschiebung der Häufigkeit von gesättigten und ungesättigten Bedingungen von Juli bis Oktober ersichtlich. Während im Juli in Nächten mit Kaltluftabfluss die Luft meistens unterhalb der definierten Feuchtigkeitsschwelle von 80 % bleibt (5,2%), wird diese bereits im August in 55 % der 5-Minuten Intervalle überschritten. Dieser Trend setzt sich im September mit 67% und Oktober mit 77% fort (Abb. 4.8). Trotz der unterschiedlichen Häufigkeitsverteilung ist der Median der Differenz der spezifischen Luftfeuchte zwischen QKS und GW immer im Bereich zwischen  $-1,4 \text{ g kg}^{-1}$  bis  $-2,2 \text{ g kg}^{-1}$  (Abb. 4.8).

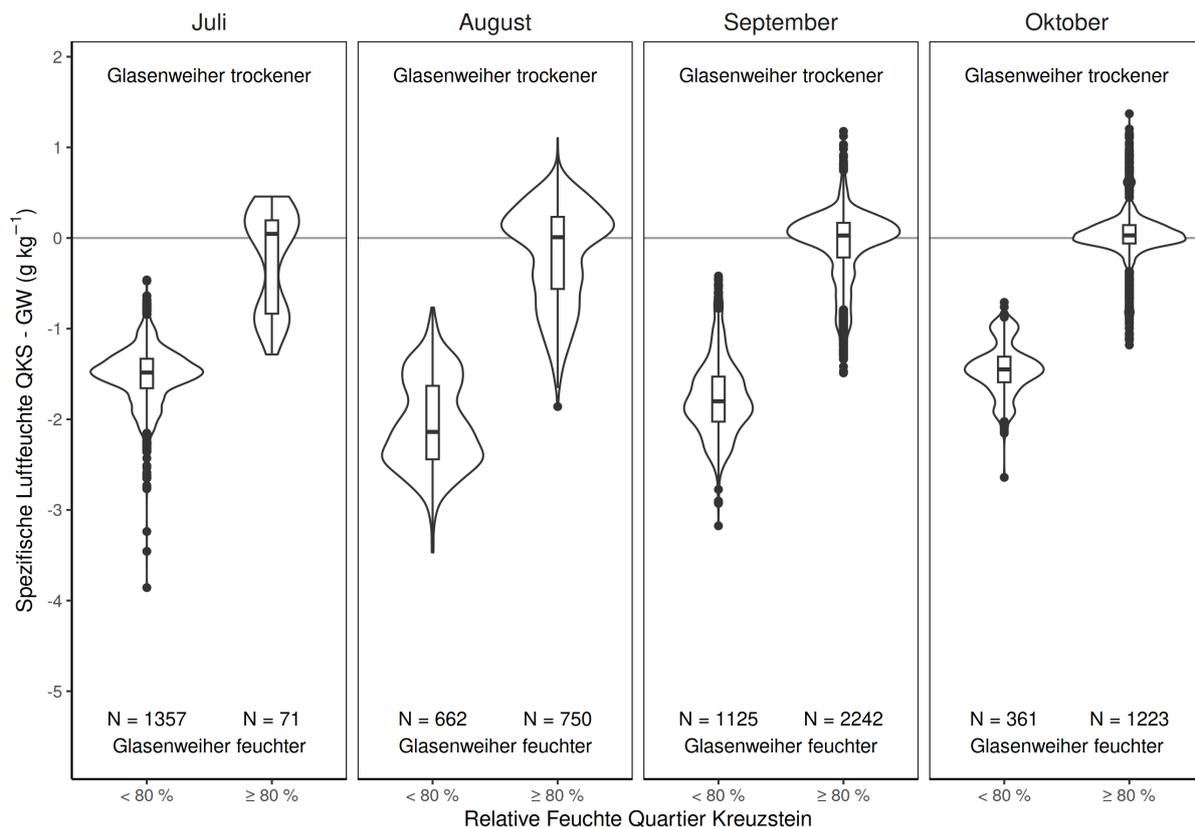


Abbildung 4.8.: Gegenüberstellung der Differenz der spezifischen Luftfeuchte zwischen Quartier Kreuzstein und Glasenweiher in Kaltluftnächten in den untersuchten Monaten Juli bis Oktober. Datengrundlage sind 5-Minuten Daten der Mikro-Wetterstationen Glasenweiher und Quartier Kreuzstein vom 04. Juli 2023 bis zum 16. Oktober 2023. Die spezifische Luftfeuchte wird aus dem Wasserdampfpartialdruck und Luftdruck berechnet.

Der Vergleich der spezifischen Feuchte zeigt, dass die Luft am Glasenweiher feuchter ist als auf der anderen Seite des Dammes, dem Quartier Kreuzstein (Abb. 4.8). Des weiteren unterliegt die Luftfeuchtigkeit an den beiden Standorten auch einer tageszeitlichen Dynamik (Abb. 4.4). So nimmt die relative Luftfeuchte aufgrund der Abkühlung der Luft an beiden Standorten zu und erreicht dabei etwa Sättigung. Die spezifische Feuchte nimmt während Kaltluftnächten am Glasenweiher kontinuierlich ab ( $\frac{\Delta q_{GW}}{\Delta t} = 0,24 \text{ g kg}^{-1} \text{ h}^{-1}$ ). Auf der anderen Seite des Dammes ist hingegen ab 23 Uhr eine Zunahme der spezifischen Feuchte um  $0,8 \text{ g kg}^{-1}$  zu vermerken (Abb. 4.4).

### 4.3. Räumliche Variabilität der Lufttemperaturabweichungen und -differenzen

Durch die räumlich kontinuierlichen, mobil durchgeführten Messungen werden thermische Unterschiede auf räumlicher Skala zu unterschiedlichen Zeitpunkten untersucht. Die Temperaturabweichung von der Referenztemperatur gibt Aufschluss über die Erwärmung und Abkühlung von Gebieten und dadurch Hinweise auf die Bildung von lokaler Kaltluft und Kaltluftströmungen. Die mittleren Lufttemperaturabweichungen der jeweiligen Tageszeiten morgens (Abb. B.5), nachmittags (Abb. 4.10) und abends (Abb. 4.9) werden in Karten dargestellt und zur besseren Vergleichbarkeit untereinander in einem Diagramm als Funktion der Entfernung zusammengefasst (Abb. 4.11).

Zunächst werden die tageszeitlichen Unterschiede der Lufttemperatur beschrieben. Am Morgen ist das Gesamtmittel von  $[\widehat{\Delta T}]$  positiv (0,45 K). Dies bedeutet, dass die durchschnittliche Lufttemperatur aller Messfahrten entlang der gefahrenen Messroute höher als  $\langle \overline{T_{\text{ref}}} \rangle$  ist. Am Nachmittag ist das Mittel aller Fahrten  $[\widehat{\Delta T}] = -0,50$  K und am Abend  $[\widehat{\Delta T}] = -0,25$  K. Nachmittags sind die räumlichen Unterschiede der Lufttemperatur eher gering, in Bereichen mit höherem Vegetationsanteil (Sendelbach, Glasenweiher, Röhrensee und Röhrenseepark) sind niedrigere Lufttemperaturen festzustellen. Die größten räumlichen Unterschiede von  $\langle \overline{T_{\text{ref}}} \rangle$  treten während den Abendstunden auf (Abb. 4.11). Im Mittel über alle Messfahrten am Abend treten die höchsten Abweichungen von  $[\widehat{\Delta T}]$  zwischen Sendelbach ( $d = 2450$  m) bzw. Schwedenbrücke ( $d = 10\,390$  m) und Ludwig-Thoma-Straße ( $d = 7695$  m) mit  $-2,1$  K bzw.  $-2,2$  K und  $1,2$  K auf. Daraus folgt eine mittlere Differenz zwischen der höchsten positiven und negativen Abweichung aller Abendfahrten von  $3,4$  K. In der Messfahrt am 10.08.2023 ist die Abweichung mit  $4,6$  K am größten.

Am Morgen sind die Abweichungen von  $[\widehat{\Delta T}]$  zwischen Maximum und Minimum mit  $3,03$  K um  $0,38$  K geringer als am Abend. Gebiete, die am Abend bereits eine negative Abweichung zum Stadtmittel zeigten sind auch am Morgen die kühlest Gebiete. Dazu zählen die Gebiete der Sendelbach und Röhrenseepark (Abb. 4.11). Die höchste positive Abweichung ist mit  $1,66$  K an der Ludwig-Thoma-Straße. In der Unterführung zwischen Jugendherberge und Glasenweiher ist die Lufttemperatur um  $1$  K erhöht und genauso hoch wie an der Ludwig-Thoma-Straße. Am Nachmittag ist die räumliche Verteilung von  $[\widehat{\Delta T}]$  im Vergleich zur Situation am Abend und Morgen unterschiedlich (Abb. 4.11). Sehr auffällig ist die negative Abweichung von  $[\widehat{\Delta T}]$  im Röhrenseepark, der mit großen Differenz der Lufttemperatur begrenzt ist (Abb. 4.10). Am Abend ist  $\langle \overline{T_{\text{ref}}} \rangle$  gegenüber  $\langle \overline{T_{\text{mob}}} \rangle$  entlang der gemessenen Strecke leicht erhöht (Abb. 4.9). An der Überquerung des Sendelbaches ist eine starke Reduktion von  $\widehat{\Delta T}$  festzustellen. Dabei nimmt  $\widehat{\Delta T}$  im Mittel gegenüber QKS Nord um  $1,4$  K ab. Gegenüber QKS Süd beträgt die Differenz von  $[\widehat{\Delta T}]$  sogar  $2,6$  K. Im weiten Streckenverlauf beträgt die Differenz von  $[\widehat{\Delta T}]$  zur Dr. Konrad Pöhner Straße  $2,8$  K (Abb. 4.11). Entlang der Nürnberger Straße ist  $[\widehat{\Delta T}]$  leicht negativ (Abb. 4.9). Ist östlich der Nürnberger Straße das Gebiet bebaut, so ist  $[\widehat{\Delta T}]$  positiv (Abb. 4.9). Bei Streckenmeter  $3700$  ist eine positive Anomalie von  $[\widehat{\Delta T}]$  um etwa  $1$  K gegenüber den Bereichen in  $100$  m Entfernung festzustellen (Abb. 4.11). An dem Wegpunkt Jugendherberge ist ein lokales Minimum ( $[\widehat{\Delta T}] = 0,8$  K) festzustellen. Auf der Nordseite des Glasenweihers ist  $[\widehat{\Delta T}]$  nahezu identisch zur Südseite (Glasenweiher Damm). Im Wohngebiet des Stadtteiles Birken nimmt  $[\widehat{\Delta T}]$  mit zunehmenden Abstand zum Glasenweiher zu. Entlang des Sportplatzes in der Nobelstraße treten große Temperaturdifferenzen auf.  $[\widehat{\Delta T}]$  ist entgegen der Umgebung um  $0,8$  K geringer. Der Bereich des Röhrensees ist am Abend durch starke Temperaturdifferenzen begrenzt. An der Nordseite des Röhrensees

nimmt  $\widehat{\Delta T}$  innerhalb weniger Meter um 1 K ab. Nach etwa 650 m nimmt  $\widehat{\Delta T}$  wieder in geringer räumlicher Entfernung um etwa 1,4 K zu. An der Ludwig-Thoma-Straße ist  $\widehat{\Delta T}$  maximal.  $\widehat{\Delta T}$  nimmt zur Pottensteiner Straße ab und ist im weiteren Streckenverlauf negativ. Das räumliche Mittel von  $\widehat{\Delta T}$  beträgt im Röhrenseepark  $-1,3$  K. Das zweite lokale Temperaturminimum wird nach der Schwedenbrücke erreicht.

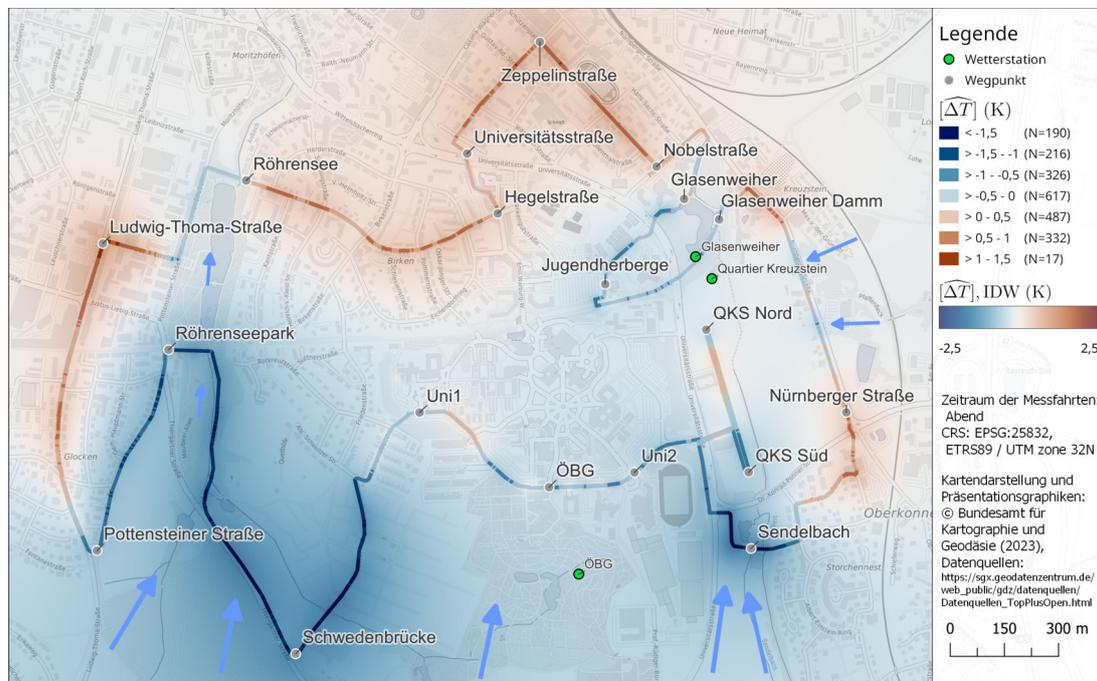


Abbildung 4.9.: Räumliche Darstellung von dem  $\widehat{\Delta T}$  aller Abendfahrten bei einem Mittelungsintervall von 5 m entlang der Messroute und über Inverse Distance Weighting interpolierte Bereiche. Mit blauen Pfeilen sind vermutete Fließwege der Kaltluft eingezeichnet. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt.

Am Morgen sind die räumlichen Unterschiede von  $\widehat{\Delta T}$  geringer als am Abend ausgeprägt (Abb. B.5). Die Differenz zwischen QKS Nord und Sendelbach ist unverändert geblieben. Gegenüber der Situation am Abend ist  $\widehat{\Delta T}$  am Sendelbach um 0,3 K reduziert. Liegt aber dennoch unterhalb der Referenztemperatur. Die Differenz zwischen Sendelbach und Dr. Konrad Pöhner Straße ist wie auch zum QKS Nord im Vergleich zu den Abendstunden reduziert. Die Temperaturanomale an der Jugendherberge ist im Vergleich zum Abend reduziert. Im Vergleich zum Glasenweiher Damm und Glasenweiher ist eine Temperaturdifferenz von 0,8 K festzustellen. Im folgenden ist eine abrupte Temperaturzunahme um 1,4 K in der Unterführung der Universitätsstraße messbar. Der Glasenweiher weist am Morgen sehr ähnliche Lufttemperaturen wie das südlich anschließende Wohngebiet auf (Nobelstraße, Zeppeleinstraße). Dabei ist auffällig, dass auch der Stadtteil Birken und Röhrensee erhöhte Temperaturen gegenüber der Referenztemperatur aufweist. Die Unterschiede sind allerdings innerhalb dieses Gebietes (4,9 bis 6,1 km) gering ( $\widehat{\Delta T} < 0,7$  K). An der Ludwig-Thoma-Straße ist wie am Abend das Maximum von  $\widehat{\Delta T}$ . Im Röhrenseepark ist  $\widehat{\Delta T}$  unterdurchschnittlich. In der Nähe der Schwedenbrücke wird die geringste Temperatur der Morgenfahrten erfasst ( $\widehat{\Delta T} = -1,7$  K).

Am Nachmittag ist das räumliche Muster von  $\widehat{\Delta T}$  unterschiedlich zu der Situation am Morgen und Abend (Abb. 4.11). Das Gebiet Uni1 bis QKS Süd mit 0 bis 1 K etwas kälter als das Stadtmittel (Abb. 4.10). Der Sendelbach stellt wie auch zu den anderen Tageszeiten negative Abweichungen dar. Auffällig ist die ebenfalls starke negative Abweichung mit 1,2K entlang der Universitätsstraße zwischen QKS Süd und Sendelbach (Abb. 4.10).  $\widehat{\Delta T}$  ist entlang der Nürnberger Straße ausgeglichen bis leicht negativ. Am Glasenweiher Damm, Jugendherberge und Glasenweiher Damm ist  $\widehat{\Delta T} < -1$  K. Im Wohngebiet zwischen Nobelstraße und Röhrensee sind nur geringe Abweichungen festzustellen ( $\langle \widehat{\Delta T} \rangle < \pm 0,5$  K). Kühler ist nur ein Bereich nach der Universitätsstraße. Am Röhrensee ist  $\widehat{\Delta T}$  negativ ( $-1,2$  K). Entlang der Ludwig-Thoma-Straße ist es um etwa 0,5 K wärmer als im Stadtmittel (Abb. 4.10). Entlang der Pottensteiner Straße ist die gemessene Lufttemperatur um 0,5 K geringer gegenüber dem Stadtmittel. Im Röhrenseepark bis zur Schwedenbrücke ist  $\widehat{\Delta T}$  sehr negativ ( $\widehat{\Delta T} < -2$  K).

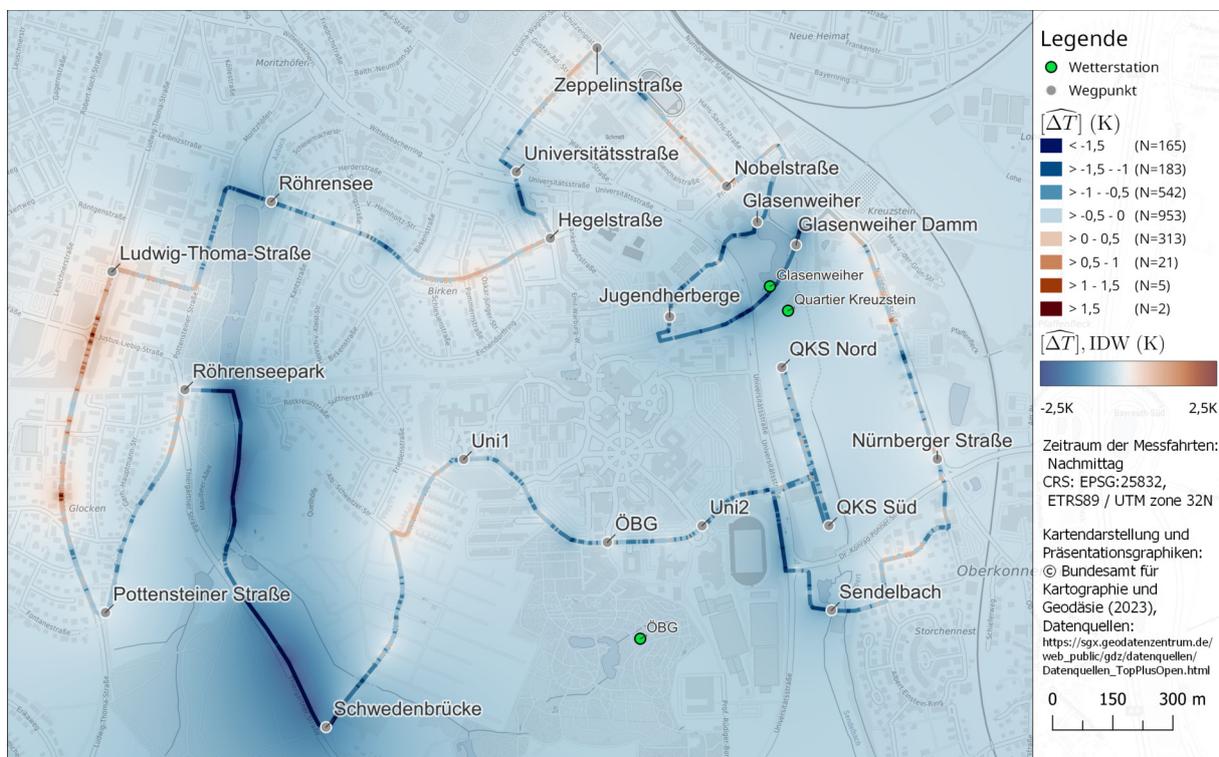


Abbildung 4.10.: Räumliche Darstellung von dem  $\widehat{\Delta T}$  aller Fahrten am Nachmittag bei einem Mittelungsintervall von 5 m entlang der Messroute und über Inverse Distance Weighting interpolierte Bereiche. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt.

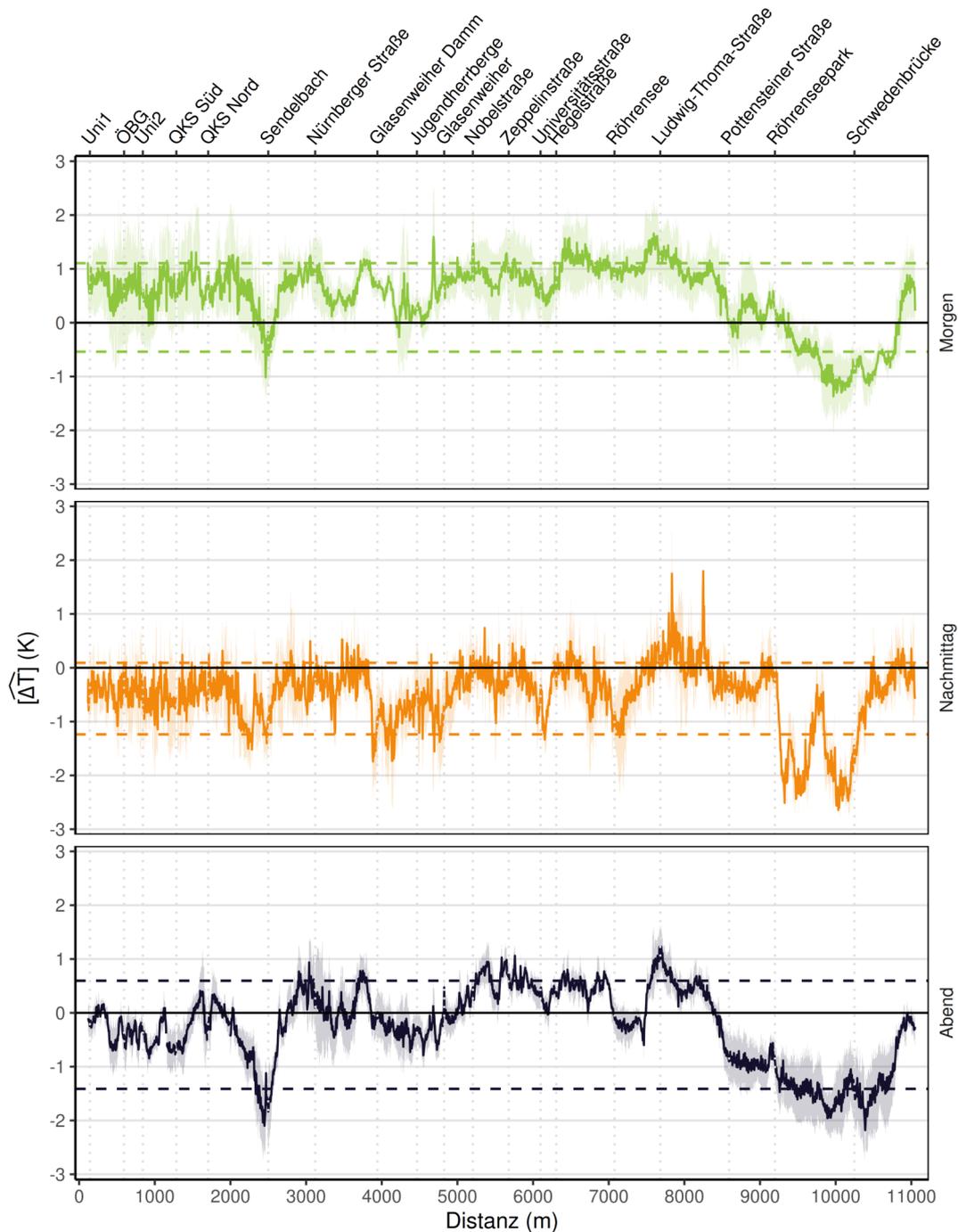


Abbildung 4.11.: Mittelwert und Standardabweichung von  $[\widehat{\Delta T}]$  aller Messfahrten zu den drei Messzeiträumen am Morgen ( $N = 4$ ), Nachmittag ( $N = 3$ ) und Abend ( $N = 5$ ) über ein Mittelungsintervall von 5 m. In horizontalen gestrichelten Linien ist das 10 % und 90 % Perzentil von  $\widehat{\Delta T}$  dargestellt. Charakteristische Wegpunkte entlang der Route beschreiben die Startpunkte von Streckenabschnitten mit besonderer Landnutzung und sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Datengrundlage sind fahrradbasierende, mobile Lufttemperaturmessungen auf einer festgelegten 11,5 km langen Route. Die Strecke wird in beide Richtungen an verschiedenen Tagen im August zu den Zeitpunkten am Morgen, Mittag und Abend abgefahren. Messungen bei windigen oder stark bewölkten Bedingungen wurden nicht berücksichtigt.



# 5. Diskussion

In der Diskussion werden die formulierten Hypothesen anhand der vorliegenden Ergebnisse überprüft. Es wird diskutiert, inwieweit die Hypothesen widerlegt werden können.

## 5.1. Kaltlufteinfluss am Quartier Kreuzstein

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss des Kaltluftflusses auf das Quartier Kreuzstein zu bestimmen. Es wurde erwartet, dass der Damm am Südrand des Quartier Kreuzsteins ein weiteres fließen der vom Sophienberg über die Hohlmühlleite nach Süden strömenden Kaltluft verhindert und sich ein Kaltluftsee bildet.

Bei dem Vergleich der Hauptwindrichtung der Mikro-Wetterstationen entlang der Fließbahn der Kaltluft ist eine Abnahme der Windböengeschwindigkeit offensichtlich. Mit abnehmendem Gefälle nimmt der gravitative Antrieb der Kaltluftströmung ab und somit auch die Geschwindigkeit (Haiden und Whiteman, 2005). Das geringe Gefälle zwischen der Hohlmühlleite und der Dr. Konrad Pöhner Straße ist zudem mit  $0,4^\circ$  gering. Zudem liegt der Standort der Mikrowetterstation Dr. Konrad Pöhner Straße nicht in der Senke des Sendelbaches sondern etwa 4 m oberhalb. In der Senke muss die Kaltluft angestaut werden um über die Dr. Konrad Pöhner Straße in Quartier Kreuzstein zu fließen. Vermutlich stellt die Dr. Konrad Pöhner Straße aufgrund der höheren Lufttemperatur eine kleine Barriere für den Kaltluftfluss dar. Zudem ist eine leichte Abschwächung des Kaltluftflusses aufgrund der Verwirbelungen der Luft durch den Verkehr wahrscheinlich. Mithilfe der mobilen Messungen kann gezeigt werden, dass die Erwärmung der Universitätsstraße gegenüber der direkten Umgebung gering ist (Abb. 4.9, Abb. B.5). Das Gefälle im Quartier Kreuzstein entlang der vermuteten Fließbahn der Kaltluft ist mit unter  $0,4^\circ$  ( $0,7\%$ ) sehr gering. Dies hat zu Folge, dass der gravitative Antrieb abnimmt, weshalb die durchschnittliche Windböengeschwindigkeit bis unter  $1 \text{ m s}^{-1}$  abnimmt.

Entgegen der Annahme, dass keine Hauptwindrichtung an der Mikro-Wetterstation Quartier Kreuzstein mehr festzustellen ist, ist ein Maximum der Windrichtung bei  $330^\circ$  und  $30^\circ$  messbar (Abb. 4.3). Diese ist zudem auch über einen längeren Zeitraum zu beobachten (Abb. B.1). Zu beachten ist, dass die gemessenen Windböengeschwindigkeiten unterhalb des sicheren Messbereiches von  $0,3 \text{ m s}^{-1}$  liegen (METER, 2023). Dieser kann durch eine weitere Kaltluftströmung vom ÖBG entlang des Uni-Geländes und über die Universitätsstraße erfolgen, die dann nordwestlich der Station in das Quartier Kreuzstein fließt. Die Wahrscheinlichkeit für einen Kaltluftfluss entlang dieser Fließbahn ist nicht hoch, da die Geländeneigung sehr gering ist und die Kaltluft die Universitätsstraße überqueren müsste. Wahrscheinlich ist der Kaltluftzustrom aus Osten vom Eichelberg (Abb. 4.9). Aufgrund der Geländeneigung zwischen der Bundesautobahn und der Nürnberger Straße von  $1,2^\circ$  und dem großen Quellgebiet östlich der Bundesautobahn. Im Gebiet östlich der Bundesautobahn findet Kaltluftbildung und Fluss dieser nach Westen statt (Tschuschke, 2019). In Experimenten im Herbst 2020 wurde gezeigt, dass die Überströmung der Bundesautobahn mit Kaltluft sehr wahrscheinlich ist. Im Bereich der Nürnberger Straße sind am Abend und am Morgen zwei Bereiche mit geringerer Lufttemperatur erkennbar (Abb. B.3). Die vermutete Fließbahn der Kaltluft vom Eichelberg über die Nürnberger Straße stimmt

zudem gut mit der gemessenen Südost-Strömung an der Mikro-Wetterstation Quartier Kreuzstein überein (Abb. B.1).

In dem Vergleich der Kaltluftsituationen zwischen der kaltluftbeeinflussten MWS Mistel und Quartier Kreuzstein ist ersichtlich, dass die mittlere Lufttemperaturdifferenz zwischen Quartier Kreuzstein und Kämmerei etwa 0,5 K geringer ist als zwischen Mistel und Kämmerei (Abb. 3.4, Abb. 3.5). Das sehr ähnliche Muster der beiden Stationen lässt darauf schließen, dass auch die Station Quartier Kreuzstein von einem Kaltluftzustrom beeinflusst ist.

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der fahrradgestützten Lufttemperaturmessungen am Abend (Abb. 4.9). Dennoch konnte in diesem im Zeitraum im Bereich des Stadtteiles Kreuzstein keine deutliche Temperaturabnahme am Morgen (Abb. B.5) festgestellt werden. Es zeigt sich jedoch, dass im nördlichsten Bereich der Messroute im Quartier Kreuzstein eine Abnahme der Lufttemperatur am Abend zu beobachten ist, die sich auch am Morgen in abgeschwächter Ausprägung zeigt (Abb. 4.11). Möglicherweise ist es durch die Kaltluftzufuhr vom Eichelberg aus Osten im nördlichen Teil des Quartier Kreuzsteins im Bereich der Mikro-Wetterstation kälter als im Bereich, der durch die mobilen Messungen erfasst werden konnte. Dies könnte auch daran liegen, dass in den untersuchten Nächten nur ein mäßiger Kaltluftstrom vom Sophienberg vorhanden war, der nicht vollständig bis in den Quartier Kreuzstein vordringen konnte. Daraus resultiert nur eine geringe Lufttemperaturdifferenz ( $\Delta T_{\text{QKS-Kämmerei}}$ ) von ca.  $-2\text{ K}$ .

Somit kann die erste Hypothese in dieser Arbeit, dass sich ein Kaltluftsee am Quartier Kreuzstein ausbildet, nicht widerlegt werden. Anhand der Änderung der Windrichtung und Abschwächung der Windgeschwindigkeit sind bereits wesentliche Indizien für die Kaltluftbeeinflussung und den Stau von Kaltluft gegeben (Abb. B.1). Bekräftigt werden kann dies durch die ähnliche Lufttemperaturverteilung zur kaltluftbeeinflussten Station Mistel (Abb. 3.4, Abb. 3.5). Dennoch konnte der Kaltluftereinfluss nicht eindeutig mithilfe der mobilen Lufttemperaturmessungen nachgewiesen werden.

## 5.2. Quantifizierung des Seenklimas

Das zweite Ziel dieser Arbeit war es die Ausprägung des Seenklimas am Glasenweiher und den Einfluss des Dammes auf dieses zu untersuchen. Es wurde erwartet, dass der Damm ein Strömungshindernis für den nächtlichen Kaltluftfluss darstellt, wodurch sich das Mikroklima auf beiden Seiten des Dammes unterscheidet. Auf der Süd-Ost Seite des Dammes finden während des gesamten Untersuchungszeitraumes Bauarbeiten statt. Die Oberfläche besteht größtenteils aus Kies und Schotter und weist daher eine geringe Wasserverfügbarkeit und wenig Vegetation auf. Auf der Nord-West Seite des Dammes, an der Station Glasenweiher ist der Anteil an Vegetation hoch. Die Station befindet sich je nach Wasserstand 0 bis 3 m vom See entfernt.

Im Folgenden werden die Unterschiede im Mikroklima unter Berücksichtigung der Daten der Wetterstationen an den beiden Standorten diskutiert. Dafür werden auch die Ergebnisse der mobilen Messungen mit einbezogen. An Tagen mit hoher Strahlungsintensität resultiert aufgrund der geringen Vegetationsbedeckung und Wasserverfügbarkeit ein hoher Tagesgang der Lufttemperatur. (Abb. 4.6). Die größtenteils aus Kies bestehende Fläche absorbiert einen hohen Anteil (71 % bis 56 %) der kurzwelligen Strahlung (Pisello et al., 2014). Der hohe Anteil absorbiertes kurzwelliger Strahlung erwärmt die Kiesoberfläche stark (Pisello et al., 2014). Diese absorbierte Energie wird in Form von fühlbarer Enthalpie an die bodennahen Luftschichten abgegeben, weshalb sich diese erwärmen. Der konduktiv getriebene Bodenwärmestrom ist wegen der geringen Wasserverfügbarkeit und geringen

Konnektivität zwischen den Kieselsteinen gering. Somit verbleibt die zugeführte Energie an der Oberfläche. Die geringe spezifische Wärmekapazität von Schotter ( $\approx 800 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) führt dazu, dass sich die Oberfläche schnell erwärmt. Durch die Erwärmung der bodennahen Luft nimmt die Dichte dieser ab, wodurch diese durch freie Konvektion aufsteigt. Daraus resultieren hohe Oberflächen- und Lufttemperaturen am Mittag und Nachmittag.

In den Abendstunden nimmt die Intensität der kurzwelligeren Einstrahlung ab, die langwellige Ausstrahlung bleibt aufgrund noch erhöhter Oberflächenstrahlungstemperatur hoch. In Strahlungsnächten ist die atmosphärische Gegenstrahlung ( $L \downarrow$ ) gering, die Oberfläche kann langwellig ins Weltall ausstrahlen, wodurch ein Energieverlust an der Oberfläche und bodennahen Luftschichten stattfindet und die Nettostrahlungsbilanz positiv wird. Analog zur schnellen Erwärmung des Schotters nimmt auch die Oberflächenstrahlungstemperatur am Abend mit abnehmender Energiezufuhr rasch wieder ab. Der Wärmetransport ist nun zur Oberfläche gerichtet, das sich in einer schnellen Änderung der bodennahen Lufttemperatur zeigt (Abb. 4.6).

Am Glaserweiher ist die aus Gräsern, Sträuchern und Bäumen bestehende Vegetation für geringere kurzwellige Strahlung ( $K \downarrow$ ) am Boden verantwortlich. Ein großer Teil der kurzwelligeren Einstrahlung wird bereits in den Baumkronen absorbiert beziehungsweise reflektiert und erreicht somit nicht die Bodenoberfläche (Konarska et al., 2014). Dies hat zur Folge, dass die Lufttemperatur in 2 m bis 3 m Höhe bei hoher kurzwelliger Einstrahlung geringer ist als am Quartier Kreuzstein (Abb. 4.6). Neben der Beschattung durch die Baum- und Strauchvegetation, ermöglicht die Verfügbarkeit von Wasser die Evapotranspiration. Durch Evapotranspiration wird der Lufttemperaturanstieg reduziert, indem die zur Verfügung stehende Energiemenge, in den latenten ( $Q_E$ ) statt in den fühlbaren turbulenten Wärmestrom ( $Q_H$ ) umgewandelt wird (Bowler et al., 2010). Diese Prozesse führen mittags zu einer geringeren Lufttemperatur am Glaserweiher gegenüber Quartier Kreuzstein. Trifft die kurzwellige Sonnenstrahlung auf die Wasseroberfläche erwärmt sich diese aufgrund der viel höheren spezifischen Wärmekapazität von  $4196 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  nur geringfügig. Die zur Verfügung stehende Energiemenge wird hauptsächlich in den latenten Wärmestrom ( $Q_E$ ) umgewandelt. Demzufolge wird ein langsamer Anstieg der Lufttemperatur am Glaserweiher erwartet, der allerdings nicht beobachtet werden konnte. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Aufgrund der geringen Größe des Weihers von weniger als 1 ha fällt der Kühlungseffekt durch Evaporation aufgrund geringerer direkter kurzwelliger Einstrahlung auf die Wasseroberfläche gering aus (Pataki et al., 2011). Zudem trifft die direkte Sonnenstrahlung erst gegen Mittag auf die Wasseroberfläche, da sie von den Bäumen am Ufer absorbiert wird. Die mobilen Messungen zeigen eine starke Reduktion der Lufttemperatur aufgrund der Wasserfläche und Vegetation am Nachmittag (Abb. 4.10). Die Lufttemperatur ist im Bereich des Glaserweiher (Glaserweiher Damm, Glaserweiher) am Nachmittag etwa 1 K geringer als in der direkten Umgebung (Abb. 4.11) und gegenüber QKS Nord ergeben sich Lufttemperaturunterschiede von 1,5 K (Abb. 4.10). Der Abkühlungseffekt ist räumlich stark begrenzt, das darauf hindeutet, dass Beschattung und Wasserverfügbarkeit die Hauptursachen für die geringere Lufttemperatur sind.

Am Abend nimmt die kurzwellige Einstrahlung ab, so dass die Intensität der langwelligeren Nettostrahlung ( $I_{\text{net}}$ ) die Abkühlungsrate der Lufttemperatur bestimmt. Es ist eine schnellere Abnahme der Lufttemperatur am Quartier Kreuzstein gegenüber dem Glaserweiher zum Sonnenuntergang festzustellen (Abb. 4.7). Die Intensität der langwelligeren atmosphärischen Gegenstrahlung ( $L \downarrow$ ) unterscheidet sich aufgrund der geringen räumlichen Distanz zwischen den beiden Standorten nicht wesentlich. Allerdings wird  $L \downarrow$  durch den am Glaserweiher vorherrschenden geringen Himmelssichtfaktor aufgrund der hohen Vegetation direkt neben der Mikrowetterstation erhöht, wodurch  $I_{\text{net}}$  reduziert wird. Dies führt zu

einer langsameren Abkühlung der bodennahen Luft. Zusätzlich kühlt die Wasseroberfläche aufgrund der hohen Wärmekapazität langsam ab und wirkt der Abkühlung der Luft entgegen. Der Einfluss auf die Lufttemperatur ist aufgrund der Größe der Wasserfläche gering (Deutscher Wetterdienst, 2023; Yao et al., 2023). Die schnellere Abnahme der Lufttemperatur am Quartier Kreuzstein wird wahrscheinlich durch die höhere Oberflächenstrahlungstemperatur am Quartier Kreuzstein verursacht, denn die Strahlungsleistung von der ausstrahlenden Fläche ist nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz proportional zu vierten Potenz der Oberflächenstrahlungstemperatur. Bereits kurz nach Sonnenuntergang sind die Lufttemperaturen an beiden Standorten bis kurz nach Sonnenaufgang identisch (Abb. 4.6). Im untersuchten Zeitraum ist etwa vier Stunden nach Sonnenuntergang gegen 0 Uhr an beiden Standorten  $\frac{\delta T}{\delta t} \approx 0$ . Die geringen Differenzen in der nächtlichen Lufttemperatur an beiden Standorten sind über den gesamten Untersuchungszeitraum zu beobachten (Abb. 4.5).

Für die Beurteilung des Mikroklimas ist neben der Lufttemperatur auch die Feuchtigkeit wichtig. In Nächten mit geringen Temperaturunterschieden zwischen den Standorten unterscheidet sich die Luftfeuchte (Abb. 4.7). Dieses Muster ist konsistent über den gesamten Beobachtungszeitraum (Abb. 4.8). Typisch für ein Seeklima ist aufgrund der höheren Wasserverfügbarkeit ein höherer Wassergehalt in der Luft (Deutscher Wetterdienst, 2023; Theeuwes et al., 2013). In dem Fall, dass keine gesättigten Bedingungen vorherrschen, ist die Luft am Glasenweiher feuchter als am Quartier Kreuzstein (Abb. 4.7). Über den Untersuchungszeitraum von Juli bis Oktober nimmt die Anzahl der Zeitintervalle  $rF \geq 80\%$  zu (Abb. 4.8). Dies liegt an der allgemeinen Aufweitung der Luft im Sommer und entspricht dem Jahrestrend (Schönwiese, 2020). Darüber hinaus variiert die spezifische Luftfeuchte auch innerhalb einer Nacht (Abb. 4.4). Die Unterschiede in relativer und spezifischer Luftfeuchte zwischen den Standorten Quartier Kreuzstein und Glasenweiher sind in Nächten mit Kaltluftabfluss größer als in Nächten ohne Kaltluftabfluss (Abb. 4.4). Dies zeigt, dass es sich um unterschiedliche Luftpakete auf beiden Seiten des Dammes handelt, die bei starker Turbulenz miteinander gemischt oder durch das Einmischen von Luft aus höheren Luftschichten überprägt werden. In diesen Nächten mit erhöhter Durchmischung sind sowohl die Lufttemperatur als auch die Luftfeuchte nahezu identisch (Abb. 4.4). Dennoch sind in Strahlungsnächten mit Kaltluftbildung und geringerer Durchmischung deutliche Unterschiede in der Instationarität der spezifischen Luftfeuchte festzustellen. Am Quartier Kreuzstein nimmt die spezifische Luftfeuchte in Nächten mit Kaltluftabfluss zu. Eine Erklärung dafür ist die Zufuhr von feuchterer Luft durch die Kaltluftströmung. Die feuchten Vorbedingungen sind notwendig, da die über Wiesen bewegende Kaltluft Feuchtigkeit aufnehmen kann. Am Glasenweiher ist die Luft bereits in den frühen Nachtstunden nahezu gesättigt, weshalb durch Taufall die spezifischen Luftfeuchte abnimmt. Somit lässt sich festhalten, dass sich das Mikroklima auf beiden Seiten des Dammes unterscheidet.

Am Morgen wird wie am Abend am Glasenweiher eine verzögerte und langsamere Reaktion der Lufttemperatur auf die kurzweilige Strahlung erwartet. Allerdings erwärmt sich die Luft in der ersten Stunde nach Sonnenaufgang an beiden Standorten nahezu identisch. Dies ist auf die durch Taufall bedingte Verfügbarkeit von Wasser an beiden Standorten zu erklären (Deutscher Wetterdienst, 2023). Die Energie der kurzweiligen Einstrahlung wird am Morgen an beiden Standorten zu ähnlichen Anteilen in den latenten und fühlbaren Wärmestrom umgewandelt. Nach etwa einer Stunde nach Sonnenaufgang ist die Erwärmung am Glasenweiher geringer, bedingt durch die höhere Wasserverfügbarkeit aufgrund des stärkeren nächtlichen Taufalls und geringere bodennahe Einstrahlung wegen der hohen Vegetation. Dieser Trend setzt sich nicht bis zum Mittag fort, sondern es kommt zu

einer stärkeren Erwärmung des Glasenweiher gegenüber dem Quartier Kreuzstein. Eine mögliche Ursache hierfür könnte die stärkere Erwärmung der bodennahen Luft am Quartier Kreuzstein sein. Die lokale statische Stabilität der Bodenschicht am Quartier Kreuzstein ist in der Nacht und den frühen Morgenstunden vermutlich stabil. Infolge der durch die Erwärmung der Oberfläche induzierten konvektiv turbulenten fühlbaren Wärmestroms sind die unteren Luftschichten zunehmend neutral oder labil geschichtet. Dies könnte zur Einkopplung der lokalen bodennahen Luftmasse in das größere Zirkulationssystem führen. Dies hat zu Folge, dass die Einmischung von Luft aus der Mischungsschicht eine langsamere Erwärmung der bodennahen Luft bedingt.

Während den Nachtstunden ist die Lufttemperatur auf beiden Seiten des Dammes identisch (Abb. 4.6). Daraus lässt sich analog zu vorherigen Beobachtungen schließen, dass die Wasserfläche zu klein ist um einen erwärmenden Effekt auszuüben. Die geringe Lufttemperaturdifferenz zwischen der Süd- und Nordseite des Dammes könnte aus der Überströmung des Dammes mit Kaltluft resultieren. Dafür müsste der Kaltluftsee am Quartier Kreuzstein eine Mächtigkeit von etwa 8 m aufweisen. Derartige Mächtigkeiten von mehr als 10 m sind bei langer Wegstrecke oder hohem Gefälle nicht ungewöhnlich (VDI, 2003; Weber und Kuttler, 2004). Dennoch unwahrscheinlich ist, dass sich ein so mächtiger Kaltluftsee am Quartier Kreuzstein ausbildet. Bei einer Überströmung des Dammes müsste sich die Kaltluft auf der Süd-Seite des Dammes auf diese Mächtigkeit anstauen, das sich in einer geringeren Lufttemperatur gegenüber der Nord-Seite des Dammes äußern würde. Sobald der Kaltluftsee die Höhe des Dammes erreicht hat und diesen überströmt wäre eine Reduktion der Lufttemperatur auf der Nord-Seite des Dammes zu erwarten. Diese war nicht zu beobachten. Alternativ ist eine Luftströmung kalter Luft über das Universitätsgelände und entlang des Radweges möglich. Die Windrichtung an der Wetterstation Glasenweiher zeigt eine stets gerichtete Strömung der Luft von SSW. Dies entspricht der Richtung des Fuß- und Radweges (Abb. B.2). Da die aus SSW stammende Luft zuerst an der MWS Glasenweiher gemessen wird und anschließend den Weiher überquert ist der wärmende Einfluss gering (Theeuwes et al., 2013). Zusätzlich ist die Wasserfläche klein, sodass auch auf der anderen Seite des Weiher keine großen Lufttemperaturunterschiede zu erwarten sind. Mithilfe der mobilen Messungen konnten keine Lufttemperaturunterschiede zwischen der Süd und Nordseite des Glasenweiher festgestellt werden (Abb. 4.11).

Die zweite Hypothese dieser Arbeit nimmt an, dass der Damm zwischen dem Quartier Kreuzstein und dem Glasenweiher ein Strömungshindernis für den nächtlichen Kaltluftfluss darstellt und durch ein unterschiedliches Mikroklima beschrieben werden kann. Diese Hypothese kann nicht widerlegt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der kühlende Effekt der Wasserverfügbarkeit und Vegetation zur Verringerung der Lufttemperatur am Mittag und Nachmittag beitragen. Nach Sonnenuntergang ist die Lufttemperatur auf beiden Seiten des Dammes nahezu gleich, das gegen einen mächtig ausgebildeten Kaltluftsee spricht. Stattdessen wird ein Kaltluftstrom entlang des Fuß- und Radweges vermutet, der die Reduktion der Lufttemperatur bedingt. Der erwärmende Effekt kann aufgrund der Position der Mikro-Wetterstation im Zuwindbereich des Weiher nicht erfasst werden.

### 5.3. Großräumige Einordnung in das südliche Stadtgebiet

Das dritte Ziel dieser Arbeit war es, die Ergebnisse am Quartier Kreuzstein und Glasenweiher in die räumliche Lufttemperaturverteilung des Bayreuther Südens einzuordnen und Aussagen über die Bedeutung der Kaltluftschneisen für das Stadtklima und die Ausprägung der urbanen Wärmeinsel zu treffen. Aus der kleinräumigen Temperaturverteilung gehen wärmere und kältere Gebiete hervor, deren Lufttemperatur durch unterschiedliche Faktoren bestimmt werden, die im Folgenden diskutiert werden. Bei der Einordnung der Stationen bezüglich der Jahresmitteltemperatur 2019 wurde die Stationen Kämmerei, Markt, Spinnerei als warm und die Stationen Mistel, ÖBG und Hofgarten als kalt eingestuft (Thomas und Samimi, 2021). Die Lufttemperatur der Station Altstadt ist 2019 im Vergleich zum Gebietsmittel aller Stationen ausgeglichen und repräsentiert sehr gut die mittlere Lufttemperatur im gesamten Stadtmessnetz (Thomas und Samimi, 2021). Dies entspricht den Beobachtungen während den mobilen Messungen im August 2024 (Abb. B.3). Zudem weisen die Stationen standortbedingte Unterschiede in der Beeinflussung von nächtlicher Kaltluft auf. Insbesondere die Stationen ÖBG und Mistel sind stark von nächtlicher Kaltluft vom Sophienberg beziehungsweise Buchstein beeinflusst (Pfister, 2016; Thomas und Samimi, 2021). Dem entgegen sind die Stationen im Stadtzentrum (Kämmerei, Markt) vom Bayreuth nicht von Kaltluftflüssen beeinflusst (Thomas und Samimi, 2021). Durch die Speicherung von Wärme in den Straßen und Fassaden als auch eine erhöhte atmosphärische Gegenstrahlung aufgrund der dicht stehenden Gebäude ist die Lufttemperatur durch das urbane Mikroklima gut zu beschreiben. Diese Stationen gehören während der Messperiode zu den wärmsten Stationen im Stadtmessnetz (Abb. B.3). Die Station Spinnerei weist an Strahlungstagen am Mittag und Nachmittag Lufttemperaturen über dem Stadtmittel auf. Häufig werden an dieser Station die höchsten Lufttemperaturen im Stadtmessnetz erfasst. Am Abend und Nacht entspricht die gemessene Lufttemperatur etwa dem Stadtmittel, da die geringe Bebauungsdichte eine effektive Ausstrahlung ermöglicht. Die beiden Stationen Glasenweiher und Quartier Kreuzstein im Bayreuther Süden, weisen im Vergleich zum Stadtmittel leicht unterdurchschnittliche Lufttemperaturen auf (Abb. B.3). Nur mittags und nachmittags ist die Lufttemperatur am Quartier Kreuzstein leicht gegenüber dem Stadtmittel erhöht (Abb. B.3). Das Stadtmittel  $\langle T_{ref} \rangle$  repräsentiert somit nicht die Lufttemperatur im Stadtzentrum von Bayreuth, sondern vielmehr die Mittellufttemperatur der gesamten Stadt inklusive dem Umland. Dies ist für die weitere Einordnung der mobil gemessenen Lufttemperaturen wichtig. Ist  $\widehat{\Delta T} > 0\text{K}$  so ist die Abweichung gegenüber dem Stadtzentrum (Kämmerei und Markt) fast immer  $< 0\text{K}$ . Die Korrektur der Instationarität der Lufttemperatur berücksichtigt die Lufttemperatur aller Stationen. Da die Stationen im Stadtzentrum weniger stark von der Abkühlung betroffen sind, ist die Abnahme der Lufttemperatur im stadtfernen Bereich größer als im stadtnahen Bereich, so dass die tatsächliche Abkühlungsrate im Bayreuther Süden etwas größer ist als die Korrektur. Systematische Temperaturabweichungen von der tatsächlichen Lufttemperatur sind jedoch aufgrund des wechselnden Fahrtrichtung und der mehrmaligen Befahrung als sehr gering einzustufen.

Die Abweichungen der  $\widehat{\Delta T}$  während der Fahrten sind zu allen drei Tageszeiten reproduzierbar und zeigen einen ähnlichen Verlauf. Dies ist ein Hinweis auf die Unabhängigkeit von den Lufttemperaturen zwischen den Messfahrten. Aufgrund der fehlenden Konvektion in der Nacht ist die räumliche Verteilung der  $\widehat{\Delta T}$  zwischen Abend und Morgen am Ähnlichsten (Abb. 4.11). Am Nachmittag ist die räumliche Verteilung der  $\widehat{\Delta T}$  über die gesamte Messstrecke weitgehend ähnlich, während sie am Abend am Größten ist

(Abb. 4.11). Die räumlichen Unterschiede entlang der Messroute sind am Abend maximal. So ist die Differenz zwischen dem 10- und 90 %-Perzentil von 1,3 K. Diese Ähnlichkeit ist auf unterschiedliche physikalische Prozesse zurückzuführen. Während dichte Baumvegetation tagsüber die Bodenoberfläche beschattet und die Luft durch Transpiration abkühlt, bewirkt sie abends und nachts eine geringere Abkühlung der Luft. Ursache hierfür ist die langwellige Ausstrahlung der Bodenoberfläche an den Baumkronen absorbiert und reemittiert werden. Stattdessen ist die stark negative Abweichung gegenüber  $\widehat{\Delta T}$  im dicht bewaldeten Röhrenseepark durch Advektion von kalter Luft bedingt.

Im Folgenden werden Gebiete mit ähnlichen Eigenschaften zusammengefasst und miteinander verglichen. Dabei werden auch Unterschiede zwischen den Tageszeiten diskutiert.

Anhand der Lufttemperatur kann das Untersuchungsgebiet in folgende Gebiete mit homogenen Eigenschaften kategorisiert werden.

- Uni, ÖBG, QKS
- Glasenweiher, Röhrensee
- Birken
- Röhrenseepark, Schwedenbrücke, Sendelbach
- Ludwig-Thoma-Straße

Die Lufttemperaturdifferenzen zu den untersuchten Tageszeiten sind im ersten Gebiet Uni1, Uni2, ÖBG, QKS gering (Abb. 4.11). Die ähnlichen Standorteigenschaften, wie geringe Bebauungsdichte in diesem Gebiet und den leichten Einfluss von Kaltluft sind für ähnliche Lufttemperaturen verantwortlich. Überraschend ist die geringe Lufttemperaturabweichung am Wegpunkt QKS Süd am Nachmittag (Abb. 4.10). Aufgrund der starken Sonneneinstrahlung und geringer Vegetation ist die Lufttemperatur nur unwesentlich höher als im vegetationsreicheren Gebiet Uni und ÖBG. Zusätzlich könnte die offene Freifläche dazu beitragen die warme Luft abzutransportieren und für eine gute Mischung mit kühlerer Luft sorgen, woraus geringere Lufttemperaturen resultieren. Im Juni sind die thermischen Unterschiede wegen höherer Strahlungsintensität der kurzwelligen Einstrahlung vermutlich höher.

Die Gebiete Glasenweiher und Röhrensee weisen am Nachmittag aufgrund des hohen Vegetationsanteils negative Abweichungen von etwa  $-1$  K gegenüber  $\langle T_{\text{ref}} \rangle$  auf (Abb. 4.10). Diese Gebiete werden von Bäumen beschattet, was dazu führt, dass die Bodenoberfläche weniger kurzwellige Strahlung absorbiert und sich dadurch weniger stark erwärmt. Dies wirkt sich auch auf den Abend aus, an dem die Temperatur noch negativ ist (Abb. 4.9). Diese Gebiete unterscheiden sich von der Umgebung durch große Lufttemperaturdifferenzen von etwa 1 K. Die Gebiete in unmittelbarer Nähe des Glasenweihers und des Röhrensees haben aufgrund der höheren Wärmespeicherkapazität anthropogener Materialien Energie gespeichert, wodurch sie auch abends höhere Oberflächentemperaturen aufweisen und höhere Lufttemperaturen bedingen. Morgens sind diese Gebiete wärmer als das Stadtmittel. Dies ist auf die hohe Gegenstrahlung durch die Vegetation und die damit verbundene geringe Abkühlung zurückzuführen. Zudem wirkt die Wärmespeicherung im Wasser einer Abkühlung entgegen, wodurch ein Abkühlungseffekt nur tagsüber zu erwarten ist (Theeuwes et al., 2013).

Im dichter bebauten Gebieten (Nobelstraße, Zeppelinstraße, Universitätstraße und Hegelstraße) ist zu beobachten, dass die Lufttemperaturen mit zunehmender Versiegelung und Bebauung ansteigen. Besonders ausgeprägt ist dies in den Abendstunden (Abb. 4.9).

Dieses Gebiet ist durch keine großen Lufttemperaturunterschiede gekennzeichnet, dennoch bilden sich zu jeder Tageszeit kleinere Kälteinseln gegenüber dem direkten Umland heraus. Dazu zählt das Gebiet direkt hinter der Universitätsstraße, welches durch einzelne Bäume vor allem am Nachmittag beschattet wird. Dabei ist  $\widehat{\Delta T}$  ähnlich zum stark beschatteten Röhrensee. Am Sportplatz in der Nobelstraße ist ersichtlich, dass Grünflächen die Umgebung durch stärkere Abkühlung in den Abendstunden positiv beeinflussen und die nächtlichen Lufttemperaturen effektiv reduzieren (Abb. 4.9). Die Freifläche weist einen höheren Himmelsichtfaktor als das bebaute Wohngebiet auf. Daraus folgt aufgrund ver-ringerter atmosphärischer Gegenstrahlung und somit höherer Ausstrahlung, eine stärkere Abkühlung.

Dem gegenüber steht das Gebiet der Ludwig-Thoma-Straße mit einem hohen bis sehr hohen Versiegelungsgrad. Ein hohes Verkehrsaufkommen und ein geringer Vegetationsanteil macht diesen zum wärmsten Gebiet entlang der Messroute (Abb. 4.11). Künstliche Oberflächen wie Beton, Asphalt und Stein verstärken diesen Effekt durch ihre vergleichsweise hohe Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit (Zmarsly et al., 2002). Diese Materialien erwärmen sich tagsüber stark und emittieren die gespeicherte Wärme abends und nachts, das zu erhöhten nächtlichen Lufttemperaturen führt. Die geringe Wasserverfügbarkeit und die begrenzte Verdunstungsleistung verstärken diesen Mechanismus. Anthropogene Wärmequellen, insbesondere der Verkehr, tragen zur Wärmebelastung bei (Offerle et al., 2005). Dadurch sind bereits hier die Effekte der UWI ausgeprägt.

Im Gegensatz dazu stehen die Routenabschnitte Röhrenseepark, Schwedenbrücke und Sendelbach, welches sich durch stets negative  $\widehat{\Delta T}$  charakterisiert. Am Nachmittag ist der bereits beschriebene Beschattungseffekt dafür verantwortlich. Zusätzlich führt die Wasserverfügbarkeit aufgrund des durch den Röhrenseepark fließenden und in den Röhrensee mündenden Aubachs beziehungsweise Sendelbachs zur einer Erhöhung des latenten Wärmestrom gegenüber dem fühlbaren Wärmestrom aufgrund von Evapotranspiration. Im Bereich des Röhrenseeparks und des Sendelbachs bilden sich in den Abend- und Nachtstunden durch topographisch bedingte Kaltluftzuflüsse vom Sophienberg Kaltluftseen, welche zu negativen Abweichungen gegenüber dem Stadtmittel führen. Dieser advektiver Transport sorgt für die geringste Lufttemperatur entlang der Route.

Bei dem Vergleich der gemessenen Lufttemperaturen sind größere räumliche Unterschiede festzustellen (Abb. 4.11). Die Lufttemperatur an der Ludwig-Thoma-Straße ist morgens und nachmittags sehr ähnlich zur Innenstadt (Kämmerei, Markt) (Abb. B.3). In den Abendstunden ist die Lufttemperatur in der Innenstadt jedoch um durchschnittlich 0,7 K höher, vermutlich wegen des geringeren Luftaustausches. Es ist somit festzuhalten, dass die Ausprägung der städtischen Wärmeinsel im Untersuchungsgebiet entlang der Route festzustellen ist.

In dieser Arbeit wurde die Hypothese aufgestellt, dass der gesamte Bayreuther Süden vom Kaltluftabstrom des Sophienbergs profitiert und die räumliche Verteilung Lufttemperatur ausgeglichen ist. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit kann diese Hypothese widerlegt werden. Am Nachmittag ist die Lufttemperatur in Gebieten mit erhöhtem Vegetationsanteil geringer als in der direkten Umgebung. Am Abend sind Gebiete, die vom Kaltluftzustrom beeinflusst sind deutlich kälter als die Umgebung. Zudem ist der Zustrom von Kaltluft aufgrund der Topographie und Strömungshindernissen begrenzt. Die Unterschiede gleichen sich bis zum Morgen aus, wodurch der Überwärmungseffekt dicht bebauter Gebiete geringer wird. Dennoch ist eine direkte Beeinflussung durch die Kaltluft im gesamten Bayreuther Süden nicht festzustellen.

## 6. Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurde die Wirkung von Strömungshindernissen auf nächtliche Kaltluftabflüsse anhand eines Fallbeispiels untersucht, um ein besseres Verständnis des Abkühlungspotentials in Städten zu erlangen. Dies schafft eine zuverlässige Datengrundlage für Prozessverständnis und eine nachhaltige Stadtplanung. Zur Quantifizierung des Einflusses von Strömungshindernissen auf die nächtlichen Kaltluftflüsse wurden sowohl stationäre als auch mobile meteorologische Messungen in Bayreuth durchgeführt.

Es wurde festgestellt, dass Bauwerke und Dämme den Kaltluftabfluss beeinträchtigen. Im Quartier Kreuzstein ist der Kaltluftsee nur gering ausgeprägt. Der Damm zwischen dem Quartier Kreuzstein und dem Glasenweiher mit einer Höhe von 8-10 Meter nicht überströmt werden kann. Durch den Einsatz von stationären Mikro-Wetterstationen konnte keine Differenz in der Lufttemperatur vor und hinter dem untersuchten Damm während Kaltluftnächten festgestellt werden. Dies deutet auf eine lokale Kaltluftentstehung am Weiher bzw. den umliegenden Grünflächen oder eine weitere Kaltluftabflussbahn hin. Die spezifische Luftfeuchte unterscheidet sich jedoch in Kaltluftnächten bei ungesättigten Verhältnissen gegenüber Wasserdampf stark. Die spezifische Feuchte am Glasenweiher ist stets höher, das auf ein ausgeprägtes, durch den Damm räumlich begrenztes Mikroklima hindeutet. Flächen mit hohem Vegetationsanteil wirken in den Nachmittags kühlend auf die unmittelbare Umgebung, aber auch nachts kühlend, da weniger Energie im Boden gespeichert wurde. Diese Arbeit zeigt, dass Kaltluftabflüsse einen signifikanten Einfluss auf die bodennahen Lufttemperaturen am Stadtrand einer mittelgroßen Stadt haben. Kaltluftströmungen können in dicht bebaute Gebiete aufgrund des geringeren Gefälles nur schwer eindringen. Bereits kleine Strömungshindernisse entlang der Fließwege der Kaltluft können zu einer Begrenzung des Kaltluftabflusses führen. Dies führt zu unter anderem zu einer geringeren nächtlichen Abnahme der Lufttemperatur in dichter bebaute Gebieten. Für eine nachhaltige Stadtentwicklung ist es daher wichtig, sowohl Kaltluftschneisen zu erhalten als auch die innerstädtische Vegetation zu fördern.

Es wäre interessant, die Auswirkungen einer Dammöffnung genauer zu untersuchen. Die geplante Öffnung des Damms könnte dazu beitragen, die mittags und nachmittags kühlende Wirkung der Vegetation am Glasenweiher auf das Quartier Kreuzstein auszudehnen. Nach Abschluss der Baumaßnahmen könnte ein hoher Vegetationsanteil im Quartier Kreuzstein zur Reduzierung der Lufttemperatur beitragen. Um den Kaltluftzustrom weiterhin zu ermöglichen, sollte der Bereich zwischen Sendelbach und Glasenweiher sowie entlang der Nürnberger Straße von dichter Bebauung freigehalten werden.



# Literaturverzeichnis

- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.*, *23*(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Baddeley, G. (2001). *GPS - NMEA Sentence Information*. Verfügbar 7. September 2023 unter <http://aprs.gids.nl/nmea/>
- Barnaba, L. (2020). *Ellipse Series - Hardware Manual*.
- Barr, S., & Orgill, M. M. (1989). Influence of External Meteorology on Nocturnal Valley Drainage Winds. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *28*(6), 497–517. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1989\)028<0497:IOEMON>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1989)028<0497:IOEMON>2.0.CO;2)
- 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>
- Burt, S., & de Podesta, M. (2020). Response times of meteorological air temperature sensors. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *146*(731), 2789–2800. <https://doi.org/10.1002/qj.3817>
- De Podesta, M., Bell, S., & Underwood, R. (2018). Air temperature sensors: Dependence of radiative errors on sensor diameter in precision metrology and meteorology. *Metrologia*, *55*(2), 229–244. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aaaa52>
- de Lange, N. (2020). *Geoinformatik in Theorie und Praxis: Grundlagen von Geoinformationssystemen, Fernerkundung und digitaler Bildverarbeitung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60709-1>
- Deutscher Wetterdienst. (2023). *promet, meteorologische Fortbildung, Heft 106: Stadtklima im Wandel*. [https://doi.org/10.5676/DWD\\_PUB/PROMET\\_106](https://doi.org/10.5676/DWD_PUB/PROMET_106)
- Foken, T. (2007). Das Klima von Bayreuth: Status quo und Aufgaben für die Stadtplanung. *STANDORT-Z Angew Geogr*, *31*(3), 150–152. <https://doi.org/10.1007/s00548-007-0045-x>
- Foken, T., & Nappo, C. J. (2008). *Micrometeorology*. Springer.
- für Statistik, B. L. (2023, 10. Mai). *Bayerisches Landesamt für Statistik - GENESIS-Online*. Verfügbar 10. Mai 2023 unter <https://www.statistikdaten.bayern.de/genesis/online/>
- Gabriel, K. M., & Endlicher, W. R. (2011). Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. *Environmental Pollution*, *159*(8-9), 2044–2050. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.016>
- Geiss, A., & Mahrt, L. (2015). Decomposition of Spatial Structure of Nocturnal Flow over Gentle Terrain. *Boundary-Layer Meteorol*, *156*(3), 337–347. <https://doi.org/10.1007/s10546-015-0043-7>
- Gustavsson, T., Karlsson, M., Bogren, J., & Lindqvist, S. (1998). Development of Temperature Patterns during Clear Nights. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *37*(6), 559–571. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1998\)037<0559:DOTPDC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1998)037<0559:DOTPDC>2.0.CO;2)
- Häckel, H. (2021). *Meteorologie* (9., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage). Verlag Eugen Ulmer.

- Haiden, T., & Whiteman, C. D. (2005). Katabatic Flow Mechanisms on a Low-Angle Slope. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 44(1), 113–126. <https://doi.org/10.1175/JAM-2182.1>
- Harrison, R. G. (2014). *Meteorological Instruments and Measurements*. John Wiley & Sons Inc.
- He, C., Kim, H., Hashizume, M., Lee, W., Honda, Y., Kim, S. E., Kinney, P. L., Schneider, A., Zhang, Y., Zhu, Y., Zhou, L., Chen, R., & Kan, H. (2022). The effects of night-time warming on mortality burden under future climate change scenarios: A modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6(8), e648–e657. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00139-5)
- Huang, W. T. K., Masselot, P., Bou-Zeid, E., Fatichi, S., Paschalis, A., Sun, T., Gasparrini, A., & Manoli, G. (2023). Economic valuation of temperature-related mortality attributed to urban heat islands in European cities. *Nat Commun*, 14(1), 7438. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43135-z>
- Hupfer, P., Kuttler, W., Chmielewski, F.-M., & Pethe, H. (Hrsg.). (2005). *Witterung und Klima*. Vieweg+Teubner Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-96749-7>
- IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]* (Nr. 6). Geneva, Switzerland, (in press). Verfügbar 23. Mai 2023 unter [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_LongerReport.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf)
- Irrgang, K. (2023). *Altes und Neues zu thermoelektrischen Effekten und Thermoelementen*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-66419-3>
- Konarska, J., Lindberg, F., Larsson, A., Thorsson, S., & Holmer, B. (2014). Transmissivity of solar radiation through crowns of single urban trees—application for outdoor thermal comfort modelling. *Theor Appl Climatol*, 117(3-4), 363–376. <https://doi.org/10.1007/s00704-013-1000-3>
- Kovats, R. S., & Hajat, S. (2008). Heat Stress and Public Health: A Critical Review. *Annual Review of Public Health*, 29(1), 41–55. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843>
- METER. (2019). 20623\_EM60\_Manual\_Web.pdf. *METER Group*. Verfügbar 25. September 2023 unter [http://library.metergroup.com/Manuals/20623\\_EM60\\_Manual\\_Web.pdf](http://library.metergroup.com/Manuals/20623_EM60_Manual_Web.pdf)
- METER. (2023, März). ATMOS41\_Manual. *METER Group*.
- Nadeau, D. F., Pardyjak, E. R., Higgins, C. W., Huwald, H., & Parlange, M. B. (2013). Flow during the evening transition over steep Alpine slopes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 139(672), 607–624. <https://doi.org/10.1002/qj.1985>
- Nkemdirim, L. C. (1980). Cold air drainage and temperature fields in an urban environment: A case study of topographical influence on climate. *Atmospheric Environment (1967)*, 14(3), 375–381. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(80\)90071-2](https://doi.org/10.1016/0004-6981(80)90071-2)
- Offerle, B., Grimmond, C. S. B., & Fortuniak, K. (2005). Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology*, 25(10), 1405–1419. <https://doi.org/10.1002/joc.1198>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017, 14. September). *Urban Climates* (1. Aufl.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Oke, T. R. (1969). Towards a More Rational Understanding of the Urban Heat Island. *McGill Climatological Bulletin*, 03, 20.

- Oke, T. R. (1973). CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND. *07*, 769–779.
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, *14*(4), 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quart J Royal Meteor Soc*, *108*(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (1995). The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. *NATO ASI Series e Applied Sciences-Advanced Study Institute*, *277*, 81–108. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-017-3686-2_5)
- Oppold, J. (2020, 7. September). *Stadt entwickelt ehemaliges Zapf-Areal neu*. Bayreuth.de. Verfügbar 2. Mai 2023 unter <https://www.bayreuth.de/stadt-entwickelt-ehemaliges-zapf-areal-neu/>
- Pataki, D. E., McCarthy, H. R., Litvak, E., & Pincetl, S. (2011). Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, *21*(3), 661–677. <https://doi.org/10.1890/09-1717.1>
- Peng, R. D., Bobb, J. F., Tebaldi, C., McDaniel, L., Bell, M. L., & Dominici, F. (2011). Toward a Quantitative Estimate of Future Heat Wave Mortality under Global Climate Change. *Environ Health Perspect*, *119*(5), 701–706. <https://doi.org/10.1289/ehp.1002430>
- Pfister, L. (2016). *Novel insights into the dynamics of cold-air drainage and pooling on a gentle slope from fiber-optic distributed temperature sensing*.
- Pisello, A. L., Pignatta, G., Castaldo, V., & Cotana, F. (2014). Experimental Analysis of Natural Gravel Covering as Cool Roof and Cool Pavement.
- Rochette Cordeiro, A. M., Ornelas, A., & Silva, D. D. (2023). The importance of topography in the formation of cold-air pooling in urban spaces. The example of the city of Coimbra (Portugal). *Theor Appl Climatol*, *152*(1-2), 227–239. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04401-8>
- Royé, D. (2017). The effects of hot nights on mortality in Barcelona, Spain. *Int J Biometeorol*, *61*(12), 2127–2140. <https://doi.org/10.1007/s00484-017-1416-z>
- Sachsen, T., Ketzler, G., & Knörchen, A. (2014). Past and future evolution of nighttime urban cooling by suburban cold air drainage in Aachen. Verfügbar 12. Mai 2023 unter <https://doi.org/10.12854/erde-144-19>
- Schönwiese, C.-D. (2020). *Klimatologie: Grundlagen, Entwicklungen und Perspektiven* (5., überarbeitete und aktualisierte Auflage). Verlag Eugen Ulmer.
- Spies, I. (2019, Juli). *Urban climate – just warm streets and cool parks?*
- 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>
- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *Intl Journal of Climatology*, *31*(2), 200–217. <https://doi.org/10.1002/joc.2141>
- Theeuwes, N. E., Solcerová, A., & Steeneveld, G. J. (2013). Modeling the influence of open water surfaces on the summertime temperature and thermal comfort in the city. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(16), 8881–8896. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50704>
- Thomas, C., & Samimi, C. (2021, 20. August). Schlussbericht Zum Forschungsvorhaben Minderung Städtischer Klima- Und OzonRisiken (MiSKOR).
- Tonkin, R. (1986). *Practical Meteorology*. Distributed by Friends of the McCreary Centre Society.

- Tschuschke, A. (2019, 12. September). *Einfluss von Topografie, Fließgewässern und Bebauung auf die Temperaturverteilung und Luftströme im Bayreuther Becken - Analyse von fahrradgetragenen Messungen und Stationsdaten des MiSKOR-Messnetzes im Sommer 2019*.
- VDI. (2003, Oktober). VDI 3787 Umweltmeteorologie Lokale Kaltluft.
- Weber, S., & Kuttler, W. (2004). Cold-Air Ventilation and the Nocturnal Boundary Layer Structure above an Urban Ballast Facet. *Meteorologische Zeitschrift*, *13*, 413–420. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2004/0013-0413>
- Wicki, A., Parlow, E., & Feigenwinter, C. (2018). Evaluation and Modeling of Urban Heat Island Intensity in Basel, Switzerland. *Climate*, *6*(3), 55. <https://doi.org/10.3390/cli6030055>
- Wildmann, N., Mauz, M., & Bange, J. (2013). Two fast temperature sensors for probing of the atmospheric boundary layer using small remotely piloted aircraft (RPA). *Atmos. Meas. Tech.*, *6*(8), 2101–2113. <https://doi.org/10.5194/amt-6-2101-2013>
- Yao, L., Sailor, D. J., Yang, X., Xu, G., & Zhao, L. (2023). Are Water Bodies Effective for Urban Heat Mitigation? Evidence from Field Studies of Urban Lakes in Two Humid Subtropical Cities. *Building and Environment*, *245*, 110860. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110860>
- Zmarsly, E., Kuttler, W., & Pethe, H. (2002). *Meteorologisch-klimatologisches Grundwissen: eine Einführung mit Übungen, Aufgaben und Lösungen*. Ulmer.

# Anhang

## A. Sensorvergleich



Abbildung A.1.: Aufbau des Instrumentenvergleichs im Juni 2023 der Mikrowetterstation Quartier Kreuzstein (Rechts) und einer weiteren Mikrowetterstationen (Links). Aufgrund von dem geringen Abstand zwischen den beiden Mikrowetterstationen konnte eine gegenseitige Beeinflussung nicht ausgeschlossen werden. Blickrichtung nach Süden.



Abbildung A.2.: Aufbau des Instrumentenvergleichs im Juni 2023 der Mikrowetterstation Quartier Kreuzstein (Mitte) und zwei weiteren Mikrowetterstationen (rechts, links). Blickrichtung nach NNO.

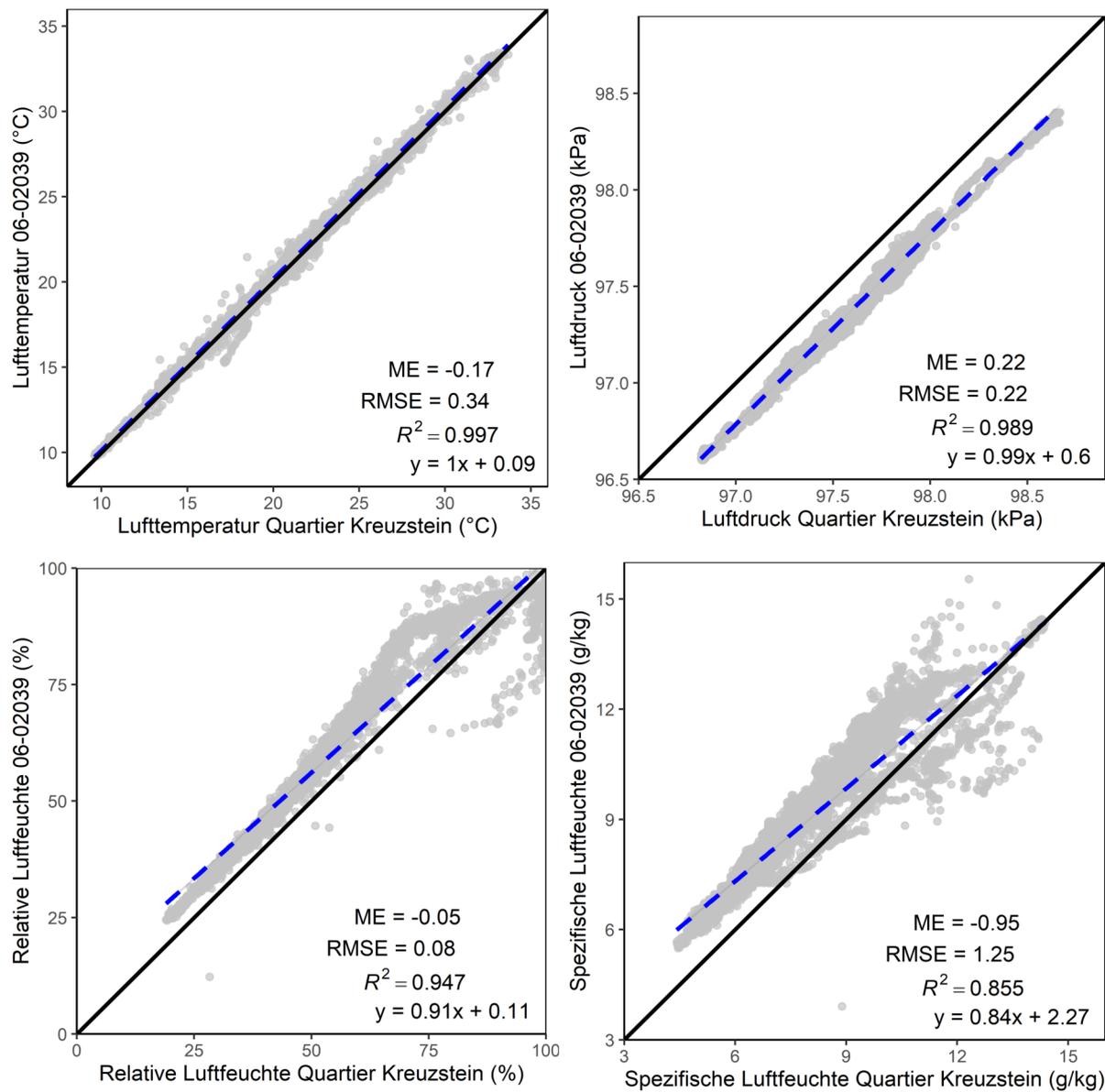


Abbildung A.3.: Gegenüberstellung der Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte beider Stationen während der gesamten Messperiode der Vergleichsmessung, vom 16.06.2023 bis zum 04.07.2023 ( $N=5150$ ). Spätere Glasenweiher Station mit ID 06-02039, und Station Quartier Kreuzstein 06-02040. Zusätzlich werden die statistischen Kennwerte mittlerer Fehler (ME), Wurzel-Mittelwert-Fehler (RSME), das Bestimmtheitsmaß und die Geradengleichung der Regressionsgeraden angegeben.

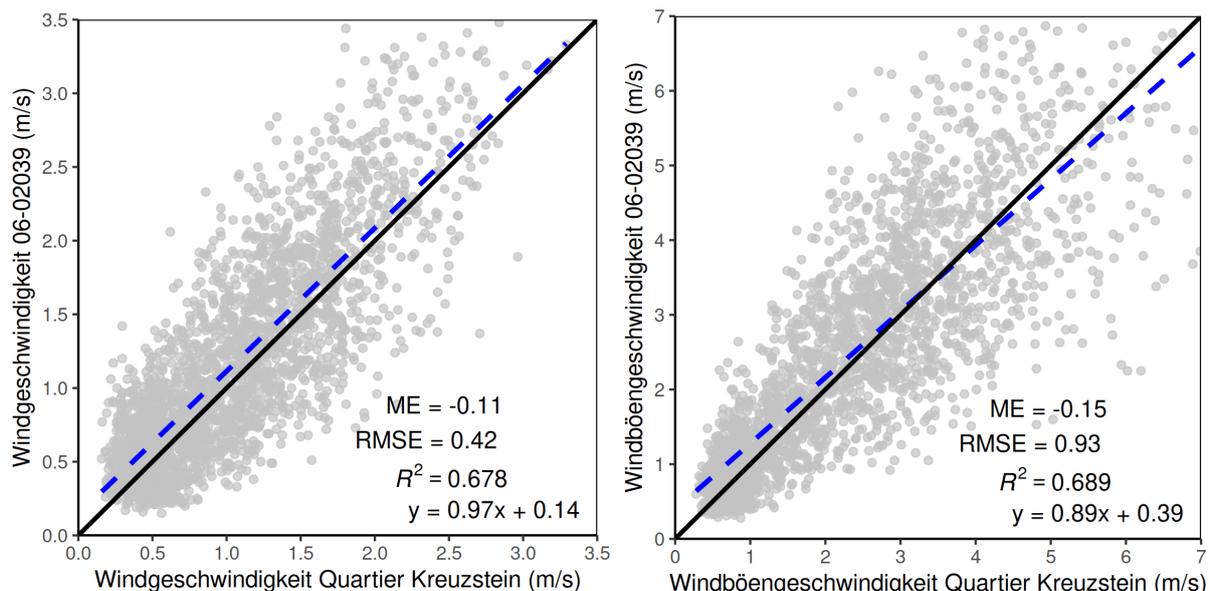


Abbildung A.4.: Gegenüberstellung der Wind und Windböengeschwindigkeit der beiden Stationen während 25.06.2023 und dem 04.07.2023 (N=2422). Spätere Glasenweiher Station mit ID 06-02039, und Station Quartier Kreuzstein 06-02040. Zusätzlich werden die statistischen Kennwerte mittlerer Fehler (ME), Wurzel-Mittelwert-Fehler (RSME), das Bestimmtheitsmaß und die Geradengleichung der Regressionsgeraden angegeben.

### Vergleich Windrichtung (26.06 - 04.07)

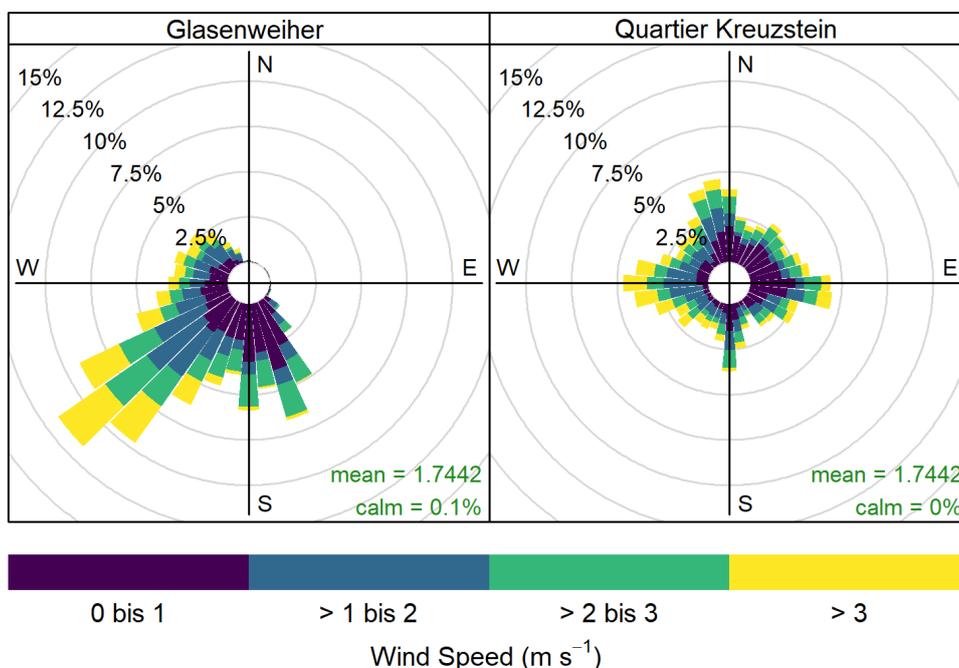


Abbildung A.5.: Gegenüberstellung der beiden Stationen während 25.06.2023 und dem 04.07.2023 (N=2422). Spätere Glasenweiher Station mit ID 06-02039, und Station Quartier Kreuzstein 06-02040

## B. Zusätzliche Tabellen und Abbildungen

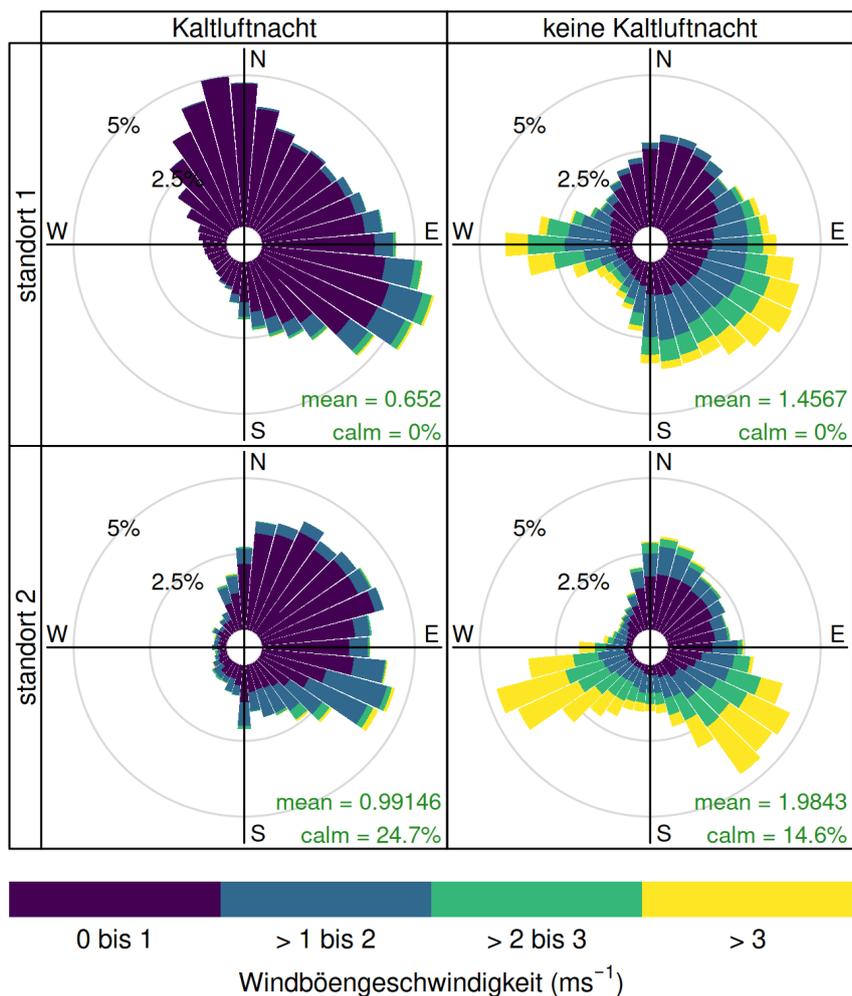


Abbildung B.1.: Windrose mit Windrichtung und Windböengeschwindigkeit der Mikro-Wetterstation Quartier Kreuzstein zwischen dem 01.09.2021 und dem 16.10.2023. Die Mikro-Wetterstation wurde am 09.12.2022 von Standort 1 an Standort 2 versetzt. Zeitintervalle in denen die Station aufgrund von Bauarbeiten abgedeckt war oder offensichtliche Fehlfunktion der Sensoren wurden entfernt. Unterscheidung von Kaltluftnächten ( $N_{\text{Standort 1}} = 21690$ ,  $N_{\text{Standort 2}} = 6073$ ) und keinen Kaltluftnächten ( $N_{\text{Standort 1}} = 44147$ ,  $N_{\text{Standort 2}} = 22517$ ) auf Basis von 5-Minuten-Intervallen.

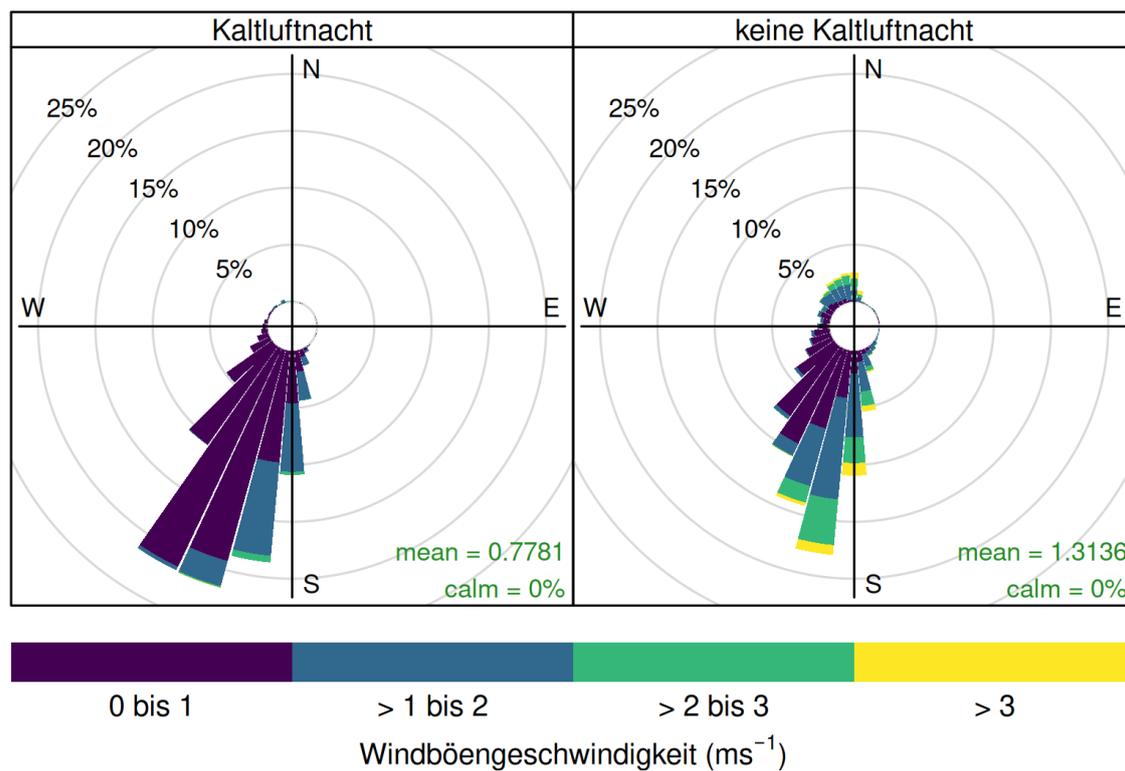


Abbildung B.2.: Windrose mit Windrichtung und Windböengeschwindigkeit der Mikro-Wetterstation Glasenweiher zwischen dem 04.07 und dem 16.10.2023. Unterscheidung Kaltluftnächten (N = 6654) und keinen Kaltluftnächten (N = 6287) auf Basis von 5-Minuten-Intervallen.

Tabelle B.1.: Übersicht der Messfahrten mit Datum, Fahrtbeginn, Ende der Fahrt, Fahrtrichtung, Verwendung der Fahrt in der Auswertung und sonstige Bemerkungen. Die Daten bis auf 'verwendet' stammen aus dem Fahrtenprotokoll, das zu Beginn und Ende jeder Fahrt ausgefüllt wurde. Beginn und Ende beziehen sich auf den ungefähren Start des Messsystems und nicht auf den tatsächlichen Beginn der Messung.

Datum	Beginn	Ende	Richtung	Verwendet	Bemerkungen
9.8.2023	20:45	21:42	QKS -> RS	x	Lüfterkabel defekt - Noch vor der Fahrt repariert, Thermocouple klappert im Strahlungsschutz
10.08.2023	5:35	6:20	QKS -> RS	x	Sonnenaufgang etwa bei Röhrensee
10.08.2023	17:35	18:23	QKS -> RS	x	
10.08.2023	20:41	21:27	QKS -> RS	x	
10.08.2023	21:33	22:22	RS -> QKS	x	
11.08.2023	5:10	5:57	RS -> QKS	x	
11.08.2023	5:59	6:45	QKS -> RS	x	Sonne aufgegangen, trifft ab Röhrensee auf Straße, Thermocouple nach oben gerutscht
11.08.2023	17:05	17:52	RS -> QKS	x	
11.08.2023	20:52	21:45	RS -> QKS	x	Um 21:15 am Glasenweiher Koordinatendrift festgestellt, eingetreten nach etwa 10 Minuten, Neustart des Messsystems um 21:15. Schrauben CR6 locker -> nachgezogen
11.08.2023	22:05	22:37	RS -> QKS	x	Wiederholungsfahrt von Fahrt 9 bis Glasenweiher aufgrund der Koordinatendrift
12.08.2023	5:20	6:10	QKS -> RS	x	
12.08.2023	15:10	15:51	QKS -> RS	x	T-Stück (Strahlungsschutz leicht verdreht (15°))
13.08.2023	5:30	6:20	QKS -> RS	-	hohe gefühlte Luftfeuchte (Sturm-)Schäden im RS-Park
13.08.2023	21:08	22:10	QKS -> RS	x	späterer Fahrtbeginn, da erst jetzt Wolkenauflösung (Postfrontale Aufheiterung nach Niederschlag), dichter Nebel bei Tappert (etwas am Röhrensee)
12.10.2023	6:30	7:28	QKS -> RS	-	Koordinatendrift
13.10.2023	18:40	19:47	RS -> QKS	-	Koordinatendrift

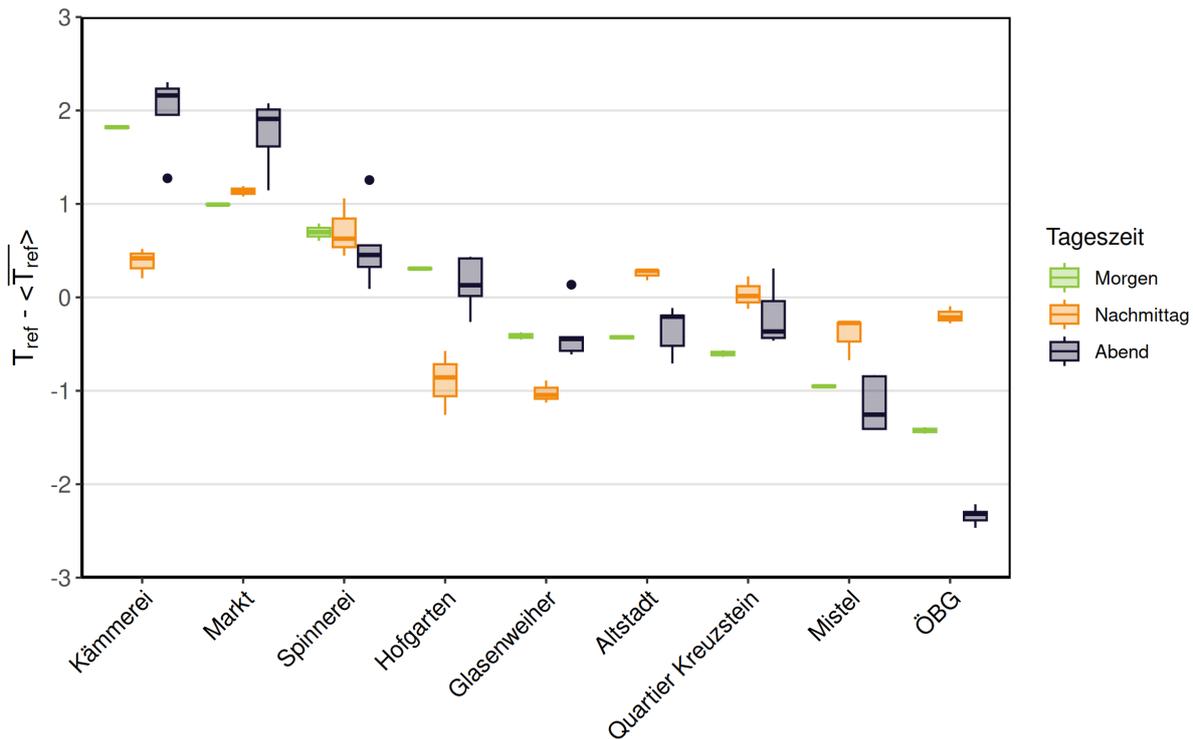


Abbildung B.3.: Abweichung der Lufttemperatur an verschiedenen Mikro-Wetterstationen im Stadtmessnetz am Morgen ( $N = 4$ ), Nachmittag ( $N = 3$ ) und Abend ( $N = 5$ ) im Bezug auf zum Stadtmittel ( $\langle T_{ref} \rangle$ ). Die Reihenfolge der MWS wird durch die mittlere Lufttemperatur am Morgen beschrieben.

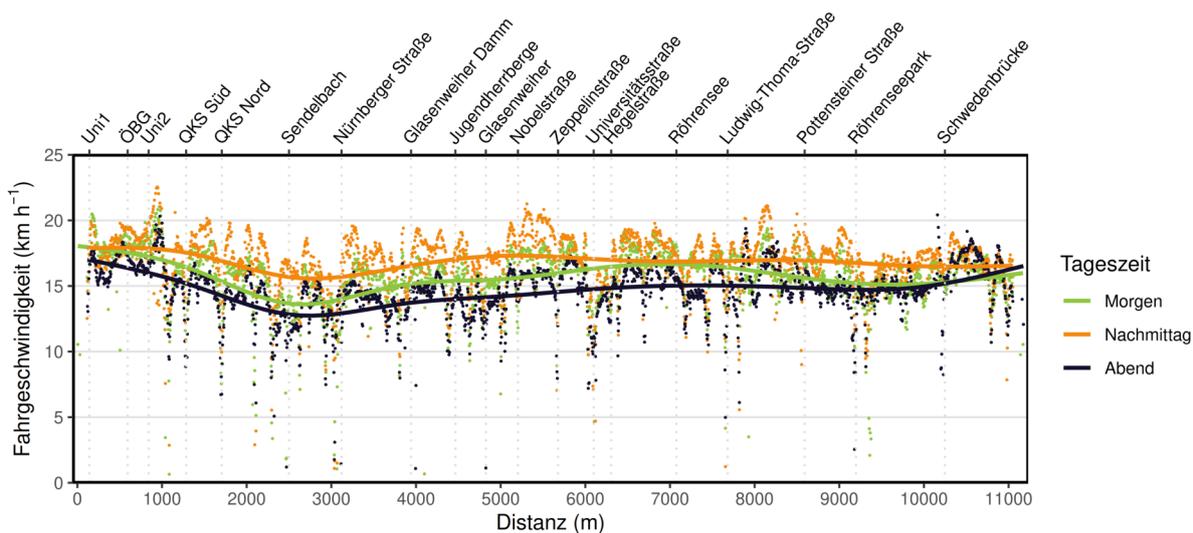


Abbildung B.4.: Mittlere Fahrtgeschwindigkeit während der Messfahrten am Morgen ( $N = 4$ ), Nachmittag ( $N = 3$ ) und Abend ( $N = 5$ ) in Abhängigkeit von der Distanz entlang der Messroute in einem Streckenabschnitt von 5 Metern sowie die mittels der Glättungsfunktion GAM gemittelten Werte.

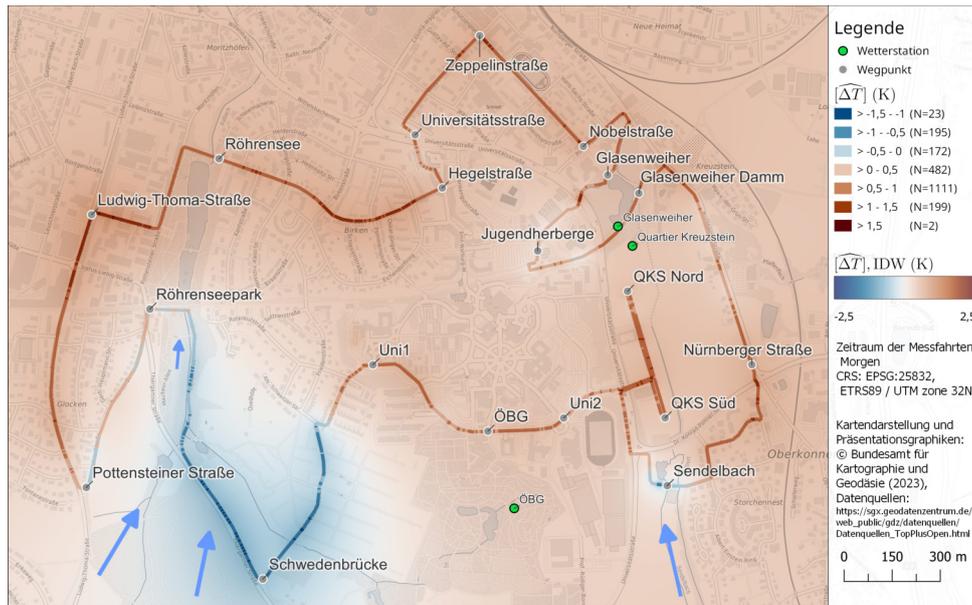


Abbildung B.5.: Räumliche Darstellung von dem  $\Delta T$  aller Morgenfahrten bei einem Mittelungsintervall von 5 m entlang der Messroute und über Inverse Distance Weighting interpolierte Bereiche. Mit blauen Pfeilen sind vermutete Fließwege der Kaltluft eingezeichnet. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt.

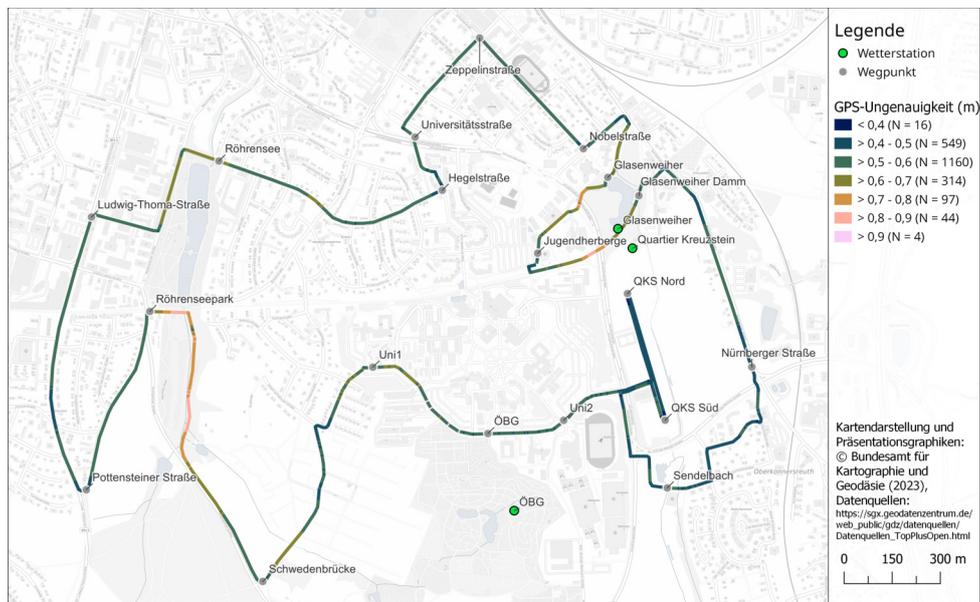


Abbildung B.6.: Räumliche Darstellung der GNSS Genauigkeit entlang der Messroute Morgen. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt.

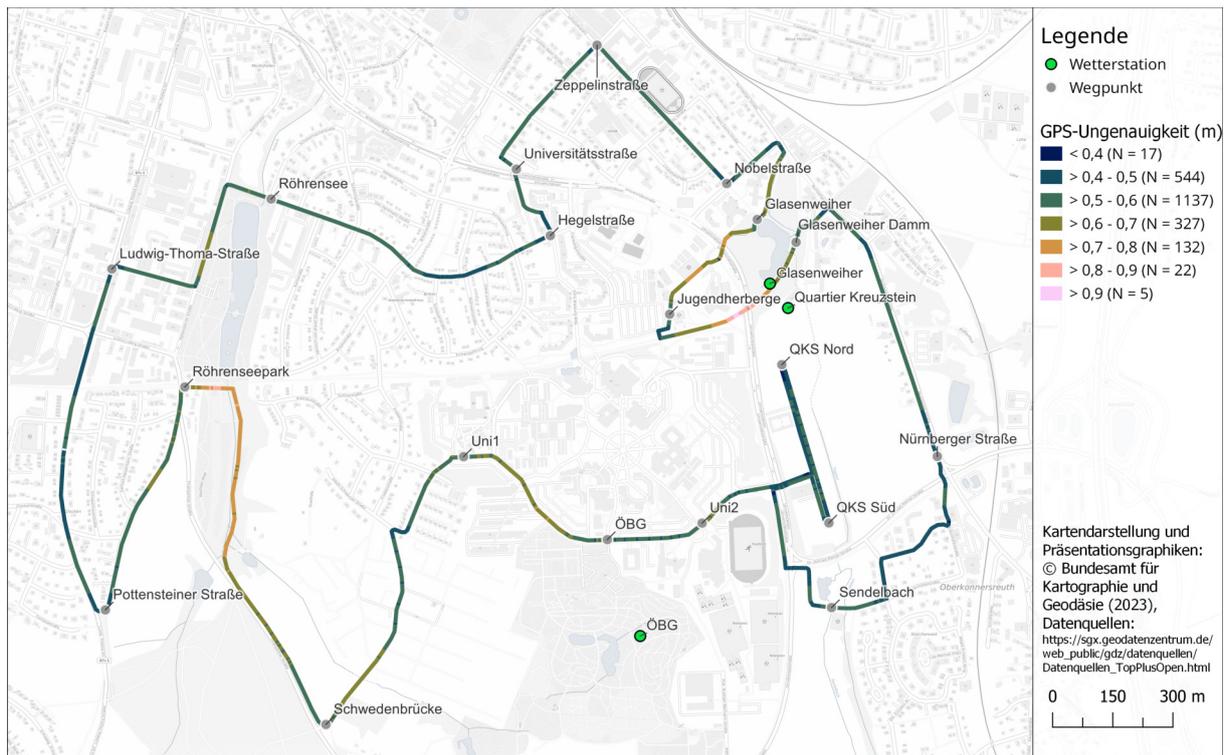


Abbildung B.7.: Räumliche Darstellung der GNSS Genauigkeit entlang der Messroute Nachmittag. Zusätzlich sind Wegpunkte am Beginn von Streckenabschnitten dargestellt (gelesen bei einer Route gegen Uhrzeigersinn). Durch grüne Punkte, sind Mikro-Wetterstationen entlang der Route und die Wetterstation im ÖBG dargestellt.



# Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst habe, dass ich sie zuvor an keiner anderen Hochschule und in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung eingereicht habe und dass ich keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Bayreuth, 29.02.2024  
Ort, Datum

*O. Schappacher*  
Unterschrift

