# Schlussbericht zum Forschungsvorhaben

# Minderung Städtischer Klima- und OzonRisiken (MiSKOR)







und durch

Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege



## **Schlussbericht**

Projektname: Minderung Städtischer Klima- und OzonRisiken

Akronym: MiSKOR

**Aktenzeichen:** 71a-U8729-2015/57-324; LGL-Projektnummer: 18-17

**Projektlaufzeit:** 01.04.2018 – 31.12.2020

**Projektleitung:** Prof. Dr. Christoph Thomas

Universität Bayreuth, Mikrometeorologie

**Projektantragsteller:** Prof. Dr. Christoph Thomas<sup>1</sup>, Prof. Dr. Cyrus Samimi<sup>2</sup>

Universität Bayreuth: <sup>1</sup>Mikrometeorologie, <sup>2</sup>Kimatologie

**Projektmitarbeiter:** Dr. habil. Johannes Lüers (Mikrometeorologie)

Erstautor Klima-Teil

Dr. Seyed Omid Nabavi, Prof. C. Samimi (Klimatologie)

Erstautoren Ozon-Teil

**Projektpartner:** Prof. Dr. Anke Nölscher (Univ. Bayreuth Atmosphärische Chemie)

Prof. Dr. Andreas Held (TU Berlin Umweltchemie u. Luftreinhaltung)

Bearbeitungsstand: 20.08.2021

# Inhalt

1	Zusammenfassung	1
2	Hintergrund und Zielsetzung	1
3	Methoden	4
3.1	Klimateil Stadt Bayreuth	4
3.1.1	Mikrometeorologisches Monitoringnetzwerk Stadt Bayreuth	4
3.1.2	Mobile fahrradgetragene Messungen	6
3.1.3	Computersimulationen PALM-4U zum räumlichen und zeitlichen	
	Verhalten des Stadtklimas	
3.2	Ozonteil	8
3.2.1	Auswertung des Zusammenhangs meteorologischer Größen mit der	•
2 2 2	Bildung bodennahen Ozons	9
3.2.2	Trends der Ozonkonzentration in Nordbayern und Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Grenzwerten	10
3.2.3	Mobile Messfahrten zur Quantifizierung und Differenzierung der	10
0.2.0	Ozonbelastung in Bayreuth	11
3.2.4	Modellierung der Projektion der Ozonproduktion und der Veränderung	
	der Ozonbelastung für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5	
		14
4	Ergebnisse	16
4.1	Klimateil	
4.1.1	Räumliche und zeitliche Unterschiede des Bioklimas in Bayreuth	
	(Urbane Wärmeinsel)	16
4.1.2	Großwetterlagen Mitteleuropas als Wetterantrieb für Nordbayern und ihr	
	Einfluss auf Bayreuth	
4.1.3	Nordbayern - Urbane Wärmeinseln mittelgroßer Städte	
4.1.4	Computermodellierung PALM-4U Stadt Bayreuth	
4.1.5	Zeitlich begrenzte mobile Temperaturmessungen	
4.2	Ozon	36
4.2.1	Zusammenhang meteorologischer Größen und der Bildung bodennahen	00
4.2.2	OzonsTrends der Ozonkonzentration in Nordbayern und Überschreitungs-	36
4.2.2	wahrscheinlichkeiten von Grenzwerten	30
4.2.3	Raumzeitliche Differenzierung der Ozonbelastung in Bayreuth	
4.2.4	Modellierung der Projektion der Ozonproduktion und der Veränderung	
	der Ozonbelastung für die Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5	46
4.3	Synthese Klima und Ozon	50
5	Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen	
5	Klimaanpassungsstrategie	50
6	Literaturverzeichnis	
7	Glossar	
8	Anhänge	62

# 1 Zusammenfassung

Das Projekt MiSKOR zeigt den Zusammenhang städtischer Klima- und Ozonrisiken auf, um Hinweise für Minderungsstrategien zu geben. Der Fokus liegt dabei auf mittelgroßen Städten in Nordbayern, wobei Bayreuth als Modellstadt dient. Mittelgroße Städte sind für die Fragestellung von Bedeutung, weil die meisten stadtklimatischen Untersuchungen sich mit großen Ballungsräumen beschäftigen und auch Probleme der Luftqualität häufig für diese diskutiert werden. Auch in jüngerer Zeit hat sich dieser Fokus kaum verändert. In mittelgroßen Städten zwischen 10.000 und 100.000 Einwohnern jedoch lebt in Deutschland ein beträchtlicher Teil, rund 42 %, der Bevölkerung und im Gegensatz zu Großstädten lassen sich offensichtlicher Weise stadtplanerische Veränderungen leichter verwirklichen.

Im Projekt ist es das Ziel, den Stadtklimaeffekt und den Zusammenhang zur Ozonbelastung raumzeitlich zu quantifizieren und insbesondere die innerstädtische Differenzierung aufzuzeigen. Zu diesem Zweck wurden für zwei Jahre umfangreiche Messkampagnen zum Stadtklima und zur Ozon- bzw. Stickstoffoxidbelastung durchgeführt. Für beide Aspekte wurden auch historische Veränderungen berücksichtigt. Flankiert wurden die Messungen von Modellierungsansätzen und die Berechnung von Szenarien, um die zukünftige Entwicklung durch den globalen Klimawandel abzuschätzen.

Für Bayreuth konnte der innerstädtische Überwärmungseffekt und die damit verbundene Hitzebelastung im Sommer zweifelsfrei und erstmalig auch kleinräumlich differenziert belegt werden. Die Überwärmung beträgt bis zu 4 °C, wodurch im Sommer innerstädtische Temperaturen im Schatten von > 40 °C auftreten können. Durch den Klimawandel ist mit einer weiteren Verschärfung zu rechnen. Unsere Untersuchungen zeigen aber auch, wie der Überwärmungseffekt innerstädtisch durch Veränderung der Nutzungsstruktur (z.B. Begrünung) gemindert werden kann. Für die Ozonbelastung zeigen sich insgesamt steigende Tendenzen in Nordbayern. Auch für die Ozonbelastung kann eindeutig eine räumliche Differenzierung in Abhängigkeit der Stadtstruktur (z.B. Emissionen aus Verkehr) festgestellt werden, wobei gesetzliche Grenzwerte für die Ozonbelastung in Bayreuth selten erreicht werden. Durch die Verknüpfung der meteorologischen Messungen mit denen der Ozonkonzentration konnte klar gezeigt werden, dass hohe Temperaturen höhere Ozonbildungsraten bedingen, was die Bedeutung der städtischen Überwärmung auch in diesem Kontext offenlegt. Die Abschätzung der zukünftigen Ozonbelastung lässt für die Klimaszenarien RCP2.6 und 4.5 kaum eine Veränderung erwarten. Erst für das RCP8.5 ist mit einer deutlich höheren Ozonkonzentration bis zum Ende des Jahrhunderts zu rechnen. Der Stadtklimaeffekt modifiziert diese Abschätzung möglicherweise lokal.

Die Ergebnisse aus MiSKOR machen deutlich, dass die Effekte der Hitze- und der Ozonbelastung auch in mittelgroßen Städten in der Klimaanpassungsstrategie des Freistaates Bayern berücksichtigt werden müssen.

# 2 Hintergrund und Zielsetzung

Städte sind ein wesentlicher Bestandteil unserer Gesellschaft. Neben unzähligen positiven Funktionen haben städtische Regionen auch eine Vielzahl direkter negativer Auswirkungen auf die Bewohner, sowie auf die Umwelt der städtischen und der angrenzenden (ländlichen) Gebiete. Die hohe Dichte der aufgebauten Infrastruktur und deren Nutzung führt zu Veränderungen der Energie- und Stoffkreisläufe und verursachen ein übergeordnetes Mesoklima, das durch heterogene Mikroklimate in sich gegliedert ist. Dadurch kommt es in Städten zu Auswirkungen auf die

Gesundheit der Menschen, Pflanzen, Tiere und die Infrastruktur, der sich durch die Heterogenität des Mikroklimas innerhalb der Stadt unterschiedlich stark manifestiert.

Der städtische Wärmeeffekt (Urban Heat Island, UHI) beschreibt die Veränderung vieler meteorologischer Größen im Vergleich zum Umland, was bereits erste Untersuchungen zum Stadtklima in der Mitte des 19. Jahrhundert zeigen (Kratzer 1935). Vertieft wurde das Thema dann hauptsächlich von Oke (1974, 1976, 1982), gefolgt von Grimmond & Oke (1999a, b) und Arnfield (2003) und Stewart (2011). Der Unterschied der Lufttemperatur kann im Vergleich zur unbebauten Umgebung bis zu mehrere Grad Celsius betragen und ist der deutlichste Ausdruck der Wärmeinsel. Untersuchungen zur Luftverschmutzung in Städten reichen ebenfalls weit zurück und umfassen dabei auch schon früh die Luftbelastung mit Ozon (Haagen-Smit 1952, Layne 1955).

Die Intensität der UHI wird verkürzt als Temperaturunterschied zwischen einem städtischen und einem ländlichen Ort definiert, wobei die städtische Temperatur an der wärmsten Stelle innerhalb der Stadt ermittelt werden sollte. Das Umland dient als Referenz und sollte unter Berücksichtigung der Bevölkerungs- und Infrastrukturdichte ausgewählt werden (Peterson & Owen 2005, Stewart 2011). Es ist allerdings oft schwierig, funktionsfähige städtische oder ländliche Messstellen in einem angemessenen Abstand zueinander zu finden. Es ist zudem offensichtlich, dass nicht nur ein überhitztes Stadtgebiet bzw. ein schadstoffbelastetes Stadtviertel existiert, sondern Städte in ihrer Bebauungs- und Nutzungsstruktur sehr heterogen sind und ständigen Veränderungen unterliegen. Neben stark überhitzten Stadtteilen gibt es Räume mit merklich kälteren Temperaturen, oft in enger Nachbarschaft. Die Hauptursache für die geringeren Temperaturen ist das Vorhandensein von Vegetation oder offenem Wasser. Die Assoziation zu Stadtparks ist offensichtlich und daher sprechen u.a. Spronken-Smith & Oke (1998) von sogenannten "Park Cool Island" (PCI). Neben der räumlichen Heterogenität ist zudem davon auszugehen, dass Wetterlagen saisonal unterschiedliche bioklimatische Einflüsse haben und diese in Wechselwirkung mit der Stadtstruktur stehen. Folglich ist nicht nur der mesoskalige Unterschied zwischen Stadt und Land von Bedeutung, sondern auch die kleinräumigen Unterschiede innerhalb der Stadt (Schmid & Oke 1992, Arnfield 2003, Rizwan et al. 2008, Franck et al. 2013, Georgescu et al. 2014).

Darüber hinaus haben bereits zahlreiche Studien gezeigt, dass sich die Heterogenität der bebauten städtischen Infrastruktur auch auf alle anderen biometeorologischen Faktoren auswirkt (u.a. Terjung & Louie 1974, Terjung & O'Rourke 1980, Peterson & Stoffel 1980, Kidder & Essenwanger 1995, Taha 1997, Ichinose et al. 1999, Parlow et al. 2014, Jaenicke et al. 2015, Lietzke et al. 2015, Ulpiani 2020). Einflüsse gibt es auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft (Schwüle, Verdunstung), auf den Luftstrom und die turbulente Luftdurchmischung (Verteilung von Wärme, Feuchtigkeit, Frischluft, Luftschadstoffen), das Strahlungsbudget (Erwärmung, Abkühlung) und die Immission von primären und sekundären Luftschadstoffen (Atemwegserkrankungen).

Neben der städtischen Überwärmung wurden schädliche Luftverschmutzungen als weiteres Risiko in Städten identifiziert. Dies führte zum Konzept der Urban Pollution Islands (UPI), um die signifikanten, negativen Folgen für die menschliche Gesundheit zu verdeutlichen (z.B. Walcek & Yuan 1995, Olszyna et al. 1997, Silva et al. 2017, Steul et al. 2018, Ulpiani 2020). Hier gilt vor allem das sekundär gebildete Ozon als Leitgas für Einstufungen der Luftqualität. Die raumzeitliche Verteilung ist dabei eng mit stadtklimatischen Bedingungen verknüpft (Bloomer et al. 2009). In Großstädten (ab 100.000 Einwohner) sind bis zu 5 % aller Todesfälle direkt oder indirekt auf die städtische Überhitzung zurückzuführen (Basu & Samet 2002, Della-Marta et al. 2007, Gabriel & Endlicher 2011, Morabito et al. 2012, Scherer et al. 2013, Buchin et al. 2016). Zusätzlich wird geschätzt, dass bodennahes Ozon in der Außenluft im Jahre 2015 weltweit 254.000 Todesfälle verursachte (Fleming et al. 2018).

Durch den Klimawandel verschärft sich der Überwärmungseffekt in Städten (Fallmann et al. 2017, Bastin et al. 2019). Vor allem zunehmend extremere Wetterbedingungen verstärken bereits bestehende bioklimatische Belastungen mit einer Erhöhung der Stress- und Gesundheitsrisiken. Durch die Verknüpfung klimatischer Effekte mit Luftschadstoffen ist auch hier mit Veränderungen zu rechnen (Cohen et al. 2017, Silva et al. 2017). Chen et al. (2018) rechnen in China beispielsweise mit einer Zunahme der von Ozon verursachten Mortalität um 10,7% für 2053-2055 im Vergleich zu 2013-2015 für das RCP8.5 Szenario (DWD o.J.).

Die grundlegenden Prozesse des Stadtklimas sind bekannt, aber ihre Bewertung und Vorhersage, insbesondere für Anwendungen in der Stadtplanung, sind aufgrund der kleinräumig variablen Effektwirkung und der hohen aerodynamischen Rauigkeit der Städte schwierig. Hierzu finden auch erst in jüngerer Zeit detaillierte Untersuchungen statt (Mahrt et al. 2009, Pfister et al. 2017). Zudem lag der Forschungsschwerpunkt zumeist auf den großen Ballungsräumen, mit sehr hohem Verkehrsaufkommen inklusive großer Pendlerbewegung, sowie industriell und gewerblich bedingten Emissionen. Nur wenig ist über das Ausmaß des urbanen Effekts in mittelgroßen städtischen Gebieten bekannt.

Im MiSKOR-Projekt wird daher die Aufmerksamkeit auf die Variation des Mikroklimas und der Ozonbelastung in mittelgroßen Städten insbesondere am Beispiel der Modellwerkstatt Bayreuth gelenkt, um zu zeigen, dass urbane Effekte (UHI, PCI oder UPI) nicht nur Großstädte, sondern auch mittelgroßer Städte betrifft. Da die Risikofaktoren bioklimatischer Stress und Ozonbelastung gekoppelt sind, ist eine gemeinsame Betrachtung beider städtischer Phänomene notwendig und stellt daher den Grundansatz zur Forschung in MiSKOR.

**Unser Ziel** ist ein besseres Ursachenverständnis der relevanten biophysikalischen Prozesse und Mechanismen, um die Interaktion des urbanen Wärmeeffekts und dessen Verbindung mit troposphärischen Ozonkonzentrationen besser zu verstehen. Dieses Verständnis soll die Basis für Planungshilfen in der Praxis sein.

**Unsere Absicht** ist die Erarbeitung von Empfehlungen um die negativen Folgen des Klimawandels auf menschliches Leben, die in Kombination mit derzeitiger und künftiger Belastung durch Hitze und Schadstoffe im städtischen Umfeld stehen, abzumildern und somit die Gesundheit der Einwohner Bayerns zu verbessern bzw. das Schadensrisiko zu verringern.

**Unser Ansatz** bezieht sich bewusst auf kleinere und mittelgroße Städte in Nordbayern insbesondere Bayreuth, da hier größere Handlungsspielräume vorhanden sind, sowohl bezüglich der messtechnischen Erfassung und Computersimulation eines kompletten Stadtgebietes als auch für die zügige stadtplanerische Umsetzung möglicher Minderungsmaßnahmen.

**Wir wollen zeigen,** dass kleinere und mittelgroße Städte ähnliche bioklimatische Stressoren und Folgen der Luftverschmutzung wie große Metropolen aufweisen.

Diese Ziele wurden durch eine Kombination von drei Maßnahmen erreicht:

- 1) Aufbau und Betrieb eines Messnetzes mit 15 vollautomatischen Mikrowetterstationen und Ozonreferenzmessung zur dauerhaften, kontinuierlichen und standardisierten Registrierung des Wetters und der Ozonkonzentration im Stadtgebiet Bayreuths, mit einer zeitlich hohen Auflösung der meteorologischen Zustandsgrößen, sowie die statistische Auswertung vorhandener meteorologischer und luftchemischer Datenreihen inklusive des Ozons in städtischen Regionen Nordbayerns.
- 2) Hochauflösende mobile Messungen von biometeorologischen Elementen (z.B. Strahlungstemperatur, Windströmung), sowie von Ozon und NOx entlang relevanter Routen im Stadtgebiet im Rahmen zeitlich begrenzter Prozessstudien an gewählten Brennpunkten.

3) Numerische strömungsauflösende Computermodellierung von turbulenter Luftbewegung, Wärmeeffekten und Ozonbildungspotential in urbanen Gebieten, Simulationen von möglichen Planungsvorhaben, bzw. Simulationen unter bestimmten Witterungslagen und Simulationen für mögliche künftige Klimaszenarien (Ozon), die durch die Messungen gestützt sind.

# 3 Methoden

# 3.1 Klimateil Stadt Bayreuth

### 3.1.1 Mikrometeorologisches Monitoringnetzwerk Stadt Bayreuth

Meilensteine Klima: M4 experimentelle Erfassung & M1 statistische Auswertung und weiterführend M6, M7 (Modellierung) und M8 (Abschätzung)

Ein wichtiger Bestandteil von MiSKOR ist das in Bayern einzigartige **mikroklimatische Mess-netzwerk im Stadtgebiet von Bayreuth** (Abbildung 1). Dieses Messnetzwerk dient a) der Erfassung der kleinräumigen Unterschiede des städtischen Mikroklimas (Luftschadstoffbelastung, Sonnenstrahlung, Lufttemperatur und -feuchte, Niederschlag, Luftdruck, Windrichtung und -geschwindigkeit, Blitzanzahl und Blitzentfernung), b) der Bestimmung der bioklimatischen Stressoren (Hitze, Kälte, Schwüle, Windchill, Sonnenstrahlung, Schadstoffbelastung) und c) als Grundlage für die Stadtklimasimulationen. Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- 1) Wie hoch ist die räumliche Variabilität des Mikroklimas im Stadtgebiet in Abhängigkeit der Jahreszeiten und Großwetterlagen? (Meilenstein M1 und M4)
- 2) Welche physikalischen Prozesse und mechanistischen Modelle erklären den urbanen Effekt und den Luftaustausch über und in Bayreuth? (Meilenstein M1/M4 und M6/M7)
- 3) Wie groß ist der Effekt von Stadtgrün und Frischluftschneisen auf die UHI, und lassen sich Empfehlungen für minimale Parzellengrößen zur Minderung der Gesundheitsbelastung aufstellen? (Meilenstein M8 basierend auf M1/M4, M6/M7)

Zur Bearbeitung der Fragestellung wurden im Sommer 2018 in jeweils 6 durch Wärme belasteten, dichtbebauten Stadtregionen (Standorte 1, 2, 3, 4, 6, 12) und an kühleren Standorten (Standorte 5, 7, 8, 9, 10, 11) moderne Mikrowetterstationen aufgebaut und in Betrieb genommen. Die All-in-One-Wetterstationen (ATMOS-41, Metergroup U.S.A.) vereinen 12 Wettersensoren in einem einzigen, kompakten Gerät für atmosphärische Bedingungen in rauen Klimazonen (keine beweglichen Teile). Die Daten werden als 5-Minuten Statistiken in Naheechtzeit mit einem Mobilfunkmodul an einen Datenserver übertragen. Die meisten Geräte wurden an Pfosten von Straßenlaternen montiert, an Gittertürmen (Nr. 8, 14 & 15) oder Gebäudestruktur (Nr. 2 & 12). Die Messhöhe (mit Ausnahme Nr. 12 in 20 m über Straßenniveau) wurde auf 3,5 m über Grund festgelegt.

Zur messtechnischen Prüfung der Wetterstationen haben Thomas et al. (2019) eine Feldbewertung der Geräte durchgeführt und Korrekturfunktionen bestimmt. Diese Ergebnisse führten zur Verbesserung der Instrumente durch den Hersteller. Im Vorfeld der Installation des MiSKOR-Messnetzes im Juli 2018 wurde ein Nebeneinander-Vergleich aller Stationen über 17 Tage durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr zufriedenstellend, da mittlere durchschnittliche Abweichungen von z.B. 0,1 K bezüglich Lufttemperatur bzw. 0,06 m s<sup>-1</sup> bezüglich Windgeschwindigkeit ermittelt wurden. Die Messdaten des Netzwerkes werden seit Anfang September 2018 aufgezeichnet und sind über die Webseite (www.bayceer.uni-bayreuth.de/miskor) nach interner automatischer Prüfung verfügbar. Der hier untersuchte Zeitraum umfasst Messungen vom 01. Sep. 2018 bis 30. Sep. 2020.

Die Standorte (Abbildung 1 und Tabelle 1) wurden ausgewählt, um gezielt maximale Unterschiede in Stadtgebieten mit unterschiedlicher Versiegelungsdichte, Gebäudehöhe, Nähe zu den Hauptverkehrsachsen, Grün-, Park- oder Wasserflächen zu finden. Grünflächen sind Hofgarten (Nr. 9), Naherholungsgebiete am Röhrensee (Nr. 11) und Wilhelminenaue (Nr. 10), Gewässerufer am Mainzulauf der Mistel (Nr. 8) und Pegelhaus im Flusslauf Roter-Main (Nr. 7). Altstadt (Nr. 4), Birken (Nr. 5) und St. Georgen (Nr. 3) liegen in typischen, lockerer bebauten Wohn-/Gartengebieten mittelgroßer Städte. Der Standort Spinnerei (Nr. 6) ist ein typisch versiegeltes Gewerbeund Einkaufsgebiet. Die Standorte im Stadtzentrum (Markt Nr. 1, Kämmereigasse Nr. 2 und Dachterrasse Karstadt Nr. 12) sind hochversiegelte Wohn- und Gewerbegebiete (Detailinfos Tabelle 1 und unter www.bayceer.uni-bayreuth.de/miskor > Messnetz-Stationsinfos).

Im Rahmen wissenschaftlicher Abschlussarbeiten wurde das Messnetz Ende August 2019 um drei Messstationen erweitert: Holzbrücke (Nr. 13) direkt in 3,5 m Höhe über dem Roten Main, sowie St. Johannis (Nr. 14) und Eichelberg (Nr. 15) östlich der eingedämmten Autobahn A9. Als Referenzmessstation (Nr. 16) dient die nach internationalen Messstandards seit 1994 von der Mikrometeorologie betrieben Klimastation im Ökologisch-Botanischen Garten der Universität Bayreuth (Lüers et al. 2014).



Abbildung 1: Messstandorte des MiSKOR-Projektes verteilt in der Stadt Bayreuth. 15 automatische, fest installierte Mikrowetterstationen (ATMOS-41, Metergroup U.S.A.) und Referenzstation im Ökologisch Botanischem Garten der Universität Bayreuth (ÖBG, seit 1994). Messbeginn der MiSKOR-Stationen Sep 2018, Messhöhe 3,5 m über Grund. Echtzeitdatenübertragung über das Mobilfunknetz.

Tabelle 1: Beschreibung der relevanten MiSKOR-Stationen. Prozentanteile der jeweiligen Landnutzung im Umkreis von 20 m zum Messpunkt, Prozentanteil Bäume an Vegetation, Entfernung (Luftlinie in m) jeweils zum Standort 01 Markt, Jahresmittel Lufttemperatur für 2019 (Messhöhe 3,5 m über Grund außer Karstadt Dach 20 m ü. G), Abweichung der Lufttemperatur in Kelvin vom Gebietsmittel (10,3 °C, Mittel aller Stationen außer Karstadt und Pegel). Sortiert von der größten positiven (wärmsten) zur größten negativen (kältesten) Abweichung vom Gebietsmittel 2019.

	Untergrund 20 m Umkreis%				Abde- ckung%	Entfernung zum	Jahresmittel 2019	Abweichung 2019 vom
	Stra- ßenbe- lag	Ge- bäude	Wasser	Vegetation	Bäume	Stadtzent- rum (Meter)	Lufttempera- tur (°C)	Gebietsmittel Temp. (K)
02 Kämmerei	20	80	0	0	0	120	11,1	+0,8
01 Markt	85	15	0	0	0	0	10,9	+0,6
03 St. Georgen	53	45	0	2	0	1670	10,7	+0,3
12 Karstadt Dach	25	75	0	0	0	63	10,6*	+0,3*
06 Spinnerei	94	1	0	5	2	870	10,5	+0,2
04 Altstadt	40	30	0	30	5	1660	10,3	±0,0
05 Birken	40	20	0	40	5	1370	10,3	±0,0
09 Hofgarten	0	0	10	70	95	680	10,2	-0,1
11 Röhrensee	0	0	30	55	85	1300	10,0	-0,4
10 Wilhelminenaue	15	0	10	75	0	1730	9,9	-0,4
08 Mistel	0	0	8	92	20	705	9,9	-0,4
16 ÖBG	0	0	2	98	20	2410	9,7	-0,6
14 St. Johannis	25	0	0	75	0	2400	**	**
15 Eichelberg	15	0	0	85	0	2460	**	**

<sup>\*\*</sup> Stationen 14 und 15 Messbeginn erst Aug 2019, \* Station 12 Messung Dachfläche ca. 20 m über Straßenniveau

Die Messdaten aller 16 Stationen wurden aufwendig auf Plausibilität und Korrektheit geprüft (inkl. standardisierter Gerätevergleiche) und einheitlich formatiert. Für die Messgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchte, Luftdruck wurden alle etwaigen Datenlücken gefüllt (Regressionsanalyse). Für die weiteren Messgrößen Wind, Niederschlag oder Globalstrahlung konnten aufgrund der hohen räumlichen Variabilität und fehlender Referenzwerte nicht alle Datenlücken geschlossen werden, betroffen sind aber meist nur wenige Stationen über kurze Zeiträume. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) stellte die Wetterlagenklassifikation für den Zeitraum 1881 bis 2020 zur Verfügung. Für den Vergleich der UHI in Nordbayern (Meilenstein M1) konnten nach Datensichtung biophysikalisch bedeutsame Stationspaare von urbanen und ländlichen Stationen in Bamberg, Weiden, Nürnberg, Schweinfurt, Ansbach, Regensburg, Schwandorf, Kulmbach, Hof und Würzburg gefunden werden.

### 3.1.2 Mobile fahrradgetragene Messungen

### Meilensteine Klima: M4 Experimentelle Erfassung der UWI im Stadtgebiet Bayreuth

Zur Unterstützung des Messnetzes (Abbildung 1) wurden kurzzeitige Prozessstudien mit räumlich und zeitlich hochauflösenden mobilen Messungen im Stadtgebiet Bayreuth durchgeführt. Das Temperaturfeld wurde in zwei fahrradgestützten Messkampagnen im Sommer 2018 (ca. 500 m lange Route rund um den Hofgarten) und im Sommer 2019 (ca. 15 km lange Route durch das gesamte Stadtgebiet) vermessen.

Ziel der ersten Fallstudie war es, die für Bewohner spürbaren Temperaturunterschiede zu quantifizieren und Messsensoren hinsichtlich ihrer Eignung für mobile Einsätze zu testen (Details in Masterarbeit Spies 2019). Dazu wurden Luft- und Oberflächentemperaturen sowie die gefühlte Temperatur bestimmt, da das menschliche Wohlbefinden nicht nur von Lufttemperatur, sondern auch von Wärmestrahlung, relativer Luftfeuchte und der örtlichen Windgeschwindigkeit abhängt. Ziel der zweiten, erweiterten Fallstudie (Bachelorarbeit Tschuschke 2019) war es, mit verbesserter Messtechnik (Kapitel4.1.5), die Temperaturverteilung detailliert auch zwischen und außerhalb

des Einflussgebietes des MiSKOR-Messnetzwerks zu erfassen. Messungen erfolgten bei autochthonen, d.h. windschwachen Wetterlagen mit wenig oder fehlender Bewölkung.

# 3.1.3 Computersimulationen PALM-4U zum räumlichen und zeitlichen Verhalten des Stadtklimas

# Meilensteine Klima: M6, Modellierung/Simulationen mithilfe numerischer Computermodelle und experimenteller Daten für Bayreuth

Der zweite MiSKOR-Baustein neben den Beobachtungen basiert auf dem Einsatz biophysikalischer Computermodellen, die auf (Super-) Rechenclustern laufen. Diese CFD-Modelle (*Computational Fluid Dynamics*, dt: Strömungsmodelle) simulieren das räumliche und zeitliche Verhalten des Stadtwetters und -klimas in sehr hoher Modellauflösung flächendeckend (z.B. Delage & Taylor 1970, Martilli & Santiago 2009, Maronga et al. 2015 & 2019, Buccolieri et al. 2020, Veena 2020 u. v. m.). Stadtklimamodelle sind besonders nützlich, um szenarienbasierte, praktische Maßnahmen durch Änderungen der städtischen Infrastruktur oder Eingabeparameter zu testen. Einer der erfolgreichsten und hier im Projekt angewendeten Modelltypen ist die Large-Eddy-Simulation LES (Maronga et al. 2015 & 2019). Diese LES-Modelle haben sich als Best-Practice-Tool für Prozesse im Sub-Grid-Maßstab (kleiner als das Modellraster) von Städten erwiesen (Yang 2014).

Beim LES-Ansatz wird die Luftbewegung der Atmosphäre im großen Maßstab (große Wirbel large eddies) direkt aus den physikalischen, thermodynamischen Formeln berechnet und nur die turbulente Strömung im kleinen Maßstab (Sub-Grid-Skala) numerisch modelliert (parametrisiert vereinfacht), aber dennoch realitätsnah dargestellt. Heute können städtische LES-Modelle im Mikromaßstab wie das für MiSKOR genutzte PALM-4U (Maronga et al. 2015 & 2019) Stadtviertel mit einem Rasterabstand von 1 m und ganze Städte auf 10 m Gitterweite simulieren. Eine genaue Beschreibung der Details der MiSKOR-Modellstruktur und des PALM-4U-Bayreuth findet sich in der Masterarbeit von Sungur (2021). Das in MiSKOR verwendete Modell gliedert sich in den eigentlichen Modellkern (Abbildung 2, dunkelblau), die zuschaltbaren Zusatzmodule (Abbildung 2, hellblau), die Eingangsdaten (Antrieb und statische topographische Daten), die Datenausgabe (Output) und die Setup-Einstellungen zur Steuerung des jeweiligen Simulationslaufs. Der Eingang statischer Daten (Landnutzungs-, Gebäude- und Topografiedaten) wurde durch das Landoberflächenmodul (LSM) vorbereitet, das Informationen über das 218 km² große MiSKOR-Gebiet beinhaltet und auf kartografischen Grundlagen des Bayerischen Amts für Digitalisierung, Breitband und Vermessung beruht. Das LSM besteht aus einem mehrschichtigen Bodenmodell zur Vorhersage der Bodentemperatur und des Feuchtigkeitsgehalts sowie einem Löser für die Energiebilanz an der Oberfläche. Für Bayreuth und Umgebung wurde eine Stammdomäne mit 20 m Auflösung festgelegt und eine untergeordnete Domäne mit 5 m Auflösung (65 km²), die nur den engeren Stadtkern abdeckt. Weiterhin wurden die Module Biometeorologie und Strahlung verwendet, um die Berechnung thermischer Indizes (Gefühlte Temperatur PERCT, universeller thermischer Klimaindex UTCI und physiologisch äquivalente Temperatur PET) zu ermöglichen.

Für Simulationsläufe werden externe, numerische atmosphärische Daten als großräumiger, mesoskaliger Antrieb in Form von Rand- und Anfangswerten für die eigentliche LES-Domäne benötigt, die vom deutschen Wettervorhersagemodell COSMO-DE2 (DWD) stammen. Die notwendige Verknüpfung zwischen COSMO und dem PALM-4U-Bayreuth erwies sich als technisch sehr herausfordernd und zeitlich aufwendig. Gleiches galt auch für die Aufbereitung der statischen Eingangsdaten von der Landnutzungs- und Gebäudeklassifizierung, die nur in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) gelöst werden konnte. Beide Aspekte führten zu einer erheblichen Zeitverzögerung.

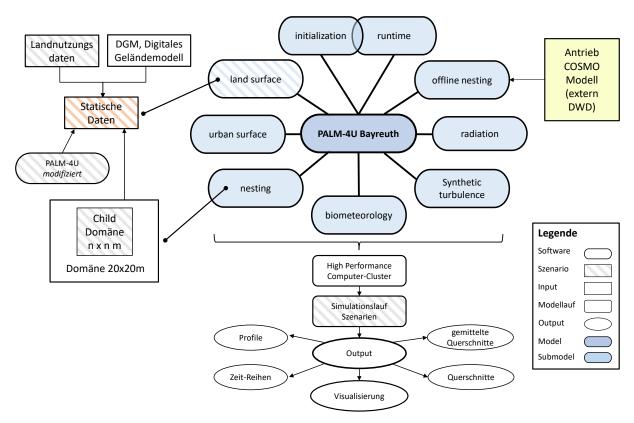


Abbildung 2: Schema der in MiSKOR verwendeten Computermodellumgebung (verändert nach Sungur 2021). Large Eddy Simulation (LES) basierend auf dem PALM-4U-Modell entwickelt von Maronga et al. 2015 & 2019 speziell zur Berechnung 3-diemsionaler Luftströmungsfelder und meteorologischer Größen für städtische Gebiete. Die schräg schraffierten Module ermöglichen über Modifizierung die Entwicklung verschiedener Szenarien.

Um mit der Simulation exemplarisch einen besonders starken Effekt der städtischen Überwärmung abzubilden, wurde die Hitzewelle im Sommer 2019 beispielhaft an zwei Tagen zwischen dem 25. und 28. Juli 2019 simuliert. Dabei führte vom 24.7. bis 26.7.2019 ein antizyklonales (Hochdruck gesteuertes) Drucksystem zur Ausbildung eines Höhenrückens über weiten Teilen Deutschlands und Fennoskandiens (HFa Wetterlage) mit extrem heißer Festlandsluft und ungestörter Sonneneinstrahlung, der die bisherigen Allzeitmaxima an vielen Wetterstationen Deutschlands überschreiten ließ.

Das LES-Computermodell PALM-4U wurde gegenüber den ursprünglich im Antrag genannten Modellen ATHAM und ENVI-met bevorzugt, da sie deterministische mikrometeorologische Modelle sind, die keine wahre Luftströmung in der Modelldomäne haben. Der derzeitige Stand der Wissenschaft verwendet i.d.R. LES-Modelle für die Simulation kleiner Modellgebiete, die die Luftströmung und damit den Wärme- und Wasserdampftransport stochastisch originär entstehen lassen. So kann der Einfluss kleiner Strömungshindernisse und Oberflächenveränderungen, wie im Rahmen von MiSKOR simuliert, realitätsnäher und damit aussagekräftiger untersucht werden. Weiterhin bot die Kopplung von COSMO-Daten zum Antrieb des PALM-4U Vorteile in der technischen Umsetzung.

### 3.2 Ozonteil

Bodennahes Ozon ist das Produkt photochemischer Prozesse, an denen natürliche und anthropogene Vorgängersubstanzen beteiligt sind, unter anderem flüchtige organische Verbindungen (VOC), Methan, Kohlenmonoxid und Stickoxide (NOx) (Monks et al. 2014). Die Strahlungsintensität steuert die Photolyse von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und damit die Bildung von O<sub>3</sub>. NO<sub>2</sub> wird

entweder direkt emittiert, zum Beispiel durch Straßenverkehr oder Industrie, oder photochemisch aus der Mischung von NO und VOC gebildet. Andererseits reagiert O<sub>3</sub> mit vielen VOC und wird durch die Reaktion von NO aus der Luft titriert.

Neben chemischen Produktions- und Abbaumechanismen von Ozon, bestimmen physikalische Prozesse die Ozonverteilung in der bodennahen Atmosphäre. So fördern hohe Windgeschwindigkeiten die Abfuhr von NO, was eine geringere O<sub>3</sub>-Titration bedingt (Khiem et al. 2010). Eine signifikante negative Beziehung zwischen O<sub>3</sub> und der relativen Luftfeuchtigkeit resultiert vor allem aus einer negativen Korrelation zwischen relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur. Allerdings kann eine hohe Luftfeuchtigkeit auch mit Bewölkung zusammenhängen und damit wegen der verringerten kurzwelligen Einstrahlung die O<sub>3</sub>-Bildung reduzieren (Agudelo–Castaneda et al. 2014). Die Beschaffenheit von Oberflächen in städtischen und ländlichen Umgebungen verursachen unterschiedlich große Depositionsraten von Ozon, da Blattoberflächen den Schadstoff besser aus der Luft aufnehmen als Steinfassaden und Asphalt (z.B. Clifton et al. 2020).

Ein weiterer Aspekt sind die zeitlichen Veränderungen der Ozonkonzentrationen, die eng mit den Emissionen von Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) zusammenhängen. Diese effektiven Vorläufersubstanzen von O<sub>3</sub> aus Autoabgasen sind seit ca. 20 Jahren deutlich zurück gegangen (Jiang et al. 2017). Insbesondere die Reduktion von NO führt bei gleichbleibend hohen VOC-Belastungen zunächst zu einer Zunahme von O<sub>3</sub> (Parrish et al. 2013) und erst bei weiterer Reduzierung zu effektiv geringerer Ozonbildung. Der positive Trend des bodennahen Ozons kann auch in Verbindung mit einer Zunahme der Hintergrundkonzentration auf der Nordhalbkugel und nichtlinearen Zusammenhängen mit NOx und VOC gebracht werden (Mar et al. 2016). Zudem zeigen sich gegenläufige Trends zwischen Städten und dem Umland, mit konstanten oder rückläufigen Trends in ländlichen Gebieten (Monks et al. 2014). MiSKOR macht den Versuch, die unterschiedlichen Skalen zu kombinieren, mit großräumigen Untersuchungen für Nordbayern und Detailanalysen für Bayreuth, um die Heterogenität innerhalb des Stadtgebiets zu erfassen.

Zusätzlich zu den aktuellen Bemühungen für bessere Luftqualität, stellt sich die Frage der zukünftigen Entwicklungen durch den Klimawandel, für die es bereits Annahmen und Modellierungen gibt (Jacob & Winner 2009, Fu et al. 2015, von Schneidemesser et al. 2015, Chen et al. 2018). In allen Studien wird prinzipiell von einer Erhöhung der Ozonproduktion durch den Klimawandel ausgegangen, allerdings abhängig vom Grad der Erwärmung und der Konzentration für die photochemischen Prozesse relevanter Stoffe in der Atmosphäre. Herausgestellt wird aber auch der Forschungsbedarf. Auch für Bayern gibt es eine neuere Studie, allerdings nur stationsbezogen und für das Klimaszenarium RCP8.5 (Worstcase Szenario), die ebenfalls von einem Anstieg des troposphärischen Ozons ausgeht (Hertig 2020). In MiSKOR werden auch RCP2.6 und 4.5 angewendet und auf den nordbayerischen Raum angepasst.

Diese Zusammenhänge und Szenarien wurden im Projekt für die Meilensteine 2, 3, 5 und 9 mit verschiedenen methodischen Ansätzen untersucht. Basis der Auswertungen sind stündliche Stationsdaten zur Luftqualität des "Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU), Daten aus der AirBase (The European Air Quality Database) der Europäischen Umweltagentur, Reanalyse Daten zur Luftqualität des Copernicus Atmosphere Monitoring Service der EU (CAMS-EU), Daten des Deutschen Wetterdienstes und eigene Messungen. Für die Szenarien kamen auf 5 km herunterskalierte Daten aus EURO-CORDEX und ReKlisEs-De zum Einsatz (Jacob et al. 2014, Huebener et al. 2018).

## 3.2.1 Auswertung des Zusammenhangs meteorologischer Größen mit der Bildung bodennahen Ozons

Meilensteine Ozon: M2 Erfassung des statistischen Zusammenhangs zwischen meteorologischen und luftchemischen Parametern und Ozonkonzentration in Nordbayern

Zusätzlich zu den in Kapitel 3.2 aufgeführten Daten, wurde der übergeordnete Ozontransport (BT-Ozon) nach Nordbayern abgeschätzt, um die lokale Ozon-Produktion in Bezug zur Heranführung zu setzen. Die Entfernung und Richtung atmosphärischen Transportwege wurden für die Jahre 2014 bis 2017 mit dem Computermodell HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* ermittelt (Draxler & Hess 1998). In das Modell flossen 3-Stundenwerte des Atmosphä-

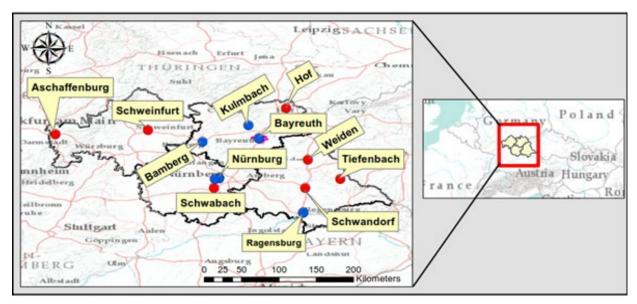


Abbildung 3: Luftqualitätsstationen in Nordbayern. Stationen mit O₃ in Rot, ohne O₃ in Blau (Nabavi et al. 2021)

renzustands mit einer Auflösung von 1° für den gleichen Zeitraum ein (NCEP's Global Data Assimilation System). Wegen nichtlinearer Zusammenhänge wurde ein hybrider Modellierungsansatz eingesetzt, bei dem ein statistisches Modell maschinellen Lernens (*Extreme Gradient Boosting Machines*,XGBMs) mit dem Vorhersagemodell des Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF CAMs-EU) kombiniert wurde (Nabavi et al. 2021). Für das Training des Modells wurden O<sub>3</sub>- und NOx-Daten nordbayerischer Stationen der Jahre 2014-2017 verwendet (rote Punkte in Abbildung 3). Für Stationen ohne O<sub>3</sub> Messungen (blaue Punkte) wurde O<sub>3</sub> aus NOx und meteorologischen Größen abgeschätzt.

Die Identifizierung und Gewichtung der Faktoren, und die Untersuchung der Beziehung zwischen den ausgewählten Variablen erfolgte mit verschiedenen statistischen Verfahren, die in den Computer Programmsprachen R und Python implementiert sind. Die Methoden bzw. Programm-Bibliotheken gbm, SHAP und lime sind ausführlich bei Friedman 2001, Freeman et al. 2016, Greenwell et al. 2018, Lundberg & Lee 2017 und Pedersen & Benesty 2018 beschrieben. Die Kombination der Methoden erlaubt die Abschätzung der Zielgröße des tägliches 8-Stunden-Maximums von Ozon (MDA8), das an nicht mehr als 25 Tagen im Jahr höher als 120 µg/m³ betragen darf (UNION 2008). Insbesondere SHAP Werte werden bei den Ergebnissen bei der Interpretation herangezogen, da sie die Bedeutung und den Einfluss der unterschiedlichen Faktoren in den Modellen erklären.

# 3.2.2 Trends der Ozonkonzentration in Nordbayern und Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Grenzwerten

# Meilensteine Ozon: M3 Statistische Analyse historischer Trends der Ozonkonzentrationen und Überschreitungshäufigkeiten von Schwellenwerten in Nordbayern

Neben der Analyse des Trends des bodennahen Ozons für die Jahre 1995 bis 2017 wurde auch die Entwicklung gängiger Kennzahlen untersucht (Tabelle 2). Zudem wurde ein Klassifikationsmodell entwickelt, um die Überschreitung der O<sub>3</sub>-Grenzwerte abzuschätzen. Es basiert auf den

Prädiktoren für XGBM aus Kapitel 4.2.1. Vor der eigentlichen Analyse mussten die Daten zwei Kriterien erfüllen. Alle O<sub>3</sub>-Werte, die 2,83-mal größer als das 95% Perzentil oder zweimal größer als das 99% Perzentil sind, wurden ausgeschlossen. Nach der Datenbereinigung verblieben nur Stationen in dem Datensatz für die Zeitreihenanalyse, die mindestens 75% des theoretischen monatlichen Maximalwerts für Ozon aufweisen (Lyapina et al. 2016). Insgesamt haben sieben Stationen des LfU in Nordbayern den Kriterien entsprochen (Arzberg, Aschaffenburg, Hof, Kleinwallstadt, Schweinfurt, Tiefenbach, Würzburg).

uo	llen für Gesundheit	kurzeitige Belastung	die vier höchsten MDA8 Werte pro Jahr (4MDA8)  Zahl der Tage pro Jahr mit MDA8 Werten > 60 ppb (µg/				
für Oz	<u>_</u>		Jahressumme von MDA8 > 35 ppb (μg/m³) (SOMO35)				
ınzahlen	Kennzahlen Menschliche Gee	langzeitige Belastung	jährliches Maximum des gleitenden Mittels des täglichen Einstundenmaximums für Ozon (3MMDA1)				
tskenı	Ψ		Durchschnitt von MDA8 für die warme Jahreszeit (AVGMDA8)				
Gesundheitskennzahlen für Ozon	Kennzahlen für Ackerpflanzen		akkumulierte Ozonbelastung für Werte > 40 ppb (μg/m³) für die Monate Mai bis Juli (AOT40)				

Tabelle 2: International gängige Kennzahlen für die Ozonbelastung (Fleming et al. 2018)

Der lineare Trend von Ozon und den Gesundheitskennzahlen wurde mit dem Thiel-Sen Schätzer ermittelt. Die logistische Regression (Otero et al. 2016, Gomez-Rubio 2018) zum Training der Ozonklassifikation erfolgte für zwei Kategorien O $_3$ -Konzentration > 120 µg/m $^3$  (Ozon vorhanden) und < 120 µg/m $^3$  (kein Ozon). Dieser Wert wurde gewählt, weil er erstens von der Europäischen Kommission als Grenzwert für MDA8 festgelegt wurde (UNION 2008) (Kapitel 3.2.1) und zweitens eine Empfehlung von Otero et al. (2016) erfüllt, wonach mit einer Stichprobe von 4995 Fällen 5 bis 20 Beobachtungen pro Prädiktor für die logistischen Regression vorhanden sind.

# 3.2.3 Mobile Messfahrten zur Quantifizierung und Differenzierung der Ozonbelastung in Bayreuth

# Meilensteine Ozon: M5 Experimentelle Bestimmung der räumlichen Unterschiede der Ozonkonzentration in Bayreuth und im nahen Umland mit einer fahrradgestützten mobilen Messplattform

Um die räumliche und zeitliche Differenzierung der Ozonbelastung in Bayreuth zu erfassen, wurden in den Monaten Juni, Juli und August 2019 und 2020 mobile Messkampagnen und zwischen Januar und September 2020 Messungen an festen Standorten durchgeführt (elektrochemische Sensoren, BT1/2/3). Die Untersuchungen sind Bestandteil von zwei Masterarbeiten (Fr. L. Mahr und Fr. S. Arora). Am BayCEER der Universität Bayreuth werden zudem seit Mai 2019 Ozonund Stickoxid-Konzentrationen gemessen, die als Referenzstation in die Untersuchungen einbezogen wurde (UV-Photometrischer O<sub>3</sub> Analyzer, Chemilumineszenz Detektor-CLD für NOx).

Die Messrouten durch Bayreuth decken die unterschiedlichen Stadtstrukturen, wie ländlich geprägte Gebiete, stark befahrene Straßen, dicht bebaute Gebiete, Parks usw. in Bayreuth ab und führen an den meteorologischen Stationen vorbei (Kapitel 3.1.1) (Abbildung 4). Die Messfahrten fanden zu unterschiedlichen Tageszeiten, an unterschiedlichen Wochentagen und zu unterschiedlichen Wetterlagen statt, um so Mobilitätsmuster und den Einfluss meteorologischer Größen abzubilden. Die festen Stationen waren an der Spinnerei, im Hofgarten und in der Maximilianstraße, ebenfalls Standorte der meteorologischen Stationen, installiert. Die Maximilianstraße ist eine Fußgängerzone im Stadtzentrum, die viel von Menschen frequentiert ist, aber kaum Emissionsquellen aufweist, abgesehen von Lieferverkehr. Der Hofgarten als große zentrale Parkanlage kann als grüne Stadtlunge bezeichnet werden und ist eine kühle Insel in der Stadt. Gleichzeitig emittiert hier die Vegetation flüchtige organische Verbindungen (VOC), die für photochemische Prozesse von Bedeutung sind (Kapitel 3.2). Der Standort Spinnerei ist ein viel frequentiertes Gewerbegebiet mit relativ hohen Emissionen aus dem Verkehr. Für die mobilen Messungen entlang der Routen wurden Fahrräder verwendet, an denen die meteorologischen Instrumente für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit (beide gegen Strahlung abgeschirmt) und Strahlung so montiert waren, dass sie nicht von den Fahrer\*innen beeinflusst wurden (Abbildung 5). Diese meteorologischen Parameter wurden mit einem Datenlogger (Hobo) aufgezeichnet. Der Sensor für

O<sub>3</sub>/NOx wurde im Rucksack transportiert. Die meteorologischen Parameter und zusätzlich die Position per GPS wurden alle zwei Sekunden geloggt, O<sub>3</sub> und NOx in Intervallen von 11 Sekunden (Mahr 2020). Die mobilen elektrochemischen Sensoren (BT1-BT3) und die Referenzsensoren am BayCEER wurden vor und während der Einsätze in der Abteilung Atmosphärenchemie der UBT aufwendig im Labor für NOx und O<sub>3</sub> kalibriert (Abbildung 6). Die Kalibrierung erfolgte für

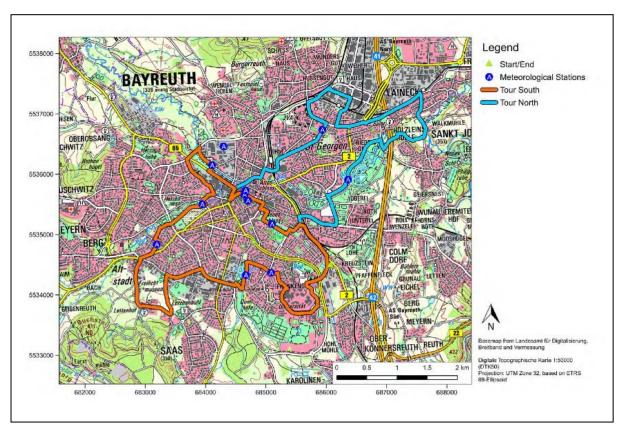


Abbildung 4: Routen der Ozonmessungen (Mahr 2020)

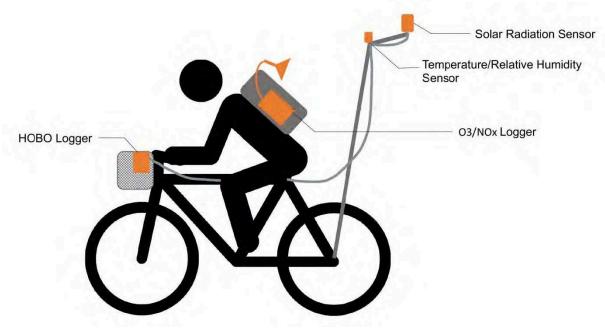


Abbildung 5: Messfahrrad (Mahr 2020)

10, 24 und 30 °C, sowie 44 und 75% relative Luftfeuchtigkeit, um meteorologische Einflussfaktoren abzubilden.

Ein wichtiger Aspekt der Auswertung der mobilen Messungen ist Zusammenhänge zu den Stadtstrukturen zu ermitteln. Die erfolgte mit einer Land Use Regression (LUR). Die LUR ist ähnlich einer linearen Regression und bezieht hier Luftqualitätsdaten an den Messstandorten, die jewei-

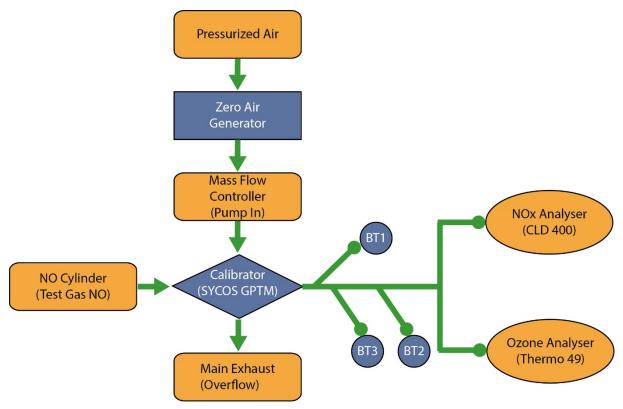


Abbildung 6: Ablaufschema der Kalibrierung der Ozon- NO-Sensoren (BT1-3) (nach Arora 2021)

lige Landnutzung am Standort und die Großwetterlagen ein (Hoek et al. 2008). Tabelle 3 zeigt das Modell nach der Kombination aller möglicher Prädiktoren. Die Validierung des Modells erfolgte mit der *leave-one-out cross-validation* (LOOCV).

Tabelle 3: LUR Modell mit Modellvariablen und Parameter der Modellgüte (Mahr 2020)

Final	57.18 + 5.97 x WT SE + 4.72 x WT SV	۷ +	R <sup>2</sup>	adj. R <sup>2</sup>	p-Value	LOOCVR <sup>2</sup>	RMSE	
Model	3.19 x <b>WW WE</b> + 0.75 x <b>NS S</b> + 0.73 x	CC	52.08	51.8	<0.001	51.48	8.7	
	$ $ CCW $- 3.89 \times MA M - 0.35 \times RH - 0.1$	9 x						
	$NO_2 - 0.34 \times COM + 0.32 \times DAV - 0.13$	2 x						
	$MAR - 0.62 \times MIR \times 0.95 \times REC - 0.59$	9 x						
	RES							
Land use	variables included in the model:	Other variables included in the model:  WT SE = Weather type south-eastern inflow direction						
COM = C	ommercial area	WT SE = Weather type south-eastern inflow direction						
DVA = De	ensely vegetated area	WT SW = Weather type south-western inflow direction						
MAR = M	lajor road	WW WE = Measurement day on weekends						
MIR = Mir	nor roads	NS S = Tour South						
REC = Re	REC = Recreational area			CC CCW = Tour clockwise/Tour counterclockwise				
RES = Residential area			MA M = Tour morning/Tour afternoon					
				<b>TEMP</b> = Air temperature (logged on tours)				
		RH = Air temperature (logged on tours)						
		NO	2 = <b>NO</b> 2 CO	ncentration	n (logged on	tours)		

# 3.2.4 Modellierung der Projektion der Ozonproduktion und der Veränderung der Ozonbelastung für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5

# Meilensteine Ozon: M9 Simulation zukünftiger Ozonbildungspotentiale für ausgewählte Szenarien bezüglich Klima und Luftqualität und M10 Extrapolation zeitlicher Trends der Gesundheitsbelastung durch Ozon für Klimaszenarien RCP 2.6, 4.5 und 8.5

Um eine Projektion der Ozonproduktion in die Zukunft zu ermöglichen, wurde wieder ein statistisches Modell maschinellen Lernens (XGBMs, eXtreme Gradient Boosting Machines, Chen et al. 2015) und ein dynamisches Modell kombiniert. Das dynamische Modell (Weather Research and Forecasting, WRF) ist mit WRF-Chem gekoppelt, um die Atmosphärenchemie einzubeziehen (Grell et al. 2005). Die Verbindung statischer Modelle und dynamischer Modelle wird für regionale Vorhersagen zunehmend verwendet, um die Vorteile prozessbasierter physikalischer Modelle und gemessener statistischer Zusammenhänge zu kombinieren und so zu robusteren Ergebnissen zu kommen. Mit den Modellen erfolgte die Abschätzung des zukünftigen Bildungspotentials bodennahen Ozons in Nordbayern für die Klimaszenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5. In MiSKOR wurden dabei zum ersten Mal die EURO-CORDEX/ReKliES-De Daten (Kapitel 3.2) als Input in das statistische Modell verwendet. Bias-korrigierte Klimaprojektionsdaten wurden für die Tagesmitteltemperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit und kurzwellige-Einstrahlung für die Emissionsszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 vom LfU zur Verfügung gestellt. Die Klimaprojektionsdaten basieren auf den 12 regionalen Klimamodellen des Bayern-Ensembles, angetrieben durch vier Globalmodelle (Tabelle 4). Es ist hervorzuheben, dass nur fünf der 12 Klimaprojektionen für alle drei Emissionsszenarien vorliegen.

Tabelle 4: Globale und regionale (downscaled) Modelle für meteorologische Projektionen für die Klimaszenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (nach LfU 2020)

Globalmodell	Regionalmodell		RCP	
		2.6	4.5	8.5
ICHEC-EC-EARTH (r12)	CLMcom-CCLM4-8-17	X	Х	Х
ICHEC-EC-EARTH (r12)	KNMI-RACMO22E	X	X	X
ICHEC-EC-EARTH (r12)	SMHI-RCA4	X	Х	X
ICHEC-EC-EARTH (r1)	KNMI-RACMO22E		Х	Х
ICHEC-EC-EARTH (r1)	UHOH-WRF361H			Х
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	X	Х	Х
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	SMHI-RCA4	X	Х	Х
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	UHOH-WRF361H	X		Х
MPI-M-MPI-ESM-LR (r1)	WETTREG-13	X		Х
MIROC-MIROC5 (r1)	CLMcom-CCLM4-8-17	X		Х
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	UHOH-WRF361H			Х
MOHC-HadGEM2-ES (r1)	WETTREG-13			Χ

Der statistischen O<sub>3</sub>-Simulation für Nordbayern liegen die O<sub>3</sub>-Reanalysedaten aus CAMS (Kap. 3.2.1) mit einer Auflösung von 0,1° zu Grunde (Marécal et al. 2015). Wegen der Bedeutung des Gesundheitsparameters MDA8 (Tabelle 2) für Ozonstudien wurde der Wert aus CAMS 3-Stunden O<sub>3</sub>-Werten berechnet und als Trainingssatz für den Zeitraum 2013-2018 der statistischen Modellierung mit je einem Modell pro Klimaszenario (RCP2.6, 4.5, 8.5) verwendet. Der Vorhersagezeitraum ist von 2000 bis 2100. Schließlich wurde aus den MDA8 Projektionen SOMOS35 (Tabelle 2) berechnet, um die Veränderung einer kurz- und einer langzeitigen Gesundheitsbelastung durch Ozon abzuschätzen. Um den Effekt der zukünftigen Temperaturänderung auf den Ozonbildungsprozess besser beurteilen zu können, liefen die WRF-Chem Simulationen für die Zeiträume 1975-1983 (historischer Zeitraum) und 2090 bis 2100 (Zeitraum des globalen Klimawandels) nur für die Klimaszenarien RCP2.6 und RCP8.5. Die Auswahl nur zweier Ozonkennwerte und der 10 jährigen Zeitraum liegen in der sehr rechenintensive Modellierung begründet. Da die zukünftigen Emissionen nicht simuliert werden können und es in der Studie um den Einfluss meteorologischer Größen im Kontext des Klimawandels auf die Ozonbildung geht, gingen die atmosphärenchemische Bedingungen des Jahres 2010 aus einem globalen Modell (MOZART-4/GEOS-5) in die Simulationen ein. Das gleiche gilt auch für die anthropogene Verbrennung von Biomasse und biogene Emissionen (TNO MACC II nach Kuenen et al. 2014, FINN nach Wiedinmyer et al. 2011, MEGAN nach Guenther et al. 2006). Die Chemie der Gasphase stammt aus der Simulation RADM2 (Stockwell et al. 1990).

# 4 Ergebnisse

#### 4.1 Klimateil

# 4.1.1 Räumliche und zeitliche Unterschiede des Bioklimas in Bayreuth (*Urbane Wärmeinsel*)

## Meilenstein 4: Experimentelle Erfassung der UWI im Stadtgebiet Bayreuth

Im MiSKOR Untersuchungszeitraum wurden das bislang drittwärmste (2019) und zweitwärmste (2020) Jahr in Deutschland laut DWD erfasst. Weitere Messdaten liegen für künftige Auswertungen bis mittlerweile März 2021 (und fortlaufend) vor.

Die räumliche Darstellung konnte trotz der hohen Dichte des Messnetzes nicht umgesetzt werden bzw. bringt keinen Mehrwert. Es war schließlich auch nicht möglich, den dichotomen/statistischen Ansatz zu verwirklichen, da die mikroskaligen lokalen Punktmessungen nicht mit den makroskaligen Wetterlagen in Verbindung gebracht werden konnten. Deshalb wurden die Unterschiede und Gemeinsamkeiten für die jeweiligen Station aufgezeigt.

Abbildung 7 zeigt die Lufttemperatur und Luftfeuchte (weitere Messgrößen aus Platzgründen nicht dargestellt) für den Untersuchungszeitraum. Die roten Punktlinien zeigen zur Einordnung die Temperatur-

1.9.20

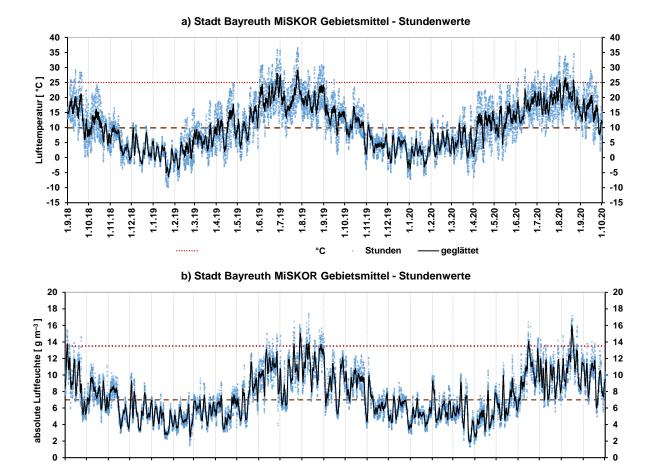


Abbildung 7: Stadt Bayreuth. a) Gebietsmittel der Lufttemperatur in °C basierend auf Stundenmittel (11 MiSKOR Wetterstationen inkl. ÖBG). Gestrichelte Linie: Mittelwert: 9,9°C. b) Gebietsmittel der absoluten Luftfeuchte in g m<sup>-3</sup> basierend auf Stundenmittel (11 MiSKOR Wetterstationen exkl. ÖBG). Gestrichelte Linie: Mittelwert 7,0 g m<sup>-3</sup>. Messzeitraum jeweils Sep 2018 bis Sep 2020.

1.9.18

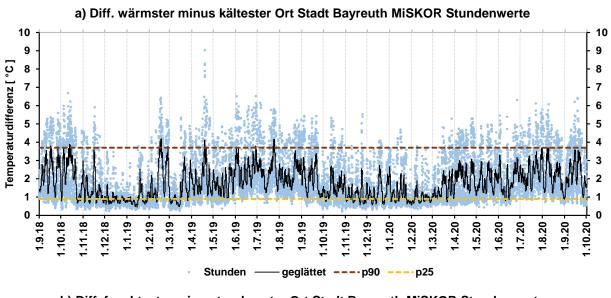
1.3.19

Tabelle 5: Aufstellung ausgewählter Messstandorte Stadtgebiet Bayreuth. Anzahl: Tage Frost (< -5 °C), Sommertage 25 30 13,5 g m³) und Tage mit Windgeschwindigkeit > 3 m s⁻¹ (\*ÖBG Wind aus 17 m ü. Grund); jeweils Jahr 2019. MiSKOR-Messnetz, Messhöhen 3,5 m ü. Grund.

Messort	Anz. < -5°C	Messort	Anz. 25°C	Messort	Anz. 30°C	Messort	Anz. Schwüle	Messort	Wind > 3 ms <sup>-1</sup>
Kämmerei	7	Hofgarten	50	Hofgarten	12	St.Georgen	31	Röhrensee	10
Markt	8	Wilh.Aue	57	Wilh.Aue	17	Kämmerei	32	Altstadt	14
Hofgarten	10	Mistel	60	Mistel	21	Birken	34	Birken	23
St.Georgen	10	Röhrensee	64	St.Geor- gen	21	Hofgarten	36	St.Georgen	27
Spinnerei	14	Birken	64	Röhrensee	23	Altstadt	36	Hofgarten	33
Altstadt	15	St. Geor- gen	66	ÖBG	23	Spinnerei	37	Markt	41
Birken	16	Spinnerei	66	Kämmerei	23	Röhrensee	38	Kämmerei	57
Wilh.Aue	17	Altstadt	66	Birken	24	Markt	41	Mistel	82
Röhrensee	17	ÖBG	66	Altstadt	25	ÖBG	42	Spinnerei	91
Mistel	21	Markt	66	Spinnerei	26	Mistel	46	Wilh.Aue	252
ÖBG	24	Kämmerei	68	Markt	27	Wilh.Aue	48	ÖBG	302*

Zu erwarten war, dass Hofgarten mit ausgeprägtem Baumkronendach die geringste Zahl an heißen Tagen und Sommertagen aufweist, gefolgt von den Grünflächen und dem Röhrensee. Die Flussauen der Wilhelminenaue direkt am Roten Main und der grüne Finger des Mistelbaches weisen aufgrund der intensiven Verdunstung die meisten schwülempfundene Tage auf.

Durch das dichte MiSKOR-Messnetzwerk konnte die Untersuchung der UHI zunächst räumlich unspezifisch erweitert werden, um maximale Unterschiede zu finden. Dazu wurde die Differenz der jeweils wärmsten und kältesten Station für jedes Stundenmittel berechnet (Abbildung 8a), sowie analog für die absolute Luftfeuchte (oder andere Parameter) (Abbildung 8b). Nur Werte des absoluten Feuchtegehaltes als tatsächlicher Gehalt an Wasserdampf, in Gramm Wasser pro Kubikmeter Luft, lassen sich untereinander vergleichen, nicht jedoch die relative Luftfeuchte als Prozent-Angabe in Bezug zu 100% Wasserdampfsättigung.



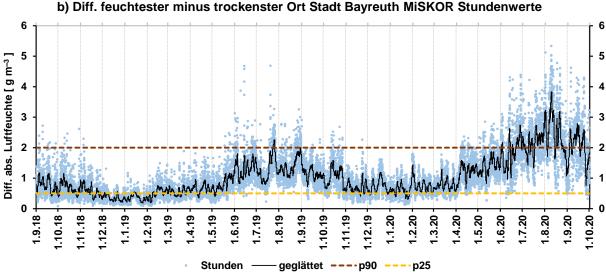


Abbildung 8: Stadt Bayreuth. Differenzen des jeweils wärmsten minus des kältesten (a) bzw. feuchtesten minus trockensten (b) Ortes im Stadtgebiet Bayreuths basierend auf Stundenwerte (10 MiSKOR Wetterstationen exkl. ÖBG). Gestrichelte Linien: rot, jeweils 90%-Perzentile (obersten 10% der Werte) der stündlichen Differenzen; gelb, jeweils 25%-Perzentil (untersten 25% der Werte). Messzeitraum jeweils Sep 2018 bis Sep 2020.

Für Bayreuth als Modellwerkstatt lässt sich nun belegen, dass allein innerhalb des Stadtgebietes Lufttemperaturunterschiede zwischen 7 und 9 Grad Celsius auftreten können. Statistisch liegen

die meisten Fälle zwischen 1 °C und 4 °C, und immerhin 10% aller Fälle deutlich über 4 °C Unterschied. Diese Unterschiede treten sowohl in der Sommerzeit, als auch signifikant im Frühling und Herbst und zeitweise mitten im Winterzeitraum auf. Vier bis sieben Grad Unterschiede machen sich nicht nur während Hitzeperioden bioklimatisch belastend bemerkbar (30 °C zu 37 °C) sondern auch hinsichtlich Frostgrenzen (-3 °C zu 4 °C) im Winter oder bei den klassischen Kälterückfällen im Spätfrühling oder Frühherbst. Auffällig ist, dass die Spanne der Beträge der Temperaturunterschiede in ungefähr gleicher Größenordnung zwischen 2018 und 2020 auftreten. Anders die Luftfeuchtigkeit (Abbildung 8b). 2020 zeigten sich deutlich größere Unterschiede feuchter zu trockeneren Standorte in Bayreuth. Werden 2019 nur selten Unterschiede über 2,5 g m-³ gemessen, so übersteigen schon ab April 2020 bis in den Herbst hinein die Feuchteunterschiede die 2,3 bis 5 g m-³. Die Ursache dafür ist vielschichtig, kann aber mit der geringeren Verfügbarkeit von Wasser und dem größeren potenziellen Verdunstungsvermögen (Verdunstungsdürre, Frühjahrstrockenheit) in einigen Stadtteilen und der Aufeinanderfolge mehrerer Trockenjahre seit 2014 in Oberfranken zusammenhängen.

Weiterhin wurde der monatliche mittlere Tagesgang der Abweichung einer einzelnen Station vom Messnetzmittel untersucht. Analog der Auswertung im Zwischenbericht (2019), zeigt Abbildung 9, dass bestimmte Tagesmuster regelmäßig und abhängig von der Großwetterlage und Jahreszeit auftreten. Die Monate Januar, April, Juli und September 2019 zeigen die Spannweite des urbanen Effektes im Jahresverlauf. Positive Werte bedeuten wärmer bzw. feuchter und negative Werte kälter bzw. trockener als das Gebietsmittel. Hierfür wurden jeweils die hochversiegelte und dichtbebaute Innenstadt um die Kämmereigasse (Kä) mit anderen Standorten verglichen. Die größten Temperaturunterschiede mit einem Betrag von über 4 °C im Monatsdurchschnitt Juli finden sich zwischen Kämmerei und dem ÖBG (BG) im Sommer und hier in der Regel zwischen Juni und August. Bei der Lufttemperatur zeigt sich ein typischer Tagesgang, der zwischen Innerstadt (Kä) und den offenen Grünflächen (ÖBG und Mistel) gegenläufig ist (Abbildung 11a, b). Die Innenstadt (schwarz und graue Linien) bleibt unabhängig von der Jahreszeit deutlich wärmer (nachts, morgens, abends) oder ist gleichtemperiert (tagsüber). Und umgedreht, die offenen Grünflächen ÖBG oder Mistel (blaue Linien) oder Wilhelminenaue (nicht gezeigt) bleiben deutlich kälter zur Nachthälfte und sind ebenfalls ausgeglichen tagsüber. Dieses Muster bleibt übers Jahr erhalten, lediglich die Beträge der Differenzen sind im Winter (Jan.) für beide Standorte am geringsten (± 1 °C). Interessant ist, dass es in der überbauten Innenstadt und an der Mistel kaum Unterschiede bei den Beträgen im Sommer und Frühling/Herbst gibt. Im ÖBG zeigt sich für Frühling/Herbst jedoch nachts eine Halbierung. Grund dafür und zusätzlich auch für die geringere nächtliche Abkühlung an der Mistel ist die unterschiedliche Dichte der Vegetation (freie Wiese im ÖBG und keine Bebauung im näheren Umfeld; Baum- und Gebüsch-Bestand und Bebauung in Umfeld der Mistel). Ganz unterschiedlich sieht es beim Vergleich Kämmerei zur innerstädtischen Parkanlage Hofgarten und zum Wohn-/Gartenviertel Birken (oder Altstadt) aus. Stadtpark Hofgarten (unter dem Baumkronendach) und Innenstadt Kämmerei (Baukörper) verlaufen parallel, jedoch auf unterschiedlichem Niveau. Beide Standorte sind in der Nachthälfte deutlich wärmer, der Hofgarten fällt aber tagsüber im Sommer zwischen 1 und 2 Grad kühler aus als die dicht verbaute Innenstadt. Die typischen Wohn-/Gartengebieten wie Birken oder Altstadt zeigen mit ihrer offenen Bebauung und viel Grün keinen Tages- und Jahresgang hinsichtlich der Temperaturdifferenzen zum Bayreuther Gebietsmittel.

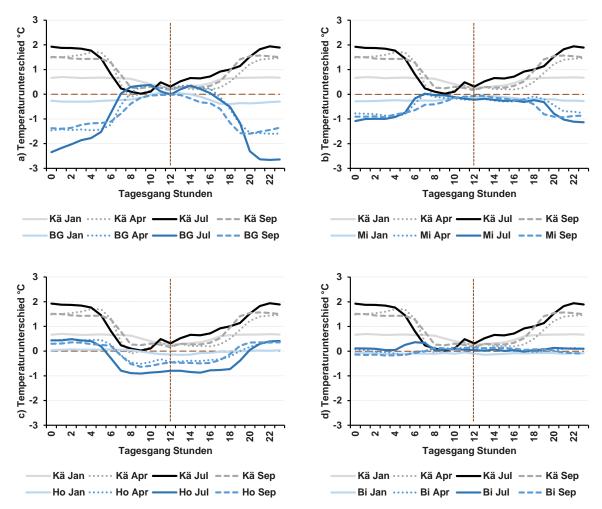


Abbildung 9: Mittlere Tagesgänge der Unterschiede der Lufttemperatur für die Monate Januar, April, Juli und September 2019. MiSKOR-Messnetz Bayreuth: Kä=Kämmerei, Ho=Hofgarten und BG=Referenzstation Ökologisch-Botanischer Garten Univ. Bayreuth. Temperaturabweichung jeder Einzelstation vom Durchschnitt über alle Messstationen (= Gebietsmittel rote, horizontale Strichlinie). Zeit MEZ.

Auch auf das Luftfeuchteangebot hat städtische Landnutzung einen merklichen Einfluss (Abbildung 10). Die verbaute Innenstadt (Messstation Kämmerei) bleibt von Frühling bis Herbst tagsüber trockener als das Gebietsmittel. Der Winter ist ohne Tagesgang ausgeglichen. Die dicht verbaute Innenstadt bleibt in den Morgenstunden (ca. zwischen 4 und 10 Uhr MEZ je nach Sonnenstand) deutlich trockener als das Gebietsmittel, die Grünzonen (Wilhelminenaue, Mistel) und die begrünten Wohnviertel (Birken, Altstadt) sind deutlich feuchter.

Die größte Jahresvariation zeigt die im Rotmaintal gelegene Wilhelminenaue im Osten Bayreuths auf. Die Aue (im Sommer und Herbst) und der Röhrenseepark im Sommer zeigen einen ähnlichen und im Vergleich zu den anderen Standorten deutlicher ausgeprägten Tagesgang, mit minimalen Feuchten in den frühen Morgenstunden und schneller Auffeuchtung bis zum Nachmittag, um dann in den Abendstunden wieder aufs nächtliche Niveau abzufallen. Im Gegensatz dazu zeigen die Wohnvierteln Birken und Altstadt oder der Markt einen umgedrehten Effekt: Feuchtezunahme in den Morgenstunden, tagsüber Rückgang und erneuten Anstieg nach Sonnenuntergang. Die Gründe dafür sind durch Unterschiede in Bodenversiegelung, Wasserdargebot, Verdunstungsvermögen, Wärmehaushalt und Sonneneinstrahlung bedingt.

Abbildung 11 fasst die Ausprägung des urbanen Klimaeffektes in Form jahreszeitlicher mittlerer Tagesgänge für Lufttemperatur und Luftfeuchte zusammen. Die größten Unterschiede treten wie

erwartet im Sommer auf. Eine neue Erkenntnis ist jedoch, dass sehr ähnliche Beträge hinsichtlich der UHI im Frühling und Herbst und hinsichtlich der Feuchte zumindest im Herbst auftreten. Der stärkste Temperatureffekt macht sich im Frühling, Sommer und Herbst zwischen 20 Uhr bis ca. 2 Uhr MEZ bemerkbar, die geringsten Temperaturunterschiede treten zwischen 12 und 16 Uhr auf (Abbildung 11a). Im Sommer wir die 25 °C Schwelle tagsüber zwischen 8 und 21 Uhr abends im Sommer überschritten, und die Grenze für sog. tropische Nächte von 20 °C nachts jedoch nicht oder kaum. Beide haben eine erhebliche Wärme- oder Hitzebelastung als Folge (Abbildung 11).

Das Gebietsmittel der Feuchte zeigt im Sommer und Herbst eine deutliche Tagesvariation (Abbildung 11d). Im Sommer wird bereits ab ca. 5 Uhr MEZ der Schwüleschwellwert überschritten, jedoch nur bis ca. 12 Uhr mittags. Gründe dafür sind die einsetzende Verdunstung von Wasser (Gewässer, Tau, Transpiration der Vegetation) kurz nach Sonnenaufgang bei oft windschwachen bis windstillen Bedingungen. Erst bei höherem Sonnenstand setzt die turbulente Durchmischung der Luft über große Vertikaldistanzen ein und führt zum Abtransport der feuchten Luftmassen. Gerade zu diesen Morgenstunden zeigt sich folglich bei den Beträgen der Feuchtedifferenzen (Abbildung 11) eine entsprechende Spitze, sowohl im Sommer, als auch bemerkenswert im Frühling (Beginn Vegetationszeit).

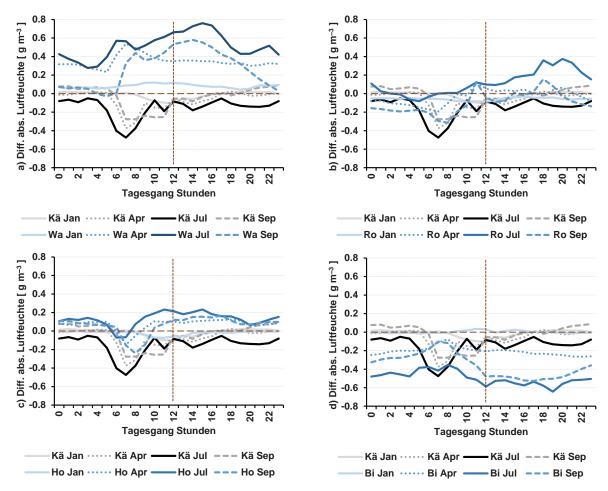
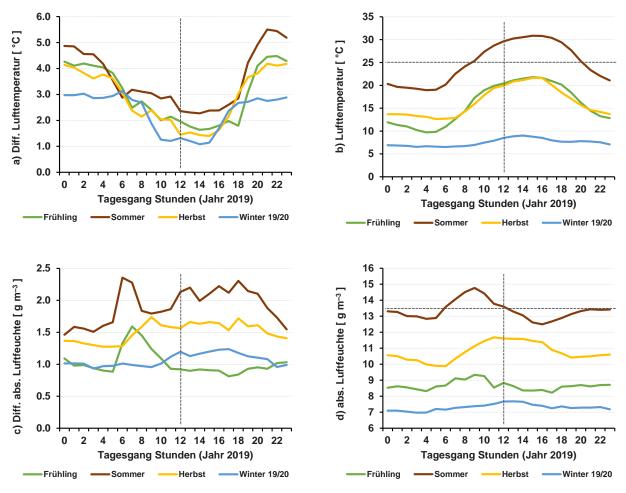


Abbildung 10: Mittlere Tagesgänge der Unterschiede der absoluten Luftfeuchte für die Monate Januar, April, Juli und September 2019. MiSKOR-Messnetz Bayreuth: Kä=Kämmerei, Wa=Wilhelminenaue, Ro=Röhrenseepark, Ho=Hofgarten, Bi=Birken. Feuchteabweichung jeder Einzelstation vom Durchschnitt über alle Messstationen (= Gebietsmittel rote, horizontale Strichlinie). Zeit MEZ.



bildung 11: Mittlere Tagesgänge für die vier Jahreszeiten, Jahr 2019. a) und c) jeweils mittlere maximale Unterschiede zwischen wärmsten/feuchtesten minus kältesten/trockensten Ort im Stadtgebiet Bayreuth. b) und d) jeweils mittlerer Tagesgang des Gebietsmittels. Vertikale Strichlinie = 12 Uhr MEZ, horizontale Strichlinien: b) ,5 g m<sup>-3</sup> = Schwülebelastung. MiSKOR-Messnetz, Zeit MEZ.

# 4.1.2 Großwetterlagen Mitteleuropas als Wetterantrieb für Nordbayern und ihr Einfluss auf Bayreuth

Generell ist die Interpretation der makroskaligen, für Europa abgeleiteten Großwetterlagen auf kleinräumiger, lokaler Ebene schwierig. Für das MiSKOR-Projekt (Meilenstein 1) wurden daher umfangreiche Auswertungen der Bayreuther Messnetzdaten in Bezug zu europäischen Großwetterlagen durchgeführt und es konnten für bestimmte, ausgeprägte Fälle eindeutige Zusammenhänge gefunden werden. Aufgrund der sehr hohen Komplexität der Zusammenhänge erwies sich jedoch die Aufstellung von eindeutigen Entscheidungsschemata als nicht sinnvoll. Als Ergänzung zu den bereits im Zwischenbericht (April 2019) vorgestellten Detailergebnissen (aus Platzgründen hier nicht wiederholt) stehen neue Erkenntnisse über die Veränderung der atmosphärischen Zirkulation über Europa zur Verfügung, die objektive Folgen auch für Bayern nach sich ziehen werden.

Die großräumige Wetterlage über Europa, Deutschland, Bayern und deren regionale Ausprägung in Oberfranken und in einem Stadtgebiet bestimmen die Randbedingungen, ob es zu einer Ausdifferenzierung von lokalen Unterschieden, eines sichtbaren, auf Umwelt und Mensch wirksamen urbanen Klimaeffektes kommen kann oder nicht. Typische Wettermuster bzw. die Zirkulationsmuster der Atmosphäre über Europa werden seit langem operativ für Europa bestimmt (James 2007, Huth et al. 2016, Beck et al. 2016). Für die Untersuchung im MiSKOR-Projekt werden die

vom DWD rücklaufend bis 1881 bestimmten Großwetterlagen nach der Klassifizierung von Hess und Brezowsky (Hess & Brezowsky 1952 & 1977, Gerstengarbe & Werner 2010) herangezogen.

Da Großwetterlagen über Europa auch durch die vom Menschen verursachte Klimaveränderung modifiziert werden können, zeigt Abbildung 12 für ausgesuchte Zirkulationsfälle erstmalig in der Literatur deren Entwicklung über einen 140 Jahre Zeitraum. Im ersten Fall (Abbildung 12a) sind die tiefdruckgesteuerten, zyklonalen Zirkulationsmuster der Atmosphäre über Europa und die entsprechend Hochdruck gesteuerten, antizyklonalen Muster aufgetragen. Als deutliches Signal zeigt sich ab den 1960er Jahren eine Aufspaltung der sonst, bis dahin, ausgeglichenen Anzahl beider Fälle, sichtbar durch eine Zunahme des zyklonalen Einflusses und teilweise Einbruch der antizyklonal gesteuerten Luftmassen und einer Zunahme der interannuellen (Jahr-zu-Jahr) Variationen. Der zweite Fall (Abbildung 12b) stellt die expliziten zonalen (Breitenkreis folgenden) Westwindlagen inkl. beider Fälle zyklonal (Tiefdruckausläufer) und antizyklonal (Hochdruck) über Deutschland und die expliziten, autochthonen Hochdrucklagen (HM/BM = Hochdruck oder Hochdruckbrücke über Mitteleuropa/Deutschland) dar. Hier zeigt sich, dass sich bis zum Jahr 2000 keine Änderung ergab. Danach verringert sich jedoch die Anzahl der Westlagen bei gleichzeitiger Zunahme der interannuellen Variationsbreite. Der nächste Fall (Abbildung 12c) belegt, dass sich ab den 1950er Jahren bis heute die Anzahl der Luftmassenanströmung aus nordwestlichen Richtungen (feucht und meist kühl) reduziert und die südwestlichen Richtungen (meist warm bis heiß, wechselnd feucht/trocken) zugenommen haben (seit Mitte der 1990er sogar leicht gegenüber der NW-Lage überwiegen). Die Zeitreihen der Wetterlagen mit überwiegend direkter Nord- bzw. Südkomponente (Abbildung 12d) belegen auch hier ein deutliches Klimawandelsignal: ab den 1940er Jahren verändert sich die Zirkulation zu Gunsten der Südlagen.

Zur besseren Beschreibung des Wettergeschehens und zur Interpretation der lokalen Ausprägung und Abschätzung zukünftiger Klimaverhältnisse bedarf es einer zeitlichen Aufgliederung zumindest auf die Jahreszeiten (Abbildung 13). Zur Anschaulichkeit wurden die für Nordbayern wetterbestimmenden Fälle **SW**- und **NW**-Anströmung (gemischte Zirkulationsform), die zonale Westwind-Anströmung und die autochthonen Hochdrucklagen untersucht. Bezüglich der Südwestlagen (warm/heiß und wechseln feucht/trocken) zeigt sich mit Ausnahme der Wintermonate eine signifikante Zunahme ab den 1940er Jahren. Dieser Trend ist im Frühling ab den 2000er Jahren wieder rückläufig, und zwar zu Gunsten der Hochdrucklagen **HM**, **BM** und **Wa** (Westantizyklonal, in denen Süddeutschland unter autochthonem Hochdruck liegt). Die **NW**-Lagen im Frühling zeigen bisher keine signifikante Veränderung. Diese Ergebnisse entsprechen der Beobachtung einer erheblichen Erhöhung der Lufttemperaturen, der Sonnenscheinstunden und der Frühjahrstrockenheit in Franken (Ionita et al. 2020).

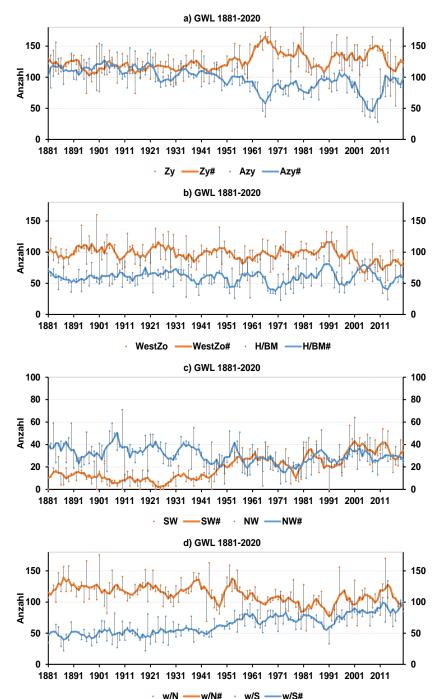


Abbildung 12 Zeitreihen der Großwetterlagen (GWL) über Europa seit 1881 bis einschließlich 2020. Punkte mit Bezugslinien entsprechen der jeweiligen Anzahl der Fällte pro Jahr. Durchgezogene Linien sind über 5 Jahre gleitend gemittelte Jahreswerte (in Legende: mit # markiert). Grundlage ist die Klassifikation nach Hess & Brezowsky 1952 und Gerstengarbe & Werner 2010. Zusammengefasste Wetterlagen: a) zyklonale (Tiefdruck) gesteuerte Wetterlage (Zy) und anti-zyklonale (Hochdruck) gesteuert (Azy), b) zonale (Breitenkreis folgende) Westströmung (WestZo) und stabile, explizite Hochdrucklagen HM und BM (H/BM) über Mitteleuropa; c) gemischte Zirkulation Südwest (SW)- und Nordwest (NW)-Anströmung (beide zy- und antizyklonale Fälle); d) Wetterlagen mit ausgeprägter Nord (w/N) bzw. Süd (w/S) Komponente. Rohdaten: DWD. Prüfung, Statistik: MiSKOR).

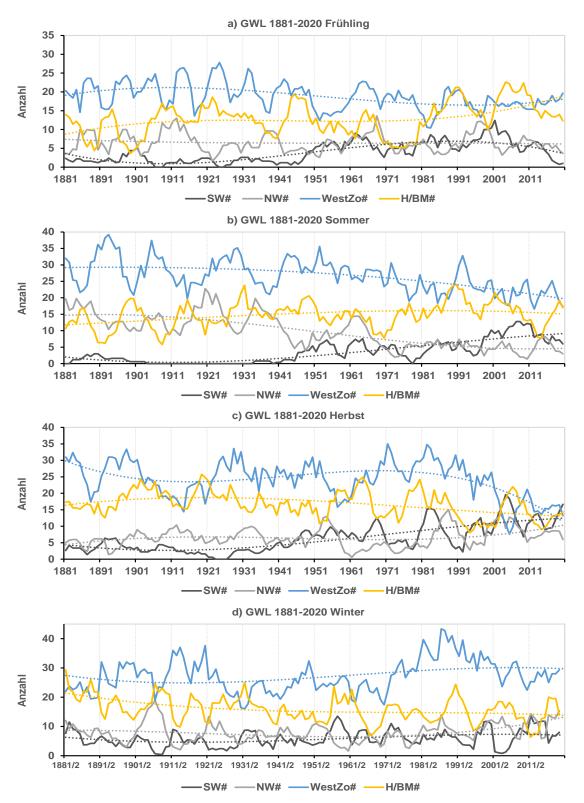


Abbildung 13: Beschreibung wie unter Abbildung 12 Zeitreihen ausgewählter Zirkulationsfälle bzw. GWL separiert für die vier nordhemisphärischen Jahreszeiten (über 5 Jahre gleitend gemittelte Jahreswerte). Punktlinien: polynomischer Trend (3. Grades). Rohdaten: DWD. Prüfung, Statistik: MiSKORLüers).

Im Sommer zeigt sich ab den 1930er Jahren eine beständige Abnahme der Nordwestlagen und der zonalen Westanströmung und bedingt auch eine Abnahme der Nordströmungen, die durch eine Zunahme warm/heißer **SW**-Lagen und vermehrter gemischt/meridionaler (Längenkreis fol-

gender) Zirkulationslagen (hier nicht gezeigt) aus Richtungen mit südlicher oder östlicher Komponente kompensiert wird. Der Herbst ist durch die signifikante Abnahme der zonalen Westwinde geprägt, hauptsächlich durch die Abnahme der **Wz**-Lage. Gleichzeitig hat sich die Anzahl der **SW**-Lagen merklich erhöht. Im Winter erhöht sich ab ca. den 1970er Jahren bis Anfang der 2000er Jahre hingegen die Zahl der Westströmungen, die im Winter Zufluss temperierter Atlantikluft (Erwärmung) für Deutschland bedeuten.

Wir stellen fest, dass es eindeutige Veränderungen in der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre über Europa gibt, die sich zwangsläufig auf das lokale, kleinräumige Wettergeschehen in Bayern ausgeübt haben und werden. Die Erforschung dieser Zusammenhänge sowie der Attribution zu menschlicher Aktivität ist eine komplexe Aufgabe (e.g. Trenberth 1995, Reichler 2009, IPCC 2014, Marshall et al. 2020).

## 4.1.3 Nordbayern - Urbane Wärmeinseln mittelgroßer Städte

Der Meilenstein M1 forderte die umfangreiche Untersuchung der UHI für ausgewählte Städte in Nordbayern inklusive Bayreuth (Tabelle 6). Als Grundlage dienten dazu parallele Lufttemperaturmessungen in einem potenziell überwärmten Innenstadtbereich und an einem ruralen, ländlichen Standort in nicht zu großer Entfernung (klassische UHI bestimmt aus 2 Standorten vgl. Kap. 2). Die Daten müssen auf mindestens stündlichen Beobachtungen basieren (Erfassung Tagesgang). Es boten sich Städte an, die sowohl eine innerstädtische Messstation des Landesamts für Umwelt (LfU, Lufthygienisches Landesüberwachungssystem Bayern), als auch eine offizielle Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) außerhalb der Stadt gelegen aufwiesen. Diese Bedingungen erfüllten Ansbach, Bamberg, Hof, Kulmbach/Kronach, Nürnberg, Regensburg, Schwandorf, Schweinfurt, Weiden und Würzburg. Zwei Hinweise sind wichtig: a) die Daten (LfU & DWD) liegen nur ungeprüft vor und decken oftmals verschiedene Zeiträume ab, b) die Stationen liegen nicht alle im gewünschten Zielgebiet, hier zumeist die LfU-Stationen, die nicht in einem dichtversiegelten Innenstadtbereich liegen, sondern eher rural geprägt sind (Grünflächen, offene Lagen). Nach grober Datenprüfung wurden Stundenmittelwerte der Lufttemperatur gebildet, und für jeden Tag das 10%-, 50% und 90%-Perzentil berechnet. Anschließend wird für jeden Tag die Differenz für jeden der drei Perzentil-Bereiche bestimmt (Dif-p10, ...). Zeitpunkte des unteren 10%-Wertebereich (Dif-p10) traten nahezu ausschließlich während der Nachtstunden auf, die des oberen 10%-Wertebereich (Dif-p90) tagsüber. Diese Methode ist gegenüber Ausreißern oder Fehlwerten robuster als z. B. Minimum/Maximum. Zu beachten ist, dass die Beträge nicht die maximal aufgetretene Spannbreite (würde den 0% und 100%-Perzentile entsprechen) der UHI darstellen.

Tabelle 6: Urbane Wärmeinsel (UHI) für ausgewählte Städte in Nordbayern und für 12 Stadtteile in Bayreuth. Daten für Städte Nordbayern: Vergleich der jeweiligen LfU-Station (meist innerstädtisch) mit DWD-Station (außerhalb Stadt, rural), ja nach Stadt versch. Zeiträume zw. 2000 bis 2019. Daten Bayreuth: MiSKOR-Messnetz Jahr 2019. Beträge: positive Werte = LfU bzw. MiSKOR-Station wärmer als Referenzstationen DWD- bzw. ÖBG und davon der 10% oberste Wertebereich. Berechnung pro Tag der 10%- und 90%-Perzentile aus Stundenwerten. Differenz (Dif) der jeweiligen Perzentile (p) Station-DWD oder -ÖBG: Dif-p10 = Nachtwerte, Dif-p90 = Werte tagsüber. Fett markiert: nächtliche UHI ausgeprägter als Überwärmung am Tag (Erwartungsfall).

Nordbayern, versch. Zeiträume 2000-19	Dif-p10 (nachts)	Dif-p90 (tags)
Würzburg	0,7	3,4
Schweinfurt	0,5	3,2
Ansbach	1,3	2,8
Bamberg	3,1	2,0
Nürnberg	2,2	2,7
Kulmbach	2,9	4,2
Hof	0,4	2,6
Regensburg	2,7	4,2
Schwandorf	1,5	3,0
Weiden	2,3	1,2

Bayreuth Jahr 2019	Dif-p10 (nachts)	Dif-p90 (tags)
Kämmerei	4,1	8,0
Markt	3,4	0,9
St, Georgen	3,4	0,6
Karstadt-Dach	2,9	1,4
Spinnerei	2,5	0,9
Birken	2,2	0,5
Altstadt	2,0	0,5
Hofgarten	2,7	0,1
Pegel	2,0	1,2
Röhrensee	1,8	0,2
Wilhelminenaue	1,3	0,2
Mistel	1,1	0,2

Für die 12 Stadtteile Bayreuths (Tabelle 6 rechts) zeigt sich die UHI am deutlichsten während der Nachthälfte (inkl. Abend- und Morgenstunden, vgl. auch Abbildung 9, Abbildung 11), bedingt durch nachts fehlende Sonneneinstrahlung, geringe Durchlüftung (kaum atmosphärische Turbulenz) und effektive Wärmeausstrahlung (Abkühlung) bei un- oder wenig bebauten Oberflächen im Falle von autochthonen (vor Ort geprägten) Wetterlagen (meist Hochdruckeinfluss über Bayern). Die Unterschiede im Betrag der UHI zwischen den Stadtteilen begründen sich durch die in Tabelle 1 und Tabelle 5 bereits dargestellten Unterschiede. Die in Tabelle 6 orange markierten Stadtteile sind alle dicht versiegelt, verbaut, aber unterschiedlich durchlüftet (Karstadt-Dach 20 m über Grund). Die hellgelb markierten Orte schließen das versiegelte, aber gut durchlüftete Gewerbegebiet Spinnerei und die beiden Wohn-/Gartenviertel (höherer Grünanteil) ein. Hellgrün entspricht den beiden Parkanlagen Hofgarten (deutliche UHI, hoher Baumbestand, Messung unter Baumkronendach (höhere langwellige Gegenstrahlung, kaum durchlüftet), Röhrensee (Bäume aber offen Seefläche, besser durchlüftet) und der Pegel am Rotmainufer nordwestlich stadtauswärts. Der grüne Finger entlang des Bachlaufs der Mistel im Westen und die große Naherholung-Grünfläche Wilhelminenaue im Rotmaintal stadteinwärts im Osten zeigen entsprechend nur noch kleine UHI-Beträge. Die Unterschiede zwischen Innenstadt und großer Frei-/Grünfläche zeigt Abbildung 14 am Beispiel Kämmerei (urban/rural) bzw. Wilhelminenaue (rural/rural). Bei der Kämmerei ist zu sehen, dass es über den ganzen Tag einen UHI-Effekt gibt, der tagsüber deutlich kleiner ist als die kräftige Überwärmung in der Nacht, wobei die nächtliche Überwärmung seltener zwischen Oktober und Januar auftritt. Bei der Wilhelminenaue (rural) zeigen sich erheblich kleinere UHI-Beträge für die Nachtzeit (kaum Überwärmung mit einer Spitze im Auftreten im Juni/Juli) und tagsüber sogar überwiegend negative Werte (Wilh.Aue kühler als ÖBG) zwischen Spätsommer, Herbst und Winter.

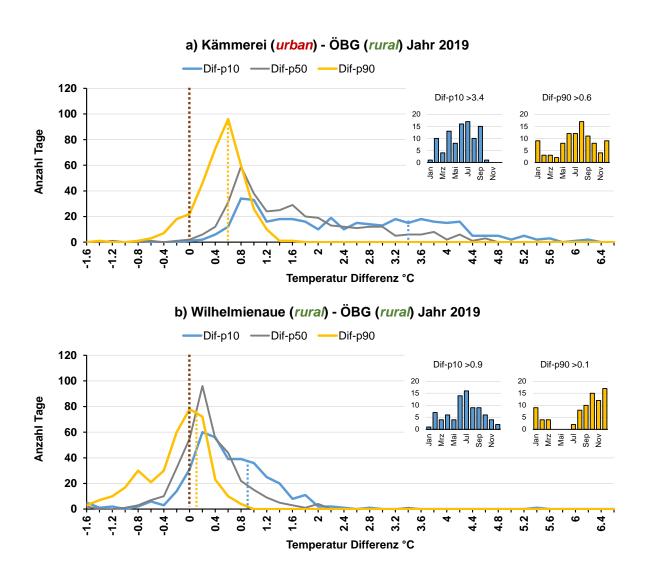
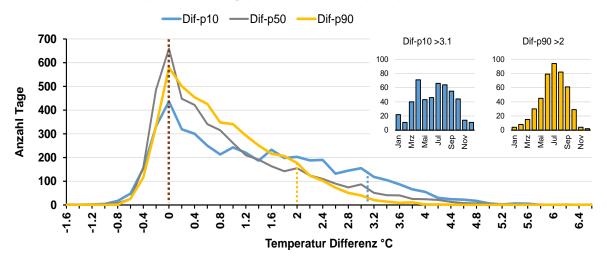


Abbildung 14: Stadt Bayreuth: Häufigkeitsverteilung der Differenzen Lufttemperatur zwischen a) der dicht verbauten Innenstadt (Kämmerei, urban) bzw. b) der offenen Grünfläche Wilhelminenaue (rural) und jeweils der Referenzstation Ökologisch-Botanischer Garten Univ. Bayreuth (ÖBG, rural) außerhalb der Stadt. Entfernung (Luftlinie) Kämmerei/ÖBG 2.4 km, Wilh.Aue/ÖBG 2.6 km. Positiv = Kämmerei/Wilh.Aue wärmer als ÖBG und v.v. Berechnung pro Tag der 10%, 50% und 90%-Perzentile aus Halbstundenwerten. Differenz (Dif) der jeweiligen Perzentile (p) Station-ÖBG: Dif-p10 = Nachtwerte, Dif-p50 = Durchschnitt, Dif-p90 = Werte tagsüber.

Die Aussagekraft der Untersuchungen zur Dynamik und Betrag der UHI in den anderen Städten Nordbayerns ist daher im Vergleich zu Bayreuth mit dem MiSKOR Messnetz stark eingeschränkt. Mit Ausnahme von Bamberg im Westen Oberfrankens und Weiden im Norden der Oberpfalz (in Tabelle 6 fett markiert) zeigt sich für die anderen Städte kein typisches Bild der UHI mit überwiegend starker Ausprägung zu nächtlichen und frühmorgendlichen Stunden (Abbildung 15). Wir vermuten, dass dieses Ergebnis ausschließlich durch die fehlende Datengrundlage bedingt ist. Die innerstädtisch (jedoch selten in stark verdichteten Vierteln) gelegenen LfU-Stationen zeigen einen größeren UHI-Effekt tagsüber als nachts.

## a) LfU Bamberg (urban) - DWD BM (rural) 2007-2019



### b) LfU Weiden (urban) - DWD WEN (rural) 2000-2019

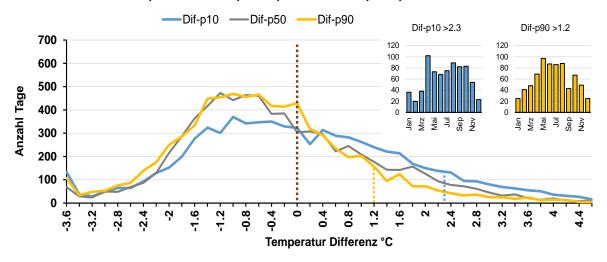


Abbildung 15: Häufigkeitsverteilung der Differenzen Lufttemperatur zwischen der LfU-Messstation (i.d.R.) Innenstadt (urban) und der DWD-Messstation außerhalb der Stadt (rural). Bamberg Entfernung (Luftlinie) beider Stationen 3,6 km, Weiden 2.3 km. Positiv = LfU wärmer als DWD und v.v. Berechnung pro Tag der 10%, 50% und 90%-Perzentile aus Halbstundenwerten. Differenz (Dif) der jeweiligen Perzentile (p) LfU-DWD: Difp10 = Nachtwerte, Dif-p50 = Durchschnitt, Dif-p90 = Werte tagsüber.

## 4.1.4 Computermodellierung PALM-4U Stadt Bayreuth

# Meilensteine Klima: M6 und M7, Modellierung/Simulationen mithilfe numerischer Computermodelle

Zur Implementierung des Computermodells PALM-4U-Bayreuth in die Infrastruktur der Universität Bayreuth und in die Arbeitsgruppe Mikrometeorologie bedurfte es erhebliche, nicht vorhersehbare Anstrengung. Erst durch die Gewinnung von Frau Leyla Sungur (Masterstudentin, Sungur 2021) ab Spätfrühling 2020 konnte diese Aufgabe verwirklicht werden. Viele der technischen Schritte das Modell zum Laufen zu bringen waren Neuland und Pionierarbeit und bedurften externer Expertise, die nicht in der Hand des MiSKOR-Teams lagen, wie in Kapitel 3.1.3 erläutert. Die größte Verzögerung in der Umsetzung der Modellberechnungen auf dem Supercomputer-Cluster der Universität Bayreuth war die begrenzte Verfügbarkeit von Rechenzeiten und Rechenknoten (CPU-Prozessor-Kerne). Die Ressourcen-Anforderungen bestimmter Modell-Konfigurationen waren zu umfangreich und technisch mit den Möglichkeiten an der Universität Bayreuth nicht umsetzbar. Erst durch die Entscheidung das Modellgebiet zu verkleinern und bestimmte

rechenintensive Schritte wie das dynamische Nesting oder die RCP-Klimaszenarien fallen zu lassen, konnten die benötigten Rechenknoten ausreichend reduziert werden. Zudem wurde eine Re-Start Prozedur entwickelt, so dass eine aus beliebigen Gründen abgebrochene Simulation ab der letzten Speicherung fortgeführt werden konnte, ohne die ganze Simulation wiederholen zu müssen. Letztendlich wurden die LES-Simulationen jedoch zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Endberichts abgeschlossen, wenn auch mit erheblicher Verzögerung (ein erfolgreicher Basislauf plus 3 Szenarien brauchen i.d.R. 5 Wochen reine Rechenzeit).

Die final festgelegten Ausschnitte des Modellgebietes Bayreuth beginnen mit der Erfassung fast der gesamten Stadtgrenze, 16,2 x 13,5 km (810 x 675 horizontale Gitterflächen à 20 x 20 m Größe und 64 dynamische Höhenschichten, bis ca. 3 bis 5 km ü. Grund). Die kleinste Child-Domäne beträgt 2,0 x 1,5 km bei 5 m Gitterauflösung. Um die Idee des MiSKOR-Projekts fortzuführen, werden neben der Basis-Simulation, die den Ist-Zustand der Stadt Bayreuth simuliert, zur Darstellung der computerberechneten räumlichen Verteilung bioklimatischer Parameter für den ausgewählten Zeitraum der Hitzewelle 24. Juli bis 28. Juli 2019 zwei Manipulationsszenarien modelliert.

In der Basis-Simulation (Abbildung 16) soll gezeigt werden, inwieweit das PALM-4U-Bayreuth ähnliche städtische Effekte berechnet, wie durch Messungen des MiSKOR-Messnetzwerkes belegt. Sowohl die gefühlte Temperatur (perceived temperature) als auch die Lufttemperatur zeigen

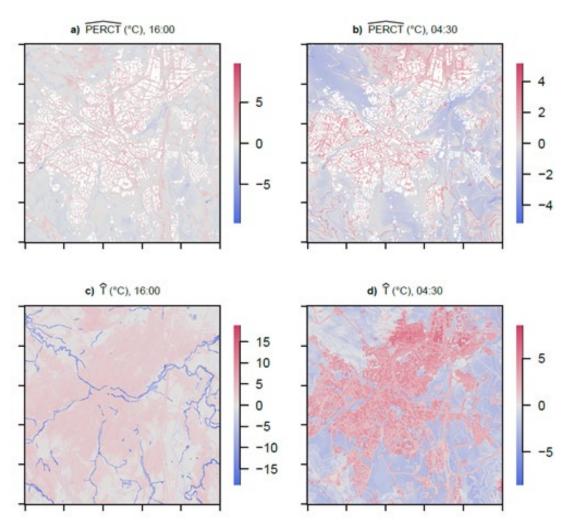


Abbildung 16: Large-Eddy-Simulation, numerisches, physikalisches Computermodell PALM-4U-Bayreuth. Temperaturfelder während der Hitzewelle 25. bis 28 Juli 2019. Abweichung vom Gebietsmittel. PERCT: perceived temperature (gefühlte Temperatur), T: Lufttemperatur, beides in Grad Celsius. Berechnung für nachmittags 16 Uhr und morgens vor Sonnenaufgang 4:30 Uhr MEZ.

für die simulierte Hitzeperiode eine mittlere räumliche Differenz von +1 K zwischen Stadt und Umland auf, und als maximale Temperaturabweichung zwischen der Innenstadt Bayreuths und dem Umland wurde für die Nachtzeit Differenzen von bis zu +5,1 K berechnet. Wie real beobachtet, zeigt auch die Berechnung eine ausgeprägte urbane Wärmeinsel während der Nacht (Abbildung 16b und d), also größere nächtliche Unterschiede zwischen Minimum und Maximum der Temperaturen als tagsüber (Abbildung 16a und c).

Die hier gezeigten Szenarien wurden aufgrund ihrer möglichen technischen Umsetzung und aufgrund bereits bestehender Überlegungen des Bayreuther Stadtrats zur Renaturierung des Rotmain-Kanals durch die Innerstadt ausgewählt. Das erste Szenario untersucht den Einfluss der Wasserfläche auf die Oberflächenenergiebilanz für den Stadtraum Bayreuth. Dafür wurde im Modell die Wasserfläche innerhalb des Stadtgebiets verdoppelt (Abbildung 17**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Eine Vergrößerung der Wasseroberfläche (z.B. des Roten Mains) sollte bei entsprechender autochthoner, windschwacher Hochdruck-Wetterlage (Hitzewelle Juli 2019) zu einer niedrigeren Lufttemperatur in der direkten Umgebung führen. Das Ergebnis der Rechnung zeigt zwar tagsüber eine Akkumulation kühlerer Flächen an Stelle der neu gewonnenen Wasserflächen, aber keinen räumlich übergreifenden Einfluss auf die vorherrschende Temperaturverteilung der Umgebung. Nachts konnte ein kleiner kühlender Effekt lokal

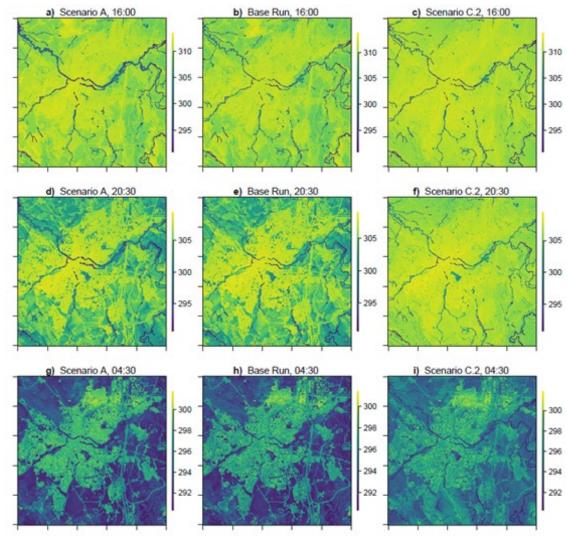


Abbildung 17: Large-Eddy-Simulation, numerisches, physikalisches Computermodell PALM-4U-Bayreuth. Temperaturfelder in Kelvin während der Hitzewelle 25. bis 28 Juli 2019 für nachmittags 16:00 Uhr, abends 20:30 Uhr und nachts 4:30 Uhr MEZ. Szenario A: Verdopplung der Wasserflächen Flusslauf. Szenario C2: Trockenstress (trockner Boden anstatt Vegetation außer Hofgarten). Base Run: Basissimulation Ist-Zustand ohne Manipulation.

auf Höhe der Mainauen festgestellt werden, ohne jedoch größerer Auswirkungen auf das weitere Stadtgebiet (Abbildung 17g).

Das zweite Szenario untersucht die Auswirkung von Trockenstress auf die Stadtvegetation während der Hitzeperiode (Abbildung 17). Wie wirkt sich das Austrocknen der Böden und der Vegetation unter Ausbleiben von Bewässerung und folglich verminderter Verdunstung auf die Lufttemperaturen in der Stadt aus? Welchen Effekt ruft städtische Begrünung hervor und was für eine räumliche Ausdehnung wird durch diese abgedeckt? Welche Rolle spielt der Hofgarten als zentrale innerstädtische Grünfläche in Bayreuth? Hierfür wurden alle inner- und außerstädtischen Grünflächen, die vorher mit Grasflächen klassifiziert wurden durch kahlen Boden ersetzt (bei Variante C2 bleibt Hofgarten grün, Abbildung 17 rechts Mitte, Abbildung 17 rechte Spalte). Trockenstress hängt direkt mit einer geringeren Transpiration der Pflanzen zusammen, weshalb sich der latente Wärmefluss (Feuchtefluss in die Atmosphäre) verringert. Als Reaktion in einer ausgeglichenen Oberflächenenergiebilanz führt dies zwangsläufig zu einer entsprechenden Zunahme des fühlbaren Wärmeflusses (größerem Bowen-Verhältnis) und ebenso folglich zu ansteigenden Lufttemperaturen. Die Berechnung unter Trockenstress ergab eine stärkere Auswirkung auf die Lufttemperatur während der Nacht von +1.0 K (Abbildung 17i) als am Tag von +0.5 K (Abbildung 17c oder f).

Der zeitliche Verlauf der Basissimulation (Abbildung 17 Mitte) spiegelt die Abkühlung des überwiegend unbebauten Umlandes und der kühlen, "Grünen Finger" (unbebaute Gewässerverläufe und Auen) im Laufe des Abends und der Nacht realistisch wider. Die aufgewärmten versiegelten Stadtflächen hingegen kühlen sich erheblich langsamer ab und erzeugen die nächtliche urbane Wärmeinsel (auffällig die besonders überwärmten Industriegebiete im Norden Bayreuths. Abbildung 17 linke Spalte zeigt nur unmittelbar entlang der verdoppelten Gewässerverläufe einen abkühlenden Effekt, und die Trockenstress-Simulation (C2) bestätigt neben die Grunderwärmung des ganzen Modellbereiches zudem die realen Beobachtungen (Spies 2019), dass der Hofgarten als städtischer Park nicht in der Lage ist, einen kühlenden Effekt auf die angrenzenden, dichtbebauten Stadtviertel auszuüben.

Die Modellsimulationen stellen eine realistische Wiedergabe der bioklimatischen Bedingungen für Bayreuth dar und sind somit in der Lage, das Stadtwetter in Bezug auf die Magnitude und Tagesgänge der physikalischen Messgrößen und deren räumliche Verteilung realistisch zu berechnen. Dies wird durch die Berücksichtigung realer, atmosphärischer (synoptischer) Steuerungsbedingungen sowie durch Verwendung aufwendig korrigierter statischer Daten (Topographie, Gebäude- und Landnutzungsklassen) erreicht. Es hat sich gezeigt, dass sich die Bayreuther LES-Simulierung als ein zuverlässiges Werkzeug zur Untersuchung urbaner Effekte erweisen konnte.

## 4.1.5 Zeitlich begrenzte mobile Temperaturmessungen

## Meilenstein Klima M4: Experimentelle Erfassung der UWI im Stadtgebiet Bayreuth

Die Fahrten der ersten Messkampagne im Aug/Sep 2018 bestanden aus räumlich kontinuierlichen Messungen während der Fahrt zwischen Hofgarten-Park und den umliegend, bebauten Wohngebieten (Abbildung 18) entlang der Route in regelmäßigen Abständen durchgeführten punktuellen Messungen (Fahrstopps A bis G, Abbildung 18) im Park, Straße und im Wohngebiet (Spies 2019). Die gefühlte (perceived) Temperatur wurde über das Konzept des *Universal-Thermal-Climate-Index* (UTCI, Jendritzky et al. 2002 & 2012) abgeschätzt (Abbildung 18a, b, c). Differenzen zum Mittelwert der jeweiligen Fahrt sind aufgetragen, um die Wärmemaße zu vergleichen. Deutliche Unterschiede zwischen den versiegelten, bebauten Standorten A, B & E und denen im Stadtpark (unterm Kronendach C, F & G, über Wiese D) sind zu erkennen. Interessant ist, dass die Verwendung des UTCI gegenüber der herkömmlichen Lufttemperatur keinen Vorteil

entlang dieser Route bringt. Daher ist der Einsatz teurer Technik (Thermalbilder) bzw. aufwendiger Messungen (gefühlte Temperatur bzw. UTCI braucht neben Temperatur auch Feuchte, Strahlung, Wind) prinzipiell nicht notwendig.

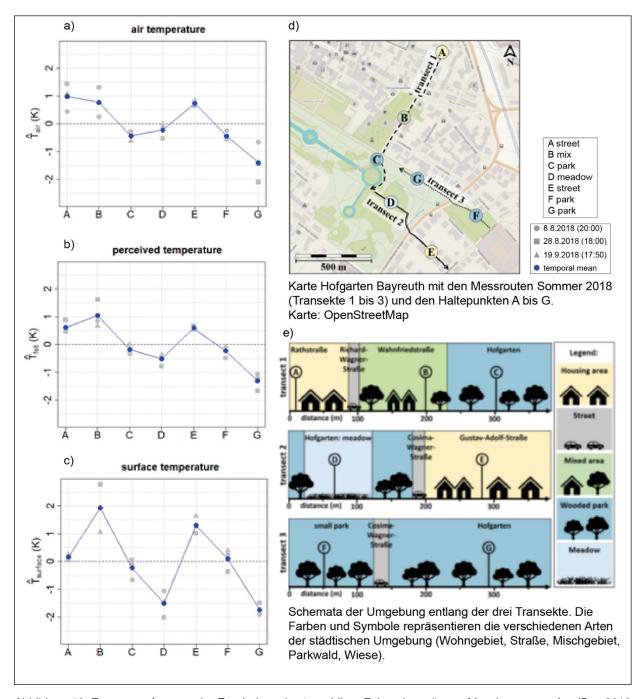


Abbildung 18: Zusammenfassung der Ergebnisse der 1. mobilen, Fahrrad gestützten Messkampagne Aug/Sep 2018 (Spies 2019). Abendmessungen, Differenzen zum Mittel: a) Tair = Lufttemperatur. B) Tfelt = gefühlte (perceived) Temperatur (UTCI-Index). c) *Tsurface* = Oberflächentemperatur (Infrarot-Kamera).

Ergebnisse in Tabelle 7 belegen die räumliche Variabilität der Temperaturmaße auf kleinsten Raum in einer städtischen Umgebung. Die drei Messfahrten aus dem Spätsommer 2018 zeigen UHI-Beträge (Tabelle 7b) ähnlich denen der Ergebnisse der ortfesten MiSKOR Wetterstationen. Selbst innerhalb der innerstädtischen Parkanlage Hofgarten (vlg. unter Baumkronen oder auf offener Wiese) und in Bezug auf die direkt angrenzenden, bebauten Stadtteile zeigen sich beachtliche Differenzen (Tabelle 7c, Abbildung 18a) durch Ausprägung räumlich eng begrenzter **Park-Cool-Islands** (Kälteinsel Parks/Grünflächen).

Die zweite Messkampagne mit mobilen fahrradgestützten Lufttemperaturmessungen fand vom 09. bis 11.08. und vom 21. bis 26.08.2019 statt (Tschuschke 2020). Erneut wurden windschwache Wetterlagen bei möglichst klarem Himmel ausgesucht, diesmal jedoch auf einer Fahrtstrecke von 15 km vermessen (Tabelle 7, Abbildung 19, Abbildung 20).

Tabelle 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der 1. mobilen, Fahrrad gestützten Mess-Kampagne Aug/Sep 2018 (Spies 2019).

a) Wetterbedingungen der ruralen Referenzstation ÖBG Univ. Bayreuth. Messhöhe ü. Grund 2 m für Temperatur T und Sonnenstrahlung K m für Wind u. Mittelung jeweils über die Zeit bei Tageslicht (wenn K 10 W m $^{-2}$  ist).  $T_{max}$  = Tagesmaximum,% = Prozentanteil wenn u < 1.5 m s $^{-1}$ . SWz, SWa = Südwestlage, zyklonal bzw. antizyklonal (Tief-, bzw. Hochdruck gesteuert), Wa = Westlage antizyklonal (Westwind Breitenkreis folgend, Hochdruck gesteuert).

Messtag	Wetterlage	<i>T</i> , ( <i>T</i> <sub>max</sub> ) °C	u ,5) m s <sup>-1</sup>	K <sup>-2</sup>
08.08.2018	SWz	28,0 (32,3)	2,4 (45%)	356
28.08.2018	Wa	21,0 (25,2)	1,4 (65%	384
19.09.2018	SWa	22,9 (27,9)	1,7 (55%)	298

T<sub>Luft</sub>: Beträge der UHI (Urban-Heat-Island) in °C zwischen Standort E (Abbildung 18), Straße, dich verbautes Wohngebiet und jeweils der ruralen Referenzstation ÖBG Univ. Bayreuth. Zeitangaben in Sommerzeit MESZ.

Messtag	morgens (Uhrzeit)	abends	morgens & abends	
08.08.2018	1,2 (10:00)	2,4 (20:10)	1,8	
28.08.2018	1,9 (09:40)	1,2 (18:20)	1,5	
19.09.2018	1,7 (08:50)	0,7 (18:00)	1,2	
alle Tage	1,6	1,4	1,5	

c) Differenzen Lufttemperatur: Beträge der **PCI** (Park-Cool-Island) in °C zwischen den Park-Standorten (Hofgarten) C und G (Abbildung 18), und jeweils Standort E (Straße, dich verbautes Wohngebiet als urbane Referenz.  $T_{Luft}$  = Lufttemperatur,  $T_{Oft}$  = Oberflächentemperatur (Infrarot-Kamera), Tgef = gefühlte (perceived) Temperatur (UTCI-Index). Zeitangaben in Sommerzeit MESZ.

Messtag (Uhrzeit)	$T_{Luft}$	$T_{Ofl}$	$\mathcal{T}_{gef}$
08.08.2018 (20:10)	-1,9	-1,7	-1,6
28.08.2018 (18:20)	-1,2	-2,5	-1,3
19.09.2018 (18:00)	-1,9	-2,6	-1,1
alle Tage	-1,7	-2,3	-1,3

Diese Messfahrten verwendeten einen erheblich schneller reagierenden, elektrisch belüfteten Sensor in einem Strahlungsschutz mit einer durchschnittlichen Zeitkonstante von nur ca. 1,7 s (63%). Die Verwendung von schnellen Messsensoren bei konstanter Belüftung und effektivem Strahlungsschutz ist zwingende Voraussetzung für eine korrekte Erfassung räumlicher Lufttemperaturdaten mit bewegten Plattformen. Dieser Grundsatz gilt ebenfalls für andere Messgrößen (Luftfeuchte, Wind, etc). Wie 2018 erfolgten die Messungen am späten Nachmittag (zur Zeit der zu erwartenden Höchsttemperaturen), am Abend nach Sonnenuntergang und am Morgen vor Sonnenaufgang (zu erwartenden Tiefsttemperaturen). Jede der insgesamt 41 Messfahrten wurde von zwei im Abstand von 15 min versetzten Fahrer\*innen im Uhrzeigersinn durchgeführt. Unterschiede zwischen dem nachmittäglichen Temperaturfeld und den beiden Zeiträumen abends und morgens werden deutlich (Abbildung 19). Die größten räumlichen Temperaturdifferenzen mit über 7 °C wurden in den Abendstunden gemessen. Dies zeigt anschaulich die Kartendarstellung in Abbildung 19. Zur Einordnung sind neben den Temperaturdaten die Standorte des festen MiSKOR-Messnetzes, bekannte Strömungshindernisse und entsprechende Bereiche mit Luftstau (zumeist kalter Luft) eingetragen. Abbildung 20 fasst die zurzeit bekannte Luftströmungssituation bei entsprechenden austauscharmen, autochthonen Wetterlagen für den Großraum Stadt Bayreuth zusammen. Dieses räumliche Muster wurde durch Beobachtungen des MiSKOR-Messnetzes und durch die zwei mobilen Kampagnen synthetisiert. Inwieweit weitere Erkenntnisse durch die Auswertung der LES-Modell PALM-4U-Bayreuth Läufe hinzukommen, steht noch aus.

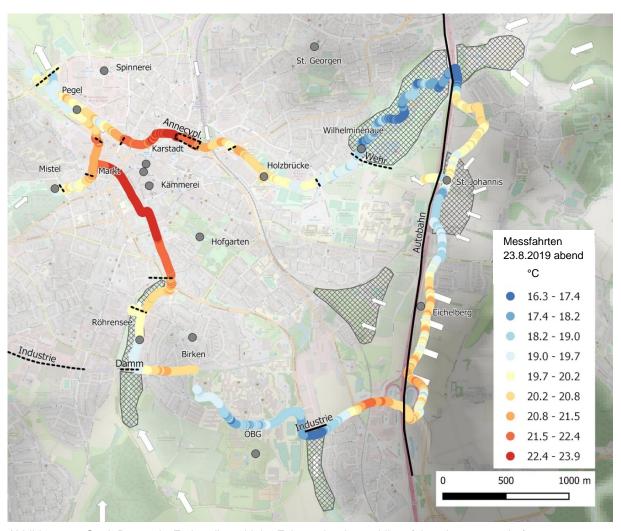


Abbildung 19: Stadt Bayreuth. Farbcodierte Linie: Fahrstecke der mobilen, fahrradgestützten Lufttemperaturmessung Messfahrt am 23. Aug. 2019, 20 Uhr abends. Standorte der festinstallierten MiSKOR-Wetterstationen (graue Punkte). Weiße Pfeile: orographische Falllinien, mögliche bodennahe Luftströmung bei austauscharmer Wetterlage. Schwarze Linien: Strömungshindernisse. Grauschraffierte Flächen: (Kalt)Luftstau. (Kartengrundlage: OpenStreetMap. Schattierung: je dunkler, je höher über NN gelegen).

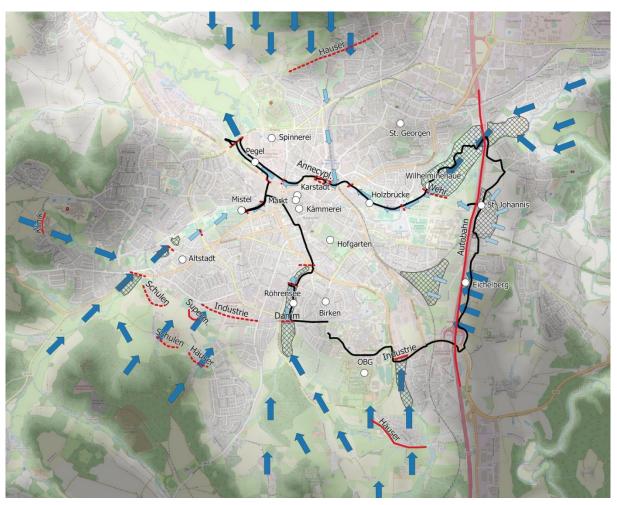


Abbildung 20: Stadt Bayreuth. Schwarze Linie: Fahrstecke der mobilen, fahrradgestützten Lufttemperaturmessung Sommer 2019. Standorte der festinstallierten MiSKOR-Wetterstationen (weiße Punkte). Blaue Pfeile: orographische Falllinien, mögliche bodennahe Luftströmung bei austauscharmer Wetterlage. Rote Linien: Strömungshindernisse. Grauschraffierte Flächen: (Kalt)-Luftstau. (Kartengrundlage: *OpenStreetMap*. Schattierung: je dunkler, je höher über NN gelegen).

#### 4.2 Ozon

#### 4.2.1 Zusammenhang meteorologischer Größen und der Bildung bodennahen Ozons

#### Meilensteine Ozon: M2 Erfassung des statistischen Zusammenhangs zwischen meteorologischen und luftchemischen Parametern und Ozonkonzentration in Nordbayern

In Abbildung 21 sind die durchschnittlichen Verbesserungen der Einflussfaktoren für die Ozon-konzentrationen in Nordbayern über die mittlere quadratische Abweichung (MSE %) dargestellt, berechnet über die relative Bedeutung der jeweiligen Einflussfaktoren (oben links in den Subplots) (Nabavi et al. 2021). Der gewählte Ansatz zeigt stärker differenziert als der im Antrag vorgeschlagen Straffaktor den Einfluss der unterschiedlichen Faktoren für die Ozonbildung. Die durchschnittliche Gebietskonzentration von Ozon (AA-Ozone) hat mit 23,5% die höchste Bedeutung, gefolgt von NO<sub>2</sub> (23,3%), Temperatur (15,2%), der übergeordnete Ozontransport (BT-Ozon), NO (7,8%), Tag des Jahres (7,2%), Tageszeit (6,7%), Höhenlage (2,2%) und absolute Luftfeuchtigkeit (1,5%). Die vier an letzter Stelle stehenden Faktoren, u.a. Windgeschwindigkeit, Windrichtung wurden nicht weiter berücksichtigt.

In Abbildung 21 sieht man sehr gut den schnellen Wechsel von positiven zu negativen SHAP Werten schon bei niedrigem NOx, besonders von NO. Dies zeigt, dass die photochemischen

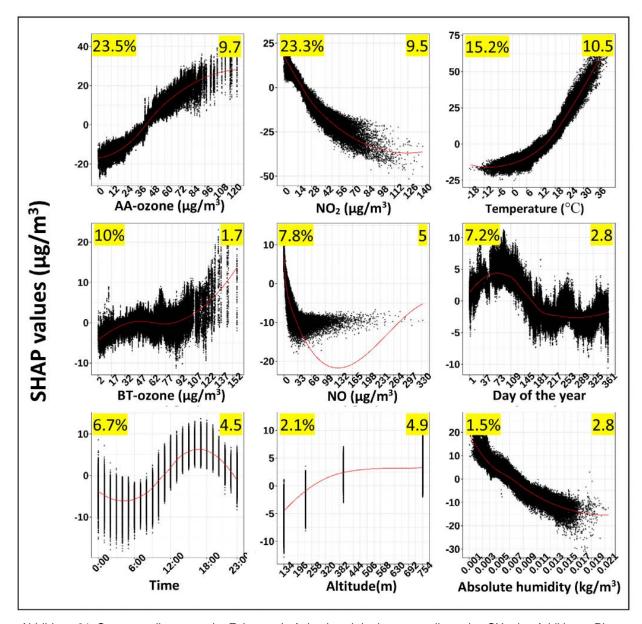


Abbildung 21: Streuungsdiagramm der Faktoren (x-Achse) und der korrespondierenden SHapley Additive exPlanations (SHAP) Werte (μg/m³) (y-Achse). In den linken oberen Ecken ist der MSE in% angegeben, in der rechten oberen Ecke der absolute SHAP Wert (Nabavi et al. 2021)

Prozesse in den Untersuchungsgebieten durch geringe VOC-Werte limitiert sind (Song et al. 2011). Die größere Streuung bei den SHAP Werten von NO<sub>2</sub> im Vergleich zu NO lässt sich der Photolyse von NO<sub>2</sub> zuschreiben. Dadurch wird nicht nur NO generiert, was wiederum O<sub>3</sub> verbraucht, um wieder NO<sub>2</sub> zu bilden. Zudem entstehen Sauerstoffradikale, die mit O<sub>2</sub> wieder O<sub>3</sub> bilden (Monks et al. 2014).

Die SHAP Werte der Temperatur stimmen mit Resultaten von Jing et al. (2017) überein, die ebenfalls einen Zusammenhang mit dem täglichen 8-Stunden-Maximum (MDA8) des O<sub>3</sub>-Mischungsverhältnisses feststellten. Es zeigt sich, dass O<sub>3</sub>-Konzentrationen ab Temperaturen von 17 °C steigen (berechnet über die erste Ableitung des Polynoms). Bei dieser Temperatur wechseln in unseren Untersuchungen die SHAP Werte ebenfalls vom Negativen ins Positive. Die positive lineare Korrelation von Temperaturen zwischen 21 und 39 °C zeigen auch Steiner et al. (2010). Mit einem Box-Model bestätigen Coates et al. (2016), dass diese positiven Zusammenhänge mit höheren chemischen Reaktionsraten zusammenhängen.

Die NO- und NO<sub>2</sub>-Konzentrationen (blau und rot in Abbildung 22-A) sowie der vorhergesagten O<sub>3</sub>-Konzentrationen zwischen 21 und 46 µg/m³ zeigen, dass NOx-Eigenschaften (features) den größten Einfluss auf die O<sub>3</sub>-Konzentrationen haben, wobei NO > 22,5 µg/m³ und NO<sub>2</sub> > 42 µg/m³ die höchsten positiven Koeffizienten aufweisen (Abbildung 22-A), gefolgt von meteorologischen Größen. Zu diesen gehören Temperaturen zwischen 18 °C und 22 °C (grün), eine absolute Luftfeuchtigkeit zwischen 0,004 und 0,0048 kg/m³ (orange) und BT-Ozon > 91,2 µg/m³ bei der Vorhersage hoher Ozonkonzentrationen (Abbildung 22-B schwarz). Wir schließen daraus, dass die Basiskonzentrationen von O<sub>3</sub> bei kühlen und feuchten Wetterbedingungen von lokalen NOx-Konzentrationen bestimmt werden. Im Gegensatz dazu bestimmen die Temperatur und die absolute Luftfeuchtigkeit hohe regionale O<sub>3</sub> Konzentrationen bei warmen und trockenen Wetterlagen, die durch Ferntransport in die Region verstärkt werden (Nabavi et al. 2021). Auch Sousa et al. (2009) kommen zu dem Schluss, dass NOx-Konzentrationen entscheidend bei niedrigen O<sub>3</sub> Werten sind, während die Temperatur und Luftfeuchtigkeit bei Ozonspitzen an Bedeutung gewinnen.

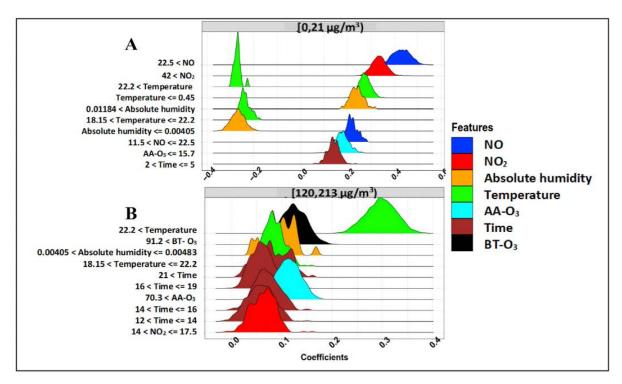


Abbildung 22: Verteilung der Koeffizienten (x-Achse) für die 10 einflussreichsten Faktoren (y-Achse) für die Abschätzung der O<sub>3</sub> Konzentrationen der Konzentrationsbereiche 0 bis 21 μg/m³ (A) und 120 bis 213 μg/m³ (B). (Spanne der Koeffizienten unterscheidet sich in den Subplots)

Abschließend hat ein hybrides Modell aus XGBMs und CAMS-EU eine signifikante Verbesserung der Ozonvorhersage in allen Jahreszeiten gebracht, wobei im Weiteren keine saisonalen Vorhersagen getroffen wurden. Der stationsbezogene statistische Fehler zwischen Beobachtung und Abschätzung dargestellt über den *Root-Mean-Square Error* (RMSE) liegt im Frühling und Sommer zwischen 9,7 und 11,4 μg/m³. Der Mittelwert des saisonalen Spearman Korrelationskoeffizienten lag nie unter 0,94 (Nabavi et al. 2021). Wenn anders als bei uns nur multivariate, statische Verfahren zum Einsatz kamen, war die Güte der Vorhersage deutlich schlechter. So berichten Watson et al. (2019) eine Pearson Korrelationskoeffizienten (r) von 0,82 und Zhan et al. (2018) einen RMSE von 27 μg/m³ bei einem r von 0,83. Auch in einer vergleichbaren neuen Studie von Liu et al. (2020), die räumlich kontinuierlichen Vorhersagen von MDA8 unter Einbeziehung von OMI troposphärischen Ozon, Reanalyse von Aerosolen und Landnutzung machen, lag der RMSE mit 27,3 μg/m³ deutlich höher als unser Fehler von 9,5 μg/m³.

Die Ergebnisse dieses Kapitels geben klare, statistisch signifikante Einsichten in die Bildungsbedingungen von O<sub>3</sub> in Nordbayern, die im Weiteren für Prognosen einer zukünftigen Entwicklung herangezogen werden können.

Zwischenergebnis: bei kühlen Wetterlagen sind die lokalen NOx-Konzentrationen entscheidend für die Ozon-Konzentration, bei trockenen, warmen Wetterlagen ist hingegen die Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit ausschlaggebend, verstärkt durch Ozontransport.

# 4.2.2 Trends der Ozonkonzentration in Nordbayern und Überschreitungswahrscheinlichkeiten von Grenzwerten

# Meilensteine Ozon: M3 Statistische Analyse historischer Trends der Ozonkonzentrationen und Überschreitungshäufigkeiten von Schwellenwerten in Nordbayern

Für den Untersuchungszeitraum 1995-2017 lässt sich ein signifikanter Anstieg der Ozonwerte in Nordbayern feststellen, vor allem in der warmen Jahreszeit (Abbildung 23). Im Sommer weisen Werte um das 90% Quantil einen linearen Trend von  $0.4~\mu g/m^3$ , im Frühjahr von  $0.2~\mu g/m^3$  auf, was einem Anstieg von etwa  $9.2~\mu g/m^3$  bzw.  $3.9~\mu g/m^3$  für den Untersuchungszeitraum entspricht. Dahingegen haben niedrige  $O_3$  Werte, um das 10% Quantil ein konstantes Verhalten oder sie nehmen im Frühjahr sogar ab. Für NO- und  $NO_2$  zeigt sich in den Sommermonaten hingegen ein negativer Trend. Im Beobachtungszeitraum von 23~Jahren ergibt sich so ein Rückgang um  $3.5~\mu g/m^3$  und  $9.8~\mu g/m^3$  für das 10% Quantil, von  $3.6~\mu g/m^3$  und  $1.4~\mu g/m^3$  für das 50% Quantil, sowie  $0.01~\mu g/m^3$  und  $1.6~\mu g/m^3$  für das 90% Quantil. Die Sommertemperatur stieg um  $3.2~{}^{\circ}$ C an, wohingegen die absolute Feuchte um  $0.0005~k g/m^3$  zurück ging, beides für alle Wertebereiche, also niedrige (10% Quantil) und auch hohe (90% Quantil). Die Veränderungen der Vorgängersubstanzen von  $O_3$  und der meteorologischen Größen fördern so einen möglichen Anstieg von Ozon in Nordbayern, besonders in der warmen Jahreszeit.

Auch wenn der generelle Trend von Ozon in Nordbayern nach oben zeigt, nehmen sowohl die Kennzahlen (Tabelle 2) für kurzeitige Belastungen (Abbildung 24) als auch langzeitigen Belastungen (Abbildung 25) an Stationen in ländlichen Regionen ab. Dieses Verhalten ist in Übereinstimmung mit Resultaten einer Studie für ländliche Regionen in Europa von Monks et al. (2014). Wie schon ausgeführt, wird der Rückgang mit einer Reduktion von verkehrsbezogenen Stickoxid-Emissionen in städtischen Gebieten und dem dadurch verringerten Schadstofftransport aus den Städten in ländliche Gebiete in Verbindung gebracht. Im Gegensatz dazu steigen die Gesundheitskennzahlen von O3 in städtischen Gebieten an, besonders in Hof und Schweinfurt. Dies ist bedingt durch den Rückgang von Stickstoffmonoxid und damit der reduzierten O3-Bildung. Erwähnenswert ist ein Phänomen an den Stationen Hof und Schweinfurt, für das wir in unserer Studie keine Erklärung haben. Die langfristigen Belastungskennzahlen nehmen überproportional zu (Abbildung 25). So betragen die Trends der kurzeitigen Belastungskennzahlen (4MDA8, NGT60, SOMO35) 0,512, 0,285 bzw. 0,023 (Trendraten in den Einheiten des langjährigen Mittels 1995-2017), wohingegen die langfristigen Kennzahlen (3MMDA1, AOT, AVGMDA8) Trendraten von 0,775, 155,971 und 0,790 aufweisen.

Insgesamt muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass die Trends an den meisten Stationen nicht signifikant sind (keine Punkte in Abbildung 24 und Abbildung 25). Dies ist sehr wahrscheinlich auf die relativ kurze Zeitreihe der Ozonmessungen und der hohen innerannuellen Schwankung von  $O_3$  zurückzuführen. Deshalb müssen die Entwicklungen an Stationen mit längeren Zeitreihen weitergehend untersucht werden. Mit unserem Ansatz einer logistischen Regression lässt sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit von  $O_3$  Werten über 120  $\mu$ g/m³ erfolgreich vorhersagen (s. siehe Kap. 4.2.4), wobei die Signifikanzniveaus für Sensitivität, Spezifität und Genauigkeit bei 0,94, 0,95 bzw. 0,95 liegen (Nabavi et al. 2021).

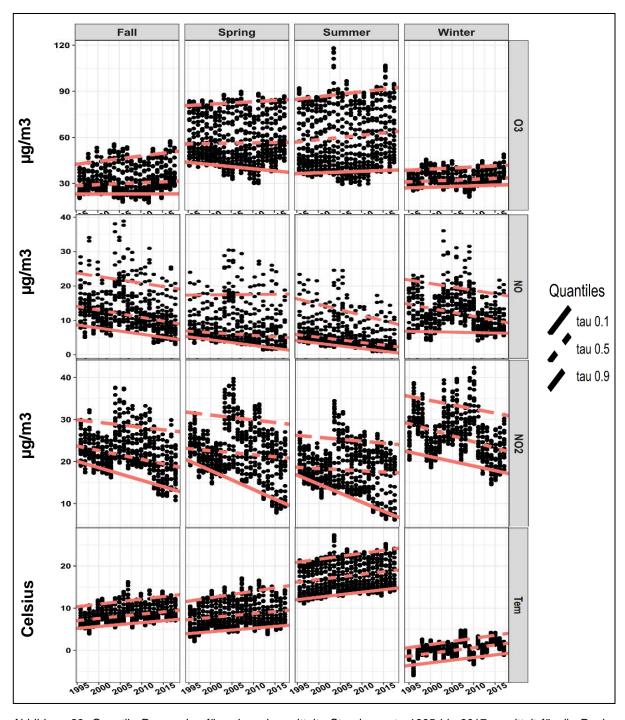


Abbildung 23: Quantile Regression für saisonal gemittelte Stundenwerte 1995 bis 2017 gemittelt für die Region Nordbayern. Insgesamt 552 Datenpunkte (23 Jahre x 24 Stunden) wurden für die Berechnung der Trends des 10%, 50% und 90% Quantil herangezogen. Alle Trends sind auf dem 0,95 Niveau signifikant.

Legt man die Grenzwerte in der EU für kurz- und langzeitige Gesundheitskennzahlen zugrunde, liegen die Werte für kurzeitigen Kennzahlen NDGT60 und AOT40 nahe an den Grenzwerten von NDGT60 < 25 Tage im Jahr und AOT40 < 18000  $\mu g/m^3$ , ihre langfristigen Mittelwerte (Farben Abbildung 25) und Zielgrößen (NDGT60 = 0 und AOT < 6000  $\mu g/m^3$ ) allerdings weit unter den Grenzwerten. In den Diagrammen ist mit den Pfeilen der Trend in den Einheiten das langjährigen Mittels dargestellt. Für 4MDA8\_O3 (Abbildung 24 obere Zeile) bedeutet die Zahlen, dass der maximale positive Trend 2,0  $\mu g/m^3$  pro Jahr für den Zeitraum 1995-2017 beträgt und der maximale negative Trend 2,04  $\mu g/m^3$ .

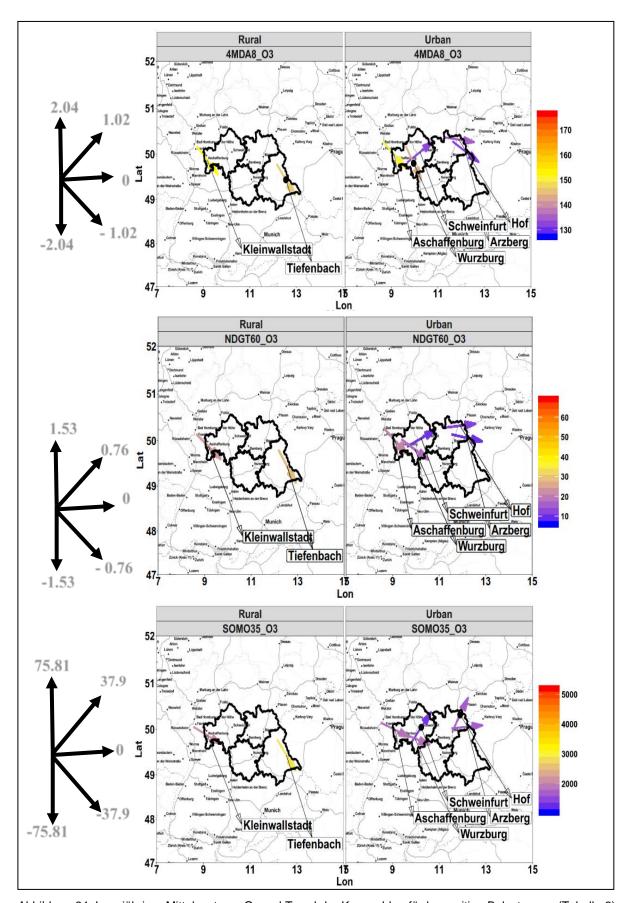


Abbildung 24: Langjähriger Mittelwert von O₃ und Trend der Kennzahlen für kurzzeitige Belastungen (Tabelle 2) für die Jahre 1995-2017. Punkte kennzeichnen signifikante Trends auf dem 95% Niveau. Die Farbe der Pfeile zeigt das langjährige Mittel 1995-2017. Die Trends sind in einen Halbkreis von -90° bis 90° eingepasst, wobei -90° die maximale Abnahme und 90° die maximale Zunahme darstellen. Die Zahlen an den Pfeilen sind die Trendraten in den Einheiten des langjährigen Mittels. Linke Bildreihe sind ländliche Stationen, rechte städti-

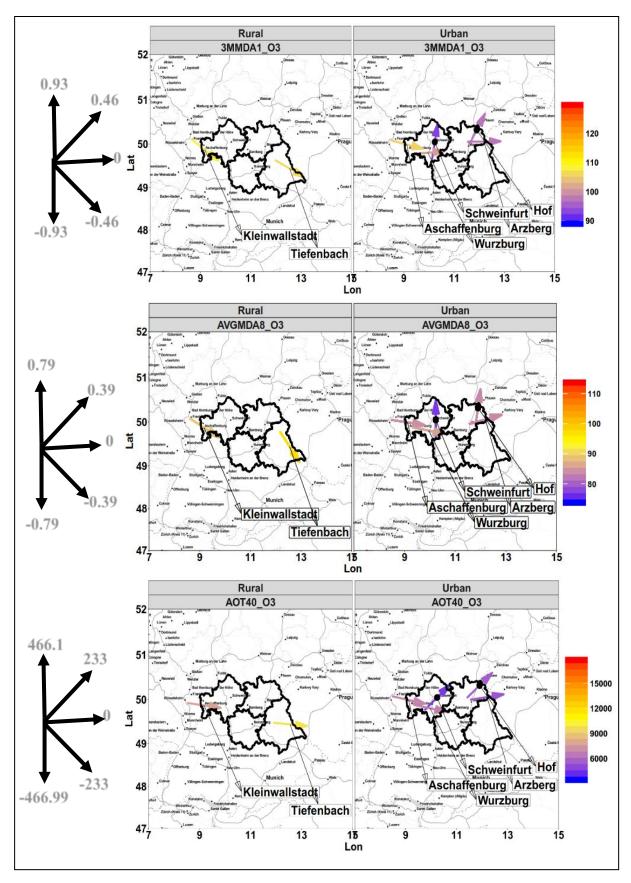


Abbildung 25: Trend der Kennzahlen für langzeitige Belastungen (Tabelle 2) für die Jahre 1995-2017. Die Darstellung entspricht der in Abbildung 24.

#### 4.2.3 Raumzeitliche Differenzierung der Ozonbelastung in Bayreuth

# Meilensteine Ozon: M5 Experimentelle Bestimmung der räumlichen Unterschiede der Ozonkonzentration in Bayreuth und im nahen Umland mit einer fahrradgestützten mobilen Messplattform

Die Resultate der mobilen Messungen von Ozon im Stadtgebiet Bayreuth während des Sommers 2019 sind in Abbildung 26 abgebildet. Allgemein zeigen sich Unterschiede zwischen den Messungen am Morgen und am Nachmittag mit deutlich höheren Werten am Nachmittag. Diese Unterschiede sind auf eine größere Ozonproduktion am Nachmittag mit höherer solarer Einstrahlung zurückzuführen. Hohe Werte finden sich auch in der Klasse dichte Vegetation und landwirtschaftliche Flächen (densely vegetated Area/Arable Land). Dies ist bei sommerlichen Temperaturen und starker solarer Einstrahlung mit hohen Emissionen von VOC erklärbar. Zusätzlich sind die lokalen Emissionen von NOx niedrig. Es ist also ausreichend NO vorhanden, um über die VOC-Photochemie Ozon zu produzieren, doch nicht genug, um Ozon aus der Atmosphäre zu titrieren. Insgesamt unterscheiden sich die Mediane der unterschiedlichen Landnutzungskategorien nur wenig und die Streuung innerhalb der Kategorien ist groß. Diese Streuung macht die Problematik der mobilen Messungen deutlich, die entlang der Routen nicht ganz sicher der jeweiligen Kategorie zuzuordnen waren. Außerdem können zusätzliche lokale Besonderheiten und meteorologische Einflüsse eine große Rolle spielen.

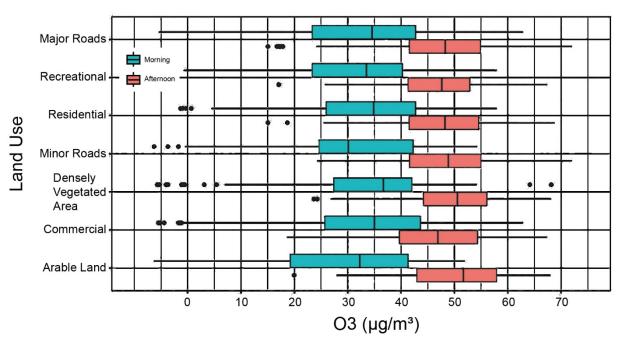


Abbildung 26: Gemessene O<sub>3</sub> Konzentrationen nach Landnutzungskategorie am Morgen und Nachmittag (verändert nach Mahr 2020)

In den Messungen bestätigen sich die tageszeitlichen Schwankungen von O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> und NO in Abhängigkeit des Tagesgangs der Strahlung, des Emissionsverlaufs und der Temperatur und Luftfeuchtigkeit (Adame et al. 2008). Mit den Messungen bestätigt sich auch der in Kapitel 4.2.1 gezeigte Einfluss der Meteorologie. Die höchsten Werte am Morgen wurden bei niedrigen Luftfeuchtigkeitswerten < 60% und höheren Temperaturen > 19,5 °C bei den mobilen Messungen, niedrige Ozonwerte demgegenüber bei Luftfeuchtigkeit > 70% und Temperaturen < 16,5 °C gemessen. Am Nachmittag korrespondieren hohe bzw. niedrige Ozonwerte mit Werten der relativen Luftfeuchtigkeit < 40% bzw. > 50%. Im Gegensatz zu Adame et al. (2008), Stathopoulou et al. (2008), Bloomer et al. (2009) und Meehl et al. (2018) hatte die Temperatur einen geringeren

Einfluss als die relative Luftfeuchtigkeit. Längere, stabile, trockene und warme Wetterlagen führten zu den höchsten Ozonwerten.

Ursprünglich war es das Ziel, mit der LUR die Verteilung von Ozon in Bayreuth mit einer Genauigkeit von einigen Metern zu simulieren. Wegen der oben geschilderten Unsicherheiten der Messungen von O3 und NOx wurde davon abgesehen. Vielmehr wurde für die LUR die Modellvorhersage für jede Landnutzungsklasse aggregiert und gemäß Tabelle 3 modelliert. In Abbildung 27 sind in den Boxplots die jeweiligen Mittelwerte für jede Kategorie, die Schwankungsbreite und Ausreißer dargestellt. Wichtig zu betonen ist die aus den Ergebnissen nicht erklärbare Unterschätzung der Ozonwerte durch die Modellierung. Eindeutige Unterschiede bestehen auch hier zwischen den Ozonkonzentrationen am Morgen und am Nachmittag. Am Nachmittag fällt auf, dass sich die Mittelwerte zwischen den Kategorien kaum unterscheiden. Die höchsten Werte weisen die Kategorien "dichte Vegetation" und "landwirtschaftliche Flächen" auf, wieder erklärbar

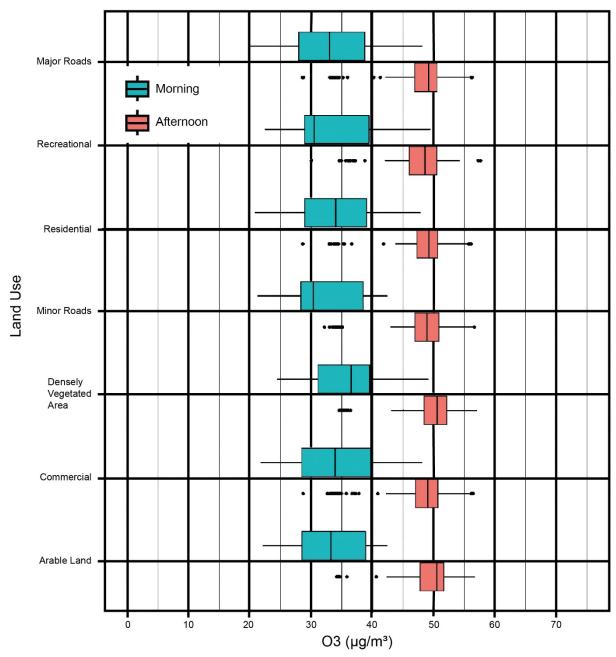


Abbildung 27: Vorhergesagte O<sub>3</sub> Konzentrationen nach Landnutzungskategorie am Morgen und Nachmittag basierend auf LUR (verändert nach Mahr 2020)

durch VOCs und die Stadt-Umland-Unterschiede. Wie bei den Messungen erreichen auch Vorhersagen für Ozon den ersten Grenzwert von 120  $\mu$ g/m³ im Untersuchungszeitraum und in den Vorhersagen nicht.

Die Ergebnisse der Messung entlang von Routen durch die Stadt und der darauf beruhenden Vorhersage werden durch die Messungen an den drei Standorten Maximilianstraße, Hofgarten und Spinnerei weitgehend bestätigt (Abbildung 24).

Insgesamt konnten wir eine starke Saisonalität der Ozonkonzentrationen, jeweils mit höherer Produktion am Nachmittag und ähnlichen mittleren Werten an allen drei Messstandorten, beobachten (Abbildung 28). Deutlich wird damit der Einfluss der solaren Einstrahlung, aber auch der in Kapitel 4.2.1 diskutierte Effekt der Temperatur für die Ozonproduktion. Die niedrigsten O<sub>3</sub>-Werte treten im Februar und März auf und die ausgeprägtesten Tagesgänge im April und Mai.

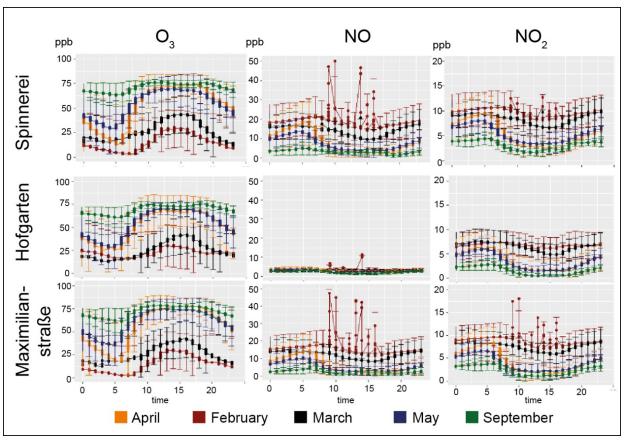


Abbildung 28: Temporäre fest installierte O<sub>3</sub>- und NOx-Sensoren im Stadtgebiet Bayreuth

Die höchsten Werte treten jeweils in den Nachmittagsstunden auf. Der Hofgarten weist dabei mit 34 ppb (68  $\mu$ g/m³) im Winter und 78 ppb (156  $\mu$ g/m³) im Sommer die höchsten Werte auf, gefolgt vom Standort Maximilianstraße mit 30 ppb (60  $\mu$ g/m³) und 77 ppb (154  $\mu$ g/m³), sowie der Spinnerei mit 29 ppb (58  $\mu$ g/m³) bzw. 76 ppb (154  $\mu$ g/m³). Die hohen O₃-Konzentrationen im Hofgarten korrespondieren mit niedrigen NO-Konzentrationen. Dies liegt an der räumlichen Entfernung zu Emissionsquellen, wie Straßen oder Industrie. Durch die niedrigeren NO-Level und die VOC-Emissionen der grünen Lunge entsteht im Sommer im Hofgarten im Mittel etwas mehr Ozon als an den anderen Standorten, was aber nicht signifikant ist. Für NOx kehren sich die Verhältnisse im Vergleich zu Ozon aufgrund der photochemischen Prozesse um. Die Werte sind in der strahlungsärmeren Jahreszeit und in der Nacht höher. Im Winter führen Inversionssituationen zudem zu einer verringerten Verteilung von Luftschadstoffen. Auffällig ist zudem das fast vollständige Fehlen von NO im Hofgarten, was auf fehlende Emissionen und der sofortigen Reaktion von NO und O₃ zu NO₂ zurückzuführen ist.

Um Unterschiede bei der regionalen Hintergrundbelastung auszuschließen, wurde Ox ( $O_3+NO_2$ ) als Funktion aufgetragen von NOx (NO+NO<sub>2</sub>). Es zeigen sich ähnliche regionale Hintergrundbelastung durch Ozon an allen drei Standorten mit ca. 10 ppb (20 µg/m³) im Winter und 65 ppb (130 µg/m³) im Sommer.

#### 4.2.4 Modellierung der Projektion der Ozonproduktion und der Veränderung der Ozonbelastung für die Klimaszenarien RCP4.5 und RCP8.5

Meilensteine Ozon: M9 Simulation zukünftiger Ozonbildungspotentiale mithilfe dynamischer Modelle für ausgewählte Szenarien bezüglich Klima und Luftqualität und M10 Extrapolation zeitlicher Trends der Gesundheitsbelastung durch Ozon für Klimaszenarien RCP 4.5 und 8.5

Für diese Modellierung wurde der Untersuchungsraum nach Süden ausgeweitet. Der engere Untersuchungsraum der nordbayerischen Regierungsbezirke ist in Abbildung 30 mit schwarzen Grenzen dargestellt. Die ersten Ergebnisse basieren auf statistischen XGBMs. In Abbildung 29 sind die Entwicklungen der MDA8 Werte für die Jahre 2000 bis 2100 für die Szenarien RCP2.9, RCP4.5 und RCP8.5 aufgezeigt. Für die Szenarien RCP2.6 und RCP4.5 sind keine oder sehr geringe Anstiege zu erwarten. Für sehr hohe MDA8 Werte (95% Quantil) ist beim RCP2.6 sogar ein geringer Rückgang vorhergesagt. Für das RCP8.5 prognostiziert das Modell deutliche Anstiege von bis zu 18 μg/m³ pro 100 Jahre, was den Einfluss der deutlich höheren Erwärmung dieses Szenarios von mehr als 3,7 °C auf die Ozonbildung zeigt.

Mit den statistischen Projektionen von MDA8 mittels XGBMs erfolgte im Weiteren die Vorhersage von SOMO35 wegen der oben schon angesprochenen sehr rechenintensive Modellierung nur für den Zeitraum 2090-2100, ebenfalls für die drei Szenarien RCP2.6, 4.5 und 8.5 (Abbildung 30). Die Veränderung bezieht sich auf den Zeitraum 1975-2000, für den SOMO35 ebenfalls mit XGBMs berechnet wurde. Für die Zeitspanne 1975-2000 fällt die relativ große räumlich Heterogenität auf, mit hohen Ozonbelastungen in Süd- und Südostbayern auf. Auch kleinere trockenere Regionen und städtische Gebiete sind durch höhere Ozonbildungsraten gekennzeichnet. Der Osten Bayerns und die Rhön mit relativ kühlen und feuchten Wetterbedingungen sind hingegen durch die niedrigste Belastung gekennzeichnet. Für den Zeitraum 2090-2100 ist für das RCP2.6 mit einem Rückgang von bis zu 7% zu rechnen, besonders im Osten des Untersuchungsgebiets. Der vergleichsweise geringe Temperaturanstieg des Szenarios RCP2.6 wird durch die Veränderung anderer meteorologischer Größen noch überlagert. Auch für das RCP4.5 Szenario ist fast der gesamte Untersuchungsraum von stabilen Verhältnissen bzw. leichten Rückgängen gekennzeichnet. Nur im Osten ist ein Anstieg von SOMO35 bis zu 5% möglich.

Erst für das Szenario RCP8.5 kommt es abgesehen von einem kleinen Streifen entlang der Alpen zu einer deutlichen Zunahme von SOMO35, die für die Zeitspanne 2090-2100 zwischen 14 und 26% liegt. Hier wird der Temperatureffekt für die Ozonbildung dominierend, aber möglicherweise spielt auch eine weitere Veränderung der Großwetterlagen eine Rolle, ebenso wie die Zunahme blockierender Wetterlagen im Sommer, wie sie sich schon heute abzeichnet (Kapitel 4.1.2).

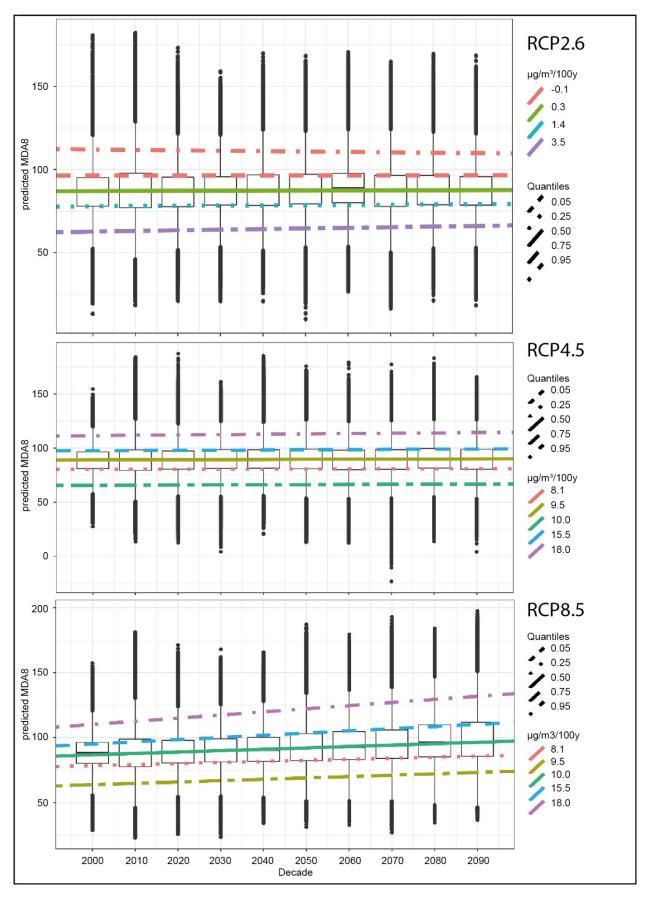


Abbildung 29: Quantile Trends von MDA8  $\mu$ g/m3. Die Trends sind für die Region zwischen 49° N und 51° N und 9° O bis 14° O berechnet.

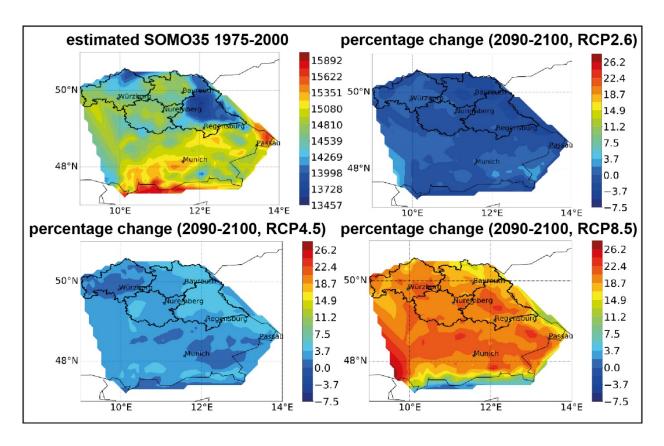


Abbildung 30: Vorhergesagte Veränderungen von SOMO35 für die Sommermonate bezogen auf die Zeitspanne 1975 bis 2000. Die prozentuelle Veränderung von SOMO35 errechnet sich durch die Subtraktion des dekadischen SOMO35 der Sommermonate 2090-2100 vom langjährigen Mittel 1997-2000 und anschließende Division durch das langjährige Mittel. Nordbayerische Regierungsbezirke sind schwarz umgrenzt.

Die dynamische Modellierung der zukünftigen Ozonbelastung mit WRF-Chem zeigt neben dem Einfluss der Temperatur auch die Rolle der planetarischen Grenzschicht für die Ozonkonzentrationen. In Abbildung 31 sind für Nordbayern die Tagesgänge für den Monat Juli als Differenz der Werte 2090-2100 und 1975-2000 wiedergegeben. Sehr deutlich zeigt sich die Temperaturzunahme in zwei Meter Höhe (T2) zu jeder Tageszeit mit einem Maximum von bis zu 5 °C zur Mittagszeit für RCP8.5. Als unmittelbare Folge nimmt die Mächtigkeit der planetarischen Grenzschicht (PBL) zur Mittagszeit um ca. 100 bis 200 m zu. In der Nacht ist die Grenzschicht bei beiden Erwärmungsszenarien geringmächtiger. Die Durchmischungsverhältnisse in der Atmosphäre und damit die Konzentrationsverhältnisse von Schadstoffen hängen unter anderem von der Mächtigkeit der planetarischen Grenzschicht ab. Deutlich wird dies beim Anstieg von NO2 und NO in den Nacht- und Morgenstunden. Damit direkt verbunden ist der Rückgang der Ozonkonzentration (O3). Um nur den Effekt der Photochemie auf die Ozonbildung abzuschätzen, wurde die photochemische Tendenz des Ozons (chem\_O3) dem Model hinzugefügt. Chem\_O3 zeigt, dass der Temperaturanstieg durch den Klimawandel eine Erhöhung der Ozonproduktion durch photochemische Prozesse von etwa 1 ppbv h1 zur Mittagszeit in beiden Szenarien verursacht.

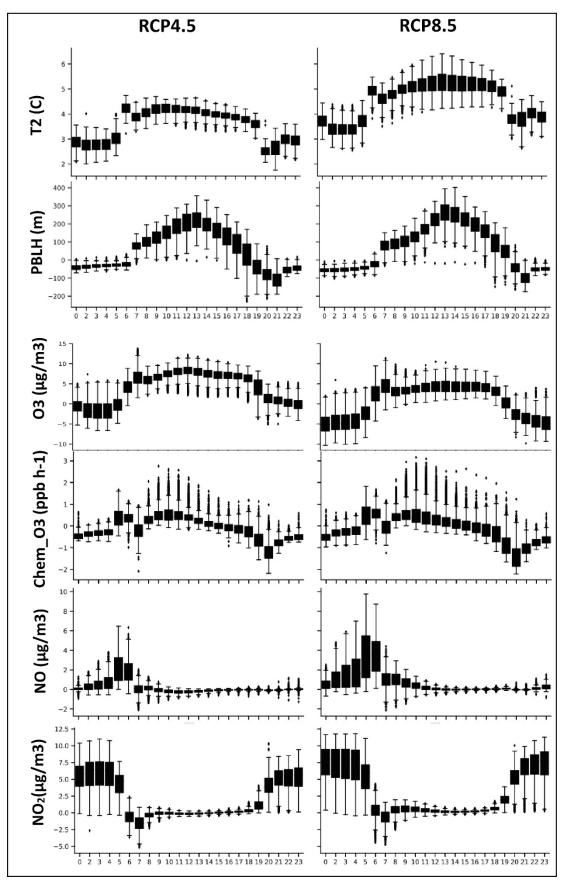


Abbildung 31: Tagesgänge meteorologischer und atmosphärenchemischer Variablen für den Juli modelliert mit WRF-chem. Dargestellt ist die Differenz der zwischen der Periode 1975-2000 und 2090-2100 (Erwärmungsszenarien) für RCP4.5 und RCP8.5 in Nordbayern. T2 ist die Temperatur in 2 m Höhe, PBLH ist die Höhe der planetarischen Grenzschicht und chem\_03 ist die chemische Produktions- und Verlustrate von O<sub>3</sub>

#### 4.3 Synthese Klima und Ozon

Für den Nordbayerischen Raum liegt die Zunahme der beobachteten bodennahen Lufttemperatur auch an der Veränderung der Großwetterlagen. Westliche und nordwestliche Anströmrichtungen nehmen zugunsten südlicher Richtungen und von Hochdrucklagen ab. Die Wirkung dieser Wetterlagen war mit verantwortlich für die Hitzesommer der letzten Jahre. Für den Messzeitraum zeigt sich, dass es in einer mittelgroßen Stadt wie Bayreuth, sowie auch in anderen nordbayerischen Städten, zu ausgeprägten Stadtklimaeffekten kommt, die die generelle Temperaturzunahme überlagern. Die Überwärmung betrug im Maximum bis zu 10 °C. Durch den Klimawandel werden in Bayreuth inzwischen in den Sommermonaten Temperaturen von über 35 °C erreicht, was im überwärmten Stadtzentrum zu Temperaturen über 40 °C führt. Für die Wärmebelastung spielen insbesondere auch die Nachttemperaturen eine große Rolle und hier die Schwelle von 20 °C als Grenze für tropische Nächte. Über dieser Grenze ist Schlaf deutlich weniger erholsam. Sehr deutlich wird dabei die innerstädtische Heterogenität mit kühleren Stadtbereichen.

Hochdruckwetterlagen mit trockenen warmen Verhältnissen fördern höhere Ozonwerte, die in Bayreuth aber sehr selten gesundheitsgefährdenden Bereiche erreicht. Legt man die Grenzwerte in der EU für kurz- und langzeitige Gesundheitskennzahlen von NDGT60 < 25 Tage im Jahr und AOT40 < 18000 μg/m³, ihre langfristigen Mittelwerte und Zielgrößen (NDGT60 = 0 und AOT < 6000 μg/m³) zugrunde, liegen die Werte für kurzeitigen Kennzahlen NDGT60 und AOT40 nahe an den Grenzwerten allerdings weit unter den Grenzwerten. Innerstädtisch ergab sich bei länger andauernden trockenen und warmen Wetterlagen eine hohe Ozonbelastung nahe den Grenzwerten. Solche Wetterlagen häufen sich seit den 1980er Jahren und dürften in Zukunft noch zunehmen. Es zeigt sich für Nordbayern jedoch erst beim RCP8.5 eine deutliche Zunahme der Ozonwerte. Durch den in Bayreuth nachgewiesenen Stadtklimaeffekt können innerstädtisch aber schon bei geringeren großräumigen Erwärmungstrends Temperaturen auftreten, die eigentlich dem RCP8.5 entsprechen. Dadurch ist lokal durchaus mit hohen Ozonbelastungen zu rechnen.

Erst durch die lokal differenzierte Messung und Modellierung der meteorologischen und luftchemischen Prozesse konnten für Bayreuth, als Repräsentantin mittelgroßer Städte, der Wärmeinseleffekt und dessen Verbindung zu Ozonbelastung aufgezeigt und so wertvolle Kenntnisse für Anpassungsstrategien gewonnen werden.

## 5 Darstellung des Nutzens im Rahmen der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie

In der bayerischen Klimaanpassungsstrategie werden die städtische Überwärmung und die Ozonbelastung in zwei Themenfeldern, *Menschliche Gesundheit* und *Städtebau/Bauleitplanung* diskutiert (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz 2016), wobei auch Querverweise zwischen den Themen gemacht werden. In beiden Themenfeldern werden explizit der Hitzestress und die gesundheitlichen Auswirkungen bodennahen Ozons hervorgehoben und auch allgemein der Zusammenhang zwischen Erwärmungstendenzen im Zuge der Klimaveränderung und der Zunahme von Ozonkonzentrationen angesprochen. Wie häufig wird hier beim Hitzestress auf die bayerischen Großstädte München und Nürnberg verwiesen. MiSKOR konnte eindeutig belegen, dass auch mittelgroße Städte ins Blickfeld rücken müssen. Die hier nachgewiesene Größe des Überwärmungseffekts in Bayreuth lässt erwarten, dass bereits heute mit zunehmender Verschärfung auch kleine Städte betroffen sind. Stadtplanerische Entscheidungen sollten daher nur auf bekannten bioklimatischen Kenndaten oder gut begründeten Abschätzungen basieren. Diese Unterschiede können nur mit einem dichten und wohlgewählten Messnetz erfasst werden, welches einzig ein räumlich und zeitlich differenziertes Bild der UHI für städteplanerischen Belange und Umweltgesetzgebung (BauGB, BNatSchG, BImSchG ...) zur Anpassung

an den Klimawandel liefern kann. Aufgrund des hohen Nutzens bei vergleichsweise geringen Kosten empfiehlt es sich, dass die bayerischen Städte zeitnah eigene Messnetze aufbauen und zum Wohl der Menschen einsetzen (derzeit ist Bayreuth die einzige Stadt in Bayreuth). Solch eine Maßnahme ermöglicht die Kommunen sowohl wirksame als auch ausgewogene Entscheidungen hinsichtlich einer effizienten Anpassung an die unvermeidbar eintretenden Folgen der Klimaänderung zu treffen und zeitnah durchzuführen.

Auch für mittelgroße Städte (42 % der Bevölkerung in Deutschland) ist eine an den Klimawandel angepasst, CO<sub>2</sub>-neutrale bzw. dekarbonisierende Stadtplanung unabdingbar. Die Bedeutung von Stadtgrün sowie Stadtblau und Frischluftleitern und -quellgebieten ist mit den Untersuchungen in MiSKOR eindrucksvoll belegt. Hierbei gilt jedoch zu beachten, dass zum einen die derzeit im städtischen Raum gängigen Pflanzen nicht gegen die kommenden Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse angepasst sind (Moser et al. 2017) und sich auch hinsichtlich einer Kühlwirkung oder Filterwirkung (Feinstaub, Luftschadstoffe) deutlich unterschieden (Rahman et al. 2018 & 2020). Zum anderen gilt, dass die Wirkung von Parks in deren bebaute Umgebung relativ klein ist. Dadurch wird es notwendig, zusätzliche hitzeminimierende stadtplanerische Maßnahmen so rasch wie möglich zu ergreifen und flächig umzusetzen. Dazu zählen die Schaffung von Verdunstungsflächen durch Gebäude- und Straßenbegrünung mit aktiver Bewässerung aus Zisternen, oder Schaffung oder Ausbau von Frischluftzirkulation (Grüne Finger), nachhaltige Entsiegelung hochverdichteter Stadtteile, vermehrte innerstädtische Niederschlagsversickerung als auch Wasserrückhaltung, Verwendung energieeffizienter Baumaterialien oder Verminderung industrieller und verkehrsbedingter Abwärme.

Die Bedeutung lokaler Emissionen von Vorläufersubstanzen für Ozon legt auch für mittelgroße Städte eine deutliche Reduktion verkehrsbedingter Emissionen nahe.

#### 6 Literaturverzeichnis

- Adame, J. A., Lozano, A., Bolívar, J.P., Benito, A., Contreras, J., Godoy, F. (2008). Behavior, distribution and variability of surface ozone at an arid region in the south of Iberian Peninsula (Seville, Spain). Chemosphere 70(5), 841-849. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.07.009
- Agudelo–Castaneda, D. M., Teixeira, E. C., & Pereira, F. N. (2014). Time–series analysis of surface ozone and nitrogen oxides concentrations in an urban area at Brazil. Atmospheric Pollution Research 5(3), 411-420. DOI: 10.5094/APR.2014.048
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. International Journal of Climatology 23, 1–26. DOI: 10.1002/joc.859
- Arora, S. (2021). Analysis of O<sub>3</sub>, NO and NO<sub>2</sub> measured at characteristically varied locations in Bayreuth. Unveröffentlichte Masterarbeit an der Universität Bayreuth.
- Bastin, J.-F., Clark, E., Elliott, T., Hart, S., van den Hoogen, J., Hordijk, I., et al. (2019). Understanding climate change from a global analysis of city analogues. PloS one 14(7), e0217592. DOI: 10.1371/journal.pone.0217592
- Basu, R., Samet, J. M. (2002). Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. Epidemiologic Reviews 24(2), 190-202. DOI: 10.1093/epirev/mxf007
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (Hrsg.) (2016). Bayerische Klima-Anpassungsstrategie. München.
- Beck, C., Philipp, A., Streicher, F. (2016). The effect of domain size on the relationship between circulation type classifications and surface climate. International Journal of Climatology 36, 2692–2709. DOI: 10.1002/joc.3688
- Bloomer, B.J., Stehr, J.W., Piety, C.A., Salawitch, R.J., Dickerson, R.R. (2009). Observed relationships of ozone air pollution with temperature and emissions. Geophysical Research Letters 36, L09803. DOI: 10.1029/2009GL037308
- Buccolieri, R., Santiago, J. L., Martilli, A. (2020). CFD modelling: The most useful tool for developing mesoscale urban canopy parameterizations. Building Simulation 14, 407-419. DOI: 10.1007/s12273-020-0689-z
- Buchin, O., Hoelscher, M.-T., Meier, F., Nehls, T., Ziegler, F. (2016). Evaluation of the health risk reduction potential of countermeasures to urban heat islands. Energy and Buildings 114, 27–37. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.038
- Chen, T., He, T., Benesty, M., Khotilovich, V., Tang, Y., Cho, H. (2015). Xgboost: extreme gradient boosting. R package version 0.4-2 1(4).
- Chen, K., Fiore, A. M., Chen, R., Jiang, L., Jones, B., Schneider, A., Peters, A., Bi, J., Kan, H., Kinney, P.L. (2018). Future ozone-related acute excess mortality under climate and population change scenarios in China: A modeling study. PLoS medicine 15(7), e1002598. DOI: 10.1371/journal.pmed.1002598
- Clifton, O. E., Fiore, A. M., Massman, W. J., Baublitz, C. B., Coyle, M., Emberson, L., et al. (2020). Dry deposition of ozone over land: processes, measurement, and modeling. Reviews of Geophysics 58, e2019RG000670. DOI: 10.1029/2019RG000670
- Coates, J., Mar, K. A., Ojha, N., Butler, T. M. (2016). The influence of temperature on ozone production under varying NOx conditions—a modelling study. Atmospheric Chemistry and Physics 16(18), 11601-11615. DOI: 10.5194/acp-16-11601-2016
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., et al. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. The Lancet 389, 1907-1918. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)30505-6

- Delage, Y., Taylor, P. A. (1970). Numerical studies of heat island circulations. Boundary-Layer Meteorology 1(2), 201-226. DOI: 10.1007/BF00185740
- Della-Marta, P.M., Luterbacher, J., von Weissenfluh, H., Xoplaki, E., Brunet, M., Wanner, H. (2007). Summer heat waves over western Europe 1880-2003, their relationship to large-scale forcings and predictability. Climate Dynamics 29, 251–275. DOI:10.1007/s00382-007-0233-1
- DWD (Deutscher Wetterdienst (ohne Jahr): RCP-Szenarien. Die neuen RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/rcp-szenarien.html (20.8.2021)
- Draxler, R. R., Hess, G. (1998). An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories. Australian Meteorological Magazine 47 (4), 295e308
- Fallmann, J., Wagner, S., Emeis, S. (2017). High resolution climate projections to assess the future vulner-ability of European urban areas to climatological extreme events. Theoretical and Applied Climatology 127(3-4), 667–683. DOI: 10.1007/s00704-015-1658-9
- Fleming, Z. L., Doherty, R. M., Schneidemesser, E. von Malley, C. S., Cooper, O. R., Pinto, J. P., et al. (2018). Tropospheric Ozone Assessment Report: Present-day ozone distribution and trends relevant to human health. Elementa: Science of the Anthropocene 6(12). DOI: 10.1525/elementa.273
- Franck, U., Krueger, M., Schwarz, N., Grossmann, K., Roeder, S., Schlink, U. (2013). Heat stress in urban areas: Indoor and outdoor temperatures in different urban structure types and subjectively reported well-being during a heat wave in the city of Leipzig. Meteorologische Zeitschrift 22, 167–177. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0384
- Freeman, E. A., Moisen, G. G., Coulston, J. W., Wilson, B. T. (2016). Random forests and stochastic gradient boosting for predicting tree canopy cover: comparing tuning processes and model performance. Canadian Journal of Forest Research 46(3), 323-339. DOI: 10.1139/cjfr-2014-0562
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: a gradient boosting machine. Annals of Statistics 29(5), 1189-1232.
- Fu, T.-M., Zheng, Y., Paulot, F., Mao, J., Yantosca, R. M. (2015). Positive but variable sensitivity of August surface ozone to large-scale warming in the southeast United States. Nature Climate Change 5(5), 454-458. DOI: 10.1038/nclimate2567
- Gabriel, K. M. A., Endlicher, W. R. (2011). Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. Environmental Pollution 159, 2044–2050. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.01.016
- Georgescu, M., Morefield, P.E., Bierwagen, B.G., Weaver, C.P. (2014). Urban adaptation can roll back warming of emerging megapolitan regions. PNAS 111, 2909–2914. DOI: 10.1073/pnas.1322280111
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C. (2010). Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2009) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky, 7., verbesserte und ergänzte Auflage, PIK Report No. 119, S. 146.
- Gomez-Rubio, V. (2018). Generalized Additive Models: An Introduction with R (2nd Edition). Journal of Statistical Software 86(1), 1-5. DOI: 10.18637/jss.v086.b01
- Greenwell, B., Boehmke, B., Cunningham, J., GBM Developers (2018). gbm: generalized boosted regression models. R package version 2.1. 5. Available at R Core Team https://CRAN. R-project. org/package=gbm [Verified 16 June 2018].
- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., Eder, B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. Atmospheric Environment 39(37), 6957-6975. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.04.027
- Grimmond, C. S. B., Oke, T. R. (1999a). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. Journal of Applied Meteorology 38(9), 1262-1292. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2

- Grimmond, C. S. B., Oke, T. R. (1999b). Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. Journal of Applied Meteorology and Climatology 38(7), 922-940. DOI: 10.1175/1520-0450(1999)038<0922:HSIUAL>2.0.CO;2
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P., Geron, C. (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). Atmospheric Chemistry and Physics 6(11), 3181-3210.
- Haagen-Smit, A. J. (1952). Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog. Industrial & Engineering Chemistry 44 (6), 1342–1346. DOI: 10.1021/ie50510a045
- Hertig, E. (2020). Health-relevant ground-level ozone and temperature events under future climate change using the example of Bavaria, Southern Germany. Air Quality, Atmosphere & Health 13, 435–446. DOI: 10.1007%2Fs11869-020-00811-z
- Hess, P., Brezowsky, H., 1952. Katalog der Großwetterlagen Europas. Ber. Dtsch.Wetterd. US-Zone 33, 39 pp. 1977: Katalog der Großwetterlagen Europas. 3. Aufl. Berlin Deutscher Wetterdienst 113, Offenbach a. M., 14+54.
- Hoek, G., Beelen, R., De Hoogh, K., Vienneau, D., Gulliver, J., Fischer, P., Briggs, D. (2008). A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. Atmospheric environment 42(33), 7561-7578. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.05.057
- Huebener, H., Keuler, K., Bülow, K., Mohr, V., Spekat, A., Menz, C., Steger, C. (2018). The Project ReKliEs-De: Complementing EURO-CORDEX with high-resolution dynamical and statistical simulations. EGU General Assembly Conference Abstracts, pp. 13111. 2018EGUGA..2013111H
  - Synoptic-climatological evaluation of the classifications of atmospheric circulation patterns over Europe. International Journal of Climatology 36, 2710–2726. DOI:10.1002/joc.4546
- Ichinose, T., Shimodozono, K., Hanaki, K. (1999). Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. Atmospheric Environment 33(24-25), 3897-3909. DOI: 10.1016/S1352-2310(99)00132-6
- Ionita, M., Nagavciuc, V., Kumar, R., Rakovec, O. (2020). On the curious case of the recent decade, midspring precipitation deficit in central Europe. npj Climate and Atmospheric Science Vol. 3(1), 49. DOI: 10.1038/s41612-020-00153-8
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Geneva.
- Jacob, D. J., Winner, D. A. (2009). Effect of climate change on air quality. Atmospheric Environment 43(1), 51-63. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.09.051
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., et al. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. Regional Environmental Change 14(2), 563-578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2
- Jaenicke, B., Meier, F., Hoelscher, M.-T., Scherer, D. (2015). Evaluating the Effects of Facade Greening on Human Bioclimate in a Complex Urban Environment. Advances in Meteorology Vol. 2015, 747259. DOI:10.1155/2015/747259
- James, P.M. (2007). An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. Theoretical and Applied Climatology 88, 17–42. DOI: 10.1007/s00704-006-0239-3
- Jendritzky, G., Maarouf, A., Fiala, D., Staiger, H. (2002). An update on the development of a universal thermal climate index. In Proceedings of the 15th Conference on Aerobiology and 16th International Congress of Biometeorology, 27 Oct–1 Nov 2002, Kansas City MO, USA, 129-133.
- Jendritzky, G., de Dear, R., Havenith, G. (2012). UTCI—why another thermal index?. International journal of biometeorology 56(3), 421-428. DOI: 10.1007/s00484-011-0513-7

- Jiang, W., Boltze, M., Groer, S., Scheuvens, D. (2017). Impacts of low emission zones in Germany on air pollution levels. Transportation Research Procedia 25, 3370-3382. DOI: 10.1016/j.trpro.2017.05.217
- Jing, P., Lu, Z., Steiner, A. L. (2017). The ozone-climate penalty in the Midwestern US. Atmospheric Environment 170, 130-142. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.09.038
- Khiem, M., Ooka, R., Huang, H., Hayami, H., Yoshikado, H., Kawamoto, Y. (2010). Analysis of the relationship between changes in meteorological conditions and the variation in summer ozone levels over the Central Kanto area. Advances in Meteorology Vol. 2010, 1-13. DOI: 10.1155/2010/349248
- Kidder, S. Q., Essenwanger, O. M. (1995). The effect of clouds and wind on the difference in nocturnal cooling rates between urban and rural areas. Journal of Applied Meteorology and Climatology 34(11), 2440-2448. DOI: 10.1175/1520-0450(1995)034%3C2440:TEOCAW%3E2.0.CO;2
- Kratzer, A. (1935). Das Klima der Städte. Geographische Zeitschrift 41 (9), 321–339.
- Kuenen, J., Visschedijk, A., Jozwicka, M., Denier Van Der Gon, H. (2014). TNO-MACC\_II emission inventory; a multi-year (2003–2009) consistent high-resolution European emission inventory for air quality modelling. Atmospheric Chemistry and Physics 14(20), 10963-10976. DOI: 10.5194/acp-14-10963-2014
- Layne D. A. (1955). A review on smog. Journal (Royal Society of Health) 75 (2), 171–192. DOI: 10.1177%2F146642405507500213
- LfU (Bayerisches Landsamt für Umwelt) (Hg.) (2020), Das Bayerische Klimaprojektionsensemble. Audit und Ensemblebildung. München.
- Lietzke, B., Vogt, R., Feigenwinter, C., Parlow, E. (2015). On the controlling factors for the variability of carbon dioxide flux in a heterogeneous urban environment. International Journal of Climatology 35(13), 3921-3941. DOI: 10.1002/joc.4255
- Liu, R., Ma, Z., Liu, Y., Shao, Y., Zhao, W., Bi, J. (2020). Spatiotemporal distributions of surface ozone levels in China from 2005 to 2017: A machine learning approach. Environment International 142, 105823. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105823
- Lüers, J., Soldner, M., Olesch, J., Foken, T. (2014). 160 Jahre Bayreuther Klimazeitreihe. Arbeitsergebnisse Mikrometeorologie, Band 56, Universität Bayreuth.
- Lundberg, S. M., Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. Advances in Neural Information Processing Systems 30 (NIPS 2017).
- Lyapina, O., Schultz, M. G., Hense, A. (2016). Cluster analysis of European surface ozone observations for evaluation of MACC reanalysis data. Atmospheric Chemistry and Physics 16(11), 6863-6881. DOI:10.5194/acp-16-6863-2016
- Mahr, L. (2020). Spatiotemporal distribution of ozone and its main predictors in Bayreuth, Germany an approach to mobile air quality measurements with low cost sensors. Unveröffentlichte Masterarbeit an der Universität Bayreuth.
- Mahrt, L., Thomas, C.K., Prueger, J. H. (2009). Space-time structure of mesoscale motions in the stable boundary layer. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135(638), 67-75. DOI: 10.1002/qj.348
- Mar, K. A., Ojha, N., Pozzer, A., Butler, T. M. (2016). Ozone air quality simulations with WRF-Chem (v3. 5.1) over Europe: model evaluation and chemical mechanism comparison. Geoscientific Model Development 9(10), 3699–3728. DOI: 10.5194/gmd-9-3699-2016
- Marécal, V., Peuch, V.-H., Andersson, C., Andersson, S., Arteta, J., Beekmann, M., et al. (2015). A regional air quality forecasting system over Europe: the MACC-II daily ensemble production. Geoscientific Model Development 8(9), 2777-2813. DOI: 10.5194/gmd-8-2777-2015
- Maronga, B., Gryschka, M., Heinze, R., Hoffmann, F., Kanani-Sühring, F., Keck, M., Ketelsen, K., Letzel, MO., Sühring, M., Raasch, S. (2015). The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version

- 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. Geoscientific Model Development 8, 2515-2551. DOI:10.5194/gmd-8-2515-2015
- Maronga, B., Gross, G., Raasch, S., Banzhaf, S., Forkel, R., Heldens, W., et al. (2019). Development of a new urban climate model based on the model PALM Project overview, planned work, and first achievements. Meteorologische Zeitschrift 28(2), 105-119. DOI:10.1127/metz/2019/0909
- Martilli A., Santiago, J. L. (2009). How to Use Computational Fluid Dynamics Models for Urban Canopy Parameterizations. In: Baklanov A., Sue G., Alexander M., Athanassiadou M. (Hrsg.) Meteorological and Air Quality Models for Urban Areas. Springer, Berlin, Heidelberg. doi.org/10.1007/978-3-642-00298-4\_4
- Meehl, G. A., Tebaldi, C., Tilmes, S., Lamarque, J.-F., Bates, S., Pendergrass, A., Lombardozzi, D. (2018). Future heat waves and surface ozone. Environmental Research Letters 13(6), 064004. DOI: 10.1088/1748-9326/aabcdc
- Monks, P. S., Archibald, A. T., Colette, A., Cooper, O., Coyle, M., Derwent, R., et al. (2014). Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer. Atmospheric Chemistry and Physics 15(15), 8889-8973. DOI: 10.5194/ACP-15-8889-2015
- Morabito, M., Profili, F., Crisci, A., Francesconi, P., Gensini, G.F., Orlandini, S. (2012). Heat related mortality in the Florentine area (Italy) before and after the exceptional 2003 heat wave in Europe: an improved public health response? International Journal of Biometeorology 56, 801–810. DOI: 10.1007/s00484-011-0481-y
- Moser, A., Rötzer, T., Pauleit, S., Pretzsch, H. (2017). Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen Risiken und Forschungsperspektiven. In Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 188 (5-6), 94-111. DOI: 10.23765/afjz0002006
- Nabavi, S. O., Nölscher, A. C., Samimi, C., Thomas, C., Haimberger, L., Lüers, J., Held, A. (2021). Sitescale modeling of surface ozone in Northern Bavaria using machine learning algorithms, regional dynamic models, and a hybrid model. Environmental Pollution 268, 115736. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115736
- Oke, T. R. (1974). Review of Urban Climatology, 1968-1973. WMO Technical Note No. 134, WMO No. 383. World Meteorological Organization: Geneva.
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer heat islands. Atmosphere 14(4), 268-277. DOI: 10.1080/00046973.1976.9648422
- Oke, T.R. (1982). The energetic basis of the Urban Heat-Island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 108, 1–24. DOI: 10.1002/qj.49710845502
- Olszyna, K., Luria M., Meagher J. (1997). The correlation of temperature and rural ozone levels in south-eastern USA. Atmosphere and Environment 31, 3011–3022. DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00097-6
- Otero, N., Sillmann, J., Schnell, J. L., Rust, H. W., Butler, T. (2016). Synoptic and meteorological drivers of extreme ozone concentrations over Europe. Environmental Research Letters 11(2), 024005. DOI: 10.1088/1748-9326/11/2/024005
- Parlow, E., Vogt, R., Feigenwinter, C. (2014). The urban heat island of Basel–seen from different perspectives. DIE ERDE– Journal of the Geographical Society of Berlin 145(1-2), 96-110. DOI: 10.12854/erde-145-8.
- Parrish, D. D., Law, K. S., Staehelin, J., Derwent, R., Cooper, O., Tanimoto, H., Volz Thomas, A., Gilge. S., Scheel, H. E., Steinbacher, M. (2013). Lower tropospheric ozone at northern midlatitudes: Changing seasonal cycle. Geophysical Research Letters 40(8), 1631-1636. DOI: 10.1002/grl.50303
- Pedersen, T. L., Benesty, M. (2018). lime: Local interpretable model-agnostic explanations. R-Package version 0.4 1
- Peterson, T. C., Owen, T. W. (2005). Urban heat island assessment: Metadata are important. Journal of Climate 18(14), 2637-2646. DOI: 10.1175/JCLI3431.1

- Peterson, J. T., Stoffel, T. L. (1980). Analysis of urban-rural solar radiation data from St. Louis, Missouri. Journal of Applied Meteorology and Climatology 19(3), 275-283. DOI: 10.1175/1520-0450(1980)019%3C0275:AOURSR%3E2.0.CO;2
- Pfister, L., Sigmund, A., Olesch, J., Thomas, C.K. (2017). Nocturnal Near-Surface Temperature, but not Flow Dynamics, can be Predicted by Microtopography in a Mid-Range Mountain Valley. Boundary-Layer Meteorology 165, 333–348. DOI: 10.1007/s10546-017-0281-y
- Rahman, M.A., Moser, A., Gold, A., Rötzer, T., Pauleit, S. (2018). Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days. The Science of the Total Environment 633, 100–111. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.168
- Rahman, M. A., Hartmann, C., Moser-Reischl, A., von Strachwitz, M., Paeth, H., Pretzsch, H., et al. (2020). Tree cooling effects and human thermal comfort under contrasting species and sites. Agricultural and Forest Meteorology 287, 107947. DOI: 10.1016/j.agrformet.2020.107947
- Reichler, T. (2009). Changes in the Atmospheric Circulation as Indicator of Climate Change. In: Letcher, T.M. (Hrsg.): Climate Change: Climate Change: Observed Impacts on Planet Earth. Amsterdam, 145-164. DOI: 10.1016/B978-0-444-53301-2.00007-5
- Rizwan, A.M., Dennis, Y. C. L., Chunho, L. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. Journal of Environmental Sciences 20(1), 120–128. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)60019-4
- Scherer, D., Fehrenbach, U., Lakes, T., Lauf, S., Meier, F., Schuster, C. (2013). Quantification of heat-stress related mortality hazard, vulnerability and risk in Berlin, Germany. Die Erde 144(3-4), 238–259. DOI: 10.12854/erde-144-17
- Schmid, H. P., Oke, T. R. (1992). Scaling North American urban climates by lines, lanes, and rows. In: Geographical Snapshots of North America, Janelle, D.G. (Hrsg.). The Guildford Press: New York.
- Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J.-F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Faluvegi, G., et al. (2017). Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change. Nature Climate Change 7, 647-651. DOI: 10.1038/nclimate3354
- Song, F., Shin, J. Y., Jusino Atresino, R., Gao, Y. (2011). Relationships among the springtime ground–level NOx, O3 and NO3 in the vicinity of highways in the US East Coast. Atmospheric Pollution Research 2(3), 374-383. DOI: 10.5094/APR.2011.042
- Sousa, S., Pires, J., Martins, F., Pereira, M., Alvim-Ferraz, M. (2009). Potentialities of quantile regression to predict ozone concentrations. Environmetrics 20(2), 147e158. DOI: 10.1002/env.916
- Spies, I. (2019): Urban climate just warm streets and cool parks? Investigating the variabilities of heat at street-canyon and city-wide scale in Bayreuth. Unveröffentlichte Masterarbeit an der Universität Bayreuth.
- 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. DOI: 10.1080/014311698214884
- Stathopoulou, E., Mihalakakou, G., Santamouris, M., Bagiorgas, H. (2008). On the impact of temperature on tropospheric ozone concentration levels in urban environments. Journal of Earth System Science 117(3), 227-236. DOI: 10.1007/s12040-008-0027-9
- Steiner, A. L., Davis, A. J., Sillman, S., Owen, R. C., Michalak, A. M., Fiore, A. M. (2010). Observed suppression of ozone formation at extremely high temperatures due to chemical and biophysical feedbacks. PNAS 107(46), 19685-19690. DOI: 10.1073/pnas.1008336107
- Steul, K., Schade, M., Heudorf, U. (2018). Mortality during heatwaves 2003-2015 in Frankfurt-Main the 2003 heatwave and its implications. International Journal of Hygiene and Environmental Health 221(1), 81–86. DOI: 10.1016/j.ijheh.2017.10.005

- Stewart, I. D. (2011). A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. International Journal of Climatology 31(2), 200-217. DOI: 10.1002/joc.2141
- Stockwell, W.R., Middleton, P., Chang, J.S., Tang, X. (1990). The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. Journal of Geophysical Research: Atmospheres 95(D10), 16343-16367. DOI: 10.1029/JD095iD10p16343
- Sungur, L. (2021). Mitigating heat accumulation in a mid-size urban area: Applying micrometeorological flow-resolving simulations to assess climate effects of urban planning measures. Unveröffentlichte Masterarbeit an der Universität Bayreuth.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. Energy and Buildings 25(2), 99-103. DOI: 10.1016/S0378-7788(96)00999-1
- Terjung, W. H., Louie, S. S. F. (1974). A climatic model of urban energy budgets. Geographical Analysis 6(4), 341-367. DOI: 10.1111/j.1538-4632.1974.tb00519.x
- Terjung, W. H., O'Rourke, P. A. (1980). Simulating the causal elements of urban heat islands. Boundary-Layer Meteorology 19(1), 93-118. DOI: 10.1007/BF00120313
- Thomas, CK., Linhardt, T., Schneider, J., and Olesch, J. (2019). Field evaluation of the micro-weather station MA-4100 (ATMOS-41) Comparison of the observational device used in the Trans-African Hydro-Meteorological Observatory (TAHMO) against WMO-grade instruments at the Ecological Botanical Gardens, University of Bayreuth, Germany, Arbeitsergebnisse Mikrometeorologie, Universität Bayreuth.
- Trenberth, K. E. (1995). Atmospheric circulation climate changes. Climatic Change 31, 427-453. DOI: 10.1007/BF01095156
- Tschuschke, A. (2019). Ein uss von Topogra e, Fließgewässern und Bebauung auf die Temperaturverteilung und Luftströme im Bayreuther Becken Analyse von fahrradgetragenen Messungen und Stationsdaten des MiSKOR-Messnetzes im Sommer 2019. Unveröffentlichte Masterarbeit an der Universität Bayreuth.
- Ulpiani, G. (2020). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. Science of The Total Environment, 141727. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141727
- UNION (2008), Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. Official Journal of the European Union.
- Veena, K., Parammasivam, K. M., Venkatesh, T. N. (2020). Urban Heat Island studies: Current status in India and a comparison with the International studies. Journal of Earth System Science 129, 85. DOI: 10.1007/s12040-020-1351-y
- von Schneidemesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. Chemical Reviews 115(10), 3856-3897. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00089
- Walcek, C. J., Yuan, H. H. (1995). Calculated Influence of Temperature Related Factors on Ozone Formation Rates in the Lower Troposphere. Journal of Applied Meteorology 34, 1056–1069. DOI: 10.1175/1520-0450(1995)034<1056:CIOTRF>2.0.CO;2
- Watson, G. L., Telesca, D., Reid, C. E., Pfister, G. G., Jerrett, M. (2019). Machine learning models accurately predict ozone exposure during wildfire events. Environmental Pollution 254, 112792. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.06.088
- Wiedinmyer, C., Akagi, S., Yokelson, R.J., Emmons, L., Al-Saadi, J., Orlando, J., Soja, A. (2011). The Fire INventory from NCAR (FINN): A high resolution global model to estimate the emissions from open burning. Geoscientific Model Development 4(3), 625-641. DOI: 10.5194/gmd-4-625-2011
- Yang, Z. (2014). Large-eddy simulation: Past, present and the future. Chinese Journal of Aeronautics 28(1), 11-24, DOI: 10.1016/j.cja.2014.12.007

Zhan, Y., Luo, Y., Deng, X., Grieneisen, M. L., Zhang, M., Di, B. (2018). Spatiotemporal prediction of daily ambient ozone levels across China using random forest for human exposure assessment. Environmental Pollution 233, 464-473. DOI: 10.1016/j.envpol.2017.10.029

#### 7 Glossar

DWD Deutscher Wetterdienst

LGL Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Pflege

LfU Bayerisches Landesamt für Umwelt

StMUV Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

StMGP Bayerisches Staatsministerium für Gesundheit und Pflege

#### Advektion

Transport von Eigenschaften der Luft mit dem Windfeld (Impuls, Temperatur, Wasserdampf Schadstoffe usw.), wobei man in der Regel von horizontaler Advektion spricht. Dabei ändern sich die Eigenschaften in den beiden horizontalen Raumkoordinaten und die Verhältnisse sind nicht mehr homogen. Unter vertikaler Advektion versteht man eine Vertikalbewegung aus Kontinuitätsgründen (Masseerhalt), die nicht auftriebsbedingt, (thermische Konvektion) ist. (Foken, T 2006: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, 2. überarb. u. erw. Aufl., 326 S.)

#### aerodynamischen Rauigkeit

Rauhigkeitsparameter, Größe zur Beschreibung der Rauhigkeit des Untergrundes. Die Erdoberfläche ist nicht aerodynamisch glatt, sondern wird aufgrund der vorhandenen Rauhigkeitselemente wie Sandkörner, Geländekanten, sprünge, Bewuchs und Bebauung charakterisiert. Diese Elemente bremsen beispielsweise den Wind in Bodennähe stark ab und bringen die mittlere Strömung in Höhe der Rauhigkeitslänge  $z_0$  zum Stillstand. Der Wert von  $z_0$  ist über Wasser und Eis sehr gering (oft kleiner 1 mm) und erreicht über hohem Bewuchs eine Größenordnung von 1 m. (www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften)

#### antizyklonal, zyklonal

antizyklonal: Drehsinn der Luftströmung um ein Gebiet hohen Luftdrucks (Nordhalbkugel: im Uhrzeigersinn, Südhalbkugel: gegen den Uhrzeigersinn). Außerdem Bezeichnung für eine Wetterlage mit überwiegendem Hochdruckeinfluss, welche zumeist durch relativ störungsfreies Wettergeschehen gekennzeichnet ist.

zyklonal: Drehsinn der Luftströmung um ein Gebiet tiefen Luftdrucks (Nordhalbkugel: gegen den Uhrzeigersinn, Südhalbkugel: im Uhrzeigersinn). Außerdem Bezeichnung für eine Wetterlage mit überwiegendem Tiefdruckeinfluss, welche zumeist durch wolken- und niederschlagsreiches Wettergeschehen gekennzeichnet ist. (Deutscher Wetterdienst)

#### Bioklima / bioklimatisch

Das Bioklima beschreibt die Gesamtheit aller atmosphärischen Einflussgrößen auf den menschlichen Organismus (oder auf Tiere / Pflanzen). Entsprechend ihrer Ausprägung und Wirkung werden sie als belastend, schonend oder als Reiz empfunden. Zu den bioklimatischen Belastungsfaktoren zählen insbesondere Wärmebelastung, Strahlungsarmut und schadstoffhaltige Luft. Als Schonfaktoren gelten ausgeglichene thermische Bedingungen, ein leicht erhöhtes Strahlungsangebot sowie weitgehende Luftreinheit inklusive Allergenarmut. Die bedeutsamen Reizfaktoren sind Hitze/Kältereiz, starke Tagesschwankungen der Lufttemperatur, böiger Wind, erhöhte Intensität der Sonnenstrahlung (inkl. UV-Licht) und geringer Sauerstoffgehalt (in der Höhe). (Deutscher Wetterdienst)

#### biophysikalische Prozesse

Die Biophysik ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, die zum einen Prozesse in biologischen Systemen mit Hilfe der Gesetze der Physik und ihrer Messmethoden untersucht und beschreibt, zum anderen sich aber auch mit der gezielten Neu- und Weiterentwicklung physikalischer Methoden zur Untersuchung biologischer Prozesse beschäftigt. (Wikipedia)

#### Calme

Windstille. Zustand der Atmosphäre, bei dem keine Luftbewegung mehr feststellbar ist. Die Grenze liegt im Ansprechbereich von Schalensternanemometern bei ca. 0.3 m s<sup>-1</sup>. Eine Windrichtung ist unter diesen Bedingungen nicht zuordenbar. (Foken, T 2006: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, 2. überarb. u. erw. Aufl., 326 S.)

#### Clusteranalyse

Unter Clusteranalysen (Clustering-Algorithmen, gelegentlich auch: Ballungsanalyse) versteht man Verfahren zur Entdeckung von Ähnlichkeitsstrukturen in (großen) Datenbeständen. Die so gefundenen Gruppen von "ähnlichen" Objekten werden als Cluster bezeichnet, die Gruppenzuordnung als Clustering. Bei der Clusteranalyse ist das Ziel, neue Gruppen in den Daten zu identifizieren (im Gegensatz zur Klassifikation, bei der Daten bereits bestehenden Klassen zugeordnet werden). Man spricht von einem "uninformierten Verfahren", da es nicht auf Klassen-Vorwissen angewiesen ist. (Wikipedia)

#### Element (Wetter / Klima / meteorologisches)

Meteorologische oder andere Größen, die einzeln sowie durch ihr Zusammenwirken das Klima in den verschiedenen Maßstabsbereichen (mikro, meso, makro) kennzeichnen. Dazu gehören u.a. alle Zustandsgrößen (Größen, die den thermodynamischen Zustand oder die Zustandsänderung eines Systems eindeutig beschreiben, z.B. Druck, absolute Temperatur, Volumen.) und Flussgrößen (Bewegungsgrößen: Wärmefluss, Strahlung, Dichtefluss, Massenfluss). (Foken, T 2006: Angewandte Meteorologie, Mikrometeorologische Methoden, 2. überarb. u. erw. Aufl., 326 S.)

#### Globalstrahlung

Globalstrahlung ist die gesamte am Erdboden ankommende Sonnenstrahlung (kurzwelliger, zumeist sichtbarer Bereich der elektromagnetischen Strahlung), also die Summe aus direkter Strahlung (nicht abgelenkter) und diffuser Himmelsstrahlung (abgelenkt, gestreut). Die Stärke der den Boden erreichenden Sonnenstrahlung ist abhängig von geographischer Breite, Tageszeit, Jahreszeit und der Geländeform, d.h. dem Winkel, unter dem die Strahlen auftreffen. (Deutscher Wetterdienst)

Die Gelände- oder Oberflächenausrichtung und -form hat eine besondere Bedeutung, da bei senkrechtem Einfall des Sonnenlichts die Strahlen auf eine relativ kleine Fläche treffen, dagegen in einem flacheren Winkel sich die gleiche Anzahl Strahlen auf eine größere Fläche verteilen; und in diesen Regionen bleibt es daher kühler.

#### Großwetterlage

Die Großwetterlage ist definiert durch eine mittlere Luftdruckverteilung in Meereshöhe und der mittleren Troposphäre in einem großen Gebiet (z.B. Europa plus Teile des Nordatlantiks) und über eine Dauer von mehreren Tagen. Die Großwetterlage bestimmt den wesentlichen Charakter eines Witterungsabschnittes; lediglich in einzelnen Teilgebieten des Großraumes kann das Wetter aufgrund von Durchzug kleinräumiger Druckgebilde wechseln. Die Zugbahnen der kleinräumigen Druckgebilde verlaufen während einer Großwetterlage ähnlich. Großwetterlagen dienen der synoptischen Klimatologie und liegen für den europäischen Raum seit 1881 vor. Die Großwetterlagen Europas (GWL) werden monatlich vom DWD erstellt und beinhalten einen Witterungs- und einen Kartenteil. (Deutscher Wetterdienst)

#### hydrostatische / nicht-hydrostatischen Modelle

Innerhalb der Gruppe der prognostischen (Wetter)Modelle unterscheidet man zwischen hydrostatischen und nichthydrostatischen Modellen. Hydrostatische Verfahren (also gültig für unbewegte, strömungsfreie Flüssigkeiten oder Gase) vereinfachen die vertikalen Bewegungsgleichungen (der Strömung) sehr stark, was in komplexen Orographien (Gelände) zu Schwierigkeiten führen kann. Nicht-hydrostatische Modelle nehmen diese Vereinfachungen nicht vor und lösen die vollständigen Strömungsgleichungen. Dies führt allerdings zu deutlich längeren Rechenzeiten

#### hygrisch

hygrisch, [von griech. hygros = feucht, nass], Vorgänge oder Begriffe, die den Niederschlag oder die Luftfeuchtigkeit betreffen. (www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften)

#### Immission / Emission

Laut Bundes-Immissionsschutzgesetz - BlmSchG) § 3 Begriffsbestimmungen:

(1) Schädliche Umwelteinwirkungen im Sinne dieses Gesetzes sind Immissionen, die nach Art, Ausmaß oder Dauer geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit oder die Nachbarschaft herbeizuführen.

- (2) Immissionen im Sinne dieses Gesetzes sind auf Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter einwirkende Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Umwelteinwirkungen.
- (3) Emissionen im Sinne dieses Gesetzes sind die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnlichen Erscheinungen.
- (4) Luftverunreinigungen im Sinne dieses Gesetzes sind Veränderungen der natürlichen Zusammensetzung der Luft, insbesondere durch Rauch, Ruß, Staub, Gase, Aerosole, Dämpfe oder Geruchsstoffe.

#### Mikroklima / Klimatop

Der Klimatop (gr. klima "Neigung, Witterung" und tópos "Ort") bezeichnet in der Landschaftsökologie eine Fläche (einen Ausschnitt der Erdoberfläche) mit einheitlichen geländeklimatischen Eigenschaften. Obwohl der Begriff auf lokalklimatische Einheiten beliebigen Charakters und beliebiger Lage angewendet werden kann, ist der Begriff insbesondere in der Stadtklima-Forschung und Planung üblich, wo er die Basis für die Erstellung sogenannter regionaler Klimafunktionskarten und für die Modellierung der Luftqualität bildet. (Wikipedia). Das "Mikro"-Klima beschreibt mittlere atmosphärische Zustände und wiederkehrende Phänomene im mikrometeorologischen Maßstabsbereich. Nach Orlanski (1975) werden atmosphärische Prozesse mit einer horizontalen Ausdehnung von wenigen Millimetern bis einigen hundert Metern der Mikroskala zugeordnet. Mit Mikroklima ist damit das spezielle Klima eines Areals gemeint, das sich in den bodennahen Luftschichten ausbildet und stark von den vorhandenen Oberflächen (Untergrund, Bewuchs, Bebauung), z.B. deren Rauigkeit und thermischen Eigenschaften, beeinflusst ist. (Deutscher Wetterdienst)

#### Prädiktor

Statistik, fachsprachlich: Variable, die benutzt wird, um die Werte einer anderen Variable vorherzusagen (Wiktionary)

#### Regression, lineare

Die Lineare Regression ist ein Spezialfall der Regressionsanalyse, also ein statistisches Verfahren, mit dem versucht wird, eine beobachtete abhängige Variable durch eine oder mehrere unabhängige Variablen zu erklären. Bei der linearen Regression wird dabei ein linearer, proportionaler Zusammenhang der Daten angenommen. (Wikipedia)

#### Schwüle

Mensch und Natur leiden unter der Hitze, insbesondere die sogenannte Schwüle kann unser Wohlbefinden erheblich beeinträchtigen. Schwüle charakterisiert die Behinderung der Fähigkeit des menschlichen Körpers, über Verdunstung (Schwitzen) Wärme an die Umgebung abzugeben. Bei hoher Luftfeuchte kann Wärmestau zu Hyperthermie und im Extremfall zu lebensbedrohendem Hitzschlag führen.

Wann aber ist es schwül? Schwüle ist ein subjektives Empfinden, es gibt keine eindeutige, meteorologisch fundierte Definition. Man kann aber eine Schwülegrenze anhand einer Kombination von Werten im Temperatur-Feuchte-Milieu festlegen. Ausgangspunkt einer vereinfachten Betrachtung ohne die Berücksichtigung von Wärmestrahlung, Luftbewegung sowie körperlicher Aktivität ist ein absoluter Schwell-Wert, und zwar ein Dampfdruck von 18.8 hPa oder eine absolute Feuchte von 13.5 g/m3, der einem Taupunkt (die Lufttemperatur bei 100% Luftfeuchte und Kondensation von Wasserdampf zu Wassertropfen) von 16 bis 17 °C entspricht.

Es tritt Schwüleempfinden auf, wenn die absolute Luftfeuchte 13.5 g/m3 übersteigt. Möglich ist dies erst bei 100% relativer Luftfeuchte und ab einer Temperatur von 16°C. Ist es kühler, kann die Luft nicht hinreichend viel Wasser aufnehmen. Erst ab einer Lufttemperatur von 16°C kann es schwül werden. Doch je höher die Temperatur steigt, umso geringer kann die relative (abs.) Luftfeuchte sein und dennoch wird der Grenzwert von 18.8 hPa oder 13.5 g/m3 erreicht oder gar überschritten. Je höher die Luftfeuchte (absolut oder als Dampfdruck) steigt, um so drückender wird die Schwüle empfunden, desto geringer wird die zur Erreichung von 18.8 hPa (13.5 g/m3) notwendige relative (absoluter) Feuchte. Bei einer aktuellen Temperatur von ca. 16 °C beträgt der Sättigungsdampfdruck gerade 18.8 hPa (abs. Feuchte 13.5 g/m3), d.h. es müssen etwa 100% relative Feuchte herrschen, um Schwüle zu erreichen. Bei 20 °C werden immerhin 80 %, bei 30 °C noch 44 % und bei 40 °C nur ca. 25 % relative Luftfeuchte benötigt, um das Milieu als schwül zu empfinden. (Deutscher Wetterdienst)

#### Stress / Stressoren

Stress bezeichnet zum einen durch spezifische äußere Reize (Stressoren) hervorgerufene psychische und physische Reaktionen (u. U. Krankheitsbilder) bei Lebewesen, die zur Bewältigung besonderer Anforderungen befähigen, und zum anderen die dadurch entstehende körperliche und geistige Belastung und Gesundheitsgefahr. Bioklimatischer Stress: durch bioklimatische Belastungsfaktoren und Reize verursacht.

#### Synoptik / synoptisch

Synoptik (griechisch: synopsis = Übersicht, Überblick) ist ein Teilgebiet der Meteorologie, das in einer großräumigen Zusammenschau die Wetterzustände in ihrer räumlichen Verteilung und zeitlichen Änderung für einen gegebenen Zeitpunkt (gleichzeitig!) untersucht (Analyse oder Wetterlage). Sie stellt sozusagen den "Anfangszustand" für eine daraus folgende Wetterentwicklung dar, welche anhand numerischer Modelle berechnet werden kann. Die Ergebnisse der Modellberechnungen können dann in interpretierter Form als Wettervorhersage weiterverarbeitet werden (Prognose oder Wetterbericht). (Deutscher Wetterdienst)

#### troposphärisches Ozon

Ozon das in der Troposphäre sekundär gebildet oder abgebaut bzw. in die Troposphäre emittiert wird (nicht zu verwechseln mit der Ozonschicht in der Stratosphäre in im Mittel 28 km Höhe).

Ozon (O<sub>3</sub>, von griechisch ozein = riechen) ist ein aus drei Sauerstoffatomen bestehendes, instabiles Molekül. Es ist ein starkes Oxidationsmittel (Reizgas, giftig). (Wikipedia)

Troposphäre: Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Erdatmosphäre und umfasst etwa drei Viertel der Masse dieser Gashülle. Sie erstreckt sich von der Erdoberfläche bis zur Tropopause. Die Höhe dieser Grenzschicht zur Stratosphäre variiert von etwa 8 Kilometern an den Polen (wo sie im Winter bis zu 2 Kilometer niedriger ist als im Sommer) und bis zu rund 17 Kilometern am Äquator. (Deutscher Wetterdienst)

#### Wärmestrahlung, Strahlungstemperatur

Wärmestrahlung wird von allen Festkörpern, Flüssigkeiten, Gasen und Plasmen emittiert, die sich in einem angeregten Zustand mit einer wohlbestimmten Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes befinden. Genauso nimmt jeder Körper gleichzeitig von anderen Körpern ausgesendete Wärmestrahlung durch Absorption auf (Strahlungsaustausch), die Summe aus Wärmestrahlungsemission und -absorption wird Strahlungsbilanz genannt. (Wikipedia) Strahlungstemperatur, Strahlungsäquivalenttemperatur, ergibt sich aus der Wärmestrahlung der Oberfläche und dem spezifischen Emissionsvermög

sogenannten schwarzen Strahlern gegeben die keinerlei Strahlung reflektieren (sprich alle Strahlung absorbiert). Reelle Objekte (graue Strahler) absorbieren die einfallende

damit grundsätzlich weniger Wärmestrahlung als ein idealer Schwarzkörper gleicher Temperatur. Die Strahlungstemperatur kann sich von der wahren Temperatur eines Körpers um mehrere Grad unterscheiden. Die mittlere Strahlungstemperatur der Umgebung ist ein wichtiger Faktor zur Bestimmung des Wärmeempfindens.

#### Wind Chill-Effekt

Durch eine erhöhte Windgeschwindigkeit tritt in den Fällen eine Abkühlung im Hautbereich auf, in denen die Hauttemperatur über der Lufttemperatur liegt, der sogenannte Wind-Chill-Effekt. Dieser Abkühlungseffekt verstärkt sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Auch bei konstanter Windgeschwindigkeit, aber gleichzeitig zunehmender Differenz zwischen Haut- und Lufttemperatur ist dies der Fall, da sich dadurch der konvektive Wärmeübergangskoeffizient (eine von der Luftbewegung, der Luftfeuchte und der Lufttemperatur abhängige Größe, die die Wärmeabgabe des Organismus angibt) erhöht. Unter warmen Bedingungen ist die Bedeutung der Luftfeuchte beim Abkühlungseffekt erheblich, da sie eine Auswirkung auf die Schweißverdunstung und damit auf die Temperaturabnahme der Haut durch Verdunstung besitzt. Unter kalten Bedingungen hat die Luftfeuchte keinen Einfluss mehr auf den Abkühlungseffekt, soweit die Haut nicht durch Wasser oder Schnee benetzt ist. Deshalb wird der Wind-Chill-Effekt zur Bewertung der thermischen Belastung auch überwiegend nur bei kalten Bedingungen angewendet. (Deutscher Wetterdienst).

### 8 Anhänge

Publikation: Nabavi et al. 2021: Site-scale modeling of surface ozone in Northern Bavaria using machine learning algorithms, regional dynamic models, and a hybrid model. Environmental Pollution. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115736

Masterarbeiten: Arora, S., Mahr. I., Spies, I., Sungur, L. (auf Anfrage erhältlich)

Bachelorarbeit: Tschuschke, A. (auf Anfrage erhältlich)