UNIVERSITÄT BAYREUTH

BACHELORARBEIT

B.Sc. Geoökologie, Mikrometeorologie

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

MiSKOR - Minderung Städtischer Klima- und OzonRisiken

Andreas Tschuschke, Matrikelnummer: 1531400

betreut von

Prof. Dr. Dipl.-Geoök. Christoph THOMAS Dr. habil. Johannes LÜERS Mikrometeorologie

9. Dezember 2019

Erklärung des Verfassers

Hiermit erkläre ich, Andreas Tschuschke, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel "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" selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Bachelorarbeit, die anderen Quellen im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen wurden, sind durch Angabe der Herkunft kenntlich gemacht. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen sowie für Quellen aus dem Internet. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Andreas Tschuschke, Datum

Zusammenfassung

Die anthropogen verursachte Klimaerwärmung verursacht einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur. Dieses Signal ist regional unterschiedlich, beispielsweise ist es aufgrund der urbanen Wärmeinsel in Städten stärker ausgeprägt. Um diesen Effekt zu verringern ist ein tiefgehendes Verständnis des Stadtklimas notwendig, wozu diese Arbeit beitragen soll. Ziel war es, die räumliche Temperaturverteilung und Kaltluftströmungen in Bayreuth (ca. 75000 EW) mithilfe stationärer und fahrradgestützter Messungen in Abhängigkeit von Topografie, Fließgewässern und Bebauung zu untersuchen. Es wurde davon ausgegangen, das die Temperatur mit der Versiegelung zunimmt. Kaltluftströmungen wurden entlang von Flüssen vermutet, wobei Brücken keine maßgeblichen Strömungshindernisse sein sollten.

Um die Hypothesen zu prüfen wurden mobile fahrradgestützte Temperaturmessungen vom 09. bis 11.08. und 21. bis 26.08.2019 bei windschwachen Wetterlagen und möglichst klarem Himmel durchgeführt. Als Messgeräte dienten Thermoelemente, die in einen selbst gebauten aktiv ventilierten Strahlungsschutz eingebaut und am Fahrrad montiert wurden, eine Zeitkonstante von 1,7 s erreichten und die Temperatur sekündlich aufzeichneten. Die Aufzeichnung der Position erfolgte sekündlich mit handelsüblichen GPS-Geräten. Messzeiten waren am späten Nachmittag, am Abend nach Sonnenuntergang und am Morgen vor Sonnenaufgang. Zu jeder Messzeit wurde die 15 km lange Route zweimal in einem Zeitabstand von ca. 15 min im Uhrzeigersinn befahren, Start- und Endpunkt waren dabei die Universität Bayreuth. Insgesamt wurden 41 Fahrten durchgeführt.

Die räumlichen Temperaturabweichungen sind reproduzierbar und über den Messzeitraum unabhängig von der absoluten Temperatur. Die höchsten Temperaturdifferenzen traten am Abend mit durchschnittlich 4,96 K auf. Die Temperaturen steigen mit dem Versiegelungsgrad an, so bilden die Innenstadt und ein außerhalb liegendes Gewerbegebiet die zentralen Wärmeinseln. Östlich der A9 gibt es Inversionseffekte bzw. Durchmischungseffekte der Stadtatmosphäre, weshalb dort offene Flächen relativ warm sind. Die Kaltluftströmungen entlang der Fließgewässer konnten bestätigt werden, sie weisen eine geringe Mächtigkeit auf und haben kaum Einfluss auf die Umgebung, bilden aber wertvolle Lokalklimate. Brücken sind unerwarteterweise maßgebliche Strömungshindernisse. In der Wilhelminenaue und östlich der A9 bilden sich Kaltluftseen, die aber durch ein Wehr und die A9 von der Stadt abgeschottet sind. Dort entsteht auch Kaltluft, ebenso am Eichelberg. Ob die A9 auf ihrer ganzen Länge nicht von Kaltluft überwunden werden kann, bleibt unklar. Kleine Wege haben bereits einen Einfluss auf das lokale Strömungsregime und können Kaltluftströmungen leiten. Schon kleine begrünte oder beschattete Flächen haben einen merklichen Einfluss auf die lokale Temperatur, Lokalklimate sind stark ausgeprägt. Am Tag wirken Flächen mit hoher Vegetation kühlend, in der Nacht nur innerhalb stark versiegelter Gebiete. Locker bebaute Gebiete können über Nacht gut auskühlen. Es sei angemerkt, dass die kühlende Wirkung von Vegetation durch Transpiration nur bei ausreichend vorhandenem Wasser möglich ist. Es empfiehlt sich begrünte Flächen zu erhalten und neu zu schaffen, Flussläufe und Straßen sollten möglichst unbebaut bleiben.

Inhaltsverzeichnis

Er	Erklärung des Verfassers i								
Ζι	ısamı	nenfas	sung	ii					
In	haltsv	verzeicl	ınis	iv					
Ał	obildu	ingsver	zeichnis	vi					
Ta	belle	nverzei	chnis	viii					
Da	atent	räger		ix					
1.	Einl	eitung		1					
	1.1.	Motiva	ation	1					
	1.2.	Theore	etische Grundlagen	2					
	1.3.	Zielset	zung	6					
2.	Mat	erial u	nd Methoden	7					
	2.1.	Standorte der neuen Mess stationen und Verlauf der Messroute $\ .\ .\ .\ .$							
	2.2.	Messg	eräteeauswahl	9					
	2.3.	Tempe	eratursensor	14					
	2.4.	Messfa	hrt	15					
	2.5.	Sensor	envergleich	15					
	2.6.	Bearb	eitung der Rohdaten	18					
		2.6.1.	Zusammenführen von Temperatur- und GPS-Daten $\ .\ .\ .\ .$.	18					
		2.6.2.	Löschen fehlerhafter Daten	18					
		2.6.3.	Kompensation der Instationarität	18					
		2.6.4.	Inverse-Distance-Weighting	19					
		2.6.5.	Potentielle Temperatur	20					
		2.6.6.	Wavelet-Transformation	22					
	2.7.	Darste	llung der Ergebnisse	23					
2.8. Weiterer Ausschluss von Daten									

3.	Erge	bnisse und Diskussion	27			
	3.1.	Allgemein	27			
	3.2.	Topografie und Fließgewässer $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	29			
	3.3.	Bebauung	32			
	3.4.	Temperatur differenzen zwischen den Messfahrer n $\ \ \ldots \ \ldots \ \ldots \ \ldots$	33			
	3.5.	Variabilität der Temperaturabweichungen und -differenzen $\ . \ . \ . \ .$	36			
	3.6.	Vergleich mit anderen Studien	37			
4.	Schl	ussfolgerungen	39			
Da	nk		41			
Lit	-iteratur 4					
Α.	A. Anhang 46					

Abbildungsverzeichnis

1.1.	Schematische Darstellung der Einflussgrößen des urbanen Wärmehaushalts	4
1.2.	Veränderung der PBL durch eine Stadt	5
2.1.	Karte der Stadt Bayreuth mit Topografie, Strömungsverhältnissen und	
	Messroute	8
2.2.	Montierung der drei neu aufgestellten Stationen	9
2.3.	Aktiv ventilierter Strahlungsschutz und Montierung am Messfahrrad	10
2.4.	Messvorrichtung zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Strahlungs-	
	schutz	10
2.5.	Strömungsgeschwindigkeiten im Strahlungsschutz bei verschiedenen Be-	
	triebsspannungen	11
2.6.	Aufbau des Experiments zur Bestimmung der Zeitkonstante	12
2.7.	Messergebnisse der Zeitkonstanten der Thermoelemente im Strahlungsschutz	13
2.8.	Schaltbild für die Temperaturmessung mit einem Thermoelement	15
2.9.	Diagramm zum Sensorenvergleich zur Kalibrierung der beiden Sensoren	16
2.10.	Streudiagramm des Sensorenvergleichs zum Sensorenvergleich	17
2.11.	Bildliche Veranschaulichung der IDW	20
2.12.	Hin- und Rückweg zur Station Mistel	21
2.13.	Routenkreuzung am Nordring	21
2.14.	Streckenverlauf entlang des Routen Mains bei der Station Pegel	21
2.15.	Morelet-Wavelet	22
2.16.	Diagramm der absoluten Temperaturen und Windgeschwindigkeiten des 2.	
	Fahrers im 6. Zyklus	24
2.17.	Karte der Abendfahrt des 2. Fahrers im 6. Zyklus mit Temperaturabwei-	
	chung von der Mitteltemperatur der Fahrt	24
2.18.	Abweichung der Temperatur von der jeweiligen Mitteltemperatur aller Abend-	
	fahrten	26
2.19.	Abweichung der Temperatur von der jeweiligen Mitteltemperatur aller Mor-	
	genfahrten	26

3.1.	Durchschnittliche Abweichung der Temperatur aller Fahrten von der jewei-						
	ligen Mitteltemperatur der Fahrt	28					
3.2.	Durchschnittstemperaturen der Messstationen des zweiten Messzeitraums .	30					
3.3.	Stadteinwärts ziehende Nebelschwaden im Flussbett des Roten Mains \ldots . 30						
3.4.	Windrose der Station ÖBG 31						
3.5.	Detailzoom in die Region zwischen Annecyplatz und Wilhelminenaue 32						
3.6.	Windrose der Station Wilhelminenaue	33					
3.7.	Detailzoom in die Region um die Station Eichelberg	34					
3.8.	Durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern zu den ver-						
	schiedenen Tageszeiten	35					
3.9.	Durchschnittliche Zeitabstände zwischen den Fahrern	35					
3.10.	Wavelet-Diagramme der Temperaturabweichungen vom Temperaturmittel						
	der Morgenfahrten	36					
3.11.	Wavelet-Diagramme der Temperaturdifferenzen zwischen den Fahrern	37					
4.1.	Einteilung der Stadt Bayreuth in warme und kalte Gebiete	40					
A.1.	Abweichung der Temperatur aller Nachmittagsfahrten von der jeweiligen						
	$Mitteltemperatur \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ $	49					
A.2.	Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur der Nachmit-						
	tagsfahrten von der Mitteltemperatur \hdots	49					
A.3.	Abweichung der Temperatur der Abendfahrten von der jeweiligen Mittel-						
	temperatur 	50					
A.4.	Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur der Abendfahr-						
	ten von der Mitteltemperatur	50					
A.5.	Abweichung der Temperatur der Morgenfahrten von der jeweiligen Mittel-						
	temperatur 	51					
A.6.	Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur der Morgenfahr-						
	ten von der Mitteltemperatur	51					
A.7.	Windrose der Station Röhrensee	52					
A.8.	Windrose der Station Mistel	52					
A.9.	Windrose der Station Holzbrücke	53					
A.10	Windrose der Station Pegel	54					
A.11	.Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern der Nachmittagsfahrten	54					
A.12	. Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern der Abendfahrten	55					
A.13	. Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern der Morgenfahrten	55					

Tabellenverzeichnis

3.1.	Durchschnittliche Temperaturdifferenzen	27
A.1.	Großwetterlagen im August 2019	47
A.2.	Beschreibung der Großwetterlagen	47
A.3.	Liste aller Fahrten	48

Datenträger

Auf dem beiliegenden USB-Stick befindet sich die Bachelorarbeit in digitaler Form als PDF mit dem Namen "Bachelorarbeit_Andreas_Tschuschke.pdf".

Im Ordner "Bachelorarbeit" befinden sich sämtliche Daten, eine kurze Erklärung findet sich in der Datei "Grober Wegweiser durch den Datendschungel innerhalb des Ordners Bachelorarbeit.docx".

Der Ordner "DATA" beinhaltet in übersichtlicher Form sämtliche Messdaten samt der unterschiedlichen Bearbeitungsstadien im CSV-Format. Näheres dazu in der Datei "Info zum Ordner DATA.txt".

1. Einleitung

1.1. Motivation

Durch die anthropogene Beeinflussung der Atmosphäre steigt die Temperatur global immer weiter an. Messungen in Bayreuth (ca. 75000 EW (Stadt Bayreuth, 2019)) zeigen, dass die Erwärmung in Bayreuth mehr als doppelt so stark ist (3,8 °C pro 100 Jahre) wie im globalen Mittel (1,5 °C pro 100 Jahre) (Thomas, 2019). Im Allgemeinen haben Städte gegenüber dem ländlichen Umland im Durchschnitt eine erhöhte Lufttemperatur, dies ist ein Teil des urbanen Wärmeinsel-Effekts (UWI-Effekt) (Kuttler, 2009). Besonders im Sommer stellen tropische Nächte mit Minimumtemperaturen von 20 °C (Fenner; Mücke u. a., 2015) eine enorme Belastung für den menschlichen Organismus dar, da sich dieser nicht von der Hitze des Tages erholen und nachts sein Verhalten gegenüber den hohen Temperaturen nur eingeschränkt anpassen kann. Dies hat eine hohe Mortalitätsrate zur Folge (Fenner; Mücke u. a., 2015), was in einigen großen Hitzeperioden der vergangenen Jahre deutlich wurde (Gabriel; Endlicher, 2011).

In Deutschland leben 77 % der Bevölkerung in dicht besiedelten Gebieten oder Gebieten mit mittlerer Besiedelungsdichte (Statistisches Bundesamt, 2018), weshalb eine detaillierte Untersuchung des Stadtklimas besonders relevant ist. Gut 30 % der Bevölkerung leben in Großstädten (≥ 100.000 EW), knapp 30 % in Mittelstädten (≥ 20.000 EW bis < 100.000 EW), ebenso viele in Kleinstädten (≥ 5.000 EW bis < 20.000 EW) (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2019). Gerade in Klein- und Mittelstädten kann aufgrund der kleineren Fläche das Stadtklima durch geschickte städteplanerische Maßnahmen leichter positiv beeinflusst werden. In der Literatur finden sich jedoch vor allem Beispiele und Messungen für Großstädte (vgl. Fenner; Mücke u. a., 2015; Dütemeyer; Barlag u. a., 2014; Weber; Kuttler, 2003; Helbig, 1999; Günter Baumbach; Vogt, 1999; Vogt; G. Baumbach u. a., 1999; Malberg, 1990). Hier setzt das Projekt MiSKOR an, in dessen Rahmen die vorliegende Bachelorarbeit durchgeführt wurde. Es hat zum Ziel anwendbare Planungshilfen für mittelgroße Städte zu entwickeln, um die negativen Folgen durch den UWI-Effekt abzumildern und somit die Gesundheitsrisiken der Einwohner zu verringern (Thomas; Samimi, 2018).

1.2. Theoretische Grundlagen

Unter Stadtklima versteht man

"die klimatischen und lufthygienischen Veränderungen, die Städte im Vergleich zum Umland aufweisen [...]" (Kuttler, 2009).

Das Stadtklima wird als Teil des Mesoklimas gesehen, welches Skalen mit einer horizontalen Ausdehnung von 2 bis 2000 km umfasst und dessen Phänomene eine Lebensdauer von 30 min bis drei Tagen haben. Ein wichtiges Parameter ist dabei die Topografie (Thomas, 2018a). Der Mensch beeinflusst mit Städten das Mesoklima direkt durch seine Lebensweise. Durch Bebauung, Energiekonsum und Mobilität werden die Energie- und Strahlungsbilanz, der Wasserhaushalt, der Wind, die Luftqualität, die Temperatur und folglich das Bioklima sowie der Aufbau der Atmosphäre verändert. Das Stadtklima hat somit zwei Hauptkomponenten (Matzarakis; Röckle u. a., 2008): eine thermische und eine lufthygienische. Der am leichtesten spürbare Effekt des Stadtklimas ist die gegenüber dem Umland erhöhte Temperatur, weshalb sich diese Arbeit bei den mobilen Messungen auf die Messung der Temperatur beschränkt. Die Bedeutung der Temperatur wird dadurch unterstrichen, dass in Studien zur Mortalitätsrate diese als meteorologischer Bezugswert genommen wird (vgl. Gabriel; Endlicher, 2011). Die Intensität der UWI ist laut einer Zusammenfassung (Arnfield, 2003) umso größer,

- 1. je kleiner die Windgeschwindigkeit ist.
- 2. je kleiner der Wolkenbedeckungsgrad ist.
- 3. wenn eine Hochdruckwetterlage vorliegt.
- 4. wenn es Nacht ist.
- 5. wenn es Sommer ist.
- 6. je größer die Stadt und/oder je größer die Einwohnerzahl ist.

Die Entstehung der UWI lässt sich über die Energiebilanz, bestehend aus Strahlungs- (Gl. 1.1) und Wärmebilanz (Gl. 1.2), erklären (nach Foken, 2016; Junk, 2010; Kuttler, 2009).

Strahlungsbilanz

$$Q^* = K \downarrow + K \uparrow + L \downarrow + L \uparrow \left(\frac{W}{m^2}\right)$$
(1.1)
mit: $K \downarrow =$ Globalstrahlung
 $K \uparrow =$ Reflexstrahlung
 $L \downarrow =$ Gegenstrahlung
 $L \uparrow =$ Ausstrahlung

Wärmebilanz

$$Q^{*} + Q_{anthr.} + Q_{Met.} + Q_{H} + Q_{E} + Q_{B} + \Delta Q_{S} = 0 \quad \left(\frac{W}{m^{2}}\right)$$
(1.2)
mit: $Q_{anthr.} =$ anthropogene Wärme
 $Q_{Met.} =$ metabolische Wärme
 $Q_{H} =$ fühlbare Wärme
 $Q_{E} =$ latente Wärme
 $Q_{B} =$ Bodenwärmestrom
 $\Delta Q_{S} =$ gespeicherte Wärme

Die Zahlenwerte der Strahlungs- und Wärmeflussdichten $\left(\frac{W}{m^2}\right)$ - auch bezeichnet als Wärmeströme oder -flüsse - sind negativ, wenn sie der Erdoberfläche Energie zuführen und positiv, wenn sie von der Erdoberfläche Energie abführen.

 $K \downarrow$ ist in westeuropäischen Großstädten um bis zu 20 % abgeschwächt, die Sonnenscheindauer verkürzt sich um bis zu 15 % aufgrund von Aerosolen und stärkerer Wolkenbildung (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, 2019). $K \uparrow$ ist aufgrund dunkler Baumaterialien, die durch die Gebäude bedingte größere Absorptionsfläche und Reflexion zwischen den Gebäuden geringer. Die langwelligen Strahlungskomponenten nehmen aus den selben Gründen zu. Durch eine höhere Oberflächentemperatur steigt $L \uparrow$, die Reflexion an Aerosolen erhöht $L \downarrow$. Die städtische Strahlungsflüsse aus. Insgesamt ergibt sich eine niedrigere Strahlungsbilanz Q^* als auf dem Land. $Q_{anthr.}$, welche in der Stadt um ein Vielfaches höher sein kann als Q^* , erhöht die Energiezufuhr merklich (Kuttler, 2009). Es ist wenig Wasser vorhanden, Q_L ist somit gering. Folglich bleiben zum Ausgleich der Wärmebilanz noch Q_H , Q_B und ΔQ_S . Durch die Baumaterialien sind die Wärmeleitfähigkeit und -speicherkapazität stark erhöht, weshalb tagsüber



Abbildung 1.1.: Schematische Darstellung der Einflussgrößen des urbanen Wärmehaushalts (Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, 2019)

die Energie über Q_B und ΔQ_S abgeführt werden kann und sich Q_H nur ein wenig erhöht oder zum Teil niedriger sein kann als im Umland. Da Q_H für die Lufttemperatur verantwortlich ist, ergeben sich am Tag oft nur kleine Temperaturunterschiede zum Umland. Nachts hingegen wird die gespeicherte Energie in ΔQ_S über den jetzt umgekehrten Q_B vor allem in Form von Q_H wieder an die Atmosphäre abgegeben, was die Temperatur gegenüber dem Umland massiv erhöhen kann. Daher tritt der maximale UWI vor allem nachts in den Sommermonaten auf, da hier am Tag besonders viel Energie gespeichert werden kann. Der gesamte Wirkungskomplex zur Entstehung der UWI ist in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt.

Durch die veränderten Energieflüsse wird die Planetare Grenzschicht (PBL = Planetary Boundary-Layer) verändert (Abb. 1.2). Besonders ausgeprägt ist dieser Effekt bei windschwachen und strahlungsreichen Wetterlagen. Dabei ist die PBL, abhängig von der Gestalt der Bebauung, aufgeteilt in (Kuttler, 2009)

 die von der Bodenoberfläche bis zum mittleren Dachniveau reichenden Stadthindernisschicht (UCL = Urban Canopy Layer), die unter anderem stark vom Himmelssichtfaktor (SVF = Sky View Factor), also dem Quotienten der aktuellen Himmelssicht und dem potentiell sichtbaren Himmel abhängt, da dadurch die Strahlungsverhältnisse und folglich das Strömungsregime beeinflusst werden; diese bildet den unteren Teil der



Abbildung 1.2.: Veränderung der PBL durch eine Stadt (Kuttler, 2009)

- 2. *Stadtreibungsschicht* (URS = Urban Rough Sublayer), die sehr lokal geprägt ist und von der Anordnung der Bebauung stark abhängt, welche wiederum Teil der
- Prandtlschicht (SL = Surface Layer) ist, in der die Einflüsse der Gebäude zunehmend abnehmen und somit ein homogenes Turbulenzfeld, ein logarithmisches Windprofil, höhenkonstante Flüsse und folglich ein höhenkonstantes Strömungsfeld vorherrschen,
- 4. und der über dem SL liegenden *Ekmanschicht* (ML = Mixing Layer oder UML = Urban Mixing Layer), die im Durchschnitt ein bis zwei Kilometer mächtig ist.

Die Messungen finden demnach in der UCL statt.

SL und ML ergeben zusammen die UBL (Urban Boundary Layer), die für eine Stadt charakteristisch ist. Die ML wird über der RBL (Rural Boundary Layer) in Windrichtung als UP (Urban Plume) fortgeführt und kann noch weit abseits der Stadt bei entsprechenden Strömungsverhältnissen wieder auf den Boden treffen, weshalb sich auch außerhalb der Stadt stadtklimatische Bedingungen ausbilden können. Die UBL und RBL entstehen durch die Rauigkeitssprünge vor und nach dem bebauten Gebiet der Stadt.

1.3. Zielsetzung

Zentrale Fragen dieser Arbeit sind:

- Welche räumliche Temperaturverteilung liegt in Bayreuth vor? Wo befinden sich Wärme- und Kälteinseln, wo Kaltluftentstehungsgebiete?
- Wo befinden sich Kaltluftströme in Bayreuth?
- Inwieweit hängen die Temperaturverteilung und Luftströme von Topografie, Fließgewässern und Bebauung ab?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden fahrradgestützte hochauflösende Temperaturmessungen durchgeführt. Zusätzlich werden Daten der schon vorhandenen 12 MiSKOR-Messstationen verwendet, die um weitere drei Stationen ergänzt werden.

Folgende Hypothesen werden zu den obigen Fragen aufgestellt:

- Stark versiegelte Flächen weisen bei Tag und Nacht eine höhere Temperatur als offene auf. Entsprechend befindet sich in der Innenstadt eine Wärmeinsel, Kälteinseln sind die Wilhelminenaue und die offenen Flächen östlich der A9, auf denen auch Kaltluft entsteht. In der Wilhelminenaue, in einem Tal südlich des Stadtteils St. Johannis östlich der Autobahn und am Sendelbach befinden sich Kaltluftseen.
- Entlang der Mistel und des Aubachs/Röhrensees wurden bereits Luftströmungen nachgewiesen (Spies, 2019). Entlang des Roten Mains ist daher ebenfalls eine Luftströmung vorhanden. Brücken stellen dabei im Gegensatz zur A9 und dem Annecyplatz kein maßgebliches Hindernis dar.

2. Material und Methoden

Um die im vorangegangenen Kapitel formulierten Fragen und zugehörigen Hypothesen zu beantworten bzw. zu überprüfen, fanden bei windschwachen Wetterlagen und möglichst klarem Himmel vom 09. bis 11.08 und 21.08. bis 26.08.19 pro Tag nach Möglichkeit sechs Messungen statt. Zu jeder Messzeit, am Nachmittag zur Zeit der zu erwartenden Höchsttemperaturen, am Abend nach Sonnenuntergang und am Morgen vor Sonnenaufgang, wurden zwei Messungen durchgeführt, die um 15 min zeitversetzt waren. Zusätzlich wurden die Daten von einem Teil der 12 MiSKOR-Messstationen verwendet, welche um drei Stationen ergänzt wurden. Im Folgenden sollen der Messstreckenverlauf und die Standorte der drei neuen Messstationen begründet werden, ferner wird auf die Messmethoden eingegangen.

2.1. Standorte der neuen Messstationen und Verlauf der Messroute

Um potentielle oder vorhandene Kaltluftbahnen zu detektieren wurden zunächst bestehende Analysen des Klimas der Stadt Bayreuth zu Hilfe genommen. Im Rahmen eines Klimagutachtens (Bangert; Heider, 2000) wurde für Bayreuth eine Klimafunktionskarte erstellt, die das Bayreuther Stadtgebiet in verschiedene Klimatope mit unterschiedlicher bioklimatischer Funktion und Belastung einteilt. Des weiteren sind kleinräumige Strömungsbedingungen eingezeichnet, die ebenfalls berücksichtigt wurden. Auch Foken (2007) geht von ähnlichen Strömungsbedingungen aus. Zusammenfassend sind alle Luftströmungen, mögliche Kaltluftseen und Hindernisse in einer Karte dargestellt (Abb. 2.1). Die vermuteten Strömungen nach Foken (2007) und Bangert; Heider (2000) sind mit großen blauen Pfeilen markiert. Kleine blaue Pfeile markieren weitere vermutete Strömungen. Die Karte enthält außerdem die von Foken (2007) vermuteten Strömungshindernisse (rote Linien) und weitere potentielle Hindernisse (gestrichelte rote Linien).

Am 21.08.2019 wurde zur genaueren Untersuchung der Luftströmung entlang des Roten Mains die Station Holzbrücke montiert (Abb. 2.2a). Um den möglichen Kaltluftsee und



Abbildung 2.1.: Karte der Stadt Bayreuth mit Topografie, Strömungsverhältnissen und Messroute. Erläuterung der Karte auf Seite 7.



(a) Station Holzbrücke

- (c) Station Eichelberg
- Abbildung 2.2.: Montierung der drei neu aufgestellten Stationen, jeweils Richtung Westen fotografiert.

(b) Station St. Johannis

die Strömungen bei St. Johannis genauer untersuchen zu können, wurde dort nahe der Unterführung am 24.07.2019 die Station St. Johannis aufgebaut (Abb. 2.2b). Die Station Eichelberg wurde nahe der A9 am Eichelberg aufgestellt, um eventuelle Kaltluftströmungen zu detektieren (2.2c). Die Standorte der Stationen sind aus Abbildung 2.1 ersichtlich.

Der Verlauf der 15 km langen Messroute (schwarze Linie in Abb. 2.1) wurde entlang vermuteter Kaltluftströmungen, Kaltluftseen und Hindernissen festgelegt. So werden die Kaltluftseen am Röhrensee, in der Wilhelminenaue, bei St. Johannis und am Sendelbach durchfahren. Weiterhin verläuft die Route entlang der Talsohlen des Aubachtals (im Süden bei Röhrensee), des Misteltals (im Südwesten) und des Roten Mains (Norden), da vor allem dort Kaltluftströmungen vermutet werden; das Sendelbachtal (im Süden bei ÖBG) wird nur gequert. Östlich der A9 soll untersucht werden, ob dort Kaltluft entsteht. Der Abstecher durch die Unterführung bei St. Johannis soll aufzeigen, ob die kalte Luft durch diese hindurchströmt. Bei der Station Holzbrücke wird der Rote Main über die Holzbrücke gequert, um ein Querprofil der Ventilationsbahn zu erhalten. Durch das zeitversetzte Fahren zweier Fahrer soll die Entwicklung der Temperatur innerhalb von ca. 15 min entlang der Route untersucht werden.

2.2. Messgeräteeauswahl

Die Messstrecke sollte möglichst schnell zurückgelegt werden, da die Temperatur über die Zeit instationär ist. Da der geplante Weg für Autos ungeeignet ist, wurden die Messungen mit Fahrrädern durchgeführt. Eine schnelle Fahrt verlangt Temperatursensoren mit einer kleinen Zeitkonstante, damit die gewünschten kleinräumigen Variabilitäten der Temperatur erfasst werden können. In Spies (2019) konnten mit dem Messgerät Testo480 zusam-



Abbildung 2.3.: Aktiv ventilierter Strahlungsschutz und Montierung am Messfahrrad. Die Messhöhe beträgt ca. 2 m. Das Testo480 / Testo735-2 befindet sich in der Box auf dem Gepäckträger.



Abbildung 2.4.: Messvorrichtung zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit im Strahlungsschutz

men mit einem passiv ventilierten und mit einer Plastikhaube vor Strahlung geschütztem Pt100-Sensor (Bestellnummer (Testo): 0614 0072) gute Ergebnisse erzielt werden. Da auf der geplanten Route eine konstante und niedrige Geschwindigkeit unmöglich ist, muss ein Strahlungsschutz mit aktiver Ventilation verwendet werden. Außerdem beträgt laut Spies (2019) die bestmögliche Zeitkonstante τ bei einer simulierten passiven Ventilation von 3 $\frac{m}{s}$ ohne Strahlungsschutz 27 s und mit Strahlungsschutz 55 s, was zu hoch ist. Für den zweiten Fahrer steht ein Testo735-2 ebenfalls mit einem Pt100-Sensor (Bestellnummer (Testo): 0609 1773) zur Verfügung. Die benötigten aktiv ventilierten Strahlungsschutze wurden nach einer bereits vorhandenen Anleitung gebaut (Thomas; Smoot, 2012) und am Fahrrad montiert (Abb. 2.3).

Die Strömungsgeschwindigkeit im Inneren des Strahlungsschutzes wurde mit einem Hitzedrahtanemometer gemessen (Abb. 2.4). Auch im Stand ist damit selbst bei schwacher Batteriespannung eine ausreichende Ventilation garantiert (Abb. 2.5).

Für die Bestimmung der Zeitkonstante wurde die Luft in einem großen Karton mithilfe



Abbildung 2.5.: Strömungsgeschwindigkeiten im Strahlungsschutz bei verschiedenen Betriebsspannungen



Abbildung 2.6.: Aufbau des Experiments zur Bestimmung der Zeitkonstante

eines Föns gegenüber der Raumtemperatur auf eine möglichst konstante Temperatur erwärmt. Der Strahlungsschutz wurde am Karton durch eine Öffnung "angeschlossen" (Abb. 2.6). Nach Erreichen einer konstanten Temperatur wurde der Strahlungsschutz samt Sensor vom Karton entfernt und in die Raumluft gehalten, deren Temperatur als konstant angesehen werden kann. Um eine realistische Strömungsgeschwindigkeit bei nicht vollen Batterien im Stand zu erhalten, wurde der Lüfter bei 9 V betrieben. Die Zeitkonstante τ beider Sensoren ist liegt bei sechs Messungen im Durchschnitt bei ca. 20 s, dies genügt noch nicht den Ansprüchen. Das Temperatursignal würde so zu stark geglättet werden und wichtige Details verloren gehen.

Daher wurden Thermoelemente vom Typ K (Bestellnummer (Testo): 0602 1793) als neue Sensoren angeschafft. Die absolute gemessene Temperatur kann bei Thermoelementen sehr ungenau sein. Dies spielt jedoch keine Rolle, da das Interesse vor allem den Temperaturdifferenzen gilt, welche mit Thermoelementen sehr gut abgebildet werden können. Bei sechs Messungen ergibt sich im Durchschnitt eine Zeitkonstante von ca. 1,7 s, was für die Messungen ausreicht, wobei die Einzelmessungen sehr variabel sind (Abb. 2.7).

In der Theorie sollte $t99 = 5\tau$ sein, dies ist hier nicht der Fall. Eine mögliche Erklärung dieser Diskrepanz liegt bei der thermischen Trägheit des Strahlungsschutzes. Er kühlt sich in der Raumluft verhältnismäßig langsam ab, was den Sensor warm hält. Dieser Effekt tritt erst dann merkbar zutage, wenn die Temperaturdifferenz zwischen Raumluft und Strahlungsschutz groß ist, weshalb sich die Messkurven dann weniger stark als in der Theorie abflachen. In der Praxis sind so große Temperaturunterschiede nicht zu erwarten, weshalb dieser Effekt bei den Messfahrten kaum eine Rolle spielen sollte.

Um die Zeitkonstante weiter zu verbessern wurde die Öffnung des Strahlungsschutzes in Fahrtrichtung montiert, sodass die Zeitkonstante durch den Fahrtwind noch kleiner wird.



Abbildung 2.7.: Messergebnisse der Zeitkonstanten der Thermoelemente im Strahlungsschutz. Die dicken grauen Linien kennzeichnen die Anfangstemperatur (0%) und die Endtemperatur (100%). Die dicken roten Linien zeigen die Zeitkonstante laut Definition, die dünnen roten Linien den entsprechenden fünffachen Wert. t99 ist mit dicken blauen Linien gekennzeichnet. Unter der Annahme, dass dieser Wert der fünffachen Zeitkonstante entspricht, ergibt sich eine Zeitkonstante, die mit den dünnen blauen Linien gekennzeichnet ist (t99/5). Die Einzelwerte der Größen wurden immer aufgerundet.

Zusätzlich beträgt die Batteriespannung meist mehr als 9 V, wodurch die Zeitkonstante weiter sinkt.

2.3. Temperatursensor

Die Messung der Temperatur mit Thermoelementen beruht auf dem Seebeck-Effekt (Thomas, 2018b; Amler; Giglberger, 2017; Meschede, 2015). Hat ein Metalldraht an seinen Enden unterschiedliche Temperaturen, so baut sich in ihm ein elektrisches Feld auf. Die Elektronen am wärmeren Ende werden auf ein höheres Energieniveau angehoben als am kälteren und diffundieren deshalb zum kälteren Ende, wodurch eine Potenzialdifferenz entsteht. Sie ist proportional zur Temperaturdifferenz und innerhalb bodenmeteorologischer Messbereiche weitgehend linear. In Thermoelementen wird ein zweiter Draht aus einem anderen Metall am einen Ende mit dem ersten Draht zusammengepresst. Dort entsteht aufgrund der unterschiedlichen Energieniveaus der Elektronen in den Materialien eine Spannung. Biegt man die Drähte nun zu einem offenen Ring, herrscht zwischen den freien Enden ein elektrisches Feld. Verändert man die Temperatur an der Kontaktstelle, ändert sich dort die Spannung, weshalb zwischen den beiden Drähten eine Spannung, die sog. Thermospannung U_{Th} , abgegriffen werden kann. Sie hängt von den als bekannt vorausgesetzten Materialeigenschaften und der Temperaturdifferenz zwischen der Kontaktstelle und den Drahtenden ab. Die unterschiedlichen thermoelektrischen Materialeigenschaften werden durch die materialspezifischen Seebeck-Koeffizienten S_A und S_B ausgedrückt. Gleichung 2.1 gibt den Zusammenhang zwischen der abgegriffenen Thermospannung, der Temperaturdifferenz und den Seebeck-Koeffizienten wieder.

$$U_{Th} = (S_B - S_A)(T_V - T_M)$$
(2.1)

Der Nachteil des Messprinzips besteht darin, dass nur eine Temperaturdifferenz gemessen werden kann. Zur absoluten Temperaturmessung ist immer eine Referenztemperatur nötig. Die abgreifbaren Spannungen bei gängigen Materialkombinationen betragen 8 bis 60 $\frac{\mu V}{K}$, weshalb mit heutigen Spannungsmessgeräten eine hohe Auflösung möglich ist. Weiterhin können Thermoelemente extrem klein gebaut werden, was die Zeitkonstante auf teilweise unter 0,01 s sinken lässt (Foken, 2016). In Abbildung 2.8 ist schematisch das Schaltbild dargestellt.

Für die mobilen Messungen wurden Thermoelemente vom Typ K (Material A: Nickel-Chrom-Legierung, Material B: Nickel) von Testo (Bestellnummer (Testo): 0602 1793) verwendet.



Abbildung 2.8.: Schaltbild für die Temperaturmessung mit einem Thermoelement. Das eigentliche Thermoelement besteht lediglich aus den beiden Metallen A und B sowie den Pressstellen (Hückelheim, 2019)

2.4. Messfahrt

Um die Temperatur räumlich gut aufzulösen, war die maximale Fahrgeschwindigkeit auf $v = 20 \frac{km}{h}$ beschränkt, was über einen Fahrradtachometer zu kontrollieren war. In der Ebene sollte möglichst nicht schneller als 17 bis 18 $\frac{km}{h}$ gefahren werden. Für $5\tau = 8, 3 \ s = t99$ ergibt sich damit eine Weglänge s von

$$s = vt = v \cdot t99 = 20 \ \frac{km}{h} \cdot 8, 3 \ s = 5,56 \ \frac{m}{s} \cdot 8, 3 \ s = 46,3 \ m \tag{2.2}$$

Da die Zeitkonstante normalerweise geringer ausfallen wird, kann eine kürzere Weglänge angenommen werden.

Die Temperaturen wurden jede Sekunde gespeichert. Um diese räumlich zuordnen zu können zeichnete parallel ein GPS-Gerät (Garmin etrex10 und Garmin etrexHCx) jede Sekunde den Standort auf. Da die GPS- und Temperaturmessgeräte die Daten mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung erfassen, wurde die Zeit der Temperaturmessgeräte vor jeder Fahrt mit der Zeit eines mit dem Internet verbunden Computers abgeglichen. Außerdem wurde die Datenaufzeichnung der Geräte jeweils synchron gestartet.

Eine Liste aller Messfahrten befindet sich in Tabelle A.3.

2.5. Sensorenvergleich

Um die Temperaturdaten beider Sensoren miteinander vergleichen zu können, müssen diese untereinander kalibriert werden. Fahrt 1 (Tab. A.3) diente als Kalibrierfahrt, hier sind



Abbildung 2.9.: Diagramm zum Sensorenvergleich zur Kalibrierung der beiden Sensoren untereinander. Es ergibt sich ein Offset von 0,55 K.

beide Fahrer ohne Zeitversetzung nebeneinander gefahren. Nach ein paar hundert Metern löste sich das Datenkabel des einen Sensors, sodass die Datenaufzeichnung abbrach, weshalb nicht die ganze Route zum Abgleich der Temperaturen zur Verfügung steht. Die gemessenen Temperaturdaten sind in Abbildung 2.9 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass sich ein Offset von ca. 0,55 K ergibt, was auch der mittleren Abweichung der beiden Temperaturen entspricht. Das lineare Modell (blaue Linie) im Streudiagramm (Abb. 2.10) geht von keinem konstanten Offset aus. Dies ist physikalisch jedoch nicht erklärbar, da der Widerstand des Sensors innerhalb des Messbereichs - und damit in jedem Fall innerhalb der zu erwartenden Messwerte - direkt proportional zur Temperatur ist. Deshalb wird dennoch von einem Offset von 0,55 K ausgegangen. Folglich wurden alle mit dem Testo735-2 gemessenen Temperaturdaten um 0,55 K erhöht.



Sensorenvergleich am 2019-08-09 17:14:49

Abbildung 2.10.: Streudiagramm des Sensorenvergleichs mit angepasstem linearen Modell (blaue Linie). Das Modell geht nicht von einem konstanten Offset aus. Da ein konstanter Offset physikalisch logischer ist und sich ein Modell mit konstantem Offset (rot gestrichelte Linie) ebenfalls gut in die Punktewolke einfügt, wird von einem Offset von 0,55 K ausgegangen.

2.6. Bearbeitung der Rohdaten

Um die Daten der Messfahrten miteinander vergleichen und mit ihnen rechnen zu können, müssen diese bearbeitet und vereinheitlicht werden. So ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten unterschiedlich viele Datenpunkte pro Fahrt. Weiterhin befinden sich die Datenpunkte aufgrund der GPS-Ungenauigkeit, die in diesem Fall bis zu $\pm 50 m$ betragen hat, nie an der selben Position. Außerdem haben sich die Fahrer manchmal verfahren und die GPS-Geräte haben teilweise die Aufzeichnung der Position ausgesetzt. Zur Bearbeitung wurden die Programme R und QGIS verwendet.

2.6.1. Zusammenführen von Temperatur- und GPS-Daten

Die Datenlücken in den Positionsdaten wurden durch lineare Interpolation gefüllt, da sie maximal 19 s groß waren. Die Zeitstempel der Testos wurden denen der GPS-Geräte angeglichen. Zusätzlich wurde die jeweils längere Datenreihe auf die Länge der kürzeren Datenreihe gekürzt. Die unterschiedlichen Längen rühren daher, dass die Geräte nicht synchron abgeschaltet worden sind. Anschließend konnten die GPS- und Temperaturdaten zusammengeführt werden.

2.6.2. Löschen fehlerhafter Daten

Die Datenpunkte am Start- und Endpunkt (Gebäude GeoIII der Universität Bayreuth) der Route wurden in einem Umkreis von ca 50 m gelöscht, da sie eine hohe GPS-Ungenauigkeit von bis zu 1 km aufwiesen. Außerdem traten ungewöhnlich starke Temperaturschwankungen auf. Datenpunkte, die nicht auf der vorgegebenen Strecke lagen, weil sich die Fahrer verfahren hatten, wurden durch leere Datenfelder ersetzt.

2.6.3. Kompensation der Instationarität

Die Instationarität der Temperatur über die Fahrzeit wurde mithilfe der MiSKOR-Messstationen so gut wie möglich kompensiert. Über die Fahrzeit jeder Messfahrt wurde für jede Sekunde das räumliche Mittel der Temperatur aller Messstationen und des ÖBG berechnet. Da die Temperaturdaten der MiSKOR-Stationen nur als 5 min-Mittelwerte vorliegen, wurde die Temperatur zwischen diesen Werten auf die Sekunde linear interpoliert, genauso wurde mit den 10 min-Werten des ÖBG verfahren. Das räumliche Mittel zum Startpunkt einer jeden Messfahrt wurde dabei als Referenzpunkt genommen und von allen anderen Mittelwerten der jeweiligen Fahrt abgezogen. Diese Differenz wiederum wurde von allen Temperaturen der jeweiligen Messfahrt abgezogen (Gl. 2.3).

$$T_{final}(t) = T_{mobil}(t) - \left(T_{Raummittel}(t) - T_{Raummittel}(t_0)\right)$$
(2.3)

Steigt der räumliche Mittelwert der Temperatur über die Messzeit an, wird demnach der Wert in der Klammer positiv und die mobile Temperatur wird nach unten korrigiert. Im umgekehrten Fall findet eine Korrektur nach oben statt.

2.6.4. Inverse-Distance-Weighting

Das Problem der unterschiedlichen räumlichen Verteilung der Datenpunkte wurde mit dem Inverse-Distance-Weighting (IDW) gelöst. Dabei werden die Datenpunkte innerhalb eines bestimmten Radius auf definierte Positionen interpoliert. Dabei fallen nahe gelegene Punkte stärker ins Gewicht als weiter entfernte. In der Geostatistik wird standardmäßig eine Abnahme der Gewichtung proportional zum Quadrat der Distanz verwendet (www.gisgeography.com, 2019). In Gleichung 2.4 ist die IDW mathematisch dargestellt.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^p}}$$
(2.4)

Dabei ist Z ein räumlich festgelegter Punkt mit unbekannten Parametern. Um dessen Parameter zu berechnen, werden n Punkte in der Umgebung einbezogen. Deren Parameter Z_i werden invers zu ihrer Distanz d_i von Z gewichtet und addiert. Durch den Nenner wird der Wert der Summe des Zählers in diesem Fall auf den Wert einer Temperatur bzw. Zeit zurückgerechnet. p ist die sogenannte "distance-weighting-power". Je größer sie ist, desto stärker nimmt der Einfluss der Parameter eines Punktes mit der Entfernung ab und desto höher gewichtet sind Punkte in der Nähe; standardmäßig ist p = 2, was auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Zur Durchführung der IDW mit den Messdaten wurde in QGIS eine fiktive Strecke möglichst entlang der Mittellinie der Punktewolke aller Messfahrten gezogen und alle 20 m ein Punkt gesetzt, insgesamt 760 Stück (Abb. 2.11). Der Abstand von 20 m ist ein Kompromiss zwischen der gewünschten hohen Auflösung der Temperatur und der Zeitkonstante, aufgrund derer das Temperatursignal um maximal 46 m verzögert ist. Die tatsächliche Verzögerung des Signals dürfte geringer sein (siehe Kapitel 2.2). Die Temperatur jedes der 20 m-Punkte auf der fiktiven Messstrecke wird von den Temperaturmessungen im direkt vorausgehenden Streckenabschnitt beeinflusst. Gleichzeitig "steckt" dessen Temperatur aber auch noch in den Messwerten der nachfolgenden Punkte. Zur Berechnung



Abbildung 2.11.: Bildliche Veranschaulichung der IDW. Die Punktewolke im Hintergrund sind die Messdaten der Messfahrten. Die schwarze Linie ist eine Strecke mit fiktiven Messpunkten im Abstand von 20 m (rote Sterne). Innerhalb der 50 m-Radien (bunte Kreise) werden alle Datenpunkte einer Messung zur Berechnung des Temperaturwertes in einem 20 m-Punkt berücksichtigt.

der Temperatur an den 20 m-Punkten werden daher alle Punkte in einem 50 m-Radius berücksichtigt. Der vergrößerte Radius ergibt sich aus der räumlichen Streuung der Datenpunkte, die bis zu knapp 50 m von den 20 m-Punkten entfernt sind. Die Messzeiten an den 20 m-Punkten wurden nach dem selben Prinzip ermittelt.

Probleme gibt es bei räumlich eng beisammen liegenden Messabschnitten. In der Nähe der Station Mistel wurde flussauf- wie flussabwärts derselbe Weg benutzt, weshalb nicht zu unterscheiden ist, welche Punkte zu welcher Fahrtrichtung gehören. Durch einen Halt an der Station Mistel liegen die Messwerte innerhalb eines 50 m-Radius zeitlich demnach bis zu 5 min auseinander (Abb. 2.12). Dasselbe Problem tritt bei der Überquerung des Roten Mains bei der Station Holzbrücke und der Fahrt durch die Autobahnunterführung bei der Station St. Johannis auf.

Am Nordring kreuzt sich die Route, was zu einer Vermischung der Daten der Routenabschnitte führt. Um diesen Effekt zu verringern, wurden die 20 m-Punkte so gelegt, dass sich direkt auf der Kreuzung der Route kein Punkt befindet (Abb. 2.13).

Da in der Nähe der Station Pegel am Roten Main flussabwärts auf der einen und flussaufwärts auf der anderen Seite entlang gefahren wurde und die Wege weit genug auseinander liegen, tritt das Problem der Fehlzuordnung von Messwerten dort so gut wie nicht auf. Die Flussufer können somit getrennt voneinander betrachtet werden.

2.6.5. Potentielle Temperatur

Auf Basis des Digitalen Höhenmodells mit einer Rastergröße von 25 m und einer Höhengenauigkeit von mindestens 2 bis 3 m (DGM25) vom Bayerischen Landesamt für Digitalisie-



Abbildung 2.12.: Hin- (von Osten kommend) und Rückweg zur Station Mistel. Obwohl derselbe Weg benutzt worden ist, befinden sich aufgrund der GPS-Ungenauigkeit die Messpunkte der Hinfahrt weiter südöstlich als die Messpunkte der Hinfahrt, weshalb die fiktive Route (schwarze Linie) leicht versetzt wurde.



Abbildung 2.13.: Routenkreuzung am Nordring. Um eine starke Vermischung der Daten der unterschiedlichen Streckenabschnitte dei der IDW zu vermeiden, wurden die 20 m-Punkte (rote Sterne) nicht direkt auf die Kreuzung gelegt.



Abbildung 2.14.: Streckenverlauf entlang des Routen Mains bei der Station Pegel. Die 50 m-Kreise (bunte Kreise) der einen Flussseite überschneiden sich kaum mit den Messpunkten (bunte Punkte) der anderen Seite.



Abbildung 2.15.: Morelet-Wavelet (Thomas; Foken, 2003)

rung, Breitband und Vermessung wurde die für die 20 m-Punkte interpolierte Temperatur T_i in der Höhe H_i in die potentielle Temperatur $T_{pot,i}$ umgerechnet. Bezugspunkt dafür ist der laut DGM25 tiefste Punkt der Messroute H_{min} in der Nähe des Nordrings mit 328,8 m. Der höchste Punkt der Route liegt in der Nähe des Eichelbergs bei 390,8 m. Aufgrund der geringen Höhendifferenz erfolgte die Berechnung vereinfacht nach Gleichung 2.5 mit einem Temperaturgradienten von $-0, 65 \frac{K}{100m}$.

$$T_{pot,i} = T_i - \left((H_i - H_{min}) \cdot (-0,0065\frac{K}{m}) \right)$$
(2.5)

2.6.6. Wavelet-Transformation

Mit Hilfe der Wavelet-Transformation werden die Temperaturdaten auf charakteristische Frequenzen an bestimmten Zeitpunkten untersucht (Thomas; Foken, 2003). In diesem Fall werden bestimmte Orte statt der Zeitpunkte verwendet. Dabei deuten hohe Frequenzen auf kleinskalige Änderungen der Temperatur hin, was ein Indiz für die Entstehung von Kaltluft und abfließenden Kaltluftpfropfen sein kann. Zur Analyse des Signals wird ein sogenanntes Wavelet verwendet. Die Wavelet-Transformation verwendet Wavelets mit unterschiedlichen Frequenzen und unterschiedlicher zeitlicher Ausdehnung. In dieser Arbeit wird das Morlet-Wavelet (Abb. 2.15) verwendet.

Zur Visualisierung werden sogenannte Wavelet-Diagramme erstellt. An der x-Achse wird der Ort angetragen, an der y-Achse die Wellenlänge oder auch Ereignislänge. Zu jeder Ereignislänge wird durch zwei Farben die "Passgenauigkeit" eines Wavelets und damit einer bestimmten Frequenz angegeben. Dadurch werden die Ereignislängen visuell auswertbar (vgl. Abb. 3.10). Der obere Plot zeigt die analysierte Raumreihe, die in der Mitte ca. bei der Station Wilhelminenaue in zwei Hälften geteilt wird (vgl. Kap. 3.5). In der Mitte befindet sich das eigentliche Wavelet-Diagramm, welches in Abhängigkeit der Strecke die vorhandenen Ereignislängen bzw. Frequenzen veranschaulicht. Der Plot rechts zeigt die sogenannte Wavelet-Varianz, ein Maß für den Anteil einer bestimmten Frequenz bzw. Ereignislänge entlang der Strecke.

2.7. Darstellung der Ergebnisse

Für jeden Fahrer und Zyklus (vgl. Tab. A.3) wurde ein Diagramm angefertigt. Die Darstellung soll beispielhaft am Diagramm des 2. Fahrers im 6. Zyklus (Abb. 2.16) erläutert werden.

Die Nachmittagsfahrt ist violett, die Abendfahrt grün und die Morgenfahrt blau dargestellt. An der unteren x-Achse ist die Streckenlänge angetragen, an der Oberseite der oberen x-Achse sind die Standpunkte der MiSKOR-Messstationen, an denen die Route vorbeiführt, markiert. An der mittleren x-Achse sind besondere Wegpunkte markiert.

Die zweigeteilte y-Achse gibt im oberen Teil die absolute Temperatur an. Die waagrechten Linien zeigen die jeweilige Durchschnittstemperatur einer Fahrt. Basierend auf den Temperaturkurven aller Zyklen und den geographischen Gegebenheiten wurden markante Streckenabschnitte definiert, deren Namen an der Unterseite der oberen x-Achse angegeben sind. Ebenso wurden besondere Streckenpunkte definiert, deren Namen an der mittleren x-Achse angegeben sind. Die violett gepunkteten Linien stellen Brücken über den Mistelbach dar. Durch die Kehrtwende an der Station Mistel kommen die Brücken doppelt vor, gespiegelt am Standort der Station Mistel. Deshalb weisen dort die Temperaturkurven eine Symmetrie auf.

An dem unteren Teil der y-Achse ist die Windgeschwindigkeit angegeben. Die Graphen zeigen die auf 1 min gemittelten Windgeschwindigkeiten der Wetterstation im ÖBG in 17 m Höhe zu dem Zeitpunkt, an dem die Temperatur an der Stelle *s* am Nachmittag, Abend oder Morgen gemessen wurde. So kann eine grobe Abschätzung der allgemeinen Strömungsbedingungen in der UBL erfolgen. Die Punkte zeigen die auf 5 min gemittelten Windgeschwindigkeiten der jeweiligen MiSKOR-Stationen zum Zeitpunkt des dortigen Halts.

Weiterhin wurden für jede Fahrt Karten der absoluten Temperatur und der Temperaturabweichung von der Mitteltemperatur angefertigt. Beispielhaft ist die Karte der Temperaturabweichung von der Mitteltemperatur der Abendfahrt des 2. Fahrers im 6. Zyklus dargestellt (Abb. 2.17), da hier durch die hohen Temperaturunterschiede ein erster Überblick der räumlichen Temperaturverteilung in Bayreuth gewonnen werden kann und sie der Abendfahrt in Abbildung 2.17 entspricht.



Abbildung 2.16.: Diagramm der absoluten Temperaturen und Windgeschwindigkeiten des2. Fahrers im 6. Zyklus. Die Nachmittagsfahrt ist violett, die Abendfahrt grün und die Morgenfahrt blau dargestellt.



Abbildung 2.17.: Karte der Abendfahrt des 2. Fahrers im 6. Zyklus mit Temperaturabweichung von der Mitteltemperatur der Fahrt

2.8. Weiterer Ausschluss von Daten

Die Abbildungen 2.18 und 2.19 zeigen die Abweichungen aller Fahrten von deren jeweiliger Durchschnittstemperatur. Die Einzelfahrten sind durch bunte Linien dargestellt, die dicke schwarze Linie zeigt den Durchschnitt aller Abweichungen an der Stelle s.

Bei den Morgenfahrten weichen die beiden Fahrten des 2. Zyklus stark von den anderen ab (gelb), selbiges gilt für die Abendfahrten des 7. Zyklus (violett). Zur Messzeit hat vermutlich die Wetterlage gewechselt (vgl. Tab. A.3). Deshalb sind die Temperaturen innerhalb der Messzeit nicht miteinander vergleichbar, weshalb die Daten der Fahrten in den Berechnungen nicht verwendet werden.

Insgesamt sind in den Diagrammen Daten aus vier verschiedenen Wetterlagen abgebildet. Eine Zusammenfassung ist aufgrund deren Ähnlichkeit unproblematisch, solange die Wetterlage innerhalb einer Fahrt nicht wechselt.

Die Daten der Stationen Kämmerei und Hofgarten werden ausgeschlossen, da diese während der Messzeit größere Ausfälle hatten. Die Station Pegel misst am Tag aufgrund eines Strahlungsfehlers falsche Temperaturen.



Abbildung 2.18.: Abweichung der Temperatur von der jeweiligen Mitteltemperatur aller Abendfahrten. Die durchschnittliche Abweichung ist als schwarze Linie dargestellt.



Abbildung 2.19.: Abweichung der Temperatur von der jeweiligen Mitteltemperatur aller Morgenfahrten. Die durchschnittliche Abweichung ist als schwarze Linie dargestellt.

3. Ergebnisse und Diskussion

Die Analysen beschränken sich überwiegend auf die Temperaturabweichungen vom Temperaturmittel der Fahrten, da diese mit den Thermoelementen besser messbar sind. Für die Klärung der Fragestellung dieser Arbeit sind diese ausreichend. Zunächst soll allgemein auf die Ergebnisse eingegangen werden, dann wird der Einfluss von Bebauung, Topografie und Fließgewässern betrachtet. Abschließend werden noch die Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Fahrern sowie die Variabilität der Temperaturabweichungen und -differenzen diskutiert.

3.1. Allgemein

Die Abweichungen von Temperaturmittel einer Fahrt sind zu allen drei Tageszeiten reproduzierbar, die Fahrten haben alle einen ähnlichen Verlauf. Das bedeutet, dass sie unabhängig von den absoluten Temperaturen sind. Besonders am Morgen (Abb. A.6) ist diese Ähnlichkeit groß. Am Nachmittag (Abb. A.2) ist die Variabilität aufgrund der vorherrschenden Konvektion größer. Diese nimmt ab dem Sonnenuntergang ab, was an den abfallenden durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten vom Nachmittag bis zum Morgen erkennbar ist. Die Variabilität der Temperaturabweichungen am Abend (Abb. A.4) ist entsprechend noch etwas höher als am Morgen.

Ebenfalls aufgrund der Konvektion sind die Temperaturdifferenzen am Nachmittag am kleinsten (Tab. 3.1). Am Abend erreichen die Differenzen ihren größten Betrag und sind bis zum Morgen wieder geringer. Dies bestätigt die Aussage in Spies (2019), dass die UWI

Tabelle 3.1.: Durchschnittliche Temperaturdifferenzen aller Fahrten und die Fahrten mit der größten Temperaturdifferenz, gegliedert nach Nachmittags-, Abend- und Morgenfahrten.

	durchschn. T-Diff.	größte T-Diff.	zugeh. Fahrt
Nachmittag	2,86 K	$5,69 { m K}$	8. Zyklus, 2. Fahrer
Abend	4,96 K	7,20 K	5. Zyklus, 2. Fahrer
Morgen	3,25 K	4,43 K	8. Zyklus, 2. Fahrer



Abbildung 3.1.: Durchschnittliche Abweichung der Temperatur aller Fahrten von der jeweiligen Mitteltemperatur der Fahrt

am Abend am größten ist. Es ist demnach nicht davon auszugehen, dass die Differenzen in der Nacht größer als am Abend werden. Aufgrund der hohen Wärmespeicherkapazität versiegelter Gebiete konnten diese bis kurz nach Sonnenuntergang noch nicht abkühlen, während unversiegelte Gebiete sehr schnell abkühlen. Demnach kühlen die in der Nacht sich bildenden Kaltluftseen langsamer ab als das versiegelte Stadtgebiet. Würden sie schneller abkühlen, müssten die Temperaturdifferenzen bis zum Morgen steigen.

Durch die fehlende Konvektion ähneln sich die Temperaturabweichungen am Abend und Morgen am stärksten (Abb. 3.1). Bis auf wenige Ausnahmen ist auch der Verlauf der Nachmittagsfahrten ähnlich. Bei hoher Vegetation und damit einhergehend kleinem Himmelsfaktor (Abschnitte Wald/Brücke, Wald bei der Station Pegel, Flussbad und Wald in der Wilhelminenaue) verläuft der Graph jedoch zum Teil sogar gegenläufig. Bäume verhindern in der Nacht die Auskühlung, während sie am Tag Schatten spenden und durch Transpiration die Luft abkühlen. Lediglich unter den Bäumen in der Dammallee ist die Luft tags wie nachts kühler als in der Umgebung. Innerhalb stark versiegelter Gebiete wie der Dammallee scheint nachts die Transpiration der Bäume für die Kühlung der Luft entscheidend zu sein, am Tag konnte der Boden durch die Beschattung am Tag nicht viel Wärme speichern. Durch die bessere Abkühlung bei großem Himmelsfaktor ist am Morgen der Bereich Highway kälter als der Röhrensee, dies war am Abend noch gegenteilig.

3.2. Topografie und Fließgewässer

Am Nachmittag (Abb. A.2) hat vor allem Exposition der Erdoberfläche zur Sonne einen Einfluss. Zur Messzeit steht die Sonne bereits im Westen, weshalb Westhänge stärker erhitzt werden. Dies betrifft vor allem die Bereiche östlich der Autobahn und das Gewerbegebiet am Pfaffenfleck im Bereich B2, welches dadurch wärmer als die Innenstadt ist. Auch am Abend (Abb. A.4) und Morgen (Abb. A.6) sind diese östlichen Gebiete wärmer. Die Ursache könnte eine Inversion sein, bei der höher gelegene Gebiete wärmer als tiefere sind. Eventuell könnte es sich aber auch um einen Urban Plume handeln, also wärmere Luft, die aus der Stadtmitte ins Umland transportiert wird (vgl. Kap. 1.2 und Abb. 1.2) und dort die Oberfläche berührt.

Solange die Fließgewässer nicht versiegelt sind, herrschen dort niedrige Temperaturen (Bereiche Röhrensee, Mistel, gesamter Roter Main außer RM3 und Annecypl., "Bach" im Bereich Johannis2). Hohe Vegetation verstärkt diesen Effekt durch Beschattung und zusätzliche Transpiration (Bereiche Röhrensee, Flussbad und RM6).

Entlang der Flusstäler von Aubach (Röhrensee), Mistel und Rotem Main gibt es stadteinwärts gerichtete Kaltluftströmungen. Der Wind weht überwiegend entlang der Täler mit niedrigen Windgeschwindigkeiten Richtung Stadt (Abb. A.7, A.8 und A.9), was ein Indiz für einen Kaltluftabfluss ist. Lediglich an der Station Pegel kann eine stadteinwärts gerichtete Strömung nicht nachgewiesen werden (Abb. A.10). Die durchschnittlichen Nachttemperaturen an den Stationen Röhrensee, Mistel, Pegel, Holzbrücke und Wilhelminenaue sind entsprechend niedrig.

Ein weiterer Beweis für die Strömungen entlang des Roten Mains sind stadteinwärts ziehende Nebelschwaden im Flussbett, die an der Station Holzbrücke fotografisch festgehalten werden konnten (Abb. 3.3). Die Kaltluftströmungen entlang der Flusstäler kühlen deren Umgebung anscheinend kaum ab. Sowohl am Abend als auch am Morgen fällt die Temperatur beim Übergang zwischen den Bereichen Mistel2 und RM1 stark ab, die kalte Luft im Flusslauf des Roten Mains hat also kaum Einfluss auf die Umgebung. Der abrupte Temperaturanstieg beim Übergang zwischen den Bereichen Damm und Hegelstraße am Abend deutet auch auf eine nicht vorhandene Kühlung des Wohngebiets hin. Für eine allgemein gültige Aussage fehlen allerdings Querprofile der Flussläufe. Auch die Mächtigkeit der Ströme scheint gering. Nach der Überquerung der Nordringbrücke (Abschnitt Nordring) taucht man in den Kaltluftstrom ein, er kann also nicht mächtiger als die Brücke hoch ist sein. Die Albrecht-Dürer-Straße (Bereich Albr.Dür.Str.) wird von den meisten Fahrern unterquert. Dabei sinkt die Temperatur ab, ein weiteres Indiz, dass der Kaltluftstrom eine geringe Mächtigkeit hat.



Abbildung 3.2.: Durchschnittstemperaturen der Messstationen des zweiten Messzeitraums, sortiert nach Durchschnittstemperaturen. Es wird nur der zweite Messzeitraum (21. - 26.08.2019) betrachtet, da die Station Holzbrücke zum ersten Messzeitraum noch nicht installiert war.



Abbildung 3.3.: Stadteinwärts ziehende Nebelschwaden im Flussbett des Roten Mains bei der Morgenfahrt des 2. Zyklus, flussabwärts von der Station Holzbrücke aus fotografiert.



Abbildung 3.4.: Windrose der Station ÖBG, Darstellung der Häufigkeit der Windrichtungen in Prozent

Topografisch bedingt entstehen bis zum Morgen einige Kaltluftseen. Sie befinden sich im Bereich Wilhelminenaue, am Roten Main östlich der A9, bei der Station St. Johannis und im Bereich Sendelbach. Sie sind durch die steilen Temperaturabfälle und -anstiege beim Durchfahren erkennbar, außerdem sind die Temperaturen der dortigen Stationen niedrig. Am Abend deutet der Temperaturabfall beim Übergang zum Röhrensee auf einen Kaltluftsee hin, der am Morgen jedoch verschwunden ist. Das Wasser des Röhrensees wirkt hier als Wärmepuffer, der eine starke Abkühlung verhindert.

Die Senke und die Straße "Pfaffenfleck" im Bereich Eichelb.Feld kanalisieren am Morgen die am Eichelberg entstehende Kaltluft. Am Abend ist die Straße "Pfaffenfleck" durch die vorherige Sonneneinstrahlung noch warm.

Abends und morgens ist der Bereich vom Röhrensee über die Universität bis zum Sendelbach kälter als der Durchschnitt der Temperaturen. Das Gebiet wird nach den Wind-(Abb. 3.4) und Temperaturdaten (Abb. 3.2) der Station ÖBG von einer Kaltluftströmung aus Richtung Sophienberg gekühlt.



Abbildung 3.5.: Detailzoom in die Region zwischen Annecyplatz und Wilhelminenaue der Abbildung A.6 (durchschn. Temperaturabweichung der Morgenfahrten).

3.3. Bebauung

Allgemein ist zu beobachten, dass die Temperaturen mit der Zunahme von Versiegelung und Bebauung ansteigen, besonders ausgeprägt am Abend und Morgen. Die wärmsten Bereiche befinden sich daher in den Bereichen rund um die Dammallee, im Bereich Annecyplatz und im Gewerbegebiet Pfaffenfleck im Bereich B2. Bereiche mit lockerer Bebauung, die mit Gärten und Grünflächen durchsetzt sind, können bis zum Morgen gut abkühlen. Dies ist in den Bereichen Highway, Colmdorf zwischen Bahnlinie und Königsallee und Uni 1 zu sehen (Abb. A.5 und A.6).

Brückenbauten und Straßen haben einen lokalen Einfluss auf die Temperatur. So erhöht sich am Nachmittag (Abb. A.1 und A.2) und Abend (Abb. A.3 und A.4) bei der Überquerung der Brücken über die Mistel die Temperatur. Der starke Temperaturabfall nach den Brücken Richtung Westen bei den Abendfahrten deutet darauf hin, dass einströmende Kaltluft teilweise blockiert wird. Am Morgen sind diese Effekte fast verschwunden, da die Brücken über Nacht auskühlen konnten. Auch die Nordringbrücke blockiert die Kaltluft aus der Rotmainaue. Nach der Unterquerung der Brücke Richtung Nordwesten (Markierung "Nordr. Br." an der mittleren x-Achse) ist es vor allem am Morgen kälter als davor.

Weiter rotmainaufwärts riegeln einige Brücken Kaltluft ab, was besonders bei den Morgenfahrten deutlich wird (Abb. 3.5 und A.5). Im Bereich RM3 steigt beim Passieren der Brücke der Casselmannstraße die Temperatur steil an, obwohl sich die Bebauung kaum verändert. Der folgende steile Temperaturanstieg und -abfall ist durch die Versiegelung des Annecyplatzes bedingt. Im Bereich RM5 vor dem Flussbad bleibt die Temperatur weitgehend konstant, bevor sie nach dem Überqueren der Brücke der Friedrich-Ebert-Straße weiter abfällt. Dies ist ebenfalls ein Hinweis auf eine Blockierung von Kaltluft. Das Stauwehr der Wilhelminenaue riegelt die Kaltluft aus selbiger so gut wie komplett ab.





Abbildung 3.6.: Windrose der Station Wilhelminenaue, Darstellung der Häufigkeit der Windrichtungen in Prozent

Allerdings deuten die Daten von Windrichtung und -geschwindigkeit, welche sehr niedrig ist, der Station Wilhelminenaue darauf hin, dass in der Nacht Kaltluft in Richtung Stauwehröffnung strömt (Abb. 3.6). So könnte durch die Öffnung Kaltluft in das Flussbad gelangen, die sich dort über dem angestauten Wasser langsam erwärmt. Auch die Autobahnbrücke über den Roten Main riegelt die Kaltluft im Osten ab. Auch durch die Unterführung der Autobahn bei St. Johannis strömt keine Kaltluft. Auf der Westseite der Autobahn ist es deutlich wärmer als auf der Ostseite, die Autobahn riegelt zumindest in diesem Abschnitt die Kaltluft aus Osten komplett ab.

Im Bereich der Station Eichelberg ist nachts der Einfluss der lokalen Bebauung zu sehen (Abb. 3.7). In der Nähe der Wege sinkt die Temperatur ab. Über die Wege strömt Kaltluft vom Eichelberg in das Wohngebiet, selbst sehr kleine Ventilationsbahnen haben demnach einen Einfluss auf die lokale Temperatur und können Wohngebiete potentiell kühlen.

3.4. Temperaturdifferenzen zwischen den Messfahrern

Mit den Temperaturdifferenzen zwischen den Messfahrern kann eine Aussage über die Erwärmungs- bzw. Abkühlungsgeschwindigkeit von Flächen getroffen werden. Diese sind



Abbildung 3.7.: Detailzoom in die Region um die Station Eichelberg der Abbildung A.6 (durchschn. Temperaturabweichung der Morgenfahrten). Die Pfeile zeigen den Einfluss der Wege auf die Temperatur. Aufgrund der Zeitkonstante ist der Effekt erst verzögert sichtbar.

wichtig um potentielle Kaltluftentstehungsgebiete zu detektieren.

Bei den Temperaturdifferenzen lassen sich keine flächenspezifischen Unterschiede zwischen den einzelnen Bereichen erkennen (Abb. 3.8). Am Abend ist die Abkühlungsrate höher als am Morgen. Morgens sind die Flächen bereits abgekühlt, weshalb die Abkühlungsrate sinkt.

Trotz der Kompensation der Instationarität der Temperaturen (vgl. Kap. 2.6.3) bleiben die Raten bei den Nachmittags- und Morgenfahrten nicht konstant, sondern weisen einen Aufwärtstrend auf. Eine mögliche Erklärung ist die unregelmäßige Verteilung der MiSKOR-Stationen entlang der Route (Abb. 2.1). Nur jeweils zwei der 16 Stationen befinden sich östlich der Autobahn (St. Johannis und Eichelberg) oder auf großen unbebauten offenen Flächen (ÖBG und Wilhelminenaue). An Westhängen befindet sich nur eine Station (Eichelberg). Der östliche Teil der Messroute ist damit im Messnetz unterrepräsentiert und die Instationarität der Temperatur in diesem Teil nicht ausreichend berücksichtigt. Speziell für den Nachmittag ist die Erwärmungsrate aufgrund des Sonnenstands in diesen Bereichen höher als in anderen Streckenabschnitten. Zusätzlich wächst der durchschnittliche Zeitabstand zwischen den Fahrern um über 5 min (Abb. 3.9). Die Erklärung für die langsamere Abkühlung in der zweiten Hälfte der Morgenfahrten ist zum einen der zunehmende Einfluss der diffusen Strahlung der aufgehenden Sonne. Dies betrifft vor allem die erste Messperiode aufgrund der früheren Sonnenaufgangszeiten. Zum anderen kann ein den Boden erreichender Urban Plume dafür verantwortlich sein. Durch die Zufuhr warmer Luft aus der Innenstadt kann das Gebiet langsamer abkühlen.



Abbildung 3.8.: Durchschnittliche Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern zu den verschiedenen Tageszeiten (Nachmittag: violett, Abend: grün, Morgen: blau). Die Windgeschwindigkeiten (ÖBG-Station in 17 m Höhe) entsprechen dem Durchschnitt über dem Zeitraum zwischen den Ankunftszeiten der beiden Fahrer an der Stelle s.



Abbildung 3.9.: Durchschnittliche Zeitabstände zwischen den Fahrern mit linearem Trend (blaue Linie).



Abbildung 3.10.: Wavelet-Diagramme der Temperaturabweichungen vom Temperaturmittel der Morgenfahrten. Links ist der Durchschnitt aller Morgenfahrten (a), rechts die Morgenfahrt des 1. Fahrers im 6. Zyklus (b) abgebildet.

3.5. Variabilität der Temperaturabweichungen und -differenzen

Die Variabilität der Temperaturabweichungen von der Mitteltemperatur und der Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern gibt einen Hinweis auf Kaltluftentstehungsgebiete. Diese weisen eine erhöhte kleinräumige Variabilität auf. Sowohl bei den Abweichungen als auch bei den Differenzen am Abend und Morgen nimmt die Variabilität ab der Station Wilhelminenaue zu (Abb. A.3, A.5, A.12, und A.13). Bei den Nachmittagsfahrten taucht dieser Effekt nicht auf, da am Tag keine Kaltluft entstehen kann (Abb. A.1 und A.11). Die zweite Hälfte der Route beinhaltet mehr unbebaute Flächen und ist ländlicher geprägt. Die Variabilität ist besonders groß im Bereich Wilhelminenaue, bei den Morgenfahrten außerdem im Bereich Eichelberg.

Zur weiteren Analyse wurden alle Temperaturabweichungen und -differenzen mit einer Wavelet-Transformation untersucht und in Wavelet-Diagrammen visualisiert. Als Beispiele sind die jeweiligen Morgenfahrten abgebildet, da bei ihnen die Varianz am größten ist (Abb. 3.10 und 3.11). Bei allen Diagrammen nehmen in der zweiten Hälfte die kürzeren Ereignislängen zu. In Abbildung 3.11b ist die erhöhte Variabilität in den Bereichen Wilhelminenaue und Eichelberg besonders gut zu erkennen. Daher ist davon auszugehen, dass diese Bereiche Kaltluftentstehungsgebiete sind.



Abbildung 3.11.: Wavelet-Diagramme der Temperaturdifferenzen zwischen den Fahrern. Links ist der Durchschnitt aller Morgenfahrten (a), rechts jeweils die Morgenfahrten des 7. Zyklus (b) dargestellt.

3.6. Vergleich mit anderen Studien

Obwohl die Studie von Spies (2019) von September bis März durchgeführt wurde, ergaben sich auch hier die größten räumlichen Temperaturdifferenzen am Abend. Sie betrugen dabei maximal 4,8 K. Die durchschnittlichen räumlichen Temperaturdifferenzen am Abend in dieser Arbeit betrugen 4,96 K, maximal wurden 7,20 K gemessen. Die Differenzen sind über einen längeren Zeitraum demnach abhängig von der absoluten Temperatur. Die Temperaturen wurden mit einem passiv ventilierten Pt-100-Sensor mit einer Zeitkonstante von 55 s bei ca. 10 $\frac{km}{h}$ jede Sekunde aufgezeichnet. In Spies (2019) sind ebenfalls die ausgeprägten Lokalklimate erwähnt, einzelne Straßenzüge und Parks (Herzogpark) haben hier lokale Auswirkungen auf die Temperatur, jedoch kaum Einfluss auf die Umgebung. Laut Spies (2019) gibt es noch Wärmeinseln in St. Georgen und auf dem Gelände der Spinnerei. So lassen sich bisher vier versiegelungsbedingte Wärmeinseln in Bayreuth festhalten: die Innenstadt, das Gewerbegebiet am Pfaffenfleck, St. Georgien und die Spinnerei. Auch Spies (2019) stellt die tagsüber kühlende Wirkung von hoher Vegetation fest und merkt an, dass offene bzw. locker bebaute Flächen in der Stadt schneller besser auskühlen können als bewaldete.

Bei einer weiteren Studie (Lehnert; Kubeček u. a., 2018) wurden fahrradgestützte Messungen auf einer 9 km langen Route durch die Stadt Olomouc (ca. 100000 EW) bei unterschiedlichen Wetterbedingungen durchgeführt. Von August 2016 bis Januar 2017 fanden an 16 Tagen je zwei Messungen am Nachmittag und zwei Stunden nach Sonnenuntergang statt. Die Temperaturaufzeichnung im Intervall von 5 s erfolgte mit einem passiv ventilierten Thermistor (Angabe der Zeitkonstante fehlt) bei maximal 15 $\frac{km}{h}$, wobei Daten bei unter 5 $\frac{km}{h}$ aufgrund der passiven Ventilation gelöscht wurden. Auch hier traten mit 4,1 K die maximalen Temperaturdifferenzen am Abend auf. Die Umgebung der Messstrecke wurde mit einem 100m-Gitter in über die Bebauung und die Vegetation definierte Lokalklimate eingeteilt. Zwischen ihnen wurden signifikante Temperaturunterschiede festgestellt, auch hier sind Lokalklimate demnach ausgeprägt. Hotspots befanden sich in Gebieten mit kompakter mittelhoher (entsprechend der Bayreuther Innenstadt) und ausgedehnter niedriger Bebauung (enstprechend dem Gewerbegebiet Pfaffenfleck) sowie asphaltierten bzw. felsigen Oberflächen. In dünn bebauten Gebieten, offenen Flächen und Flächen mit hoher Vegetation wurden die kältesten Temperaturen gemessen, was weitestgehend den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit entspricht. Am Tag sind auch hier vor allem die Beschattung und vorhandenes Wasser relevant, in der Nacht kühlen vor allem offene Grünflächen mit großem Himmelsfaktor stark aus.

Bei einer Studie in Nancy (ca. 290000 EW) (Leconte; Bouyer u. a., 2014) wurde bei mobilen Messungen mit einem Auto ein aktiv ventilierter Pt-100-Sensor (Zeitkonstante nicht angegeben) verwendet. Bei einer Geschwindigkeit von bis zu 60 $\frac{km}{h}$ wurde alle 3 m die Temperatur aufgezeichnet. Die Messungen fanden nur bei möglichst wolkenlosem und windstillem Wetter im Sommer statt. Im Gegensatz zur vorher beschriebenen Studie wurde außerdem die zeitliche Instationarität der Temperatur mithilfe von Messstationen ausgeglichen. Auch hier waren die Temperaturdifferenzen am Abend am größten. Der maximale Unterschied zwischen Umland und Innenstadt betrug 7 K, wobei das Zentrum der UWI wie bei Spies (2019) in unterschiedlichen Gebieten auftrat, es also mehrere Wärmeinseln in der Stadt gibt. Die Stadt wurde wie Olomouc in Lokalklimate eingeteilt, die hier aber eine Kantenlänge von 400 m nicht unterschritten. Auch hier ergaben sich die selben Temperaturverteilungsmuster. Am wärmsten waren kompakt mittelhoch bebaute Flächen, am kältesten Flächen mit niedriger Vegetation. Zwischen diesen besteht am Abend im Durchschnitt eine Differenz von 4,3 K, maximal gemessen wurden 7,5 K. Diese Werte sind den Werten dieser Arbeit sehr ähnlich. Wie schon Spies (2019) feststellt, verhält sich die Temperaturverteilung in Bayreuth wie in Großstädten.

Für Kaltluftströme werden in Feldstudien in Osnabrück und Stuttgart Mächtigkeiten von 20 bis 30 m (Weber; Kuttler, 2003) oder gar 100 m (Vogt; G. Baumbach u.a., 1999) beschrieben. Die Kaltluft konnte daher beispielsweise in Osnabrück über einen 12 m hohen Bahndamm bis zu 1,4 km in die Innenstadt vordringen. In beiden Städten ist das Kaltluftentstehungsgebiet aber sehr groß, weshalb man diese Messungen nicht ohne weiteres auf die Kaltluftströme in Bayreuth übertragen kann. Lediglich der vom Sophienberg kommende Kaltluftstrom dringt in die Bayreuther Wohngebiete im Süden ein, eine Untersuchung von dessen Mächtigkeit mit horizontalen Messungen könnte daher interessant sein.

4. Schlussfolgerungen

Die räumliche Temperaturverteilung in der Stadt Bayreuth wurde mithilfe fahrradgestützter Temperaturmessungen und Stationsdaten untersucht. Wärme- und Kälteinseln, Kaltluftentstehungsgebiete und Luftströmungen wurden detektiert und auf ihre Abhängigkeit von Topografie, Fließgewässern und Bebauung untersucht.

Die räumliche Temperaturverteilung in Bayreuth ist reproduzierbar, die größten Differenzen treten am Abend auf. Anhand der Daten lässt sich Bayreuth in vier warme und fünf kalte Bereiche einteilen (Abb. 4.1). Die vier warmen Bereiche bilden die beiden durch starke Versiegelung bedingten Wärmeinseln in der Innenstadt (1) und im Gewerbegebiet Pfaffenfleck (2), sowie die wärmeren Bereiche am Eichelberg (3) und in St. Johannis (4), die durch eine Inversion bzw. das Durchmischungsphänomen eines Urban Plume bedingt sind. Strömungsbedingt kalte Bereiche sind das Gebiet Uni-Birken (1), das von der Kaltluft aus Süden vom Sophienberg gekühlt wird, und das Gebiet Mistel (2) mit einer Kaltluftströmung flussabwärts aus Osten. Entlang des westlichen Roten Mains (3) sind die Temperaturen aufgrund des Fließgewässers und der fehlenden Bebauung niedriger. In der Wilhelminenaue (4) und im Tal St. Johannis (5) bilden sich Kaltluftseen, die vom Stauwehr der Wilhelminenaue bzw. der A9 abgeriegelt werden. Kaltluftentstehungsgebiete sind der Eichelberg (3), das Gebiet um den Kaltluftsee Tal St. Johannis (5) und die Wilhelminenaue (4), die als Kältepol Bayreuths bezeichnet werden kann. Lockere, mit Wiesen und Gärten durchsetzte Bebauung kann über Nacht gut abkühlen, innerhalb stark versiegelter Gebiete hat hohe Vegetation eine kühlende Wirkung.

Kaltluftströmungen konnten stadteinwärts entlang des Aubachs/Röhrensees, der Mistel und flussabwärts des Roten Mains nachgewiesen werden. Letztere besitzt eine geringe Mächtigkeit und hat kaum Auswirkungen auf die Umgebung. Der Annecyplatz und die A9 stellen große Hindernisse für Kaltluftströmungen dar. Ob die A9 die von Osten kommende Kaltluft auf ihrer ganzen Länge abriegelt, ist unklar. Selbst kleinere Brücken über die Flüsse behindern die Kaltluftströmung.

Freiflächen und Wasserläufe sollten unbebaut bleiben, eine Nachverdichtung der Bebauung vermieden werden. Durch die Schaffung neuer Grünflächen bzw. Pflanzung von Bäumen innerhalb dicht bebauter Gebiete können wertvolle kühle Lokalklimate entstehen.



- Abbildung 4.1.: Einteilung der Stadt Bayreuth in warme (rot) und kalte (blau) Gebiete auf Grundlage der Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur aller Morgenfahrten von der Mitteltemperatur.
 - Warme Gebiete:
 - 1: Innenstadt (bedingt durch Bebauung)
 - 2: Pfaffenfleck (bedingt durch Bebauung)
 - 3: Eichelberg (bedingt durch Inversion bzw. Durchmischung der UBL)
 - 4: St. Johannis (bedingt durch Inversion bzw. Durchmischung der UBL) Kalte Gebiete:
 - 1: Uni-Birken (bedingt durch Kaltluftströmung)
 - 2: Mistel (bedingt durch Kaltluftströmung)
 - 3: Westl. Roter Main (bedingt durch Fließgewässer und Bebauung)
 - 4: Wilhelminenaue (bedingt durch Bebauung)
 - 5: Tal St. Johannis (bedingt durch Topografie)

Dank

Zuerst möchte ich mich bei meinem Erstbetreuer Prof. Dr. Dipl.-Geoök. Christoph K. Thomas und bei meinem Zweitbetreuer Dr. habil. Johannes Lüers für die fachliche Unterstützung und die Beantwortung vieler Fragen bedanken. Christoph Thomas sei im Speziellen für die Erstellung der Morlet-Wavelet-Diagramme gedankt. Außerdem möchte ich Isabel Spies für die Beantwortung vieler Fragen und viele Ratschläge im Bezug auf mobile Messungen und die ATMOS-Stationen bedanken, sowie für eine erste Einführung in das Projekt MiSKOR. Weiterhin möchte ich mich bei ihr und bei Dr. Wolfgang Babel für die Unterstützung in R, bei Dr. Maria Hänsel und Johannes Heisig für Anregungen bei Problemen mit räumlichen Daten in R und bei Dr. Oliver Archner für eine kurze Einführung in QGIS bedanken. Die Besorgung von Geodaten wäre ohne Dr. Brigitte John nicht möglich gewesen, ebenso wenig ohne Stephan Scholz vom Landesamt für Vermessung, Digitalisierung und Breitband in Bayreuth. Namentlich seien auch alle Fahrradfahrer erwähnt, die mit mir gemeinsam die Messroute bei Hitze und Kälte gefahren sind: allen voran Marie, gefolgt von Lena, Elena, Lio, Leyla, Vroni, Pascal, Isabel, Laura, Monika, meinem Bruder und meiner Mutter. Abschließend möchte ich noch meiner Frau für das Korrekturlesen der Arbeit und alle weitere Unterstützung danken.

Die Arbeit wurde im Rahmen des MiSKOR-Projekts im Rahmen des Verbundprojekts "Klimawandel und Gesundheit"durchgeführt und vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz und dem Bayerischen Staatsministerium für Gesundheit und Pflege finanziert.

Literatur

- Amler, Josef; Giglberger, Stephan (2017): Anleitung zum Anfängerpraktikum Seebeckeffekt. URL: http://www.physik.uni-regensburg.de/studium/praktika/b/ download/se.pdf.
- Arnfield, A. John (2003): Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. In: *International journal of climatology*.
- Bangert, Helmut; Heider, Rita (Dez. 2000): Stadtklimanalyse Bayreuth. URL: https: //www.bayreuth.de/rathaus-buergerservice/umwelt-energie/klima-wetter/ stadtklima/.
- Baumbach, Günter; Vogt, Ulrich (1999): Experimental determination of the elect of mountain-valleybreeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg. In: Atmospheric environment. URL: https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/ S1352231099001430?token=81A4A11B91FACF2160C798DCAF483A990E20E2C644A1A53 CB57E214AA15D0E68F39FEBB32E5497C07B5C1D8BAD8B2B6B.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (17. Sep. 2019): Stadt- und Gemeindetypen in Deutschland. URL: https : / / www . bbsr . bund . de / BBSR / DE / Raumbeobachtung / Raumabgrenzungen / deutschland / gemeinden / StadtGemeindetyp/StadtGemeindetyp_node.html.
- Dütemeyer, Dirk; Barlag, Andreas-Bent; Kuttler, Wilhelm; Axt-Kittner, Ulrich (28. Apr. 2014): Measures against heat stress in the city of Gelsenkirchen, Germany. In: *Die Erde*. URL: https://www.die-erde.org/index.php/die-erde/article/view/65.
- Fenner, Daniel; Mücke, Hans-Guido; Scherer, Dieter (2015): Innerstädtische Lufttemperatur als Indikator gesundheitlicher Belastungen in Großstädten am Beispiel Berlins.In: UMID: Umwelt und Mensch Informationsdienst.
- Foken, Thomas (7. Aug. 2007): Das Klima von Bayreuth. In: Zeitschrift für angewandte Geographie. URL: https://www.researchgate.net/publication/263420473_Das_ Klima_von_Bayreuth.
- (2016): Angewandte Meteorologie. Springer Spektrum.

- Gabriel, Katharina M.A.; Endlicher, Wilfried R. (2011): Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. In: *Environmental Pollution*.
- Helbig, Alfred (1999): Urban air temperature and wind field in Trier city under the influence of the valley of the Moselle River. In: *Biometeorology and urban climatology at the millennium*, S. 635-639. URL: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id= 9160.
- Hückelheim, Arne (4. Nov. 2019): Bild einer Messschaltung mit einem Thermoelement (schematisch). URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Thermoelement#/media/ Datei:Thermoschema.svg.
- Junk, Juergen (Jan. 2010): Ausgewählte meteorologische und lufthygienische Aspekte des Stadtklimas von Trier. Diss. URL: https://www.researchgate.net/publication/ 283651348_Ausgewahlte_meteorologische_und_lufthygienische_Aspekte_des_ Stadtklimas_von_Trier.
- Kuttler, Wilhelm (2009): Klimatologie. Ferdinand Schöningh, UTB, S. 193–216.
- Leconte, François; Bouyer, Julien; Claverie, Rémy; Pétrissans, Mathieu (Okt. 2014): Multiscale methods for urban air temperature analysis assisted by mobile measurements. In: *Third International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island*. URL: https://www.researchgate.net/publication/277814829_Multiscale_methods_ for_urban_air_temperature_analysis_assisted_by_mobile_measurements.
- Lehnert, Michal; Kubeček, Josef; Geletič, Jan; Jurek, Martin; Frajer, Jindřich (Dez. 2018): Identifying hot and cool spots in the city centre based on bicycle measurements: the case of Olomouc, Czech Republic. In: Geographica Pannonica. URL: https://www. researchgate.net/publication/330015273_Identifying_hot_and_cool_spots_ in_the_city_centre_based_on_bicycle_measurements_The_case_of_Olomouc_ Czech_Republic.
- Malberg, Horst (Sep. 1990): Der Einfluss einer Stadt auf die lokalen Temperatur-, Niederschlags- und SO₂-Verhältnisse am Beispiel von Berlin. In: Naturwissenschaften, S. 421–425.
- Matzarakis, Andreas; Röckle, R.; Richter, C-J; Höfl, H-C; Steinicke, Wolfgang; Streifeneder, M.; Mayer, Helmut (Aug. 2008): Planungsrelevante Bewertung des Stadtklimas - Am Beispiel von Freiburg im Breisgau. In: *Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft* 68, S. 334-340. URL: https://www.researchgate.net/publication/230754047_ Planungsrelevante_Bewertung_des_Stadtklimas_-_Am_Beispiel_von_Freiburg_ im_Breisgau.
- Meschede, Dieter (2015): Gerthsen Physik. Bd. 25. Springer Spektrum. URL: https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-662-45977-5.

- Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg (17. Sep. 2019): Städtebauliche Klimafibel Online. Hrsg. von Reuter, Dr. Ulrich; Kapp, Dipl.-Ing. Rainer; Baumüller, Prof. Dr. Jürgen; Hoffmann, Ulrich. URL: https://www.staedtebauliche-klimafibel.de.
- Ruppert, Thomas (4. Nov. 2019): Großwetterlage August 2019. URL: https://www. dwd.de/DE/leistungen/grosswetterlage/2019/gwl_august.pdf?__blob= publicationFile&v=3.
- Spies, Isabel (Juli 2019): Urban climate just warm streets and cool parks? Investigating the variabilities of heat at street-canyon and city-wide scale in Bayreuth.
- Stadt Bayreuth (17. Sep. 2019): Entwicklung der Einwohnerzahl. URL: https://www. bayreuth.de/rathaus-buergerservice/stadtverwaltung/zahlen-fakten-2/ bevoelkerung/.
- Statistisches Bundesamt (2018): Statistisches Jahrbuch. URL: https://www.destatis. de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/statistisches-jahrbuch-2018-dl.pdf?__ blob=publicationFile.
- Thomas, Christoph K. (Apr. 2018a): Lehrveranstaltung Meteorologie.
- (Okt. 2018b): Lehrveranstaltung Umweltmesstechnik.
- (25. Okt. 2019): StadtKlimaWandel in Bayreuth Vortrag auf Einladung des CSU-Ortsverbandes Bayreuth-Ost.
- Thomas, Christoph K.; Foken, Thomas (27. Okt. 2003): Detection of long-term coherent exchange over Spruce Forest using wavelet analysis. In: Theoretical and Applied Climatology. URL: https://www.researchgate.net/publication/225491436_ Detection_of_long-term_coherent_exchange_over_Spruce_Forest_using_ wavelet_analysis.
- Thomas, Christoph K.; Samimi, Cyrus (30. Jan. 2018): Antrag für das bayerische Verbundprojekt Klimawandel und Gesundheit.
- Thomas, Christoph K.; Smoot, Alexander R. (24. Okt. 2012): An Effective, Economic, Aspirated Radiation Shield for Air Temperature Observations and Its Spatial Gradients. In: Journal of atmospheric and oceanic technology.
- Vogt, Ulrich; Baumbach, G.; Glaser, K.; Rühling, A. (1999): Determination of cold air drainage flows and the vertical distribution of air pollutants in Stuttgart. In: *Biometeo*rology and urban climatology at the turn of the millennium, S. 613-618. URL: https: //library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9160.
- Weber, Stephan; Kuttler, Wilhelm (2003): Analyse der nächtlichen Kaltluftdynamik und –qualität einer stadtklimarelevanten Luftleitbahn. In: *Gefahrstoffe, Reinhaltung der*

Luft 63.9, S. 381-386. URL: https://bibliographie.ub.uni-due.de/servlets/ DozBibEntryServlet?id=ubo_mods_00013997&lang=en.

www.gisgeography.com (1. Nov. 2019): Inverse Distance Weighting (IDW) Interpolation. URL: https://gisgeography.com/inverse-distance-weighting-idwinterpolation/.

A. Anhang

Tabelle A.1.: Großwetterlagen im August 2019 (Ruppert, 2019)

GWL 2019	GWL nach Hess & Brezowsky	Kurzbeschreibung
Donnerstag, den 01. August	HNFz	Am Rande des Nordmeer,- Skandinavienhochs gibt es in Deutschland weitere Schauer und Gewitter.
Freitag, den 02. August	HNz	Das Hoch über dem Nordmeer bleibt noch einige Tage als markantes Druckgebilde über Europa
Samstag, den 03. August	HNz	wetterbestimmend. Am Ende des klassifizierten Zeitraums verlagert es sich nach Grönland. Deutschland
Sonntag, den 04. August	HNz	wird zeitweise von teils kräftigen konvektiven Ereignissen erfasst.
Montag, den 05. August	Wz	Durch die Ausweitung eines markanten Troges vom nahen Nordostatlantik zu den Britischen Inseln und
Dienstag, den 06. August	Wz	die Nordsee stellt sich in Europa eine hochreichende westliche Strömung ein. Einzelne Frontenzüge
Mittwoch, den 07. August	Wz	erreichen auch Deutschland mit feuchter Meeresluft und zeitweiligem Regen.
Donnerstag, den 08. August	SWz	Die Frontalzone verläuft vom Seegebiet der Azoren und Nordspanien über die Biskaya und
Freitag, den 09. August	SWz	Nordfrankreich bis nach Deutschland und Polen. In der resultierenden südwestlichen Strömung wird
Samstag, den 10. August	SWz	warme Meeresluft nach Mitteleuropa transportiert. Mitgeführte Frontenzüge bringen etwas Regen.
Sonntag, den 11. August	TrW	Ein Langwellentrog über dem östlichen Nordatlantik weitet sich unter Vergrößerung seiner Amplitude
Montag, den 12. August	TrW	Richtung Westeuropa aus. Mitteleuropa gelangt daher auf die Vorderseite desselben in den Zustrom
Dienstag, den 13. August	TrW	warmer Mittelmeerluft. Zeitweise treten Schauer, lokal teils auch schwere Gewitter auf.
Mittwoch, den 14. August	Wz	Die Frontalzone verläuft von Neufundland über den mittleren Nordatlantik und die Britischen Inseln bis in
Donnerstag, den 15. August	Wz	den Süden Skandinaviens. In der resultierenden westlichen Strömung werden Tiefausläufer bis na
Freitag, den 16. August	Wz	Deutschland geführt. Die Zufuhr mäßig warmer Meeresluft setzt sich fort.
Samstag, den 17. August	SWz	Zwischen hohem Luftdruck über der Ukraine mit einem zum Mittelmeer gerichteten Keil sowie tiefem
Sonntag, den 18. August	SWz	Druck über dem mittleren Nordatlantik bis Irland verläuft die nordostwärts ausgerichtete Frontalzone
Montag, den 19. August	SWz	vom Seegebiet nördlich der Azoren über den Ärmelkanal bis nach Skandinavien. In der Strömung
Dienstag, den 20. August	SWz	mitgeführte Frontenzüge beeinflussen Mitteleuropa mit zeitweiligen Regenfällen nachhaltig.
Mittwoch, den 21. August	BM	Der Keil des Azorenhochs weitet sich allmählich über Frankreich bis nach Deutschland und im weiteren
Donnerstag, den 22. August	BM	Verlauf bis nach Polen bzw. die Ukraine hin aus. Über Osteuropa kristallisiert sich dann allmählich eine
Freitag, den 23. August	BM	eigenständige Hochdruckzelle heraus. Dafür wird der Hochdruckeinfluss über Westeuropa allmählich
Samstag, den 24. August	BM	schwächer. Niederschläge erreichen Deutschland kaum.
Sonntag, den 25. August	SEa	Ein Hochdruckgebiet über Osteuropa und Russland wird von einem Höhenhoch über der Ukraine und
Montag, den 26. August	SEa	dem Schwarzen Meer gestützt. Auch reicht ein Keil dessen bis nach Mitteleuropa. Im Südosten
Dienstag, den 27. August	SEa	Deutschlands entstehen in der warmen südöstlichen Strömung nur lokale konvektive Umlagerungen.
Mittwoch, den 28. August	BM	Zwischen einem nordöstlich verschobenen Azorenhoch und einem weiterhin noch kräftigen
Donnerstag, den 29. August	BM	osteuropäischen Hochdruckgebiet besteht über Mitteleuropa hinweg eine brückenförmige Verbindung. In
Freitag, den 30. August	BM	der nördlich der Brücke verlaufenden Frontalzone schwenken Einzelstörungen langsam ostwärts. Sie
Samstag, den 31. August	BM	beeinflussen vornehmlich den nordlichen Teil Europas mit ihren Frontenzügen.

GWL-Tabelle

Seite: 5

Deutscher Wetterdienst Bearbeiter: Dipl.-Met. Thomas Ruppert

Tabelle A.2.: Beschreibung der Großwetterlagen (Ruppert, 2019)

Legende zur Großwetterlagen-Tabelle						
Nummer	Abkürzung	Farbe				
1	Wa	Westlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Hellgrün			
2	Wz	Westlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Grelles Grün			
3	WS	Südliche Westlage	Meeresgrün			
4	WW	Winkelförmige Westlage	Grün			
5	SWa	Südwestlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Hellorange			
6	SWz	Südwestlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Orange			
7	NWa	Nordwestlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Türkis			
8	NWz	Nordwestlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Blaugrün			
9	НМ	Hoch Mitteleuropa	Weiß			
10	BM	Hochdruckbrücke Mitteleuropa	Hellgrau 25%			
11	ТМ	Tief Mitteleuropa	Grau 50%			
12	Na	Nordlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal Blassblau				
13	Nz	Nordlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Blau			
14	HNa	Hoch Nordmeer-Island, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Himmelblau			
15	HNz	Hoch Nordmeer-Island, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Blaugrau			
16	HB	Hoch Britische Inseln	Helltürkis			
17	TrM	M Trog Mitteleuropa Dunkelgrau				
18 NEa Nordostlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal Lavenr			Lavendel			
19	NEz	Nordostlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Pflaume			
20	HFa	Hoch Fennoskandien, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal	Hellrosa			
21	HFz	Hoch Fennoskandien, Mitteleuropa überwiegend zyklonal	Rosa			
22 HNFa Hoch Nordmeer-Fennoskandien, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal Hellgelb						
23 HNFz Hoch Nordmeer-Fennoskandien, Mitteleuropa überwiegend zuklonal Dunk			Dunkelgelb			
24 SEa Südostlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal Gelb						
25 SEz Südostlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal Gold						
26 Sa Südlage, Mitteleuropa überwiegend antizyklonal Gelbbrau						
27	Sz	Südlage, Mitteleuropa überwiegend zyklonal Rot				
28	ТВ	Tief Britische Inseln Braun				
29	TrW	Trog Westeuropa	Dunkelrot			
30	Ü	Übergangslage / Unbestimmt	Grau 40%			

GWL-Tabelle

Deutscher Wetterdienst

Tabelle A.3.: Liste aller Fahrten. Die von der Analyse ausgeschlossenen Fahrten sind in grauer Schrift dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der Wetterlagen (Ruppert, 2019) befindet sich in den Tabellen A.1 und A.2.

#	Datum	Zyklus	Tageszeit	Uhrzeit	2. Fahrer	Wetterlage	Besondere Vorkommnisse
							- Vergleichsfahrt, beide Fahrer zur gleichen Zeit
	00.00	1	N	17:20	ја	SWz	- späte Fahrzeit aufgrund von Messgerätkomplikationen
T	09.08.	1	Nachmittag	17:30			- Stecker des Sensors löste sich bei einem Fahrer
							- ein paar wenige Tropfen Regen
2	10.08.	2	Nachmittag	16:30	nein	SWz	bedeckter Himmel
3	10.08.	2	Abend	20:45	ja	SWz	
4	11.08.	2	Morgen	04:30	ja	TrW	 Nebel bei Holzbrücke im Flussbett, langsam flussabwärts fließend ab Wilhelminenaue bzw. St. Johannis plötzlich merklich warmer Wind Nebel zieht abwärts des Rotmaintals am Sophienberg vorbei Richtung Stadt, dort Auflösung. Selbiger Nebel wurde bei Neuhof bei Creußen gesichtet. Im Stadtteil Birken ist der sich auflösende Nebel als diffuse "Wolkenwand" sichtbar.
5	11.08.	3	Nachmittag	16:00	ja	TrW	
6	21.08.	4	Nachmittag	16:00	ja	BM	
7	21.08.	4	Abend	20:15	ja	BM	
8	22.08.	4	Morgen	04:30	ja	BM	
9	22.08.	5	Nachmittag	15:30	ja	BM	
10	22.08.	5	Abend	20:15	ja	BM	kurzzeitig falsche Strecke in der Wilhelminenaue
11	23.08.	5	Morgen	04:30	ja	BM	1. Fahrer hat sich nach Wilhelminenaue verfahren
12	23.08.	6	Nachmittag	15:30	ja	BM	
13	23.08.	6	Abend	20:15	ja	BM	
14	24.08.	6	Morgen	04:30	ja	BM	
15	24.08.	7	Nachmittag	16:00	ja	BM	
16	24.08.	7	Abend	20:15	ја	BM	
17	25.08.	7	Morgen	04:30	ja	SEa	Mitfahrerin hat sich kurzzeitig verfahren
18	25.08.	8	Nachmittag	15:30	ja	SEa	wenige Tropfen Regen
19	25.08.	8	Abend	20:15	ja	SEa	
20	26.08.	8	Morgen	04:30	ja	SEa	
21	26.08.	9	Abend	20:15	ja	SEa	



Abbildung A.1.: Abweichung der Temperatur aller Nachmittagsfahrten von der jeweiligen Mitteltemperatur. Die durchschnittliche Abweichung ist als schwarze Linie dargestellt.



Abbildung A.2.: Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur der Nachmittagsfahrten von der Mitteltemperatur



Abbildung A.3.: Abweichung der Temperatur der Abendfahrten von der jeweiligen Mitteltemperatur. Die durchschnittliche Abweichung ist als schwarze Linie dargestellt.



Abbildung A.4.: Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur der Abendfahrten von der Mitteltemperatur.



Abbildung A.5.: Abweichung der Temperatur der Morgenfahrten von der jeweiligen Mitteltemperatur. Die durchschnittliche Abweichung ist als schwarze Linie dargestellt.



Abbildung A.6.: Karte der durchschnittlichen Abweichung der Temperatur der Morgenfahrten von der Mitteltemperatur.



Abbildung A.7.: Windrose der Station Röhrensee, Darstellung der Häufigkeit der Windrichtungen in Prozent



Windrose Station Mistel, 09.-11. und 21.-26.08.2019

Abbildung A.8.: Windrose der Station Mistel, Darstellung der Häufigkeit der Windrichtungen in Prozent



Windrose Station Holzbrücke, 09.-11. und 21.-26.08.2019

Abbildung A.9.: Windrose der Station Holzbrücke, Darstellung der Häufigkeit der Windrichtungen in Prozent. Während des ersten Messzeitraums vom 09. bis 11.08.2019 war die Station noch nicht installiert, daher liegen nur Daten des zweiten Messzeitraums (21. - 26.08.2019) vor.



Abbildung A.10.: Windrose der Station Pegel, Darstellung der Häufigkeit der Windrichtungen in Prozent



Abbildung A.11.: Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern der Nachmittagsfahrten. Die durchschnittliche Differenz ist als schwarze Linie dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten (ÖBG-Station in 17 m Höhe) entsprechen dem Durchschnitt über dem Zeitraum zwischen den Ankunftszeiten der beiden Fahrer an der Stelle s.



Abbildung A.12.: Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern der Abendfahrten. Die durchschnittliche Differenz ist als schwarze Linie dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten (ÖBG-Station in 17 m Höhe) entsprechen dem Durchschnitt über dem Zeitraum zwischen den Ankunftszeiten der beiden Fahrer an der Stelle s.



Abbildung A.13.: Temperaturdifferenz zwischen den Fahrern der Morgenfahrten. Die durchschnittliche Differenz ist als schwarze Linie dargestellt. Die Windgeschwindigkeiten (ÖBG-Station in 17 m Höhe) entsprechen dem Durchschnitt über dem Zeitraum zwischen den Ankunftszeiten der beiden Fahrer an der Stelle s.