



Fachbereich 1 - Life Sciences and Engineering

Klimaschutz und Klimaanpassung

**Evaluierung öffentlicher Daten für die
mikroklimatische Modellierung:
Eine Analyse mit Palm4U**

Bachelorarbeit

vorgelegt am 14.06.2024

von

Willi Bobe

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Abkürzungsverzeichnis	V
Abstract	VI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Datengrundlage	4
3 Methodik	6
3.1 Was ist Palm4U?	6
3.2 Klimavariablen und Komfortindizes	8
3.2.1 Universal Thermal Climate Index	8
3.2.2 Physiologische Äquivalenttemperatur	9
3.2.3 Wahrgenommene Temperatur	9
3.2.4 Mittlere Strahlungstemperatur	10
3.3 Vorbereitung der Geoinformationsdaten	10
3.4 Erstellung des statischen Treibers	14
3.4.1 Aktueller Zustand des Königsplatzes	14
3.4.2 Anpassungszustand des Königsplatzes	15
3.4.3 Funktionsweise des Graphical User Interface	16
3.4.4 Rasterisierung	17
3.4.5 Unsicherheiten	19

4	Ergebnisse	20
4.1	Lufttemperatur	20
4.2	Oberflächentemperatur	22
4.3	Windgeschwindigkeit	24
4.4	Nettostrahlung	26
4.5	Spezifische Feuchte	30
4.6	Thermische Komfortindizes	33
5	Diskussion	41
5.1	Realitätsnähe des berechneten Mikroklimas	41
6	Zusammenfassung	45
7	Fazit	47
8	Ausblick	49
9	Literaturverzeichnis	51

Abbildungsverzeichnis

1	Dateiansicht der Speyer Altstadt, mittig der Königsplatz mit den Objekttypen der GeoJSON Datei in QGIS	13
2	PalmGUI Ansicht des Königsplatz im aktuellen Zustand, in rot die Gebäude, grau zeigt Bodenbeläge, grün sind alle Baumgruppen und Einzelbäume, Wasserflächen in blau	14
3	PalmGUI Ansicht des Königsplatz im Anpassungszustand, in rot die Gebäude, grau zeigt Bodenbeläge, grün sind alle Baumgruppen und Einzelbäume, Wasserflächen in blau	16
4	Ansicht des Königsplatzes im PalmGUI nach Rasterisierung, die Farblegende ist die gleiche wie in den vorherigen Abbildungen . .	18
5	Vergleich der 2m Lufttemperatur von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 18 und 19 Uhr	20
6	Differenzplot der 2m Lufttemperatur mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 18 und 19 Uhr . .	21
7	Vergleich der Oberflächentemperatur von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr	22
8	Differenzplot der Oberflächentemperatur mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr	23
9	Vergleich der Windgeschwindigkeit von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr	24
10	Differenzplot der Windgeschwindigkeit mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr	25
11	Vergleich der Nettostrahlung Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 13 und 14 Uhr	26

12	Differenzplot der Nettostrahlung mit der Differenz von Anpassungs- zustand und aktuellem Zustand zwischen 13 und 14 Uhr	28
13	Vergleich der Nettostrahlung von Ist-Zustand und Anpassungszus- tand zwischen 21 und 22 Uhr	29
14	Vergleich der spezifischen Feuchte von Ist-Zustand und Anpas- sungszustand zwischen 13 und 14 Uhr	30
15	Differenzplot der spezifischen Feuchte mit der Differenz von An- passungszustand und aktuellem Zustand zwischen 13 und 14 Uhr	31
16	Differenzplot der relativen Feuchte mit der Differenz von Anpas- sungszustand und aktuellem Zustand zwischen 13 und 14 Uhr . .	32
17	Vergleich des UTCI von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwis- chen 15 und 16 Uhr	33
18	Differenzplot des UTCI mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr	34
19	Vergleich der PET von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwis- chen 15 und 16 Uhr	35
20	Differenzplot der PET mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr	36
21	Vergleich der PT von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwis- chen 15 und 16 Uhr	37
22	Differenzplot der PT mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr	38
23	Vergleich der MRT von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwis- chen 14 und 15 Uhr	38
24	Differenzplot der MRT mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 14 und 15 Uhr	40

Tabellenverzeichnis

1	Liste der verwendeten Datensätze mit Informationen über Jahresaktualität, Geodatentyp, Auflösung und Quelle	5
2	Beschreibung der Klimavariablen mit verwendeter Einheit	8

Abkürzungsverzeichnis

ALKIS	amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem
DGM	digitales Geländemodell
DOP	digitales Orthofoto
GUI	graphical user interface
KKP	kommunaler Klimapakt
LoD	level of detail
MRT	mean radiant temperature
netCDF	network common data form
PALM	parallel large-eddy-simulation model
PET	physiological equivalent temperature
PT	perceived temperatur
UTCI	universal thermal climate index

Abstract

Der Klimawandel ist eine wachsende Herausforderung, welche durch den Wärmeinseleffekt in Städten verstärkt werden kann. Eine Anpassung an diese sich ändernden Verhältnisse ist für das menschliche Wohlbefinden unerlässlich. Die Umsetzung effektiver Anpassungsmaßnahmen benötigt jedoch gründliche Planung und lange Erfahrung durch Messung der mikroklimatischen Effekte, um die genauen Auswirkungen der Bauprojekte zu überblicken. In dieser Arbeit werden mithilfe des Palm4U-Modells und öffentlicher Datensätze die mikroklimatischen Effekte einer Anpassungsmaßnahme mit dem aktuellen Zustand verglichen. Dabei wird betrachtet, ob die Qualität öffentlicher Daten in Bezug auf Auflösung und Aktualität zu realistischen Ergebnissen führen kann. Aus dem Vergleich mit realen Messungen aus ähnlichen Projekten geht hervor, dass die berechneten Ergebnisse vergleichbare Ausmaße haben. Damit wird gezeigt, dass die verwendete Methodik auch auf andere Vorhaben übertragbar ist und das Potenzial hat, Kosten und Zeit in der Planung und Umsetzung von baulichen Anpassungsmaßnahmen zu sparen.

1. Einleitung

Der Klimawandel ist eine Realität, die weltweit spürbar ist und unaufhaltsame Auswirkungen auf unseren Planeten hat. Von steigenden Temperaturen über veränderte Niederschlagsmuster bis hin zu extremen Wetterereignissen – die Zeichen des Klimawandels sind überall präsent. Zwischen 1994 und 2023 lag die gemittelte Oberflächentemperatur um 0,95 °C¹ höher als im frühindustriellen Zeitraum 1881-1910. Angesichts dieser globalen Herausforderung ist es von entscheidender Bedeutung, dass Anpassungsmaßnahmen ergriffen werden, um die Resilienz unserer Gesellschaft und Infrastruktur in Bezug auf die Auswirkungen des Klimawandels zu stärken.

Auch Deutschland bleibt von den Auswirkungen des Klimawandels nicht verschont. Die Veränderungen der klimatischen Bedingungen sind in ganz Deutschland spürbar und erfordern eine aktive Auseinandersetzung auf lokaler, regionaler und nationaler Ebene. Deutschlands Jahresmitteltemperatur im langjährigen Zeitraum zwischen 1994 und 2023 zeigt eine Erwärmung von 1,6 °C gegenüber dem Zeitraum 1881-1910¹. In Rheinland-Pfalz liegt der Anstieg im gleichen Zeitraum bei 1,7 °C¹. Eine kleinräumige Betrachtung des Problems stellt diverse andere klimatische Faktoren in den Vordergrund. Der Wärmeinseleffekt ist bei der Betrachtung des Stadtklimas nicht zu vernachlässigen. Ein hoher Versiegelungsgrad und dichte Bebauung in Verbindung mit industrieller Aktivität und vermehrtem Treibhausgasausstoß kann die Temperatur im urbanen Raum gegenüber dem umliegenden ländlichen Bereich erhöhen, was die Dringlichkeit zur Anpassung verstärkt².

¹Kommunikation mit RLP Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen

²**Bundesamt für Umwelt** (2012): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder, Erster Teil der Strategie des Bundesrates

1.1 Motivation

Die Landesregierung in Rheinland-Pfalz reagierte im Jahr 2023 und rief einen kommunalen Klimapakt (KKP) aus. Dieser Pakt bietet den Kommunen des Landes eine maßgeschneiderte Beratung durch die Energieagentur Rheinland-Pfalz und das Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen. Der KKP ist ein bedeutender Schritt, um den Kommunen die Werkzeuge an die Hand zu geben, die es braucht, um sich den Herausforderungen des Klimawandels effektiv zu stellen.

Diese Bachelorarbeit ist damit Teil eines größeren Projektes, das darauf abzielt, die Anpassungsfähigkeit der Kommunen in Rheinland-Pfalz zu stärken. Durch die Nutzung des meteorologischen Modells Palm4U wird angestrebt, eine maßgeschneiderte Beratung für die Kommunen zu ermöglichen, die auf eigens angefertigten Modellergebnissen basiert. Dabei werden die Effekte von Anpassungsmaßnahmen bereits berücksichtigt, bevor diese teuer umgesetzt werden. Eine Fallstudie aus Prag zeigt bereits, dass die Anwendung des Palm4U-Modells zu einer klimasensibleren Stadtplanung beitragen kann³. Das getestete Projekt dieser Bachelorarbeit zielt darauf ab, die Frage zu beantworten, ob mit der Nutzung öffentlicher Daten realistische Ergebnisse für die Berechnung von Anpassungsmaßnahmen mit Palm4U erzielt werden können oder ob höhere Auflösungen oder Anforderungen erforderlich sind. In Zusammenarbeit mit der Stadt Speyer wird eine kleinräumige Untersuchung des Klimas auf dem in der Altstadt befindlichen Königsplatz durchgeführt. Dabei wird der aktuelle Zustand mit einem Anpassungsszenario verglichen, in welchem einige Maßnahmen zur Besserung des thermischen Komforts vorgenommen wurden.

Die Kommunikation mit den Kommunen kann durch diese vorgerechneten Modellergebnisse erheblich vereinfacht werden. Sie dienen als überzeugendes Mittel, um die Dringlichkeit von Anpassungsmaßnahmen zu vermitteln und die Entscheidungsfindung zu erleichtern. Darüber hinaus bietet eine digitale Umgestaltung von Flächen das Potenzial, verschiedene Bauzustände für eine Fläche zu testen. Dadurch lässt sich die effektivste Variante auswählen, um den Funktionsverlust, wie beispielsweise die Nutzung als Parkplatz, zu minimieren. Dies ermöglicht

³Geletic et al. (2021): High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic

einen nachhaltigen Umgang mit den veränderten klimatischen Bedingungen. Diese Bachelorarbeit liefert Einblicke in die Nutzung öffentlicher Daten in Palm4U und die Schlüssigkeit der Ergebnisse und gibt einen Ausblick darüber, welche weiteren Schritte erforderlich sind, um genauere Vorhersagen zu treffen. Die Entwicklung eines Verständnisses für die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen bietet Ausblick auf die Gewinnung wertvoller Erkenntnisse, welche nicht nur für Rheinland-Pfalz, sondern auch für andere Regionen mit vergleichbaren Herausforderungen von Nutzen sein können.

1.2 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 dieser Arbeit wird zuerst die Datengrundlage vorgestellt, bei welcher insbesondere auf die Zugänglichkeit geachtet wurde. Damit entfallen die Kosten und der Umstand einer Datenerhebung, was die zukünftige Bereitschaft für ähnliche Projekte auch in anderen Städten und Kommunen vorraussichtlich erhöht. Kapitel 3 beschreibt zunächst kurz das verwendete Modell, die Variablen und Indizes, welche in den Ergebnissen betrachtet werden, um aufzuzeigen, weshalb diese für die vorliegende Arbeit geeignet sind. Anschließend wird der Prozess der Datenvorbereitung und der Erstellung des statischen Treibers erläutert, so dass diese Arbeit als Grundlage für adaptive Projekte dienen kann. Dem folgt ein Vergleich des aktuellen Zustandes des Königsplatzes mit dem Anpassungszustand. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse dargelegt und beschrieben, wobei das Ziel besteht, ihre zugrunde liegenden Ursachen zu analysieren. Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Frage, ob die errechneten Ergebnisse realistische Ausmaße haben. So kann die Qualität der Datengrundlage und die Funktionalität der Methodik besser bewertet werden. Abschließend folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse sowie Fazit und Ausblick, in welchem auf die Zukunftsfähigkeit der Methodik und weitere Hinweise für die Umsetzung des Projektes eingegangen wird.

2. Datengrundlage

Die Datengrundlage zur Nutzung von Palm-4U besteht einerseits aus Geoinformationsdaten, welche den statischen Treiber aufbauen, andererseits aus meteorologischen Daten, die vom Deutschen Wetterdienst bereitgestellt werden. Diese werden in der Methodik erläutert. Bei den Daten, die für den statischen Treiber eingesetzt wurden, handelt es sich ausschließlich um öffentliche Daten, die heruntergeladen, oder auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden können. Sie enthalten alle nicht veränderlichen (statischen) Elemente, welche für die Berechnungen notwendig sind. Alle Rasterdaten wurden mit einer Auflösung von mindestens 1 m eingelesen, da dies die Zielauflösung der Ergebnisse ist. Im folgenden werden die in dieser Arbeit verwendeten Geodaten beschrieben. Tabelle 1 zeigt die Datensätze zusammen mit Informationen über Aktualität, Auflösung und Geodatentyp.

Das amtliche Liegenschaftskataster-Informationssystem (ALKIS) ist eine bundesweit einheitliche Datenbank, in der alle Liegenschaften mit ihrer Größe, der Lage und weiteren Eigenschaften als Vektordaten aufgeführt und beschrieben sind. Für die hier notwendige Datengrundlage wurden Teildatensätze für Verkehr, Gewässer, Vegetation und Gebäude genutzt⁴.

Digitale Geländemodelle (DGM) beschreiben die Geländeform und Höhe der Erdoberfläche. Sie liegen mit einer Auflösung von 1 m als Rasterdaten vor.

3D-Gebäudemodelle sind digitale Abbildungen, die sich aus dem Grundriss jedes Gebäudeobjektes und einer Gebäudehöhe zusammensetzen. Bei einem Level of Detail von 1 (LoD1) werden die Gebäude als simple Blöcke dargestellt, ohne Berücksichtigung der Dachform.

⁴Rheinland-Pfalz Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen (2024): Amtliches Liegenschaftskataster Informationssystem ALKIS, <https://lvermgeo.rlp.de/ueber-uns/unsere-aufgaben/liegenschaftskataster/alkisr> (08.05.2024)

Tabelle 1: Liste der verwendeten Datensätze mit Informationen über Jahresaktualität, Geodatentyp, Auflösung und Quelle

Datensatz	Jahresstand	Datentyp	Auflösung	Quelle
ALKIS_AX_Verkehr	2022	Vektor	-	LfU RLP
ALKIS_AX_Gewässer	2022	Vektor	-	LfU RLP
ALKIS_AX_Vegetation	2022	Vektor	-	LfU RLP
ALKIS_AX_Gebäude	2022	Vektor	-	LfU RLP
Gebäudemodell LoD1	2021	Vektor	-	LfU RLP
Baumkataster Speyer	2023	Punkt	-	Speyer
Gistus_1m DGM	2016	Raster	1 m	LfU RLP
digitales Orthofoto	2023	Raster	0,4 m	LVerGeo

Die in Tabelle 1 gezeigten Datensätze sind öffentlich zugänglich und wurden jeweils auf Anfrage beim Landesamt für Umwelt in Rheinland-Pfalz, der Stadt Speyer und dem Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz angefordert und kostenfrei zur Verfügung gestellt.

3. Methodik

Nachdem die notwendigen Daten gesammelt wurden, sind einige Schritte nötig um sie in die richtige Form im Umgang mit dem Palm4U-Modell zu bringen, damit die Ergebnisse berechnet werden können. Zunächst wird das Modell näher beschrieben und weitere Informationen über den Berechnungszeitraum und die zugrundeliegenden Meteorologischen Bedingungen geklärt. Danach werden die berechneten Klimavariablen und Indizes erläutert.

Da die in der Datengrundlage gezeigten Datensätze lediglich eine mögliche Datenbasis darstellen, mit der ein statischer Treiber erstellt werden kann, werden im Folgenden die Anforderungen an die Geobasisdaten und deren Vorbereitung erklärt, um aufzuzeigen, dass auch andere Datensätze verwendet werden können, welche diesen Anforderungen entsprechen.

Anschließend werden die beiden Zustände des Königsplatzes dargestellt, bevor diese im Graphical User Interface des Palm4U-Modells (PalmGUI) umgesetzt werden. Im letzten Schritt folgt die Rasterisierung der Daten, nach welcher die Berechnung der Ergebnisse erfolgt.

3.1 Was ist Palm4U?

Das parallel large-eddy-simulation model (PALM) ist ein meteorologisches Modell, das entwickelt wurde, um ozeanische und atmosphärische Strömungen an der Grenzschicht zur Erdoberfläche zu simulieren. Für die Anwendung in städtischen Verhältnissen können sogenannte Palm4U Komponenten eine Vielzahl von Funktionen implementieren, welche Berechnungen des städtischen Mikroklimas ermöglichen.⁵ Das Ziel von Palm4U ist es, ein Modell bereitzustellen, das

⁵Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover (Hrsg.) (2024): The PALM model system, <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac> (08.05.2024)

sowohl für planerische Entscheidungen in Städten als auch für wissenschaftliche Forschungszwecke geeignet ist und somit dazu beiträgt, stadtklimatologische Aspekte angemessen zu berücksichtigen. Alle Ergebnisse und Berechnungen dieser Arbeit entstehen unter Benutzung des Palm4U-Modells.

Bevor ein Modelllauf berechnet werden kann, müssen außerhalb des statischen Treibers meteorologische Größen festgelegt werden. Diese setzen sich zum einen aus den Koordinaten und Zeitparametern zusammen, zum anderen werden Wetterbedingungen festgelegt, unter welchen die Berechnungen erfolgen. Für den Vergleich zwischen aktuellem Zustand und Anpassungszustand werden bei beiden Läufen die gleichen Bedingungen gewählt. Die betrachtete Maßnahme zielt auf die Anpassung an Hitzebelastung ab. Daher wird die Wirkungsweise der Maßnahme unter den Bedingungen einer sommerlichen Hochdruckwetterlage getestet. Das gewählte Datum für den Vergleich ist der 21.06.2021. Es handelt sich dabei um den Tag der Sommersonnenwende, welcher die meisten Sonnenstunden und die größte Mittagshöhe der Sonne aufweist. Die potenzielle Oberflächentemperatur ist auf 18,9 °C gesetzt. Ausgehend von diesem Wert wird das anfängliche vertikale Temperaturprofil mithilfe eines anfangs festgelegten Höhengradienten erstellt. Da die Windgeschwindigkeiten in einer Hochdrucklage tendenziell eher niedrig sind, startet das Modell mit schwachem Wind aus Südwestrichtung mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s. Das Wasserdampf-Mischverhältnis an der Oberfläche wird auf 0,00719 kg Wasser pro kg trockener Luftmasse gesetzt. Auch hier gibt es einen Höhengradienten, welcher ausgehend von diesem Startwert ein vertikales Profil zum Wassergehalt der Luft festlegt.

Um die Auswirkungen einer Klimaanpassungsmaßnahme beurteilen zu können, bietet Palm4U eine Vielzahl an kalkulierbaren Klimavariablen und Indizes. Auf die Auswahl der Ausgabegrößen, für eine Beschreibung des thermischen Komforts wird im folgenden Kapitel genauer eingegangen.

3.2 Klimavariablen und Komfortindizes

Neben der Analyse grundlegender Klimavariablen gibt die Betrachtung thermischer Komfortindizes ein genaueres Bild von der Wirkung sich verändernder Umweltverhältnisse auf den Menschen. Im Folgenden sind die verwendeten Variablen gelistet und in ihrer Funktionsweise beschrieben. Anschließend folgt eine kurze Beschreibung der thermischen Komfortindizes.

Tabelle 2: Beschreibung der Klimavariablen mit verwendeter Einheit

Variable	Beschreibung	Einheit
Temperatur	Lufttemperatur in 2 m Höhe	°C
Oberflächentemperatur	Temperatur der Bodenoberfläche	°C
Windgeschwindigkeit	Geschwindigkeit der Windbewegung in 10 m Höhe	m/s
Nettostrahlung	Differenz von ein- und ausgehender Strahlung	W/m ²
spezifische Feuchte	Wasserdampfgehalt in feuchter Luft	g/kg

Die spezifische Feuchte (q) gehört nicht zu den standardmäßigen Ausgabeparametern und wurde aus dem Wasserdampf-Mischungsverhältnis (w) errechnet ($q = \frac{w}{(1+w)}$).⁶

3.2.1 Universal Thermal Climate Index

Der Universal Thermal Climate Index (UTCI) wurde entwickelt, um die menschliche Wahrnehmung von Wärmebelastungen genauer zu charakterisieren. Dabei bezieht der UTCI eine Vielzahl von Umweltfaktoren, darunter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Strahlung und Luftfeuchtigkeit ein. Diese Faktoren werden in einem komplexen Modell berücksichtigt, das die physiologische Reaktion des menschlichen Körpers auf die Umgebung simuliert. Dieses Modell für menschliche Physiologie und thermischen Komfort ermöglicht es dem UTCI eine Referenzlufttemperatur zu bestimmen, die eine ähnliche Reaktion des Körpers wie die tatsächliche Umgebungstemperatur hervorrufen würde. Zusätzlich wird

⁶Brune, William (2023): Fundamentals of Atmospheric Science, Ways to Specify Water Vapor, <https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/519> (08.05.2024)

ein eigenes Clothing Model verwendet, um den Einfluss der Kleidung auf den thermischen Komfort zu erfassen. Der UTCI ermöglicht eine präzise Einschätzung der thermischen Belastung für verschiedene Anwendungen, einschließlich Wettervorhersagen, öffentliche Gesundheitswarnungen, städtische Planung und Klimaforschung. Da der UTCI für verschiedene geografische Regionen und Bedingungen geeignet ist, wird die Anwendbarkeit in verschiedenen Gebieten ermöglicht⁷.

3.2.2 Physiologische Äquivalenttemperatur

Die physiologische Äquivalenttemperatur (physiological equivalent temperature - PET) beruht auf einem Modell des Wärmehaushalts des menschlichen Körpers. Sie liefert die äquivalente Temperatur in °C einer isothermen Referenzumgebung. Bei dieser Referenzumgebung ist der Wärmehaushalt eines menschlichen Körpers mit gleichbleibenden Kern- und Hauttemperaturen genauso ausgeglichen wie unter den variablen Außenbedingungen, die betrachtet werden. Der Index berücksichtigt dabei Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und globale Strahlungsflüsse. Die Isolierung durch Kleidung in der Referenzumgebung variiert nicht. Der Einfluss der Luftfeuchtigkeit auf die physiologische Äquivalenttemperatur beschränkt sich auf latente Wärme-flüsse über die Atmung und über die Diffusion durch die Haut⁸.

3.2.3 Wahrgenommene Temperatur

Die wahrgenommene Temperatur (perceived temperature - PT) ist ein Maß dafür, wie sich die Temperatur für einen Menschen anfühlt, basierend auf verschiedenen Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit. Sie wird verwendet, um die thermische Wahrnehmung in Außenumgebungen verständlicher zu machen, indem sie angibt, welche Temperatur (in °C) in einer isothermen Umgebung mit leichter Luftbewegung und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50% die gleiche Wärme- oder Kälteempfindung hervorrufen würde wie die betrachtete Umgebung. Dabei wird angenommen, dass

⁷Jendritzky et al. (2011): UTCI—Why another thermal index?

⁸Blazejczyk et al. (2011): Comparison of UTCI to selected thermal indices

die Referenzperson eine Stoffwechselrate von $135 \text{ (W/m}^2\text{)}$ hat und die Isolation durch Kleidung an warme Verhältnisse im Sommer und kalte Verhältnisse im Winter angepasst wird, um so viel thermischen Komfort wie möglich zu erreichen⁹.

3.2.4 Mittlere Strahlungstemperatur

Die mittlere Strahlungstemperatur (mean radiant temperature - MRT) ist die gleichmäßige Temperatur eines imaginären Raumes in °C , in dem die Wärmestrahlung des menschlichen Körpers gleich der in der tatsächlichen Umgebung ist. Sie basiert gänzlich auf Strahlungsflüssen und ist nicht abhängig von anderen Variablen wie Wind oder Luftfeuchtigkeit ¹⁰.

3.3 Vorbereitung der Geoinformationsdaten

Um den statischen Treiber für das Palm4U-Modell erstellen zu können, werden Daten benötigt, die sämtliche Objekte beschreiben, welche sich innerhalb der Berechnungen nicht mehr verändern und somit statisch sind. Das PalmGUI, mit welchem der statische Treiber weiterführend bearbeitet und finalisiert werden kann, verlangt eine genaue Datenstruktur, mit welcher jedem Objekt alle nötigen Eigenschaften für die Berechnung zugeordnet werden können. Dazu werden alle gesammelten Daten einem der folgenden sechs Objekttypen zugeordnet: Gebäude, Vegetationstypen, Bodenbelag, Wasserkörper, Baumgruppen und Einzelbäume. Die verschiedenen Objekttypen müssen als Polygondatei vorliegen. Eine Ausnahme dabei sind die Einzelbäume, welche Punktdaten erfordern. Die folgenden Eigenschaften müssen sich aus den im Vorfeld gesammelten Daten ergeben.

Allen Gebäuden wird eine Gebäudehöhe, ein Zeitraum der Erbauung und ein Nutzungstyp zugeordnet. Die Gebäudehöhe ist dabei in Metern angegeben und der Erbauungszeitraum in voreingestellten Jahresintervallen (<1950, 1950-2000, >2000). Der Erbauungszeitraum liefert Richtwerte für die Energiebilanz des Hauses, beispielsweise den Dämmungsgrad. Die Nutzung unterscheidet sich in

⁹Blazejczyk et al. a.a.O. s.8

¹⁰ASHRAE (Hrsg.) (2001): The 2001 ASHRAE Handbook, Kapitel 8 Thermal Comfort, o.O

Wohnraum und Bürogebäude. Die LOD1 Daten eignen sich für diesen Objekttypen, da sie neben der Polygondarstellung auch die Gebäudehöhe enthalten. Die Gebäudenutzung wurde aus ALKIS Gebäudedaten entnommen. Aus diesen geht hervor, dass der Königsplatz zum Großteil von Wohngebäuden umgeben ist. Der Platz befindet sich in der Altstadt, welche vor 1950 erbaut wurde. Da der Stadtteil zwischen 1970 und 2000 weitgehend saniert wurde, wird den umliegenden Gebäuden ein Erbauungszeitraum von 1950 bis 2000 zugewiesen.

Jeder Fläche kann einer von 18 Vegetationstypen zugeordnet werden. Die Datengrundlage hierfür bieten ALKIS Vegetationsdaten. Diese enthalten Vegetationsangaben zur jeweiligen Fläche, allerdings mit mehr als 18 Vegetationstypen.

Beim Bodenbelag stehen 15 Voreinstellungen zur Auswahl. Im Gegensatz zu den Vegetationstypen bezieht sich dieser Objekttyp auf den innerstädtischen Bereich. Der ALKIS Verkehrsdatensatz beinhaltet die dafür nötigen Objekt- und Nutzungsarten. Der Königsplatz selbst ist als Pflasterstein klassifiziert, die umliegenden Straßen als Asphaltbeton.

Wasserkörper werden im PalmGUI definiert als See, Fluss, Ozean, Teich oder Brunnen. Zum aktuellen Zeitpunkt sind die unterschiedlichen Wasserkörper noch nicht im Modell implementiert. Der ALKIS Gewässerdatensatz enthält alle relevanten Gewässertypen. Somit kann der Brunnen auf dem Königsplatz als solcher klassifiziert werden.

Die Baumgruppen eignen sich für Flächen, an welchen eine Klassifizierung mit Einzelbäumen aufgrund fehlender Informationen nicht möglich ist. Die Baumgruppen werden im PalmGUI unterschieden in Nadelwald, Laubwald, Mischwald und einer Grundeinstellung (Default). Jeder Baumgruppe wird eine Höhe in Metern zugeordnet. Da kein öffentlich zugänglicher Datensatz zu Baumgruppen in Speyer existiert, wurde ein digitales Orthofoto mit einer Auflösung von 40 cm (DOP40) zur visuellen Erfassung verwendet. Zusätzlich half ein von der Stadt Speyer geliefertes Baumkataster bei der Lokalisierung der Baumgruppen. Mit dieser Hilfe wurde manuell eine Polygondatei erstellt, welche den Einzelobjekten die richtige Baumgruppe zuordnet. Die Höhe der Baumgruppen wurde durch den Abgleich mit Fotos und den umliegenden Gebäudehöhen aus der LOD1 Datei ermittelt.

Einzelbäume sind die genaueste Art der Darstellung von Bäumen im PalmGUI. Im Gegensatz zu allen anderen Objekttypen werden sie als Punkte dargestellt und nicht als Polygone. Für jeden Punkt stehen 86 auswählbare Baumgattungen und eine Grundeinstellung (Default) zur Verfügung. Jeder Gattung sind voreingestellte Eigenschaften zugeordnet, welche die Erscheinung des Baumes beschreibt. Darüber hinaus ist die Höhe jedes Baumes in Metern erforderlich. Der einzig notwendige Ort für die Darstellung von Einzelbäumen ist der Königsplatz selbst. Die dort befindlichen Bäume der Gattung *Cercis* (Judasbäume) haben eine Höhe von ungefähr 3,5 m¹¹. Im Umfeld befinden sich lediglich zwei Platanen, bei welchen sich eine Darstellung lohnen könnte. Die Einzelbäume für den Platz wurden mithilfe des Baumkatasters aus Speyer dargestellt.

Die QGIS-Erweiterung PalmClassify hilft dabei, die Daten in das richtige Format zu bringen, damit sie im PalmGUI verwendbar sind. In PalmClassify kann jedem Objekttypen ein Datensatz zugeordnet werden, welcher alle notwendigen Informationen enthält. Daten, welche nicht die passende Struktur besitzen, können per Klassifikation angepasst werden. Als Ergebnis erhält der Nutzer eine neue Datei, in der der Objekttyp mit richtiger Datenstruktur gespeichert ist. Durch das Zuordnen einheitlicher Werte zu den verschiedenen Eigenschaften der Objekttypen kann Arbeitsaufwand bei der Datenbeschaffung auf Kosten der Qualität eingespart werden.

Den Gebäuden wurde mithilfe von PalmClassify eine einheitliche Nutzung zugeordnet, da sich im näheren Umkreis des Königsplatzes keine Bürogebäude befinden, welche die Berechnungen beeinflussen können. Auch das Baujahr konnte mit einheitlicher Nutzung zugeordnet werden, da die meisten Gebäude um den Platz zwischen den Jahren 1950 und 2000 entweder erbaut oder saniert wurden. Die Objekttypen Vegetationstyp, Bodenbelag und Wasserkörper folgen der gleichen Methodik, da es sich um ALKIS Daten handelt. Hierfür bietet PalmClassify Nachschlagetabellen, aus denen hervorgeht, welcher ALKIS Nutzungstyp welchem PalmClassify Typen entspricht, was die Klassifikation vereinfacht¹².

Da die Baumgruppen manuell erstellt wurden, konnte von Beginn an auf eine

¹¹Informationen stammen aus persönlicher Kommunikation mit der Stadt Speyer

¹²**Fraunhofer** (Hrsg.) (2022): Lookup Tables, https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/palm_gui/palmclassify/-/wikis/Lookup-Tables (08.05.2024)

korrekte Datenstruktur geachtet werden. Die Positionen der Einzelbäume stammen zwar aus einem Baumkataster, allerdings mussten alle übrigen benötigten Werte manuell eingetragen werden, wodurch bei diesem Objekttyp von Beginn an auf die geeignete Datenstruktur geachtet werden konnte. Alle Ergebnisdateien der verschiedenen Objekttypen werden anschließend in einer Gesamtdatei im GeoJSON-Format zusammengeführt, die alle Objekttypen enthält. Abbildung 1 zeigt die finale QGIS-Ansicht, nachdem alle Daten gesammelt wurden und eine GeoJSON-Datei erstellt wurde.

Dateiansicht QGIS

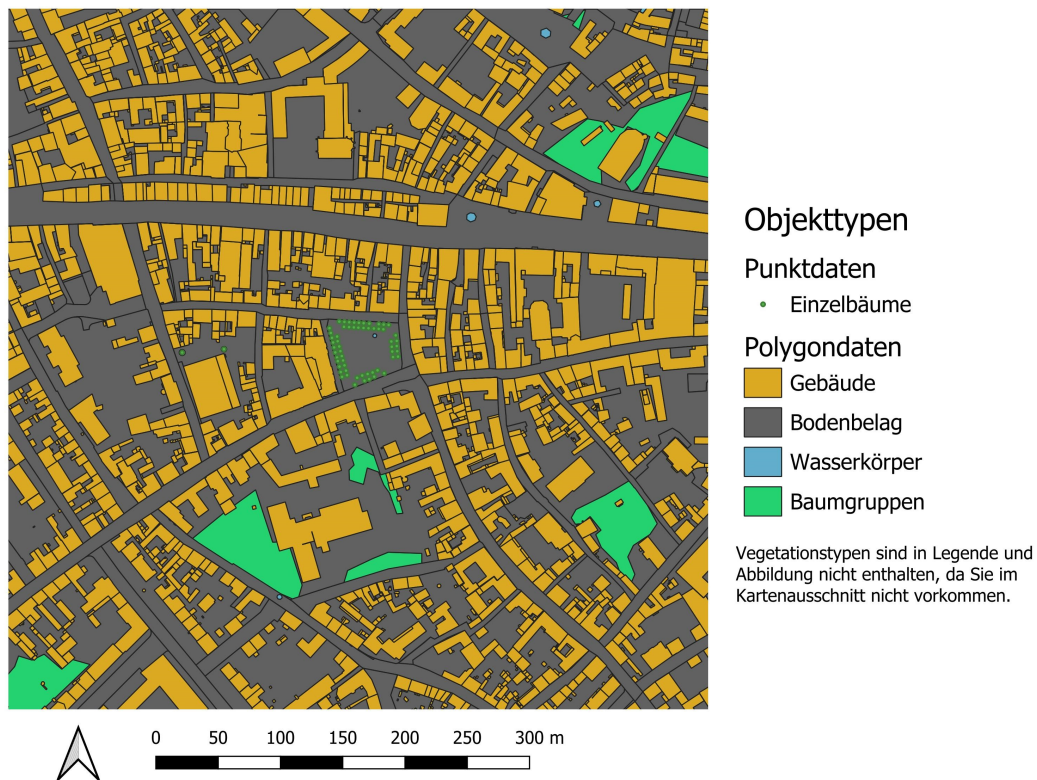


Abb. 1: Dateiansicht der Speyer Altstadt, mittig der Königsplatz mit den Objekttypen der GeoJSON Datei in QGIS

3.4 Erstellung des statischen Treibers

Nachdem das Sammeln und Aufbereiten der nötigen Daten abgeschlossen ist, kann der statische Treiber mithilfe des Graphical User Interface des Palm4U-Modells (PalmGUI) erstellt werden. Im Folgenden sind sowohl der aktuelle Zustand des Königsplatzes als auch der Anpassungszustand beschrieben, um auszuführen, welche baulichen Szenarien miteinander verglichen werden. Anschließend wird die generelle Funktionsweise des GUI erklärt, mit welchem die beiden Zustände digital nachgestellt werden.

3.4.1 Aktueller Zustand des Königsplatzes

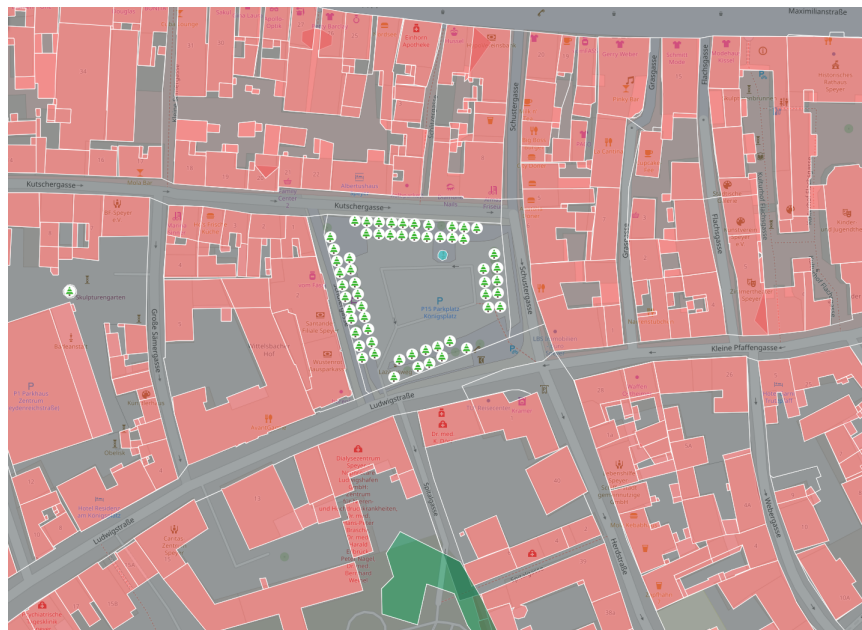


Abb. 2: PalmGUI Ansicht des Königsplatz im aktuellen Zustand, in rot die Gebäude, grau zeigt Bodenbeläge, grün sind alle Baumgruppen und Einzelbäume, Wasserflächen in blau

Der Königsplatz ist ein zentral gelegener Platz in der Altstadt von Speyer. Bis 1689 war er der Standort einer Kirche. Heute dient der Platz als Zentrum einiger Gastronomiegeschäfte, als Parkfläche für potenziell über 60 Kraftfahrzeuge und Fläche für den wöchentlichen Markt. Bis heute stehen die vorzufindenden Bäume im Umriss des ehemaligen Kreuzganges der Kirche. Der Platz ist von allen vier Seiten von Straßen und Häuserreihen umringt und hat einen gepflasterten Bodenbelag. Auf dem nördlichen Teil befindet sich der Handwerkerbrunnen, welcher

aufgrund seiner langen Geschichte unter Denkmalschutz steht. Bei den Bäumen handelt es sich um insgesamt 58 Judasbäume. Aufgrund der über 2000 Jahre zurückreichenden Stadtgeschichte Speyers ist die Wurzeltiefe der Bäume durch Trümmer und Bauschutt aus vergangenen Zeiten begrenzt, was die Wachstumshöhe auf lange Zeit einschränkt. Aktuell sind die Bäume zwischen drei und vier Meter hoch. Abbildung 2 zeigt den aktuellen Zustand des Platzes mit den dazugehörigen Objekttypen im PalmGUI.

Im Zuge des Klimawandels entstehen auf dem Königsplatz Probleme in Bezug auf das Hitzestressrisiko für den Menschen. Die beschränkte Höhe des Baumbestands begrenzt die Schattenflächen und die Verdunstungskälte, die einen kühlenden Effekt bewirken würden. Der Platz ist umgeben von Straßen und dichter Bebauung, welche an Sommertagen viel Energie aufnehmen und speichern. Dadurch entsteht eine Wärmeinselwirkung, die zu höheren Temperaturen im Bereich des Platzes und zu einem unangenehmeren Aufenthalt und einer erhöhten Hitzebelastung führen kann. In Anbetracht sowohl der steigenden Temperaturen als auch der steigenden Sonnenscheindauer in Speyer¹³ werden sich diese Problemfelder in Zukunft vorraussichtlich verschlimmern.

3.4.2 Anpassungszustand des Königsplatzes

Ziel der Umgestaltung des Königsplatzes ist es, die auftretenden Probleme der Hitzebelastung wahrzunehmen, ohne dabei die Funktionalität des Platzes einzuschränken. Es ist geplant, die südliche Hälfte des Platzes, welche derzeit gepflastert ist, durch kurzes Gras zu ersetzen, während die nördliche Hälfte als Parkplatz erhalten bleibt, jedoch unter einer effektiveren Nutzung der Fläche, um die Anzahl der Parkplätze nicht zu mindern. Aufgrund des Denkmalschutzes ist die Bewahrung des Brunnens vorgesehen. Die südliche, begrünte Fläche wird mit verschiedenen Baumarten bepflanzt, um die Biodiversität zu fördern. Ein neuer Brunnen wird in der Mitte dieser begrünten Fläche platziert. Diese Grünfläche wird von einem gebogen verlaufenden, gepflasterten Gehweg durchzogen,

¹³ **Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen** (Hrsg.) (2023): Klimawandel in Speyer
https://www.klimawandel-rlp.de/fileadmin/website/klimakompetenzzentrum/Klimawandelinformationssystem/Anpassungsportal/factsheets/Speyer_Factsheet.pdf, (08.05.2024)



Abb. 3: PalmGUI Ansicht des Königsplatz im Anpassungszustand, in rot die Gebäude, grau zeigt Bodenbeläge, grün sind alle Baumgruppen und Einzelbäume, Wasserflächen in blau

welcher am neuen Brunnen entlangführt und durch seine gebogene Form zu jeder Tageszeit von den nahegelegenen Bäumen beschattet wird. Eine Baumreihe wird den nördlichen Teil der Grünfläche begrenzen und Schatten auf den Parkplatz werfen. Auf dem nördlichen Teil des Parkplatzes wird ebenfalls eine Baumreihe angelegt, wobei die Zwischenräume ausreichend Platz für Marktstände bieten. Der Wurzelraum unter dem Platz wird vergrößert, um das Wachstum der Bäume bis zu 15 Metern Höhe zu ermöglichen und so für mehr Schatten zu sorgen. Abbildung 3 zeigt die geplanten Maßnahmen im PalmGUI.

3.4.3 Funktionsweise des Graphical User Interface

Im PalmGUI kann die eingeladene GeoJSON-Datei weiterführend bearbeitet werden. Dazu wird zusätzlich ein digitales Geländemodell (DGM) benötigt, damit die Geländeform und -höhe in die Berechnungen einfließen kann. Das DGM muss als Rasterdatensatz vorliegen, wobei die Auflösung variieren kann. Das hier verwendete DGM hat eine Auflösung von 1x1 Meter.

Das GUI bietet eine nutzerfreundliche Oberfläche, welche sich ebenfalls um die sechs verschiedenen Objekttypen aufbaut. Jeder Objekttyp kann per einfacher Auswahl zugänglich gemacht und bearbeitet werden. Die Objekteigenschaften

jedes Polygons und jedes Punktes können eingesehen und bearbeitet werden. Während in QGIS grundsätzliche Objekttypen und Objekthöhen angegeben werden können, hat das PalmGUI die Möglichkeit, alle Parameter jedes Objektes genauestens anzupassen. Darüber hinaus können neue Objekte erstellt und bestehende gelöscht werden.

Wichtig sind hier insbesondere die Wasserkörper und Einzelbäume, da sie weitere Einstellungen zwingend benötigen, die in QGIS nicht zugänglich sind. Jedes Gewässer besitzt eine Grundeinstellung für die Wassertemperatur, die eine Anpassung erfordert. Für den Brunnen auf dem Königsplatz werden 23 °C angenommen. Auch die Einzelbäume benötigen zwingend Anpassungen. Während in QGIS die Position, Gattung und Höhe des Baumes bestimmt werden kann, bietet das PalmGUI zahlreiche weitere Anpassungen. Für die Bäume des Königsplatzes wurden Kronendurchmesser, Blattflächenindex im Sommer, Höhe des Blattflächenmaximums, Stammdurchmesser und Baumalter angepasst. Während dieser Anpassungen sind die Einstellungen eines Baumes im Südosten des Platzes fehlerhaft gespeichert worden. Das daraus entstehende unrealistische Verhältnis von Baumhöhe, Kronendurchmesser und Blattflächenindex führt zu sichtbaren Unterschieden in den Ergebnissen. Diese werden in den Auswertungen der Ergebnisse berücksichtigt. Sind alle Einstellungen gemacht, kann der letzte Schritt vor den Berechnungen im GUI durchgeführt werden.

3.4.4 Rasterisierung

Die Rasterisierung von Polygondaten ermöglicht die Integration von Vektorinformationen in rasterbasierte Analysen, wie die hier angewandte räumliche Modellierung. Sie überträgt die Werte aller Vektordaten auf ein Raster, dessen Auflösung vorher gewählt werden kann. Für jeden Gitterpunkt des Rasters werden alle Berechnungen basierend auf den dort befindlichen Objekten durchgeführt. Um das Gebiet der Rasterisierung auszuwählen und zu begrenzen, wird ein Mittelpunkt angegeben, von welchem aus in X- und Y-Richtung eine Entfernung zum Gebietsrand in Gitterpunkten bestimmt werden kann. Die Größe der Gitterpunkte wird durch den Gebietstyp und die Gitterweite bestimmt. Für den Königsplatz wurde ein Gebiet mit Nesting gewählt. Nesting beschreibt die Orga-

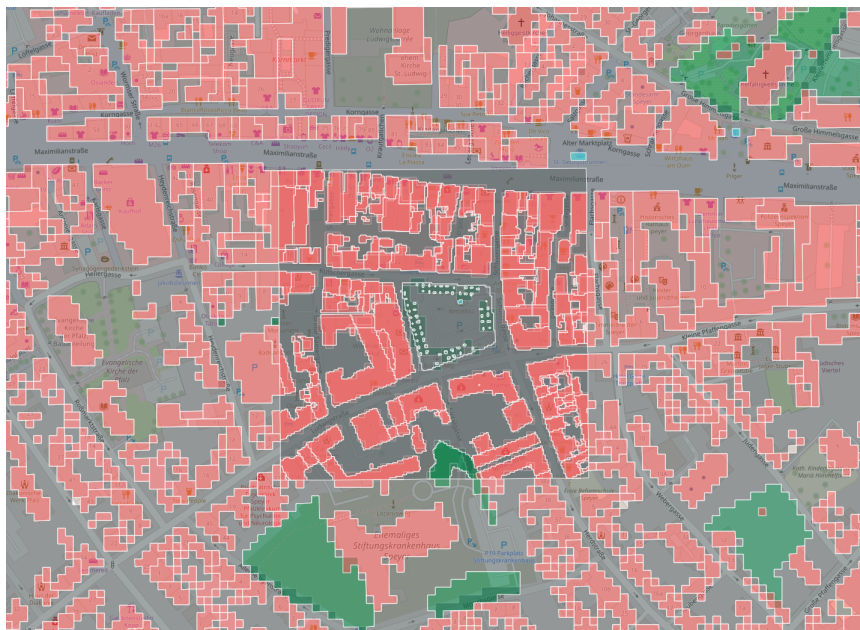


Abb. 4: Ansicht des Königsplatzes im PalmGUI nach Rasterisierung, die Farblegende ist die gleiche wie in den vorherigen Abbildungen

nisation von Rasterdaten in hierarchischer Struktur, sodass ein kleineres Raster mit höherer Auflösung (Child) innerhalb eines größeren Rasters mit gröberer Auflösung (Parent) platziert wird. So ist der Bereich, der im Fokus steht, detailliert aufgelöst, während für den umliegenden Parent-Bereich Speicherressourcen und damit auch Rechenzeit gespart wird. Für die durchgeführten Rechenläufe verläuft das Parent-Gebiet 128 Gitterpunkte in X- und Y-Richtung mit einer Gitterweite von 5 m und das Child-Gebiet 200 Gitterpunkte in X- und Y-Richtung mit einer Gitterweite von 1 m. Das Ergebnis der Rasterisierung sind 2 Dateien im netCDF-Format (Parent-Datei und Child-Datei). Diese funktionieren als der finale statische Treiber, mit welchem die Berechnungen gestartet werden. Abbildung 4 veranschaulicht die verschiedenen Auflösungen des Parent- und Childgebietes und die Auswirkung der Rasterisierung auf die ursprünglichen geradlinigen Polygone. Diese Auswirkungen werden neben den Polygonobjekten auch auf die Geländehöhe angewandt. Aufgrund des Geländeabfalls von Westen Speyers in Richtung des Rheins nach Osten, entstehen nach der Rasterisierung Höhenstufen von einem Meter, da kontinuierliche Veränderungen nur auf diese Weise im Modell dargestellt werden können. Eine solche 1 m Kante entstand nach der Rasterisierung in der Mitte des Königsplatzes und wird in den Ergebnissen sichtbar. Sie muss bei der Interpretation dieser Ergebnisse berücksichtigt werden.

3.4.5 Unsicherheiten

Da jedes Modell und jede Vorhersage über einen hypothetischen Zustand mit Unsicherheiten verbunden sind, dürfen die Ergebnisse von Palm4U nicht als eindeutig und absolut richtig angesehen werden. Quellen für Unsicherheiten entstehen an mehreren Stellen des Prozesses.

Eine der größten Fehlerquellen liegt in den Eingabedaten selbst. Insbesondere der statische Treiber kann zu Ungenauigkeiten führen, wenn die verwendeten Datensätze unvollständig oder veraltet sind. Eine möglichst hoch aufgelöste und aktuelle Datensammlung fördert die Minimierung des Fehlerpotenzials und erzielt verlässlichere Ergebnisse.

Datenlücken stellen ein zusätzliches Problem dar, das an verschiedenen Stellen auftreten kann. In diesen Fällen greift Palm4U auf Standardwerte oder Mittelwerte zurück. Ein Beispiel hierfür sind Baumgruppen, bei denen die Artenvielfalt und Baumhöhe generalisiert und als einheitliche Fläche behandelt werden. Diese Vereinfachungen sind notwendig, beeinträchtigen allerdings die Genauigkeit der Modellergebnisse.

Die Auflösung des Modells ist eine weitere potenzielle Fehlerquelle. Um Rechenzeit zu sparen, kann die Auflösung und Größe des zu berechnenden Bereichs begrenzt werden. Dies kann jedoch zu Ungenauigkeiten führen, da relevante Details möglicherweise nicht berücksichtigt werden.

Des Weiteren birgt die Rasterisierung der Daten Fehler, da gerade Kanten und lineare Übergänge während dieses Prozesses verloren gehen können. Dass dieser Prozess Fehlerpotential birgt, wurde im Abschnitt zur Rasterisierung anhand des Beispiels zur Höhenkante bereits erläutert.

Schließlich ist das Klimasystem äußerst komplex, und obwohl Palm4U viele Variablen erfasst, ist es unmöglich, alle einfließenden Größen vollständig zu berücksichtigen. Der aktuelle technische Stand erlaubt keine Berücksichtigung von ausnahmslos allen Faktoren.

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen für den 21.06.2021 liegen als 10-Minuten-Werte vor und wurden in Stundenmittelwerte umgerechnet. Da die Anpassungsmaßnahme für die Milderung der menschlichen Wahrnehmung von extremer Hitze gedacht ist, werden für die einzelnen Variablen und Indizes vor allem die Maximal- oder Minimalwerte gezeigt und ausgewertet. Die gewählten Zeitpunkte der Stundenmittelwerte können abhängig davon, welcher Tageszeitpunkt für die Hitzebelastung am relevantesten ist, variieren.

4.1 Lufttemperatur

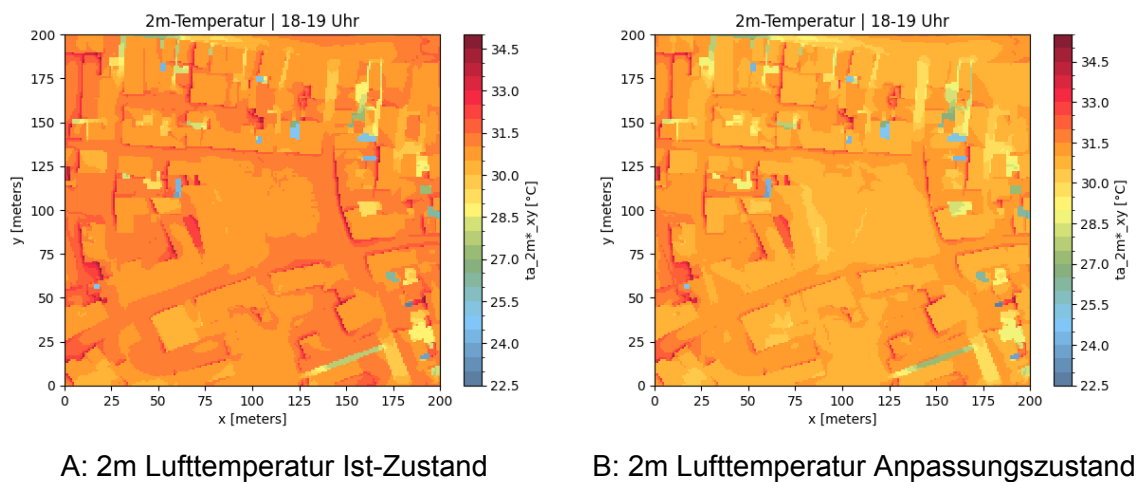


Abb. 5: Vergleich der 2m Lufttemperatur von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 18 und 19 Uhr

Die Lufttemperatur erreicht ihr Maximum für den berechneten Tag zwischen 18 und 19 Uhr, was auf die Wärmespeicherung und langsame Wärmeabgabe der Gebäude zurückzuführen ist. Abbildung 5 Figur A zeigt, dass der Großteil des Königsplatzes im aktuellen Zustand Temperaturen von 30 bis 31,5 °C erreicht.

Aufgrund des westlichen Sonnenstandes ist der östliche Teil weniger beschattet als der westliche, was den leichten Temperaturgradienten von Westen nach Osten um diese Uhrzeit erklärt. Beide Abbildungen zeigen, dass die Temperaturen in unmittelbarer Nähe zu Hauswänden um mehrere °C höher liegen (bis zu 34 °C). Dies kann auf die Ausstrahlung von Wärme durch die Gebäude zurückgeführt werden, welche bis zu diesem Zeitpunkt des Tages durch Sonneneinstrahlung gespeichert wurde. Der Anpassungszustand in Figur B erreicht hingegen Temperaturen von hauptsächlich 30 °C. Temperaturen von 31,5 °C werden an wenigen Stellen, in der Nähe von Hauswänden erreicht. Besonders im Süden des Platzes wird die Veränderung der Fläche von Pflasterstein zu Grünfläche mit Bäumen bemerkbar.

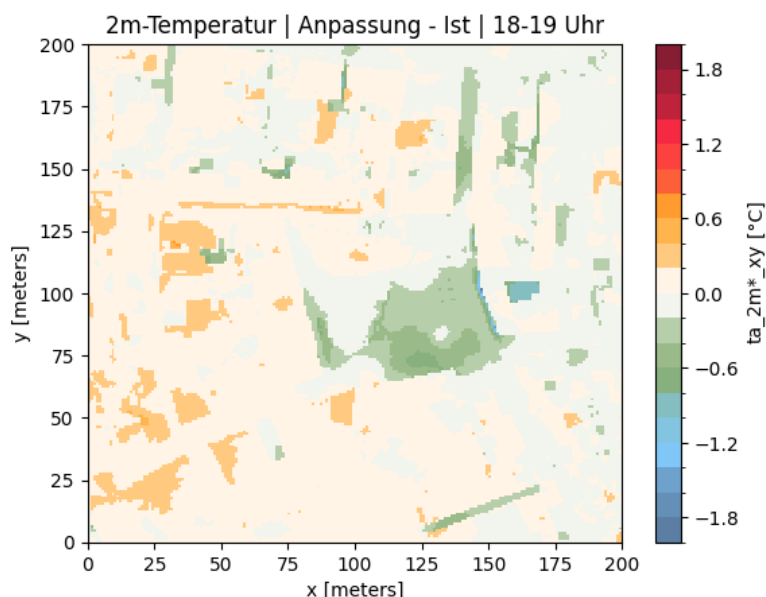


Abb. 6: Differenzplot der 2m Lufttemperatur mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 18 und 19 Uhr

Der Differenzplot in Abbildung 6 veranschaulicht die Temperaturveränderung vor allem auf dem südlichen Teil des Platzes. Die Fläche, die zuvor die höchste Temperatur auf dem Platz aufwies, zeigt nun die höchste Differenz. Die Unterschiede auf dem Platz begrenzen sich auf -0,2 bis -0,8 °C. Der Schatten, welcher nach Osten auf die Hauswand geworfen wird, sorgt in Nähe der Straße für eine Differenz von -1,2 °C. Der nördliche Teil des Königsplatzes bleibt weitgehend gleich. Die nördlich gepflanzte Baumreihe hat keinen sichtbaren Kühlungseffekt unter der reinen Betrachtung der Lufttemperatur. Im nordwestlichen Bereich wird eine Differenz von teils +0,6 °C berechnet.

4.2 Oberflächentemperatur

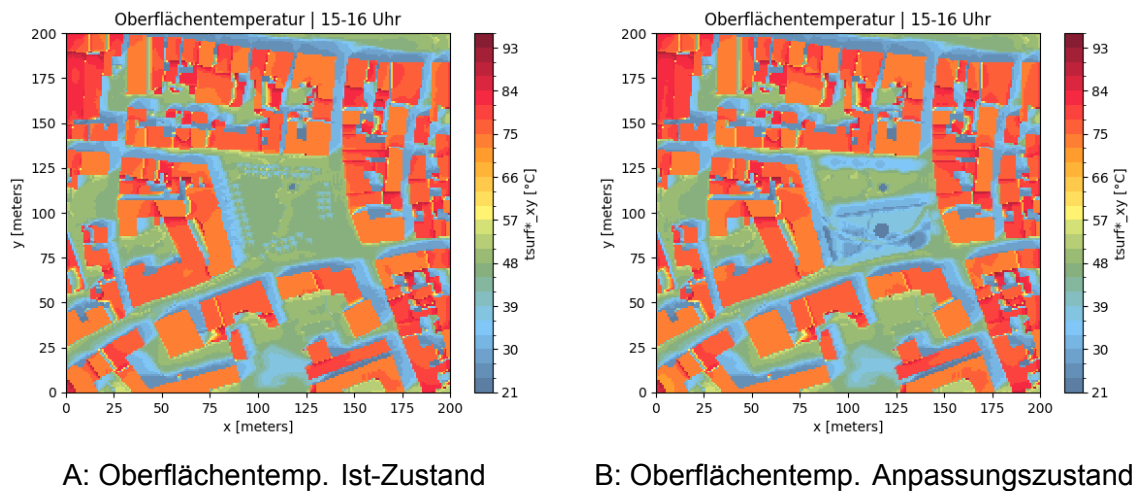


Abb. 7: Vergleich der Oberflächentemperatur von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr

Die Oberflächentemperatur weist größere Unterschiede als die Lufttemperatur auf. Abbildung 7 zeigt, dass das Maximum hier bereits zwischen 15 und 16 Uhr erreicht wird und im aktuellen Zustand (Figur A) bei 45 bis 48 °C liegt. Die Schatten der Bäume und Häuser zeichnen sich klar ab und senken die Oberflächentemperatur je nach Stand der Sonne auf 24 bis 36 °C. Die Wasseroberflächentemperatur des neuen Brunnens stellt einen hohen Kontrast zum vorherigen Pflasterstein dar, was die hohe Differenz erklärt.

Der Anpassungszustand in Figur B verdeutlicht den starken Einfluss von Schattenflächen auf die Oberflächentemperaturen. Die südlich gepflanzten Bäume reduzieren die Oberflächentemperatur von 48 °C auf 24 bis 36 °C. Die unterschiedlichen Baumgattungen auf dem südlichen Teil des Königsplatzes führen zu unterschiedlichen Bodentemperaturverhältnissen. Das ist darauf zurückzuführen, dass mit den unterschiedlichen Baumgattungen auch unterschiedliche Kronendurchmesser und Blattflächenindizes einhergehen, welche die Beschattungsverhältnisse beeinflussen. Auch die veränderte Bodenoberfläche zeigt einen Einfluss. Östlich des neuen Brunnens werfen die Bäume zu diesem Tageszeitpunkt keinen Schatten. Trotz allem liegt die Oberflächentemperatur bei 33 bis 36 °C, da sich die dort befindliche Rasenfläche nicht so stark erwärmt, wie die Oberfläche von Pflastersteinen.

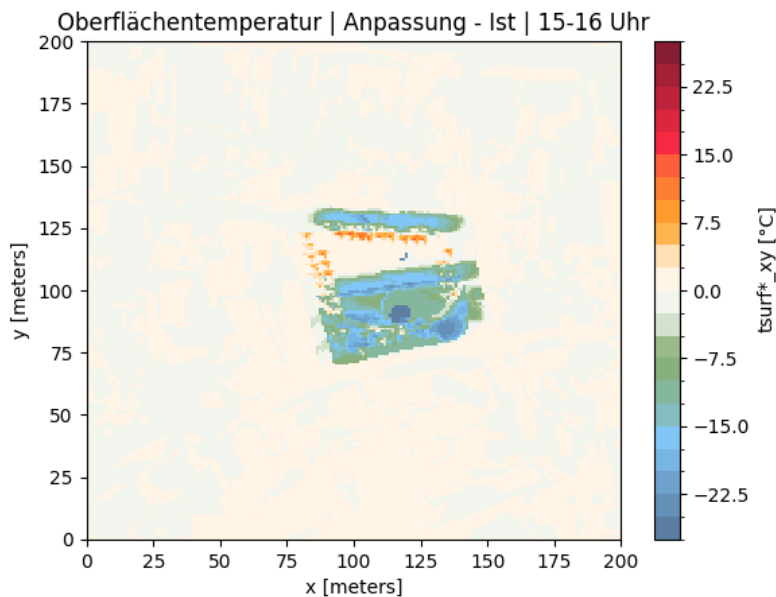


Abb. 8: Differenzplot der Oberflächentemperatur mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr

Der Differenzplot in Abbildung 8 zeigt die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Zuständen. Der südliche umgestaltete Teil des Platzes zeigt Differenzen in der Oberflächentemperatur zwischen $-7,5\text{ °C}$ und -25 °C . Auch die nördlich platzierte Baumreihe hat Effekte zwischen -15 und $-17,5\text{ °C}$. Aber auch Differenzen im positiven Bereich entstehen dort, wo im nördlichen und westlichen Teil die Bäume entnommen wurden.

Aus den Ergebnissen der Oberflächentemperatur lässt sich eine positive Auswirkung der Anpassungsmaßnahme ableiten. Objekte mit geringerer Oberflächentemperatur emittieren weniger Wärme in Form von langwelliger Strahlung an die Umwelt, was sich positiv auf das menschliche Wohlbefinden auswirken kann. Weiterhin lässt sich die Vermutung aufstellen, dass der Platz sich am Abend schneller abkühlt. Pflastersteine speichern mehr Wärme als ein mit Rasen bepflanzter Erdboden. Die dadurch entstehende länger anhaltende Abgabe von Wärme führt zu einer langsameren Abkühlung des Platzes am Abend. Die Anpassungsmaßnahme könnte demnach die Abkühlung des Platzes am Abend beschleunigen, da durch die Beseitigung der Pflastersteine auch das Potenzial zum Speichern von Wärme reduziert wird.

4.3 Windgeschwindigkeit

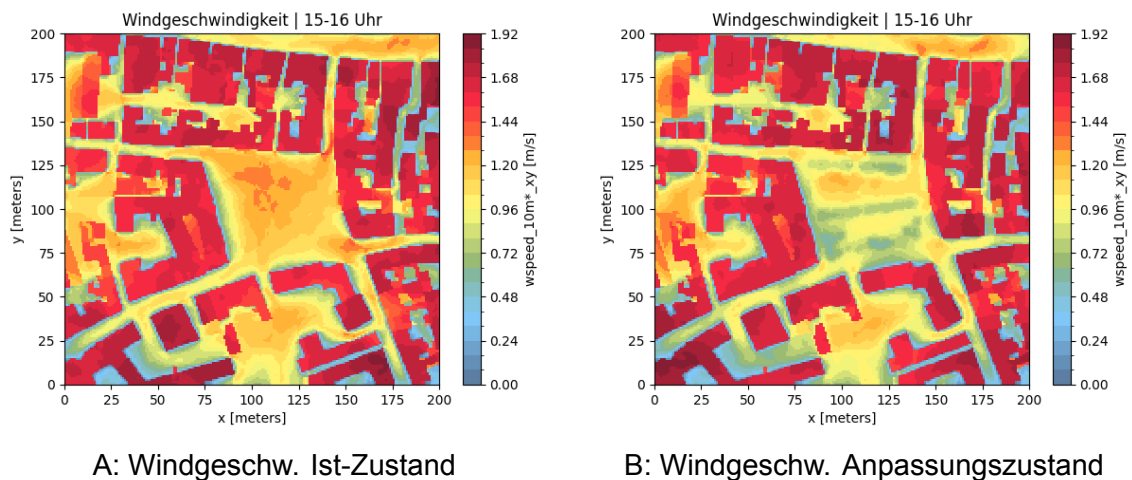


Abb. 9: Vergleich der Windgeschwindigkeit von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr

Die Windgeschwindigkeit ist eine wechselhafte Variable. Die tatsächlichen Verhältnisse des Windes lassen sich durch Mittelwerte über eine Stunde nur begrenzt darstellen. Verschiedene Wetterbedingungen und Jahreszeiten tragen zu einer Vielfalt bei, die durch einen so kurzen Betrachtungszeitraum von einem Tag nur eingeschränkt wahrgenommen werden kann. Die gewählten Ausgangsverhältnisse des Südwestwindes mit 1 m/s führen in den Ergebnissen zu kleinen Größenordnungen. Dennoch können die hier gezeigten Vergleiche einen Ausblick auf die Folgen der Anpassungsmaßnahme auf den Wind geben. Da alle Tageszeiten ähnliche Bedingungen aufweisen, ist die Auswahl des Zeitpunktes unerheblich. Bei den hier verwendeten Abbildungen wurde sich für den Zeitraum von 15 bis 16 Uhr entschieden. Es ist anzumerken, dass die Windgeschwindigkeiten in 10 Metern Höhe sich außerhalb der für den Menschen fühlbaren Reichweite befinden, jedoch geben die Ergebnisse der Windgeschwindigkeit in 10 Metern Höhe Hinweise auf die bodennahen Verhältnisse. Abbildung 9 Figur A zeigt, dass im nordwestlichen Bereich des Platzes die Windgeschwindigkeit am höchsten ist. Sie nimmt Werte von bis zu 1,36 m/s an. Auch an den Übergängen zu den umliegenden Straßen sind Höchstwerte zu erkennen. Der Transport der Luftmassen durch einen verengten Raum führt an diesen Stellen zu einer erhöhten Windgeschwindigkeit. In Gebäudenähe werden die Luftmassen auf teilweise 0,24 m/s ausgebremst. Die Bäume, die sich

auf dem aktuellen Zustand des Königsplatzes befinden, sind in den Ergebnissen nicht zu erkennen. Das resultiert aus der niedrigen Höhe des Baumwuchses, da die Windgeschwindigkeit auf einer Höhe von 10 Metern betrachtet wird.

Die neu gepflanzten Baumreihen im Anpassungszustand (Figur B) zeichnen sich hingegen durch ihre Höhe in den Ergebnissen ab und senken die Windgeschwindigkeit. Ihre Ost-West-Reihung resultiert in einer Barriere, vor allem für Wind aus Süd- und Nordrichtung. Unmittelbar am Standort der Bäume werden die Luftbewegungen ausgebremst auf bis zu 0,56 m/s. Durch die Abnahme der Windgeschwindigkeiten auf weiten Teilen des Platzes zeigen auch die Übergänge zu den umliegenden Straßen geringere Windgeschwindigkeiten.

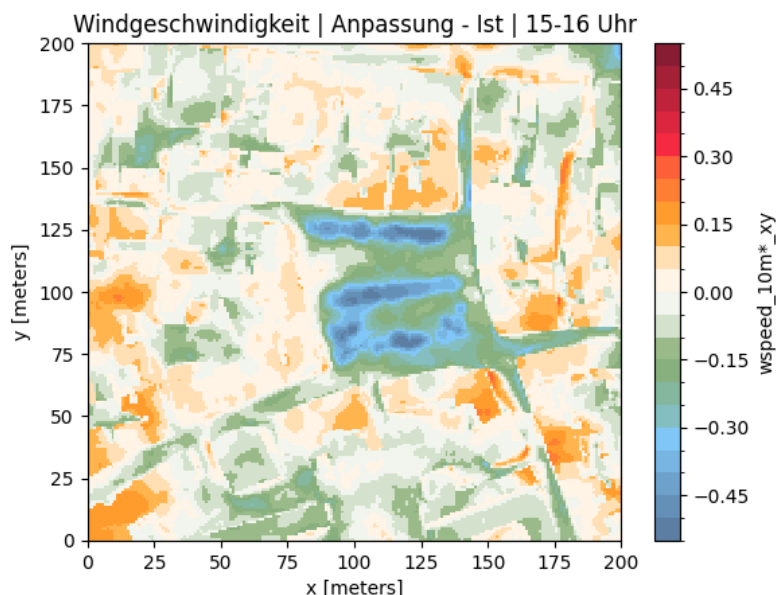
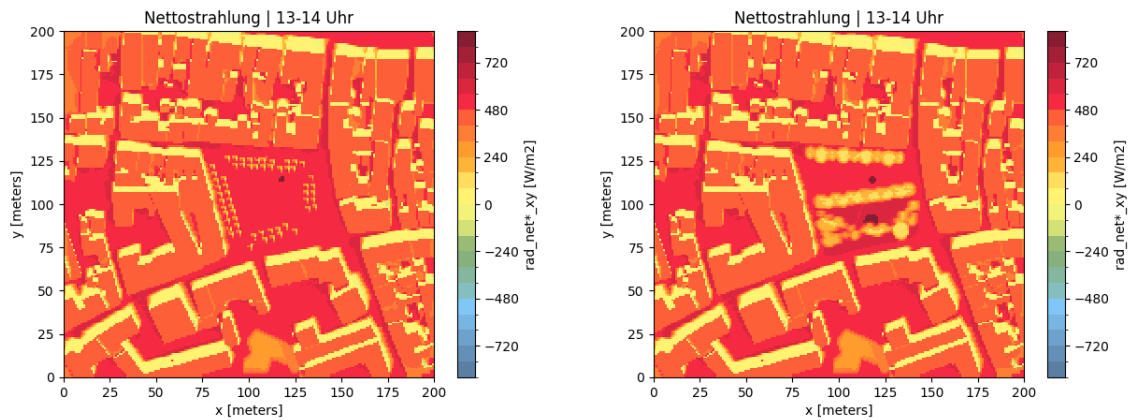


Abb. 10: Differenzplot der Windgeschwindigkeit mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr

Der Differenzplot in Abbildung 10 zeigt, dass die Anpassungsmaßnahme neben den direkten Auswirkungen auf dem Platz auch die Windgeschwindigkeit in den umliegenden Straßen leicht verringert. Die Differenzen liegen zwischen -0,1 und -0,25 m/s. Die maximalen Differenzen liegen im Bereich der Baumreihen und erreichen Werte von -0,55 m/s. Grundsätzlich kann eine verringerte Windgeschwindigkeit den thermischen Komfort beeinträchtigen, da sie die Möglichkeit zur natürlichen Abkühlung des Körpers reduziert. Die betrachtete Größenordnung steht allerdings in keinem Verhältnis zu den Veränderungen der Temperaturvariablen und dem kühlenden Effekt der Bäume durch Verdunstung.

4.4 Nettostrahlung



A: Nettostrahlung (Tag) Ist-Zustand

B: Nettostrahlung (Tag)
Anpassungszustand

Abb. 11: Vergleich der Nettostrahlung Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 13 und 14 Uhr

Die Nettostrahlung ergibt sich aus Gleichung 1¹⁴:

$$rad_{net} = (SW_{in} + LW_{in}) - (SW_{out} + LW_{out}) \quad (1)$$

rad_{net} - Nettostrahlung

SW_{in} - eingehende kurzwellige Strahlung

LW_{in} - eingehende langwellige Strahlung

SW_{out} - ausgehende kurzwellige Strahlung

LW_{out} - ausgehende langwellige Strahlung

Über den Tagesverlauf ist die Summe aus eingehender Strahlung ($SW_{in} + LW_{in}$) größer als die Summe der ausgehenden Strahlung ($SW_{out} + LW_{out}$). Diese Differenz entsteht durch die hohe Menge an eingehender kurzwelliger Strahlung durch die Sonne, welche weder von der ausgehenden kurzwelligen Strahlung noch von der ausgehenden langwelligen Strahlung kompensiert werden kann. Am höchsten ist die Bilanz der ein- und ausgehenden Strahlung um die Mittagszeit und kurz danach zwischen 13 und 14 Uhr. Abbildung 11 zeigt die Nettostrahlung der beiden Bauzustände auf der Erdoberfläche. Der Platz zeigt im

¹⁴Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover (Hrsg.) (2021): Radiation models, <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/tec/radiation> (08.05.2024)

aktuellen Zustand (Figur A) eine einheitliche Differenz zwischen +480 und +560 W/m². Eine unterschiedliche Bilanz findet sich im Bereich der Bäume und des Brunnens. Die Bäume reduzieren die Strahlungsdifferenz durch ihren geworfenen Schatten auf bis zu +80 W/m². Die eingehende kurzwellige Strahlung ist hier stark vermindert. Ähnliche Werte werden auch in den Bereichen der Gebäudeschatten erreicht. Der Brunnen hingegen erhöht die Werte auf bis zu +860 W/m². Das Wasser bekommt die gleiche Menge an kurzwelligen und langwelligen Strahlungseinflüssen, wie die Umgebung, gibt allerdings nur wenig langwellige Strahlung ab. Die Menge an abgegebener langwelliger Strahlung eines Körpers kann beschrieben werden durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz¹⁵. Dieses beschreibt die Strahlungsleistung eines schwarzen Körpers in Abhängigkeit von seiner Temperatur. Da in der Realität nicht alle Körper eine ideale schwarze Oberfläche haben, ist die Strahlungsleistung ebenfalls abhängig vom Emissionsgrad. Die Temperatur ist allerdings besonders bedeutend, da sie mit der vierten Potenz (T^4) in die Strahlungsleistung eingeht, wodurch kleine Unterschiede in der Temperatur große Auswirkungen auf die abgestrahlte Energie haben. Durch die hohe spezifische Wärmekapazität von Wasser kann selbst eine hohe Menge an Strahlung absorbiert werden, ohne die Temperatur des Wassers signifikant zu erhöhen. Dadurch ist die Oberflächentemperatur des Wassers am Tag verhältnismäßig gering und es wird wenig langwellige Strahlung abgegeben.

Im Anpassungszustand (Figur B) ist der Anteil an Schattenflächen durch mehr Bäume erhöht. Im Bereich der Rasenfläche im Süden erhöht sich die Nettostrahlung auf Werte von +560 bis 640 W/m². Auch hier ist die entstandene Differenz auf die ausgehende langwellige Strahlung zurückzuführen. Aus dem Kapitel zu den Oberflächentemperaturen geht genau wie bei den Wasserkörpern hervor, dass die Temperaturdifferenz zu den umliegenden Flächen auch für eine unterschiedliche Abgabe von langwelliger Strahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz führt. Die Rasenfläche nimmt im Vergleich zu den Pflastersteinen bei direkter Sonnenstrahlung eine geringere Temperatur an und gibt daher weniger langwellige Strahlung wieder ab.

¹⁵Wellons, Mark (2007): College of Wooster Physics Department, The Stefan-Boltzmann Law

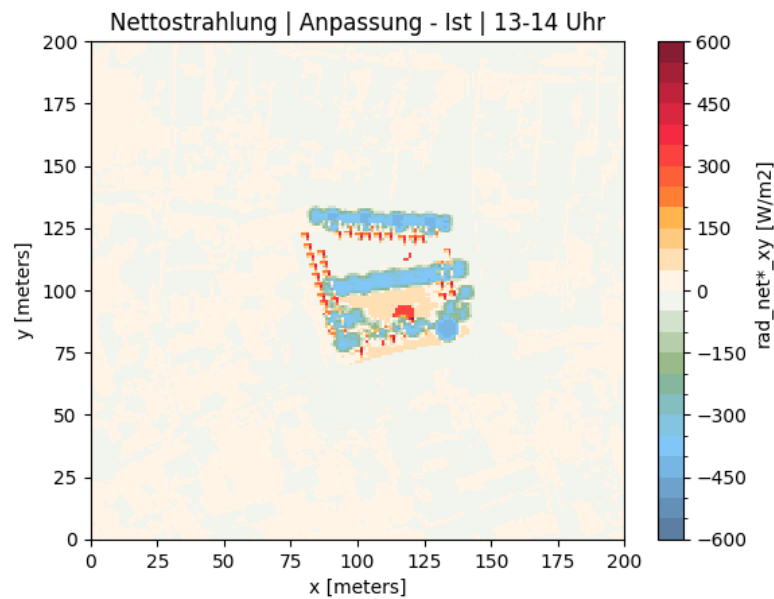


Abb. 12: Differenzplot der Nettostrahlung mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 13 und 14 Uhr

Abbildung 12 zeigt, dass die Nettostrahlungsdifferenzen durch die Anpassungsmaßnahme Werte von bis zu -450 W/m^2 erreichen. Dieser Effekt wird durch Schatten erreicht. Orte, an denen sich im aktuellen Zustand Bäume befinden, welche für den Parkplatz entfernt wurden, verlieren ihre Schattenfläche und haben eine positive Strahlungsdifferenz. Durch den neuen Brunnen wird die Differenz erwartungsgemäß erhöht, da im aktuellen Zustand mehr langwellige Strahlung die Fläche verlässt als nach der Anpassung.

Für den Menschen kann die Nettostrahlung Hinweise auf das Wohlbefinden geben. Schattenflächen, an denen die eingehende Strahlung minimiert wird, werden als angenehm empfunden. Durch das Schaffen von Flächen, die im Durchschnitt geringere Oberflächentemperaturen erreichen, kann auch die abgegebene langwellige Strahlung verringert werden, welche sonst das Temperaturempfinden negativ beeinflussen würde.

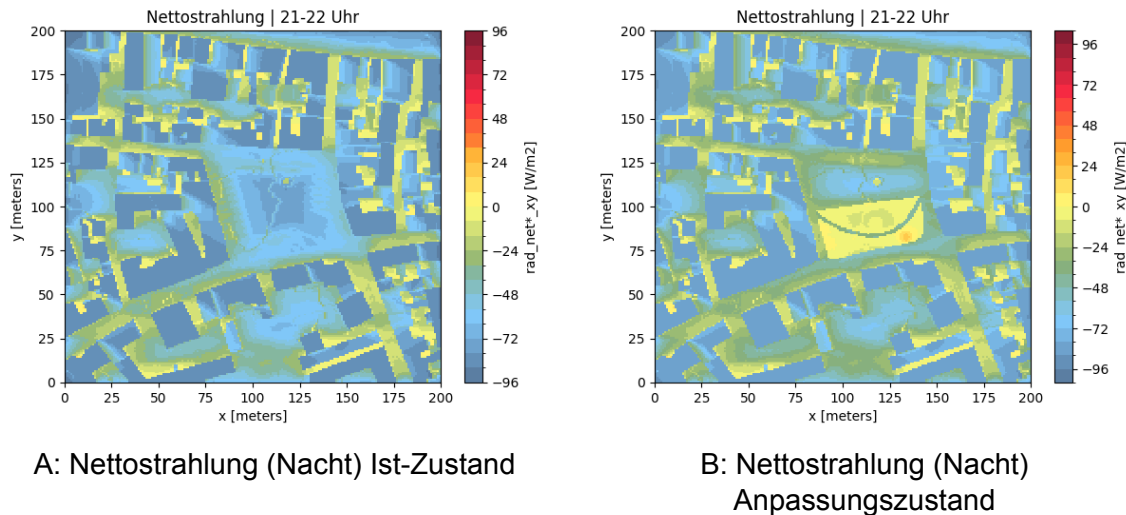


Abb. 13: Vergleich der Nettostrahlung von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 21 und 22 Uhr

In Abbildung 13 sind die nächtlichen Verhältnisse der Nettostrahlung zwischen 21 und 22 Uhr abgebildet. Die eingehende kurzwellige Strahlung erreicht nach Sonnenuntergang vernachlässigbar kleine Werte. Die Strahlungsflüsse werden hauptsächlich durch die Abgabe von langwelliger Strahlung bestimmt, die von Oberflächen abgegeben wird, welche tagsüber Sonnenstrahlung absorbiert haben. Der Großteil der Flächen zeigt daher eine negative Bilanz.

Der aktuelle Zustand in Figur A zeigt durch die höhere Abgabe langwelliger Strahlung niedrigere Werte als der Anpassungszustand. In den engeren Bereichen der Straßen werden teils leicht positive Werte von $+8 \text{ W/m}^2$ erreicht. Orte mit enger Bebauung sind tagsüber länger beschattet und erwärmen sich weniger. Dementsprechend geben sie in der Nacht weniger langwellige Strahlung ab und die Nettostrahlung hat höhere Werte. Das Gleiche trifft auf die Rasenfläche im Anpassungszustand zu (Figur B). Der südliche Bereich des Königsplatzes hat sich aufgrund von mehr Beschattung und Materialunterschieden weniger erwärmt und gibt daher in der Nacht weniger langwellige Strahlung ab als der nördliche gepflasterte Bereich. Somit trägt die Anpassungsmaßnahme sowohl tagsüber als auch in der Nacht zu angenehmeren Strahlungsverhältnissen bei. Die Beschattungsmöglichkeiten sorgen am Tag für höheres Wohlbefinden für den Menschen und eine geringere Erwärmung der Oberflächen. Das hat nachts zur Folge, dass der Platz weniger Energie abzugeben hat, welche sonst zu einer Temperaturerhöhung oder -erhaltung bis in spätere Tageszeiten beitragen könnte.

4.5 Spezifische Feuchte

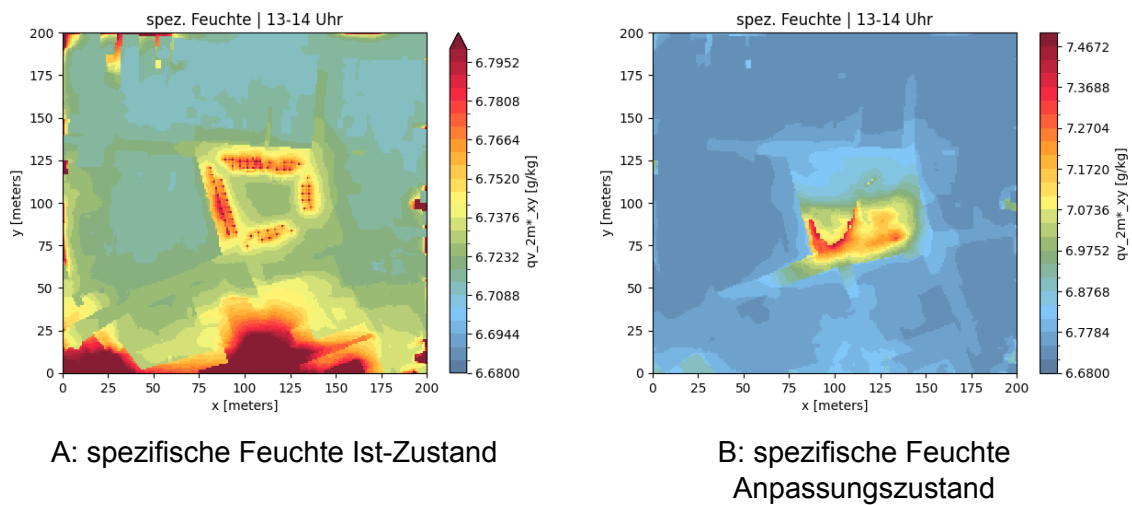


Abb. 14: Vergleich der spezifischen Feuchte von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 13 und 14 Uhr

Der Wassergehalt der Luft lässt sich temperatur- und höhenunabhängig mit der spezifischen Feuchte beschreiben. Sie steigt durch Verdunstungsprozesse, die entweder direkt von den vorhandenen Wasseroberflächen der Brunnen ausgehen oder durch Transpirationsprozesse der Vegetation, bei denen Pflanzen Wasser an die Umwelt abgeben. Bei der Verdunstung nimmt Wasser Energie aus der Umgebung auf, welche für den Menschen als Wärme fühlbar wäre. Beim Wechsel des Aggregatzustandes wird also Energie benötigt, welche nicht zu einer Temperaturerhöhung beiträgt¹⁶. Auf diese Weise können Brunnen und Vegetation zu einer Abkühlung beitragen. Eine Zu- oder Abnahme der spezifischen Feuchte kann als Indikator für ein höheres oder niedrigeres Maß an Verdunstungskühlung betrachtet werden. Abbildung 14 zeigt die Mittelwerte der spezifischen Feuchte von 13 bis 14 Uhr. In diesem Zeitraum wird die höchste Sonneneinstrahlung verzeichnet. Eine hohe Sonneneinstrahlung erhöht die Transpirationsrate, da Licht das Öffnen der Stomata anregt und die hohen Strahlungsmengen die Blätter der Pflanzen erwärmen und die Verdunstung somit beschleunigen¹⁷. Zu beachten in den Abbildungen sind die unterschiedlichen Werte der Skalen. Die resultierenden Farbtöne aus Figur A und B sind nicht vergleichbar, sondern lediglich die zuge-

¹⁶Urone P. California State University, Sacramento, Roger H. State University of New York (n.D): Phase Change and Latent Heat

¹⁷Kimball, John (2024): Biology, Kapitel 16.2C Transpiration

hörigen Werte. Aus beiden Figuren wird der Einfluss der Vegetation dennoch deutlich. Die Unterschiede in den Werten bewegen sich im Bereich Milligramm Wasser pro Kilogramm Luft. Der zentrale Bereich des aktuellen Zustandes (Figur A) des Platzes abseits der Bäume zeigt eine spezifische Feuchte von 6,73 g/kg. Im äußeren Bereich erhöhen sich die Werte durch die Vegetation auf 6,78 bis 6,8 g/kg. In Figur B reichen die Skalenwerte insgesamt etwas höher, was zu der unterschiedlichen Farbgebung führt. Der Anpassungszustand zeigt im Bereich des Parkplatzes Werte von 6,811 bis 6,877 g/kg. Der bepflanzte Bereich im Süden erreicht die höchsten Werte mit bis zu 7,4 g/kg spezifischer Feuchte. Die neu gepflanzte Baumreihe im Norden des Parkplatzes spiegelt sich in den Ergebnissen nicht sichtbar wider. Dies ist mit dem erhöhten Abstand zwischen den Bäumen zu erklären, der die insgesamt Transpirationsrate der Baumreihe einschränkt, was den Wassergehalt in der Luft nicht erheblich beeinflusst. Die durch die Rasterisierung entstandene 1 m Stufe zeichnet sich in Abbildung 14 besonders ab und verfälscht die Werte. In ihrem Bereich sammelt sich in der Anpassungsmaßnahme Feuchtigkeit an und sorgt für einen unsauberer Gradienten im südwestlichen Bereich des Platzes. Es werden Maximalwerte erreicht, die in anderen Bereichen nicht zustande kommen und daher ebenfalls der Stufe zuzuschreiben sind. Diese Werte werden dementsprechend vernachlässigt.

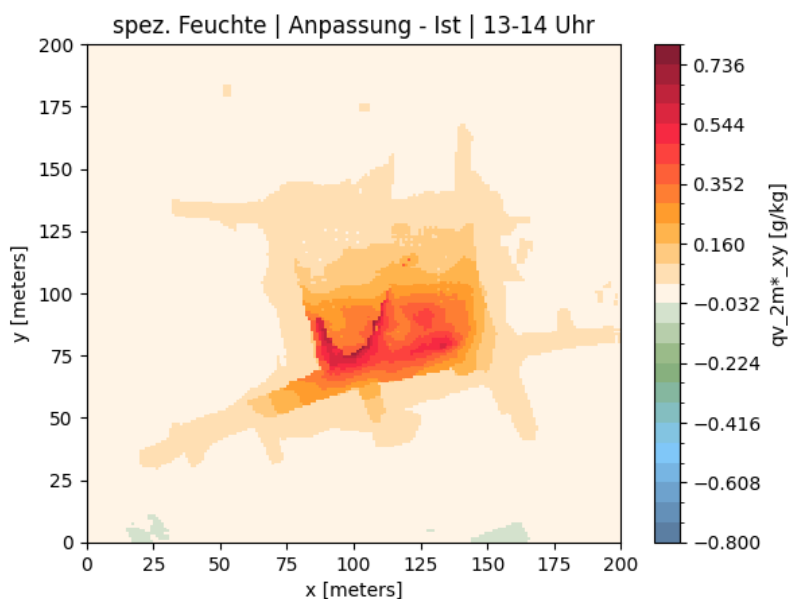


Abb. 15: Differenzplot der spezifischen Feuchte mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 13 und 14 Uhr

Die Unterschiede, welche durch die Anpassungsmaßnahme erreicht werden, wirken sich bis auf die Parkplatzfläche und die umliegenden Straßen aus. Die in Abbildung 15 gezeigten Differenzen in diesen Bereichen sind geringfügig, mit Werten zwischen +0,032 und +0,16 g/kg. Auf dem südlichen Platz steigen die Werte durch die Vegetation um bis zu +0,672 g/kg an.

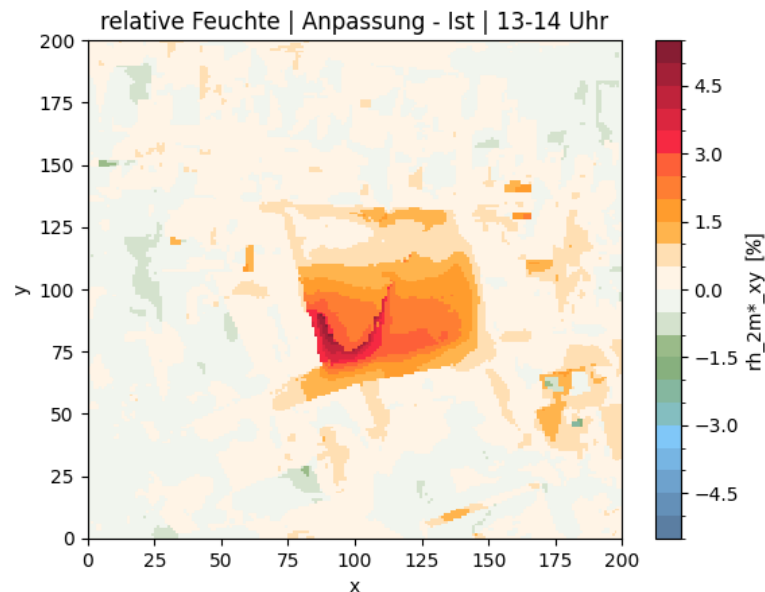


Abb. 16: Differenzplot der relativen Feuchte mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 13 und 14 Uhr

Um einen Bezug zu einer gebräuchlicheren Größe herzustellen, kann die spezifische Feuchte in die relative Feuchte umgerechnet werden¹⁸. Abbildung 16 bildet die Differenz für die relative Feuchte im gleichen Zeitschritt wie die spezifische Feuchte ab. So kann der Differenzplot aus Abbildung 15 mit den Differenzen aus Abbildung 16 abgeglichen werden. Die relative Feuchte nimmt um bis zu 4% zu, was zunächst aus dem kleinen Wertebereich, den die spezifische Feuchte abbildet, nicht hervorgeht. Da die relative Feuchte zusätzlich von der Lufttemperatur und dem atmosphärischen Druck abhängig ist, kann die Erhöhung der Werte allerdings auch zum Teil aus Unterschieden in der Lufttemperatur resultieren. In der Berechnung der relativen Feuchte wurde der Atmosphärendruck als konstant angenommen und aufgrund der Hochdruckwetterlage auf 1015 Pa festgesetzt, was eine Variation der Werte durch Druckänderungen ausschließt.

¹⁸Umrechnung erfolgte durch einen Metpy-Befehl in Python: **MetPy** (Hrsg.) (n.d.): `relative_humidity_from_specific_humidity`, https://unidata.github.io/MetPy/latest/api/generated/metpy.calc.relative_humidity_from_specific_humidity.html (08.05.2024)

4.6 Thermische Komfortindizes

Die Betrachtung von Klimavariablen ermöglicht das Verständnis verschiedener einzelner Facetten eines Mikroklimas. Jedoch ist allein auf Basis dieser Variablen eine Einschätzung des menschlichen Komforts schwierig. Die in diesem Kapitel gezeigten Indizes zum thermischen Komfort spielen eine wichtige Rolle, da sie die Komplexität der verschiedenen Klimaparameter berücksichtigen und daraus eine gefühlte Temperatur ableiten, die näher an der eigentlichen Wahrnehmung des Menschen liegt. Durch die Anwendung solcher Indizes wird das Verständnis für das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren und die Bewertung von Anpassungsstrategien zur Optimierung des thermischen Komforts erleichtert. Die Berücksichtigung mehrerer Indizes ist entscheidend, da sie auf unterschiedlichen Variablen basieren und somit verschiedene Aspekte des thermischen Komforts erfassen. Indem mehrere Indizes einbezogen werden, kann eine höhere Sicherheit bei der Bewertung des menschlichen Komforts erreicht werden.

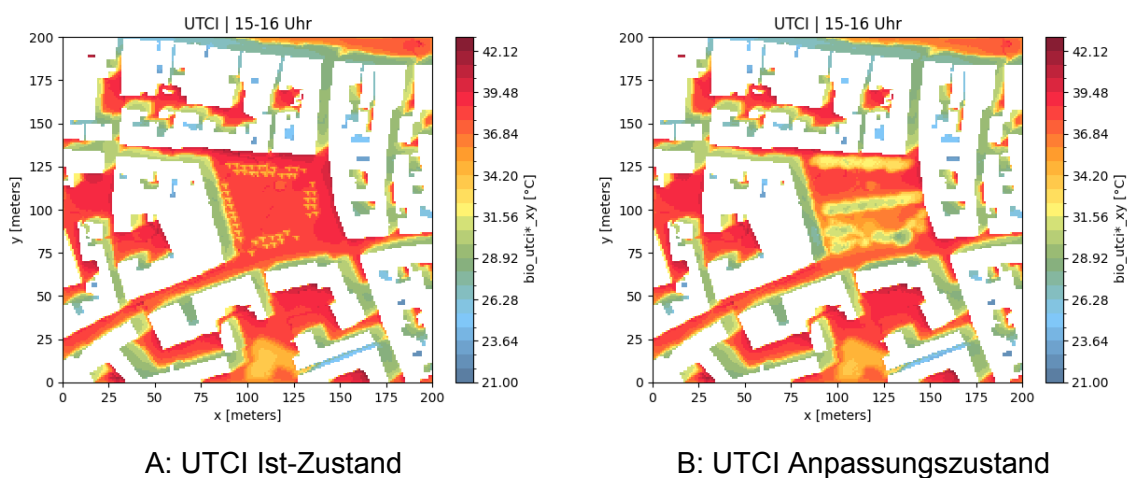


Abb. 17: Vergleich des UTCI von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr

Begonnen mit dem universal thermal climate index (UTCI) wird ersichtlich, dass die kombinierten Einflüsse von Sonneneinstrahlung, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und der langwelligen Strahlungsabgabe durch Häuserfassaden und Bodenbeläge in einer Referenztemperatur resultieren, die die berechnete Lufttemperatur zu jedem Tageszeitpunkt überschreitet. Während die Lufttemperatur ihr Maximum am Abend erreicht, liegt die nach dem UTCI für den Menschen unkomfortabelste Phase zwischen 15 und 16 Uhr. Abbildung 17 (Figur A) macht

erkennbar, dass die Referenztemperaturen in diesem Zeitraum im aktuellen Zustand zwischen 37,7 und 40,4 °C liegen. Einen großen Kühlungseffekt erreichen Schattenflächen von Gebäuden und Bäumen sowie Verdunstungsprozesse der Bäume und des Brunnens. Der Tiefschatten der Gebäude reduziert die Werte auf 28,9 °C während unter den Bäumen 33,3 °C erreicht werden.

Die Anpassungsmaßnahme (Figur B) leistet in Bezug auf den thermischen Komfort des Platzes einen positiven Beitrag. Die zusätzlichen Schattenflächen und Verdunstungsprozesse der Bäume reduzieren die Referenztemperatur in weiten Teilen des Platzes. Der Süden erreicht Temperaturen von 36,8 °C in den nicht beschatteten Bereichen und 28,9 °C im unmittelbaren Umfeld der Bäume. Wie beim nördlich gelegenen Brunnen hat auch der neu errichtete Brunnen im Süden sichtbare Auswirkungen auf den thermischen Komfort.

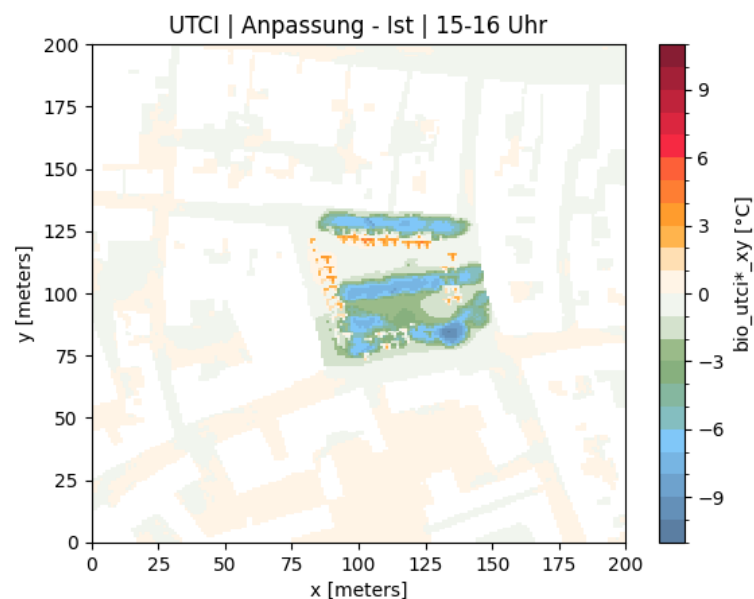


Abb. 18: Differenzplot des UTCI mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr

Abbildung 18 zeigt, dass die Anpassungsmaßnahme sich auch auf den Parkplatz im Norden auswirkt, wenn auch nur geringfügig, mit einer berechneten Differenz von -1 °C. Im direkten Vergleich zur gepflasterten Fläche, die keinen Schatten erhält, steht die neue unbeschattete Grünfläche. Diese Änderung des Bodenbelags senkt die Referenztemperatur auf eine Differenz von -2 bis -3 °C. Wie auch bei der Nettostrahlung, der Oberflächentemperatur oder der spezifischen Feuchte zeigen die Bäume für den UTCI die stärkste Wirkung. Im direkten Umfeld werden

Differenzen bis zu -9 °C berechnet. Dabei wird erneut die vielfältige Wirkung von Vegetation auf das Mikroklima deutlich.

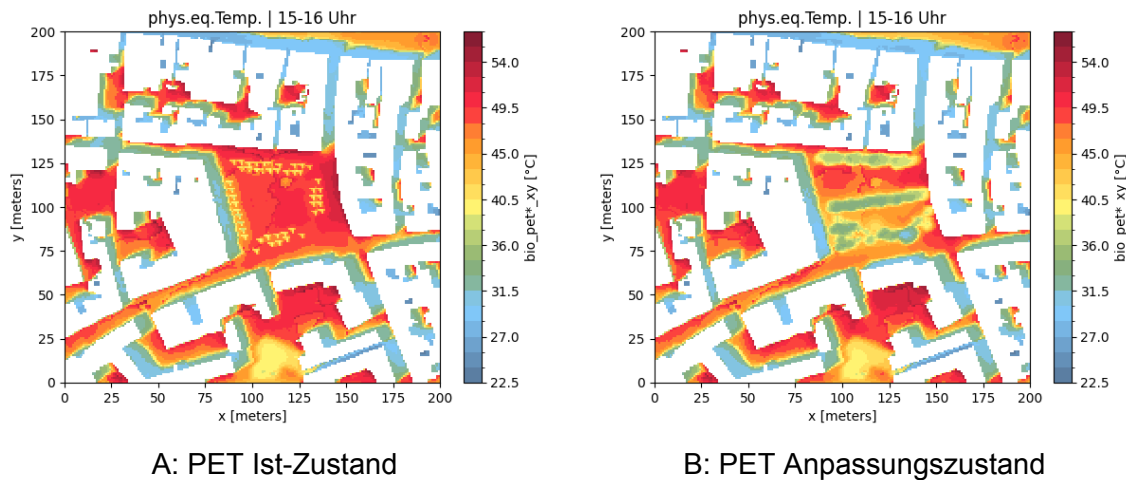


Abb. 19: Vergleich der PET von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr

Auch die physiologische Äquivalenttemperatur (PET) erreicht ihr Maximum zwischen 15 und 16 Uhr. Die Werte der PET liegen allerdings höher als die UTCI Werte. Während im aktuellen Zustand in Abbildung 19 Figur A auf weiten Teilen des Königsplatzes Äquivalenttemperaturen von $49,5$ bis 51 °C berechnet werden, erreicht der östliche Bereich durch die Sonneneinstrahlung von Südwesten Extremwerte von 54 °C . Auch unter den Bäumen werden 42 °C erreicht. Der Brunnen sticht im Vergleich zum UTCI deutlicher hervor, möglicherweise aufgrund der generell höher berechneten Umgebungstemperaturen.

Die Höchsttemperaturen der Anpassungsmaßnahme (Figur B) befinden sich an gleicher Stelle und erreichen 51 °C . Die Grünfläche führt unter den Berechnungen der PET zu Temperaturen von $46,5\text{ °C}$ im unbeschatteten Bereich und 33 °C im Schatten der Bäume. Auf dem Parkplatz werden, wie auch beim UTCI, nur geringfügige Änderungen erzielt. Die Maximaltemperaturen von UTCI und PET unterscheiden sich stark mit einer Differenz von $13,6\text{ °C}$ ($PET - UTCI$). Im direkten Kontrast dazu stehen die Unterschiede der Indizes im Bereich der Bäume des Anpassungszustandes. Hier wird eine Differenz von $4,1\text{ °C}$ erreicht. Die Auswirkungen der Maßnahme auf den thermischen Komfort werden von beiden Indizes weitgehend ähnlich bewertet. Die physiologische Äquivalenttemperatur reagiert jedoch sensibler bei der Berechnung von hohen Temperaturen im Vergle-

ich zum UTCI. Diese Sensibilität kann durch die unterschiedlichen Annahmen zur Bekleidungsisolation begründet werden. Während der UTCI ein modernes Bekleidungsmodell verwendet, das eine präzisere Bewertung des thermischen Komforts ermöglicht, reagiert die PET empfindlicher auf die Lufttemperatur und neigt bei trockenen Verhältnissen, hohen Temperaturen und wenig Wind zu höheren Werten¹⁹.

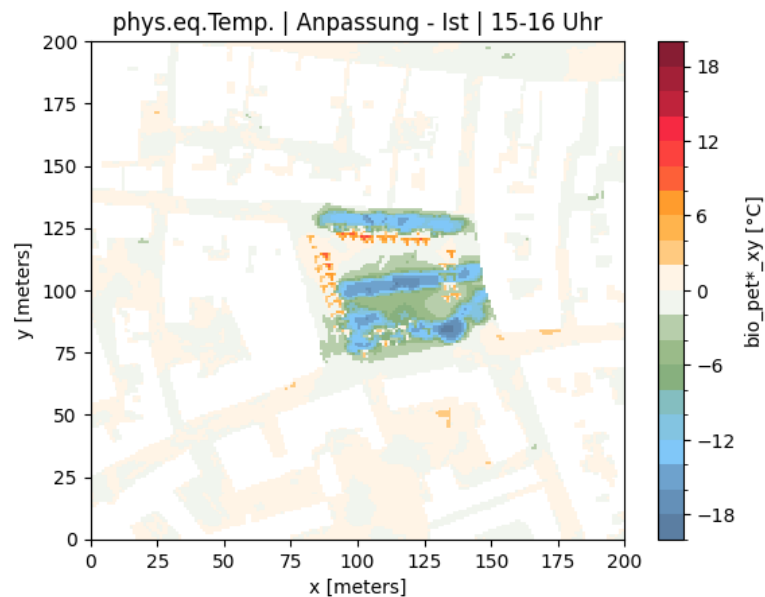


Abb. 20: Differenzplot der PET mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr

Da die PET im Ist-Zustand verhältnismäßig hohe Werte aufweist, während sie sich im Anpassungszustand eher dem UTCI annähert, sind die resultierenden Unterschiede in Abbildung 20 ausgeprägter. Die Differenzen liegen durch den Einfluss der Bäume bei -12 bis -18 °C sowohl im südlichen Bereich als auch bei der nördlichen Baumreihe. Im Allgemeinen reduziert die Anpassungsmaßnahme die Temperatur auf der Grünfläche um 4 bis 6 °C. Der Effekt des neuen Brunnens ist deutlicher erkennbar als beim UTCI.

¹⁹Blazejczyk et al. a.a.O. s.8

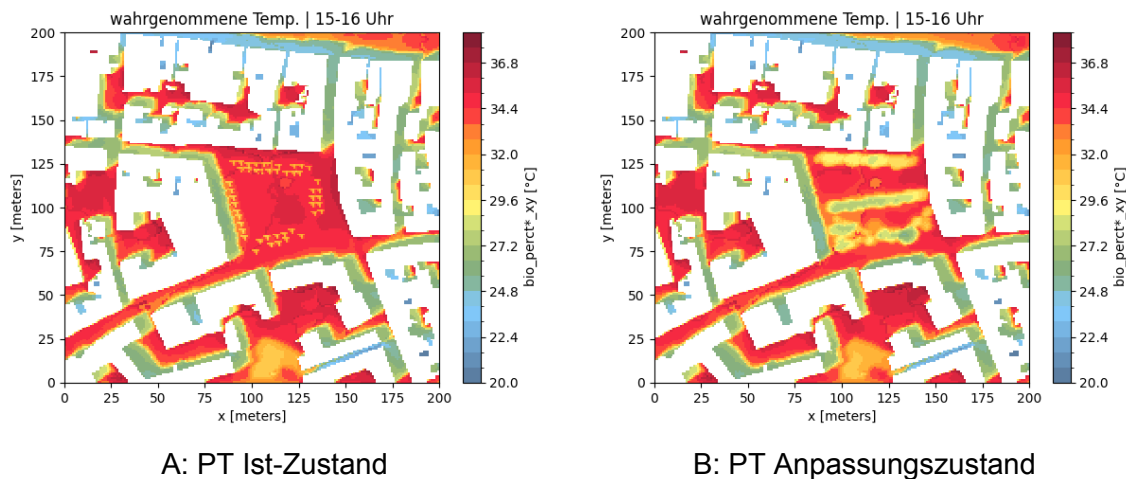


Abb. 21: Vergleich der PT von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 15 und 16 Uhr

In Abbildung 21 zeigt auch die wahrgenommene Temperatur (PT) ihre Höchstwerte zwischen 15 und 16 Uhr. Die maximale berechnete Temperatur im aktuellen Zustand in Figur A liegt bei 36,8 °C und konzentriert sich in der Nähe der Hauswände im östlichen Bereich des Gebiets. Die schattenspendenden Bäume tragen dazu bei, die Temperaturen auf 31,2 °C zu senken.

Im Anpassungszustand in Figur B bleiben die Höchsttemperaturen mit 35,2 °C nahezu gleich, sind aber auf der Gesamtfläche seltener vorzufinden. Die beiden Brunnen in der Umgebung wirken sich sichtbar auf die Umgebungstemperatur aus, insbesondere in unmittelbarer Nähe. Sie senken die Temperatur auf 32,8 °C. Der stärkste Effekt ist erneut bei den Bäumen zu verzeichnen, die die Umgebungstemperatur auf 26,4 °C herunterkühlen.

Die unterschiedlichen Bedingungen und abweichenden Gewichtungen verschiedener Umwelteinflüsse in den Referenzumgebungen der Indizes führen zu den hier erkennbaren Unterschieden. Die wahrgenommene Temperatur zeigt die bisher niedrigsten Werte. Der Index ist empfindlicher gegenüber Feuchtigkeit als der UTCI, was die geringeren berechneten Temperaturen erklären könnte. Zudem wird er stärker von der Nässe der Haut beeinflusst, was die wahrgenommene Temperatur weiter senkt²⁰.

²⁰Blazejczyk et al. a.a.O. s.8

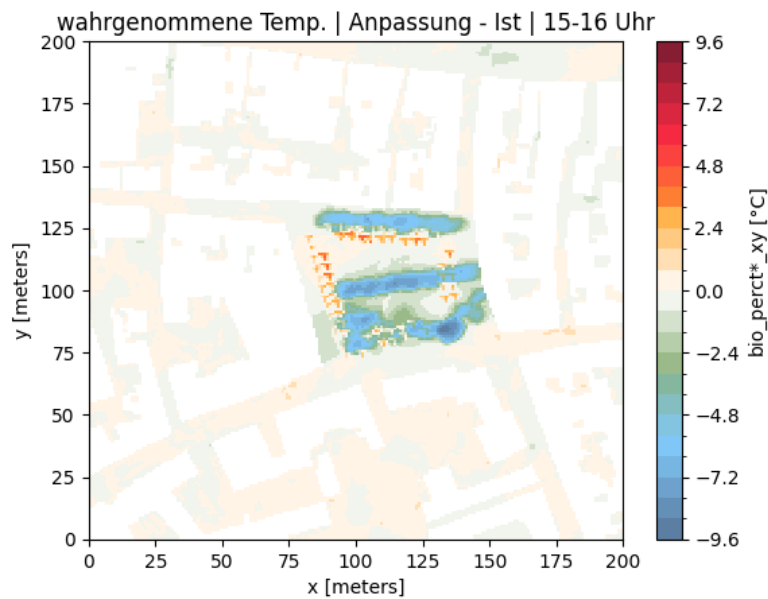
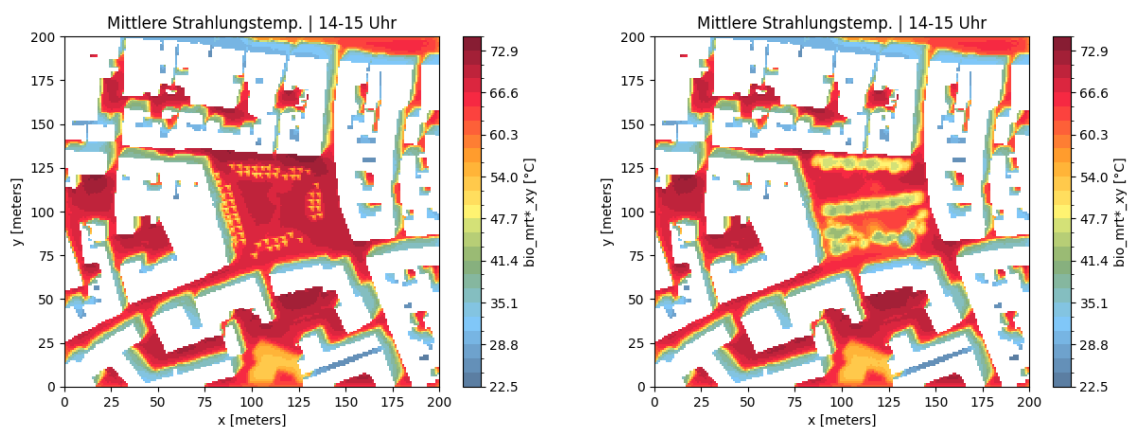


Abb. 22: Differenzplot der PT mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 15 und 16 Uhr

Die berechneten Differenzen in Abbildung 22 haben große Ähnlichkeiten mit denen des UTCI, sowohl in Bezug auf die Größenordnung, als auch bei den Wirkungsbereichen. Der größte Unterschied zum UTCI liegt bei der Grünfläche im Süden. Diese hat einen geringen Einfluss auf die Temperaturen. Der von direkter Sonneneinstrahlung getroffene Bereich zeigt lediglich eine Abkühlung von $-0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nach Westen vergrößert sich die Differenz auf $-1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Abkühlung durch die Bäume erreicht $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$. In der Umgebung des neuen Brunnens wird die Temperatur um $-3,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduziert.



A: MRT Ist-Zustand

B: MRT Anpassungszustand

Abb. 23: Vergleich der MRT von Ist-Zustand und Anpassungszustand zwischen 14 und 15 Uhr

Die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) nimmt die höchsten Werte unter allen in dieser Arbeit einbezogenen Indizes zum thermischen Komfort an. Sie berücksichtigt die Wärmeübertragung durch die Einstrahlung der Sonne, den Strahlungsaustausch zwischen den Oberflächen aller umliegenden Objekte und dem menschlichen Körper. Da Größen wie Luftfeuchtigkeit und somit auch die Verdunstungskühlung oder Wind nicht in die Berechnungen miteinbezogen werden, kann die MRT unter der Einwirkung großer Strahlungsmengen hohe Werte erreichen. Sie erreicht ihr Maximum vor den restlichen Indizes, da zu dieser Zeit sowohl große Mengen an Strahlung durch die Sonne auf den Königsplatz treffen, als auch die Oberflächen der Bodenbeläge und Häuserfassaden durch ihre Aufwärmung und Abgabe langwelliger Strahlung zur Erhöhung der MRT beitragen. Aufgrund dessen befinden sich die Höchstwerte der MRT in der Nähe der Häuserfassaden. Abbildung 23 Figur A verdeutlicht diesen Zusammenhang. Der eher südliche Sonnenstand um 14 bis 15 Uhr erwärmt die Fassaden im Norden am stärksten und führt in dessen Nähe zu berechneten Werten von bis zu 73 °C. Es zeigt sich eine deutliche Abkühlung sowohl in den schattigen Bereichen der aktuellen Umgebung als auch in den schattigen Bereichen, die infolge der Anpassungen entstanden sind (Figur B). Diese resultiert aus der Reduzierung der direkten Sonneneinstrahlung in diesen Bereichen. Jegliche Veränderungen, welche die Wärmeabgabe von umliegenden Objekten oder die direkte Sonneneinstrahlung verringern, tragen zu einer Senkung der MRT bei.

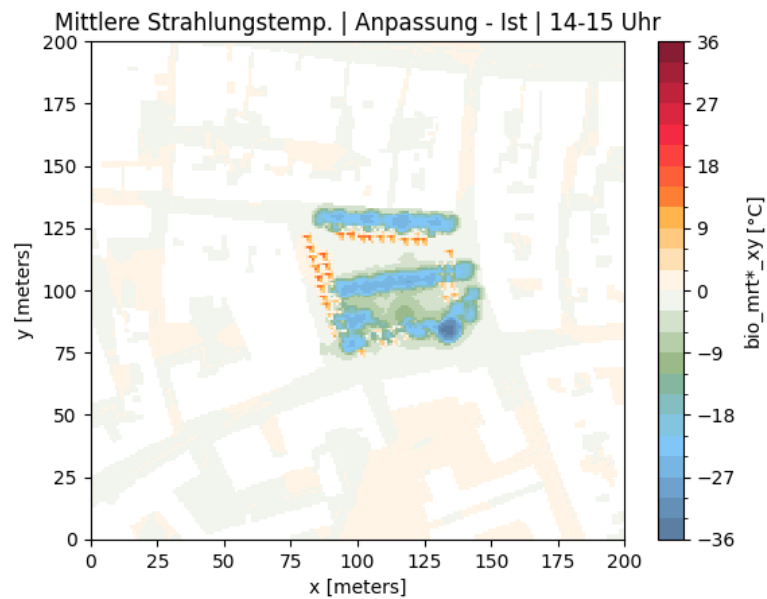


Abb. 24: Differenzplot der MRT mit der Differenz von Anpassungszustand und aktuellem Zustand zwischen 14 und 15 Uhr

Die berechneten Differenzen in Abbildung 24 zeigen den Einfluss der Schatten und der verringerten Wärmeabgabe durch Oberflächenveränderung. Dabei haben die Bäume erneut den stärksten Effekt mit einer Reduktion der MRT um über $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der neue Brunnen gibt weniger langwellige Strahlung ab, als der vorher dagewesene Pflasterstein und reduziert damit die MRT um $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ im direkten Umfeld. Die Grünfläche erzeugt ähnliche kühlende Effekte wie der Brunnen, indem sie weniger langwellige Strahlung abgibt als die zuvor vorhandenen Oberflächen. Dadurch führt sie zu einer Abkühlung von bis zu $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5. Diskussion

Die Ergebnisse zeigen, dass die implementierten Anpassungsmaßnahmen, insbesondere die Schaffung von Schattenflächen durch Bäume und Gebäude sowie die Erhöhung der Vegetationsdichte, klare Verbesserungen der thermischen Bedingungen bewirken. Dies äußert sich in einer Absenkung der Luft- und Oberflächentemperaturen sowie einer Differenz in der Nettostrahlung. Darüber hinaus wirken sich die Anpassungsmaßnahmen positiv auf die spezifische Feuchte aus, was auf eine verstärkte Verdunstung und somit eine kühlende Wirkung hinweist. Die thermischen Komfortindizes, darunter der Universal Thermal Climate Index (UTCI), die physiologische Äquivalenttemperatur (PET), die wahrgenommene Temperatur (PT) und die mittlere Strahlungstemperatur (MRT) deuten alle auf eine Verbesserung des thermischen Komforts infolge der Anpassungsmaßnahme hin. Die berechneten Signale zur gefühlten Temperatur zeigen unterschiedliche Ausmaße, basierend auf der unterschiedlichen Gewichtung einfließender Klimavariablen und Inbezugnahme der mikroklimatischen Charakteristiken vor Ort. Jedoch trägt die Schaffung von Schattenflächen und die gleichzeitige Erhöhung der Vegetation in allen Fällen dazu bei, die gefühlte Temperatur deutlich zu senken.

5.1 Realitätsnähe des berechneten Mikroklimas

Die letzte Aufgabe besteht nun darin, zu bewerten ob die errechneten Signale realistische Ausmaße haben. Aufgrund fehlender Messungen zum Vorher- und Nachherzustand wird diese Frage durch den Vergleich mit Ergebnissen ähnlicher Projekte beantwortet. Da die thermischen Komfortindizes aus den Klimavariablen errechnet werden, erfolgt der Vergleich ausschließlich mit den Klimavariablen anderer Projekte, um die Realitätsnähe der Ergebnisse zu überprüfen.

Eine Publikation aus dem Jahr 2019 untersucht den Kühlungseffekt verschiedener Grünflächen in städtischen Räumen²¹. Die Ergebnisse zeigen, dass auf kleinen Flächen von rund 300 m² eine Kühlung von 1 °C resultieren kann. Mit der Zunahme der begrünter Fläche verstärkt sich auch der Effekt der Kühlung. Eine weitere Publikation aus 2021 beschäftigt sich mit dem mikroklimatischen Effekt von Bäumen im städtischen Bereich²². Die dort gemessenen Temperaturveränderungen aus Projekten verschiedener Städte (bspw. München oder Dresden) umfassen tagsüber sehr ähnliche Temperaturreduktionen wie in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt. Der in der Anpassungsmaßnahme begrünte Bereich des Königsplatzes umfasst eine Fläche von rund 1000 m², wobei angemerkt werden muss, dass diese Fläche nicht durchgängig mit Bäumen bepflanzt ist. Der am dichtesten bepflanzte Bereich im Süden zeigt allerdings Ergebnisse zwischen -0,6 und -1 °C. Zur Mittagszeit übersteigen die berechneten Ergebnisse teilweise Werte von -1,2 °C. Somit befinden sich die von Palm4U berechneten Temperaturreduktionen im Bereich der gemessenen Werte und können als realistisch angenommen werden.

Die Oberflächentemperatur zeigt hohe Differenzen im Bereich von -7,5 °C durch die Änderung von Pflasterstein zu Rasenfläche, bis -22 °C durch das Pflanzen der Bäume. Eine Publikation aus 2019, die sich mit den Auswirkungen städtischer Grünlandschaften wie dem Olympic Forest Park in Beijing und dessen Auswirkung auf die Oberflächentemperatur befasst, verwendet die Messung durch Satelliten als Datengrundlage²³. Die dort gemessene Differenz zwischen urbaner Fläche und mit Bäumen bepflanzter Grünfläche liegt bei -16,8 bis -25 °C. Der Park hat eine größere Fläche, was die tendenziell stärkere Reduktion der Oberflächentemperatur erklären könnte. Grundsätzlich befinden sich sowohl die Differenzwerte, als auch die Absolutwerte in der gleichen Größenordnung wie Werte des Königsplatzes. Diese werden dementsprechend als realistisch angesehen.

Die Windgeschwindigkeit wurde zum einen anfangs im dynamischen Treiber des Modells festgelegt, zum anderen ist sie hoch variabel und aufgrund der

²¹ **Aram et al.** (2019): Urban green space cooling effect in cities

²² **Meili et al.** (2021): Tree effects on urban microclimate: Diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects

²³ **Beni et al.** (2019): Impacts of Urban Green Landscape Patterns on Land Surface Temperature: Evidence from the Adjacent Area of Olympic Forest Park of Beijing, China

Hochdrucklage vernachlässigbar klein. Auf einen Vergleich mit realen Messungen wird daher verzichtet.

Eine tschechische Arbeit über den Einfluss von städtischer Begrünung zeigt unter anderem die Strahlungsverhältnisse in der tschechischen Stadt Klatovy auf. An einem sonnigen Tag erreicht die eingehende kurzwellige Sonnenstrahlung 877 W/m^2 . Im beschatteten Bereich sinken die Werte auf 82 W/m^2 ²⁴. Die Ergebnisse von Palm4U zeigen zur Mittagszeit eine eingehende Strahlung von bis zu 920 W/m^2 . Im Schatten der Bäume werden die Werte reduziert auf 200 W/m^2 . Hierbei gibt es eine höhere Variabilität der Werte, da verschiedene Baumgattungen verschiedene Blattflächenindizes aufweisen und unterschiedlich viel Sonnenlicht durchlassen. Innerhalb von Häuserschatten sind es 80 W/m^2 . In Bezug auf die eingehende Strahlung werden also vergleichbare Ergebnisse zu den realen Messungen berechnet. Die Nettostrahlung besteht aus weiteren Komponenten, welche allerdings stark abhängig sind von dem Material oder der Ausrichtung zur Sonnenstrahlung. Weitere zuverlässige Vergleichswerte neben den Verhältnissen der eingehenden kurzwelligen Strahlung existieren daher nicht.

Ein Vergleich der spezifischen Feuchte bringt die Herausforderung mit sich, Werte im Dezimalbereich zu vergleichen. Bei einer so kleinen Größenordnung können selbst marginal erscheinende Differenzen einen großen Unterschied machen. Eine Publikation aus Mainz vergleicht verschiedene Mikroklimata abhängig von ihrem Begrünungsgrad und der baulichen Umgebung. Die Differenz in der spezifischen Feuchte zwischen den beiden Mikroklimata, die sich am ähnlichsten auf die Veränderungen am Königsplatz anwenden lassen, beträgt maximal $+0,15 \text{ g/kg}$ ²⁵. Die berechneten Differenzen von Palm4U liegen mit Werten bis zu $0,672 \text{ g/kg}$ deutlich darüber. Da die aus der Mainzer Publikation gewählten Umgebungen nicht vollständig mit den Verhältnissen des Königsplatzes übereinstimmen, ist damit nicht impliziert, dass die Werte der spezifischen Feuchte unrealistisch sind. Einen weiteren Vergleich kann die relative Luftfeuchtigkeit bieten. Diese wird nach den Ergebnissen von Palm4U um rund 2 bis 4% erhöht. Eine Publikation über urbane Begrünung aus Italien hat die Auswirkungen von Begrünung modelliert und

²⁴**Hesslerová et al.** (2022): The impacts of greenery on urban climate and the options for use of thermal data in urban areas

²⁵**Lindén et al.** (2016): Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany

das Modell mit eigenen Messungen validiert²⁶. Bei einem Vergleich der Differenzen in der relativen Feuchte zwischen einem Basisszenario und einem begrünten Szenario ergeben sich ebenfalls Unterschiede von bis zu 4%. Die Orte, an denen vergleichbare vegetative Veränderungen stattfanden wie am Königsplatz, weisen nahezu identische Veränderungen in der relativen Feuchtigkeit auf.

Insgesamt zeigen die modellierten Klimavariablen eine hohe Übereinstimmung mit den realen Messungen der Vergleichsprojekte. Die spezifische Feuchte zeigt zwar höhere Werte als im Vergleichsprojekt, jedoch waren die verglichenen Zustände diejenigen, die insgesamt am wenigsten übereinstimmten. Zusammenfassend können die berechneten Ergebnisse von Palm4U als realistisch angenommen werden, da sie eine adäquate Übereinstimmung mit den gemessenen Daten aufweisen.

²⁶**Detommaso et al.** (2021): Sustainable Urban Greening and Cooling Strategies for Thermal Comfort at Pedestrian Level

6. Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit untersucht die Effekte von Anpassungsmaßnahmen zur Milderung extremer Hitzebedingungen auf dem Königsplatz in Speyer am Beispiel des 21. Juni 2021. Der Fokus liegt auf der Analyse verschiedener Klimavariablen wie Luft- und Oberflächentemperatur, Windgeschwindigkeit, Nettostrahlung, spezifischer Feuchte und thermischer Komfortindizes (UTCI, PET, PT, MRT), um den Einfluss von Veränderungen in der städtischen Umgebung auf das Mikroklima und das Wohlbefinden von Menschen zu untersuchen.

Die Methodik umfasst die Erstellung eines statischen Treibers für den Königsplatz und seine Umgebung sowie die digitale Umgestaltung der Fläche im Sinne der Klimaanpassung an Hitzebelastung. Die beiden entstandenen Bauzustände dienen als Input für das Palm4U-Modell, um den aktuellen Zustand und die Auswirkungen einer erdachten Anpassungsmaßnahme zu simulieren. Der statische Treiber baut sich aus sechs Objekttypen auf (Gebäude, Vegetationstypen, Bodenbelag, Wasserkörper, Baumgruppen und Einzelbäume), welche das Modell mit physikalischen Eigenschaften beliefern, die für die Berechnung des Mikroklimas benötigt werden. Die Nutzung öffentlicher Daten zur Erstellung des statischen Treibers dient einerseits dazu, die Motivation zu eigenen Adaptionen solcher Projekte zu fördern, und andererseits wird dabei die Frage beantwortet, ob die Auflösung und Qualität der öffentlichen Daten ausreicht, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Der Prozess der Rasterisierung wandelt den statischen Treiber in Rasterdaten um, mit welchen die Ergebnisse berechnet werden können.

Diese zeigen, dass der Anpassungszustand, insbesondere die Schaffung von Schattenflächen und die Erhöhung der Vegetationsdichte, die Luft- und Oberflächentemperaturen senkt und den thermischen Komfort durch eine erhöhte Verdunstung verbessert. Thermische Komfortindizes wie UTCI, PET, PT und MRT

weisen ebenfalls auf eine Verbesserung des thermischen Komforts hin. Die Schaffung von Schattenflächen und die Erhöhung der Vegetation tragen in allen Fällen dazu bei, die gefühlte Temperatur signifikant zu senken.

Sowohl der aktuelle Stand des Klimawandels in Deutschland und Rheinland-Pfalz, als auch die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen die Bedeutung von Anpassungsmaßnahmen in urbanen Räumen zur Bewältigung extremer Hitzeereignisse und zur Verbesserung des menschlichen Wohlbefindens. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten wichtige Impulse für die Stadtplanung und -gestaltung im Kontext des Klimawandels und unterstreichen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung von Mikroklima und thermischem Komfort in städtischen Umgebungen. Sie legen nahe, dass die Integration von Grünflächen und Schattenstrukturen insbesondere durch Vegetation in städtische Planungsstrategien eine effektive Methode darstellt, um den urbanen Raum für die Bewohner während extremer Hitze angenehmer und sicherer zu gestalten.

7. Fazit

Die methodische Herangehensweise dieser Arbeit ist auf eine unabhängige Weise konzipiert, sodass sie auf unterschiedliche Standorte anwendbar ist. Die Anforderungen an die Genauigkeit und Aktualität der Datensammlung können unterschiedlich sein und dementsprechend auch der damit verbundene Aufwand variieren. Durch die Erstellung eigener Datensätze speziell für die Anwendung von Palm4U, welche die höchstmögliche Genauigkeit und Aktualität bieten, könnte die Verlässlichkeit der Ergebnisse gesteigert werden. Grundsätzlich zeigt diese Arbeit aber, dass die Durchführung unter Nutzung öffentlicher Daten möglich ist, was ihre Anwendbarkeit und Flexibilität in verschiedenen Kontexten unterstreicht. Im Vergleich zur Umsetzung und Messung der Wirkung einer Anpassungsmaßnahme erweist sich dieser methodische Ansatz als weitaus kostengünstiger. Die benötigten digitalen Werkzeuge sind, genau wie die Daten, öffentlich zugänglich und umfassen Programme wie QGIS und das graphical userinterface des Palm4U-Modells (GUI) für die Datenauswertung und zur Erstellung der statischen Treiber, sowie Python zur Ergebnisauswertung.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen teils deutliche Unterschiede zwischen dem Anpassungszustand und dem aktuellen Zustand, welche allerdings in allen Fällen positiv zum menschlichen Wohlbefinden bei Hitze beitragen. Die Realitätsnähe der Ergebnisse wurde anhand von Messungen aus vergleichbaren Projekten gezeigt.

Methodische Schwächen liegen in der Verfügbarkeit der benötigten Daten und den beiläufigen Problemen, welche innerhalb des Erstellungsprozesses für den statischen Treiber entstehen können. Öffentliche Datensätze stellen im Generellen eine verwendbare Grundlage dar, enthalten aber nur in seltenen Fällen alle nötigen Informationen und müssen dementsprechend an den

Nutzungszweck von Palm4U angepasst werden. Einzelne Objekttypen setzen sich teilweise aus mehreren Datensätzen zusammen und erfordern dennoch eine Vereinfachung einzelner Eigenschaften. Andere zwingend erforderliche Informationen sind zu spezifisch um in öffentlichen Datensätzen wiedergefunden zu werden und müssen daher manuell aus anderen zugänglichen Quellen unter Zeit- und Arbeitsaufwand erschlossen werden.

Da öffentliche Daten für die Anwendung in Palm4U und den Prozess einer Rasterisierung nicht ausgelegt sind, können in den Ergebnissen unvorhergesehene Ungenauigkeiten entstehen, wie beispielsweise eine Höhenkante, welche aus der Rasterisierung des digitalen Höhenmodells (DGM) resultiert und die Ergebnisse beeinflusst. Zur Vermeidung dieser Fehler sollte der statische Treiber nach der Rasterisierung auf diese Fehler geprüft werden um abhängig der im Fokus stehenden Fläche manuelle Anpassungen treffen zu können.

8. Ausblick

Nachdem gezeigt werden konnte, dass der Anpassungszustand einen besseren thermischen Komfort für den Menschen bietet, als der aktuelle Zustand, stehen der Stadt Speyer die nächsten Optionen zum Umgang mit Palm4U und dem Königsplatz offen. Die Ergebnisse dienen daher nicht nur als einzelner Input für den Umbau des Königsplatzes, sondern auch als Bestätigung, dass ein digitaler Zwilling der Stadt zu weiteren Ergebnissen im Sinne der Klimaanpassung beitragen kann. Ist einmal ein komplettes digitales Abbild von Speyer erstellt, lassen sich die Inhalte dieser Arbeit auf verschiedenste Flächen anwenden, um in verhältnismäßig kurzer Zeit die baulichen Ziele der Stadt zu definieren und umzusetzen.

Da die berechneten Ergebnisse lediglich den Endzustand aller durchgeführten Maßnahmen abbilden, wird klar, dass auf die funktionale Umsetzung und das Erreichen des finalen Zustandes hingearbeitet werden muss, um die in dieser Arbeit präsentierten Auswirkungen zu erreichen. Die dabei wichtigsten Veränderungen sind die Erhöhung des Wurzelraumes unter dem Königsplatz, wie in der Methodik beschrieben, sowie das Sicherstellen einer regelmäßigen Bewässerung der wachsenden Bäume. Damit wird einerseits eine verbesserte Wuchshöhe der Bäume gewährleistet, als auch Engpässe in der Wasserversorgung vermieden, welche in Zeiten einer Trockenperiode die Entwicklung der Bäume beeinträchtigen.

Für die Weiterentwicklung der Forschung in diesem Bereich bieten sich verschiedene Möglichkeiten. Ein wichtiger Schwerpunkt liegt in der Optimierung von Planungsstrategien für städtische Grünflächen und sonstige derartige Anpassungsmaßnahmen. Die Entwicklung von Leitlinien und Best Practices unter Einbeziehung einer vorherigen digitalen Umsetzung könnte Stadtplanern und Land-

schaftsarchitekten helfen, effektive und nachhaltige Anpassungsmaßnahmen zu planen und umzusetzen.

Ein anderer Ansatz liegt in der Verbesserung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Datengrundlage, welche zur Simulation von Mikroklima und thermischem Komfort gebraucht wird. Einerseits bietet die Nutzung öffentlicher Daten den Vorteil der Simplizität und zeitlichen Effizienz, allerdings würde die Erstellung und Erhaltung eines aktuelleren Datennetzes die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Modellergebnisse fördern.

Damit direkt verknüpft, bieten sich vergleichende Messungen zur Modellvalidierung als weiterer Ansatz zur Qualitätssicherung der Ergebnisse an. Statt ausschließlich auf Messungen aus ähnlichen Projekten zurückzugreifen, könnte die Implementierung von Anpassungsmaßnahmen mit Vorher-Nachher-Messungen in Einklang gebracht werden, um die Genauigkeit der Modellergebnisse zu verbessern und zu validieren. Diese weiterführenden Forschungsgebiete geben Aussicht darauf, das Verständnis und die Effektivität von städtischen Anpassungsmaßnahmen zur Förderung von Komfort und Nachhaltigkeit zu verbessern.

9. Literaturverzeichnis

- [1] **Bundesamt für Umwelt** (2012): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder, Erster Teil der Strategie des Bundesrates, s.9
- [2] **Geletic et al.** (2021): High-Resolution Modelling of Thermal Exposure during a Hot Spell: A Case Study Using PALM-4U in Prague, Czech Republic
- [3] **Rheinland-Pfalz Landesamt für Vermessung und Geobasisinformationen** (2024): Amtliches Liegenschaftskataster Informationssystem ALKIS, <https://lvermgeo.rlp.de/ueber-uns/unsere-aufgaben/liegenschaftskataster/alkisr> (08.05.2024)
- [4] **Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover** (Hrsg.) (2024): The PALM model system, <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac> (08.05.2024)
- [5] **Brune, William** (2023): Fundamentals of Atmospheric Science, Ways to Specify Water Vapor, Pennsylvania State University, <https://www.e-education.psu.edu/meteo300/node/519> (08.05.2024)
- [6] **Jendritzky et al.** (2011): UTCI—Why another thermal index?
- [7] **Blazejczyk et al.** (2011): Comparison of UTCI to selected thermal indices
- [8] **ASHRAE** (Hrsg.) (2001): The 2001 ASHRAE Handbook, Kapitel 8 Thermal Comfort, o.O
- [9] **Fraunhofer** (Hrsg.) (2022): Lookup Tables, https://gitlab.cc-asp.fraunhofer.de/palm_gui/palmclassify/-/wikis/Lookup-Tables (08.05.2024)
- [10] **Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen** (Hrsg.) (2023): Klimawandel in Speyer, <https://www.klimawandel-rlp.de/fileadmin/website/klimakompetenzzentrum/>

Klimawandelinformationssystem/Anpassungsportal/factsheets/
Speyer_Factsheet.pdf, (08.05.2024)

- [11] **Institut für Meteorologie und Klimatologie, Universität Hannover** (Hrsg.) (2021): Radiation models, <https://palm.muk.uni-hannover.de/trac/wiki/doc/tec/radiation> (08.05.2024)
- [12] **Wellons, Mark** (2007): College of Wooster Physics Department, The Stefan-Boltzmann Law
- [13] **Urone P.** California State University, Sacramento, **Roger H.** State University of New York (n.D): Phase Change and Latent Heat, [https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/College_Physics_1e_\(OpenStax\)/14%3A_Heat_and_Heat_Transfer_Methods/14.03%3A_Phase_Change_and_Latent_Heat](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/College_Physics/College_Physics_1e_(OpenStax)/14%3A_Heat_and_Heat_Transfer_Methods/14.03%3A_Phase_Change_and_Latent_Heat)
- [14] **Kimball, John** (2024): Biology, Kapitel 16.2C Transpiration
- [15] **MetPy** (Hrsg.) (n.d.): relative_humidity_from_specific_humidity, https://unidata.github.io/MetPy/latest/api/generated/metpy.calc.relative_humidity_from_specific_humidity.html
- [16] **Aram et al.** (2019): Urban green space cooling effect in cities
- [17] **Meili et al.** (2021): Tree effects on urban microclimate: Diurnal, seasonal, and climatic temperature differences explained by separating radiation, evapotranspiration, and roughness effects
- [18] **Beni et al.** (2019): Impacts of Urban Green Landscape Patterns on Land Surface Temperature: Evidence from the Adjacent Area of Olympic Forest Park of Beijing, China
- [19] **Hesslerová et al.** (2022): The impacts of greenery on urban climate and the options for use of thermal data in urban areas
- [20] **Lindén et al.** (2016): Temporal variations in microclimate cooling induced by urban trees in Mainz, Germany
- [21] **Detommaso et al.** (2021): Sustainable Urban Greening and Cooling Strategies for Thermal Comfort at Pedestrian Level