Diplomarbeit

# Fassadenbegrünung im renovierten Altbau

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

---

Diploma Thesis

# Facade greening for renovated buildings

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von


**Sebastian Rosenberger**
Matr.Nr.: 01425469


unter der Anleitung von


Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.in techn. **Azra Korjenic**
Univ.Ass. Dipl.-Ing. BSc. **Erich Streit**
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/AE 02 19, 1040 Wien, Österreich


Wien, im Februar 2025 _____


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Danksagung

An erster Stelle möchte ich mich herzlich bei meiner Betreuerin, Frau Univ.Prof.in Dipl.-Ing. Dr.in techn. Azra Korjenic, sowie meinem Zweitbetreuer, Herrn Univ.Ass. Dipl.-Ing. BSc. Erich Streit, bedanken. Während der Ausarbeitung meiner Diplomarbeit wurde mir stets konstruktiv, kompetent und unkompliziert weitergeholfen – dafür ein besonderes Dankeschön!

Ein ebenso großes Dankeschön geht an meine Familie und Freunde, die mich während meines gesamten Studiums immer unterstützt und motiviert haben. Ohne euren Rückhalt wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.

Ein weiterer Dank gilt meinen Studienkollegen und Lerngruppen, mit denen ich viele intensive Lernstunden verbracht habe, aber auch schöne Momente zwischen den Prüfungen und abseits der Universität teilen konnte. Ohne euch hätte ich dieses Studium nicht geschafft!

Vielen Dank an alle, die mich auf diesem Weg begleitet und unterstützt haben!



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kurzfassung


## Fassadenbegrünung im renovierten Altbau

Diese Arbeit untersucht die hygrothermischen Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an einem renovierten Altbau im urbanen Raum. Ziel war es, den Einfluss der Begrünung auf Oberflächentemperatur, Lufttemperatur und Luftfeuchte zu analysieren und mögliche Verbesserungen des Mikroklimas durch die Pflanzen über die Zeit abzuschätzen.

Auf Basis einer Literaturrecherche wurde die initiale Simulation zunächst mit den Wetterdaten von GeoSphere Austria und anschließend mit den vor Ort erhobenen Messdaten verglichen. Die Simulation wurde im Jahr 2021 mit der Software IDA-ICE von iC consulenten erstellt und diente als Referenzmodell zur Analyse des Temperaturverhaltens der Fassade. Das Monitoring vor Ort erfolgte über einen Zeitraum von zwei Jahren anhand von Langzeitmessungen mit Sensoren, die an mehreren Stellen der Fassade befestigt waren. Die Daten aus dem ersten Messjahr wurden bereits in einer früheren Arbeit ausgewertet.

Der Fokus dieser Untersuchung liegt auf der Auswertung des zweiten Jahres der Messungen und dem Vergleich der beiden Messjahre miteinander. Die Ergebnisse bestätigen, dass Fassadenbegrünungen signifikante thermische Vorteile bieten, insbesondere in städtischen Wärmeinseln. Im Sommer konnten die Spitzenwerte der Oberflächentemperaturen durch die Begrünung um bis zu 10 °C gesenkt werden. Die Analyse der gemessenen Daten an der untersuchten Fläche ergab, dass eine Zunahme des Deckungsgrades nicht zwangsläufig zu einer proportionalen Verbesserung der Kühlungseffekte führt.

Methodisch zeigte sich, dass die Positionierung der Sensoren einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Unterschiedliche Lichtverhältnisse können die Vergleichbarkeit der Daten beeinträchtigen. Darüber hinaus spielt die Positionierung der Sensoren in Bezug auf die gewachsene Pflanzenstruktur eine entscheidende Rolle für die Messergebnisse.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## Abstract

### Facade greening for renovated buildings

This thesis investigates the hygrothermal effects of façade greening on a renovated building in an urban area. The aim was to analyse the influence of the greenery on surface temperature, air temperature and humidity and to estimate possible improvements in the microclimate due to the plants over time.

Based on a literature search, the initial simulation was first compared with the weather data from GeoSphere Austria and then with the measurement data collected on site. The simulation was created in 2021 by iC consulenten, using the IDA-ICE software. It served as a reference model for analysing the temperature behaviour of the façade. On-site monitoring was carried out over a period of two years using long-term measurements with sensors attached to several points on the façade. The data from the first year of measurements had already been analysed in an earlier study.

The focus of this study is on analysing the second year of measurements and comparing the two measurement years with each other. The results confirm that façade greening offers significant thermal benefits, particularly in urban heat islands. In summer, the peak surface temperatures were reduced by up to 10 °C thanks to the greenery. The analysis of the data measured on the investigated area showed that an increase in the degree of coverage does not necessarily lead to a proportional improvement in the cooling effects.

Methodologically, it was shown that the positioning of the sensors has a significant influence on the measurement results. Different lighting conditions can affect the comparability of the data. In addition, the positioning of the sensors in relation to the growing plant structure plays a decisive role for the measurement results.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ....1
1.1 Problemstellung ....2
1.2 Zielsetzung der Arbeit / Forschungsfragen ....2
1.3 Aufbau der Diplomarbeit ....3
2 Grundlagen ....4
2.1 Urban Heat Islands (=UHI) in Wien ....4
2.2 Positive Effekte von Fassadenbegrünungen ....5
2.3 Möglichkeiten der Vertikalbegrünung – Begrünungskategorien nach ÖNORM L 1136:2021-04 ....6
2.3.1 Kategorie I: Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Selbstklimmern ....7
2.3.2 Kategorie II: Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Rankhilfen und Kletterpflanzen ....7
2.3.3 Kategorie III: Troggebundene Vertikalbegrünung ....8
2.3.4 Kategorie IV: Wandgebundene Vertikalbegrünung mit teilflächigen Vegetationsträgern ....9
2.3.5 Kategorie V: Wandgebundene Vertikalbegrünung mit vollflächigen Vegetationsträgern ....10
3 Wissenschaftliche Vorarbeiten ....11
3.1 N. Ribic Berbic „Evaluierung thermischer Auswirkungen von Fassadenbegrünung im historischen, renovierten Altbau“ ....11
3.2 A. Heinrich (2019) „Klimawandel und urbaner Hitzeinseleffekt: Potenziale und Herausforderungen der Fassadenbegrünung“ ....13
3.3 David Marx (2023): Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden auf das Innenraumklima ....14
3.4 Florian Teichmann (2024) „Validierung von Mikroklimasimulationen zur Quantifizierung der Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen“ ....14
3.5 Ileana Blanco, Evelia Schettini, Giuliano Vox „Predictive model of surface temperature difference between green facades and uncovered wall in Mediterranean climatic area” ....16
3.6 M. Potyka, M. Groth, M. Quante, S. Bender (2022) „Die Wirkung von Begrünungskonzepten auf das Mikroklima an hitzebelasteten Standorten Lüneburgs“ ....17
3.7 K. Rehfeldt, T. Zölch, S. Erlwein, S. Pauleit, S. Linke (2024) „Potenziale und Wirkungen grüner Infrastruktur für Klimaresilienz“ ....18
4 Methodik ....19
4.1 Grundlagen des Projekts ....20
4.2 Grundlegende Annahmen der Simulation ....22
4.3 Randbedingungen ....25

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.4 Fassadenbegrünung ..... 26
4.4.1 Trogsystem ..... 26
4.4.2 Substrat ..... 28
4.5 Pflanzen ..... 28
4.5.1 Immergrünes Geißblatt - Lonica henryii ..... 30
4.5.2 Geißblatt / Geißschlinge - Lonicera heckrottii ..... 31
4.5.3 Japanisches Geißblatt - Lonicera japonica ..... 31
4.5.4 Alpen Waldrebe - Clemantis alpina ..... 31
4.5.5 Clematis montana (Berg-Waldrebe) ..... 31
4.5.6 Clematis 'Roter Kardinal' ..... 32
4.5.7 Kletterrose (Rosa) ..... 32
4.5.8 Akebia quinata (Fünfblättrige Akebie) ..... 32
4.6 Wachstum – Entwicklung der Bepflanzung in einem Jahr ..... 33
4.6.1 Messung des Deckungsgrads ..... 33
4.7 Messeinrichtungen und Monitoring ..... 34
4.7.1 Gebäudesimulation ..... 38
4.7.2 Langzeitmonitoring ..... 40
4.7.3 Sonnenstand ..... 42
5 Ergebnisse ..... 45
5.1 Analyse der Entwicklung der Fassadenbegrünung im Zeitraum 2023 bis 2024 ..... 45
5.1.1 Bereich 1: Mezzanin, links außen ..... 46
5.1.2 Bereich 2: Mezzanin, Mitte links ..... 46
5.1.3 Bereich 3: Mezzanin, Mitte ..... 47
5.1.4 Bereich 4: Mezzanin, Mitte rechts ..... 47
5.1.5 Bereich 5: Mezzanin, rechts außen ..... 47
5.1.6 Bereich 1: 1. Stock, links außen ..... 47
5.1.7 Bereich 2: 1. Stock, Mitte links ..... 48
5.1.8 Bereich 3: 1. Stock, Mitte ..... 48
5.1.9 Bereich 4: 1. Stock, Mitte rechts ..... 48
5.1.10 Bereich 5: 1. Stock, rechts außen ..... 49
5.1.11 Spontanvegetation ..... 49
5.2 Vergleich der Wetterdaten – Prognose und Messungen ..... 50
5.3 Ergebnisse aus der Gebäudesimulation ..... 52
5.3.1 Simulierte Wetterdaten ..... 52
5.3.2 Simulierte Oberflächentemperatur ..... 52
5.4 Ergebnisse aus dem Langzeitmonitoring ..... 53
5.4.1 Oberflächentemperatur aus Monitoring ..... 54
5.4.2 Lufttemperatur aus Monitoring ..... 55
5.4.3 Luftfeuchtigkeit aus Monitoring ..... 56
5.5 Vergleich der Oberflächentemperaturen von Sensor 5 und 6 ..... 59
5.5.1 Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen 2023 ..... 60
5.5.2 Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen 2024 ..... 63
5.5.3 Analyse - Vergleich Sensor 5 und 6 für beide Messjahre ..... 65

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

5.6 Analyse der Entwicklung der Fassadenbegrünung über die Zeit 66

5.6.1 Bewertung der Entwicklung der Begrünung von 2023 zu 2024..67
5.6.2 Vergleich von Sensor 2 mit Sensor 4 im Jahr 2023 .....68
5.6.3 Vergleich von Sensor 2 mit Sensor 4 im Jahr 2024 .....70
5.6.4 Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2023 .....72
5.6.5 Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2024 .....73
5.6.6 Auswertung der Entwicklung.....74

6 Fazit .....77

7 Ausblick.....78

8 Anhang.....80

8.1 Abbildungsverzeichnis .....80

8.2 Tabellenverzeichnis .....81

9 Literatur.....82

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 1 Einleitung

Im Zuge des Forschungsprojekts der Technischen Universität Wien „Klimaresiliente Sanierungsmaßnahmen“ wurde die Fassade eines renovierten Altbaus begrünt. Geleitet von Univ.-Prof.in Azra Korjenic wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren die hygrothermischen Auswirkungen der Begrünung gemonitort. Diese Daten sollen nun ausgewertet und mit einer initialen Simulation verglichen werden. Insbesondere wird untersucht, ob das Wachstum der Pflanzen über die Zeit einen verstärkten Einfluss auf die Messergebnisse hat. Städte sind aufgrund der globalen Erwärmung zunehmend auf Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel angewiesen. Begrünte Fassaden bieten das Potenzial, städtische Wärmeinseln zu entschärfen und das Mikroklima zu verbessern. Bisher gibt es noch wenig Forschungsergebnisse, welche exakte Auswirkungen von Fassadenbegrünungen auf die hygrothermischen Eigenschaften eines Gebäudes über einen längeren Zeitraum aufzeigen. Das Forschungsprojekt „Klimaresiliente Sanierungsmaßnahmen“ lieferte über zwei Jahre Messdaten zur Begrünung eines sanierten Altbaus. Die Daten aus dem zweiten Jahr der Messungen sollen mit den Ergebnissen einer initialen thermischen Simulation abgeglichen werden. [1]

Die Arbeit hat zum Ziel, die Simulationsergebnisse mit den realen Wetterdaten zu vergleichen und die gesammelten Messdaten im Detail auszuwerten. Ein besonderer Fokus liegt auf der Frage, ob sich durch das Wachstum der Begrünung im zweiten Jahr stärkere Auswirkungen auf das Temperaturverhalten der Fassade zeigen lassen. Dazu sollen die Daten analysiert und die Ergebnisse aus den beiden Jahren der Messung miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse werden in Diagrammen und Tabellen übersichtlich dargestellt.

Im ersten Schritt erfolgt eine Literaturrecherche zu den Auswirkungen von Fassadenbegrünungen und über die im Projekt verwendeten Bepflanzungen. Anschließend werden die tatsächlichen Wetterdaten des zweiten Messjahres mit der initialen Simulation verglichen. In einem passenden Zeitraum werden folglich die Messergebnisse mit den Ergebnissen der Simulation verglichen, diese Ergebnisse werden mit den Erkenntnissen aus dem ersten Jahr verglichen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Schließlich wird untersucht, inwieweit das Wachstum der begrünten Fassade über die Zeit den thermischen Effekt verändert.

Ziel dieser Arbeit ist es, darzustellen, in welchem Umfang eine zunehmende Begrünung die Luft- und Oberflächentemperatur sowie die Luftfeuchtigkeit an Fassaden beeinflusst. Zudem wird untersucht, ob diese Effekte in Abhängigkeit vom Deckungsgrad der Begrünung quantifiziert werden können.

## 1.1 **Problemstellung**

Städte stehen vor der Herausforderung, sich an den Klimawandel anzupassen und gleichzeitig das urbane Mikroklima zu verbessern. Laut dem Strategieplan Wien „Urban Heat Islands“ werden Fassadenbegrünungen als potenzielle Lösung betrachtet, um die städtische Hitzeentwicklung zu reduzieren. Während die positiven Effekte von Fassadenbegrünungen bekannt sind, ist wenig darüber bekannt, wie sich diese Effekte über die Zeit, insbesondere durch das Pflanzenwachstum, verändern. Es wird untersucht, in welchem Ausmaß sich die im ersten Jahr erhobenen Daten von den Messwerten des zweiten Jahres unterscheiden. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Frage, wie stark das fortschreitende Pflanzenwachstum im zweiten Jahr zur Reduktion der Temperaturen und zur Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit beiträgt und damit das Mikroklima weiter verbessert.

## 1.2 **Zielsetzung der Arbeit / Forschungsfragen**

Die Forschungsziele dieser Arbeit bestehen darin, die im Rahmen des Projekts gesammelten Messdaten mit den ursprünglichen Simulationsdaten zu vergleichen, um die hygrothermischen Auswirkungen der Fassadenbegrünung über einen gewählten Zeitraum zu analysieren. Die wissenschaftliche Arbeit „Evaluierung thermischer Auswirkungen von Fassadenbegrünung im historischen, renovierten Altbau“ von Nerja Ribic Berbic hat bereits die Daten des ersten Jahres analysiert und versucht, einen mathematischen Korrelationsfaktor zwischen Simulationsergebnissen und realen Messdaten zu ermitteln.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ein Ziel ist es, den möglichen Einfluss des Pflanzenwachstums auf die begrünte Fassade zu untersuchen und zu bewerten, ob sich im zweiten Jahr stärkere klimatische Effekte zeigen.

Darüber hinaus wird versucht, die Differenzen des ersten und zweiten Jahres der Messung in Zusammenhang mit dem Pflanzenwachstum zu setzten. Auf dieser Grundlage sollen schließlich praxisrelevante Erkenntnisse gewonnen werden, die zur Optimierung zukünftiger Planung von Fassadenbegrünungen beitragen können.

Als Teil eines größeren Forschungsprojekts zur Verbesserung des städtischen Klimas durch Fassadenbegrünungen ist die persönliche Motivation, zu einem besseren Verständnis der Langzeiteffekte von begrünten Fassaden beizutragen. Diese Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zur Überprüfung und Validierung von Simulationsmodellen anhand realer Messdaten und soll die tatsächlichen Veränderungen der hygrothermischen Eigenschaften der Bepflanzung durch ihr Wachstum aufzeigen.

Es ist zu beachten, dass die vorliegende Arbeit keine Untersuchung der statischen Anforderungen oder der brandschutztechnischen Aspekte der begrünten Fassade umfasst, da diese Themen nicht Teil des Forschungsumfangs sind.

## 1.3 **Aufbau der Diplomarbeit**

Zunächst wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den aktuellen Stand der Forschung zu thermischen Auswirkungen von Fassadenbegrünungen darzustellen.

Die mit der Software IDA ICE erstellte Simulation von iC consulenten wurde mit den tatsächlichen Wetterbedingungen abgeglichen. Durch den Vergleich von simulierten und gemessenen Daten wurde der bestmögliche Vergleichszeitraum von Messdaten und Simulation gefunden.

Datenerfassung und -analyse: Die über zwei Jahre gesammelten Wetter- und Klimadaten der begrünten Fassade wurden in Excel ausgewertet. Ergebnisse aus dem ersten Jahr lagen bereits vor. Hierbei wurde ein Vergleich der Lufttemperatur, Oberflächentemperatur und Luftfeuchtigkeit mit den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Simulationsdaten vorgenommen. Besondere Aufmerksamkeit wurde auf die Differenzen zwischen dem ersten und zweiten Jahr gelegt, um die Auswirkungen des Pflanzenwachstums zu untersuchen.

Die Ergebnisse wurden in Tabellen und Diagrammen dargestellt. Falls möglich, wurde ein Korrelationsfaktor berechnet, der die Veränderungen des Pflanzenwachstums mit den Veränderungen der Messergebnisse in Beziehung setzte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 2 Grundlagen

Im folgenden Kapitel wird dargelegt, warum Fassadenbegrünungen im urbanen Raum zunehmend an Bedeutung gewinnen. Dabei werden die Möglichkeiten der Fassadenbegrünung anhand der in der ÖNORM L 1136:2021-04 definierten Begrünungskategorien erläutert. Abschließend werden die positiven Effekte begrünter Fassaden detailliert aufgeführt, um ihre Relevanz für städtische Klimaanpassungsstrategien und ökologische Ausgleichsmaßnahmen zu verdeutlichen.

## 2.1 Urban Heat Islands (=UHI) in Wien

Städtische Siedlungsgebiete weisen eine Vielzahl von Unterschieden zu angrenzenden ländlichen Regionen auf, insbesondere im Hinblick auf klimatische Faktoren wie Niederschlag, Windverhältnisse und Temperatur. Diese Unterschiede resultieren in der Form von urbanen Hitzeinseln. Das Konzept der "Urban Heat Islands" bezieht sich auf den Temperaturunterschied zwischen städtischen und ländlichen Gebieten, ein Phänomen, das bereits im 19. Jahrhundert dokumentiert wurde. Die Ergebnisse empirischer Untersuchungen belegen, dass die Temperaturdifferenz zwischen urbanen und ländlichen Gebieten Werte von bis zu 12 °C annehmen kann. [2] [3] [4]

Des Weiteren können innerhalb urbaner Räume signifikante Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Stadtteilen festgestellt werden, wobei die Verfügbarkeit grüner Infrastruktur (z.B. Parks, Grünflächen, Dach- und Fassadenbegrünungen) und blauer Infrastruktur (z.B. Teiche, Seen,

Flüsse) sowie der Versiegelungsgrad der Flächen eine entscheidende Rolle spielen. [5]

Die Hauptursache für die Entstehung städtischer Wärmeinseln ist in der Versiegelung und Überbauung natürlicher, durchlässiger Flächen zu sehen. Im Allgemeinen sind natürliche Oberflächen von Vegetation bedeckt und bestehen aus Böden, die in der Lage sind, Feuchtigkeit zu speichern. Diese absorbieren einen Teil der Sonnenstrahlung und setzen ihn durch Verdunstung in Form von Transpiration und Evaporation wieder frei, was zu einer Abkühlung der Umgebung beiträgt. Demgegenüber erwärmen sich unversiegelte Flächen aufgrund der Beschattung und Verdunstung durch Pflanzen deutlich weniger als bebaute Bereiche. [6]

Bebaute Flächen hingegen weisen häufig eine hohe Wärmespeicherung auf, was auf den Einsatz von wärmeabsorbierenden Materialien zurückzuführen ist. Zudem sind sie häufig wasserundurchlässig. In der Folge wird Niederschlagswasser rasch abgeführt, sodass es nicht für die Verdunstung zur Verfügung steht. Dies führt zu einer Verringerung der Kühlwirkung durch Verdunstung. Zudem führt die Bauweise der Gebäude zu einer Vergrößerung der Fläche, auf der Wärme absorbiert wird. In der weiteren Folge wird die Temperatur in urbanen Gebieten durch die vertikalen Oberflächen der Gebäude beeinflusst, da diese sowohl direkte Sonneneinstrahlung als auch reflektierte Strahlung von anderen Gebäuden aufnehmen. [6] [7]

## 2.2 **Positive Effekte von Fassadenbegrünungen**

Um die Auswirkungen urbaner Hitzeinseln zu reduzieren, können Fassadenbegrünungen eine wirksame Maßnahme darstellen. Laut ÖNORM L1136:2021-04 bieten sie zahlreiche positive Effekte, die sowohl das Mikroklima verbessern als auch ökologische und städtebauliche Vorteile mit sich bringen.

Laut ÖNORM L1136:2021-04, S.4 beeinflussen Vertikalbegrünungen im Vergleich die Umwelt positiv, verglichen mit Bauwerken ohne zusätzliche Begrünungsmaßnahmen durch folgende Faktoren:

- *Verbesserung des Mikroklimas (erhöhte Verdunstung, Beschattung, Kühlung, Staubbindung, Taubildung usw.)*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- *Verbesserung der Aufenthaltsqualität im Nahbereich von Vertikalbegrünungen*
- *Aktivierung ungenutzter, urbaner Flächen als multifunktionale Oberflächen,*
- *Verbesserung des naturnahen Wasserhaushalts (Regenwassermanagement)*
- *Beitrag zur Entlastung der öffentlichen Kanalisation*
- *Erhöhung der Artenvielfalt*
- *Beschattung des Baukörpers*
- *Reduktion des Schallpegels*
- *Schutz des Baukörpers vor Umwelteinflüssen (z. B. Schlagregen, Sonneneinwirkung, Überhitzung, Energieflüsse)*
- *ökologischer Ausgleich von Grünflächenverlusten als Folge baulicher Maßnahmen*
- *geografische Lage und Exposition*

Die Vielzahl an Vorteilen verdeutlicht das Potenzial von Fassadenbegrünungen als integralen Bestandteil nachhaltiger urbaner Entwicklung. Im Kapitel 2.3 werden die unterschiedlichen Möglichkeiten der Umsetzung von Vertikalbegrünungen näher erläutert. [8]

## 2.3 Möglichkeiten der Vertikalbegrünung – Begrünungskategorien nach ÖNORM L 1136:2021-04

Bei Vertikalbegrünungen lassen sich verschiedene Kategorien unterscheiden, die je nach Nutzung, bautechnischen Anforderungen und Bauweise miteinander kombiniert werden können. Diese Kategorien variieren entsprechend den spezifischen Gegebenheiten und dem jeweiligen Konstruktionsansatz.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

### 2.3.1 Kategorie I: Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Selbstklimmern

Die bodengebundene Vertikalbegrünung mit Selbstklimmern bezeichnet die Anwendung von Kletterpflanzen zur Begrünung von Bauwerken und Fassaden, wobei das Wachstum der Pflanzen ohne zusätzliche Rankhilfen erfolgt. Der Wurzelbereich der Pflanzen befindet sich entweder im vorhandenen Erdreich oder im speziell für die Vertikalbegrünung vorbereiteten oder angepassten Substrat. Es ist essenziell, dass der Kontakt zwischen den Pflanzenwurzeln und dem Boden nahezu vollständig gegeben ist. Die Begrünungsfläche unterliegt in ihrer Größe und Form den Wuchsanforderungen der Kletterpflanzen sowie dem Volumen des Wurzelraums, der entsprechend dem Begrünungsziel dimensioniert werden muss. Zudem muss die Vegetationstragschicht den Anforderungen der ÖNORM L 1210 entsprechen.

Für die angestrebte Form der Vertikalbegrünung ist der Einsatz von selbstklimmenden Kletterpflanzen erforderlich, wobei der angestrebte Deckungsgrad der begrünten Struktur im Laufe der Jahre, abhängig von der gewählten Pflanzenart und dem festgelegten Begrünungsziel, erreicht wird. Um das gewünschte Begrünungsergebnis zu erzielen, ist es notwendig, das Wachstum der Pflanzen durch regelmäßige Pflege oder technische Maßnahmen zu steuern.

In dieser Kategorie finden im Projekt keine Pflanzen Anwendung, da alle eingesetzten Arten Rankhilfen oder spezielle Unterstützungssysteme benötigen. [8]

### 2.3.2 Kategorie II: Bodengebundene Vertikalbegrünung mit Rankhilfen und Kletterpflanzen

Die bodengebundene Vertikalbegrünung mit Rankhilfen bezeichnet die Bepflanzung von Bauwerken und Fassaden durch Kletterpflanzen, die zur Bewältigung der Schwerkraft auf eine Rankhilfe angewiesen sind. Der Wurzelraum der Pflanzen besteht aus dem vorhandenen Erdreich oder einem speziell für die Vertikalbegrünung vorbereiteten oder ausgetauschten Substrat. Dabei ist ein nahezu vollständiger Kontakt zum Boden erforderlich.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die spezifischen Wuchsformen der verwendeten Kletterpflanzen bedingen die Anpassung der Rankhilfen, um eine funktionale Begrünung zu gewährleisten. Die Auswahl der Rankhilfen bestimmt die zu begrünenden Bereiche und den Umfang der Fläche. Um das angestrebte Begrünungsziel zu erreichen, ist es notwendig, das Wachstum der Pflanzen sowohl durch die Auswahl geeigneter Gerüstkletterpflanzen als auch durch regelmäßige Pflege oder technische Maßnahmen zu steuern. Für die Realisierung dieser Form der Begrünung sind ausschließlich Gerüstkletterpflanzen geeignet.

Der angestrebte Deckungsgrad der Begrünung wird in der Regel über mehrere Jahre hinweg erreicht, abhängig von der gewählten Pflanzenart und dem festgelegten Ziel der Begrünung.

In dieser Kategorie werden im Projekt Pflanzen wie das Immergrüne Geißblatt (Lonicera henryii), die Geißschlinge (Lonicera heckrottii), das Japanische Geißblatt (Lonicera japonica) und die Kletterrose (Rosa) eingesetzt, die durch ihre starke Wuchskraft und Rankfähigkeit ideal für die Nutzung von Rankhilfen geeignet sind. [8]

### 2.3.3 Kategorie III: Troggebundene Vertikalbegrünung

Die als "troggebundene Vertikalbegrünung" bezeichnete Form der Pflanzenverwendung umfasst die Bepflanzung von Bauwerken und Fassaden mit Kletterpflanzen, Stauden und Gehölzen, die in Pflanztrögen wurzeln und vertikal wachsen. In Abhängigkeit von der Selektion der Pflanzen erfolgt dies mit oder ohne zusätzliche Rankhilfe.

Troggebundene Vertikalbegrünungen sind separate Elemente und bilden keine hinterlüftete Fassade. Die Fläche, die begrünt wird, ist durch die Wuchshöhe und -form der verwendeten Pflanzen sowie das Volumen des durchwurzelbaren Raums im Trog begrenzt.

Der angestrebte Deckungsgrad der begrünten Struktur wird in der Regel über mehrere Jahre hinweg erreicht, wobei die tatsächliche Entwicklung von der Wahl der Pflanzenart und dem festgelegten Begrünungsziel abhängt. Um das gewünschte Begrünungsergebnis zu erzielen, ist eine regelmäßige Pflege oder

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

technische Bewirtschaftung unerlässlich, um das Wachstum der Pflanzen zu kontrollieren.

Für die trogbasierte Vertikalbegrünung werden im Projekt die Clematis-Arten wie die Clematis montana, die Clematis 'Roter Kardinal' sowie die Akebia quinata verwendet, die aufgrund ihrer Anpassungsfähigkeit in Pflanztrögen und ihrer Rankfähigkeit an vertikale Strukturen ideale Kandidaten darstellen. [8]

### 2.3.4 Kategorie IV: Wandgebundene Vertikalbegrünung mit teilflächigen Vegetationsträgern

Die wandgebundene Vertikalbegrünung mit teilflächigen Vegetationsträgern bezeichnet die Bepflanzung von Bauwerken und Fassaden, bei der die Pflanzen einen vollständig bodenunabhängigen Lebensraum finden. Der Wurzelraum der Pflanzen ist dabei auf eine teilflächige Vegetationstragschicht am Gebäude begrenzt. Die Begrünung erfolgt ohne direkte Bodenverbindung, wobei die Pflanzen sowohl ihre Wurzeln als auch ihre oberirdischen Teile ausschließlich am Baukörper entwickeln.

In der Regel fungiert das Begrünungssystem mit teilflächigen Vegetationsträgern als hinterlüftete Fassade. Der zu begrünende Bereich wird vollständig von den Systemkomponenten umschlossen, wobei der Pflanzenbewuchs als integraler Bestandteil des Systems betrachtet wird. Die Größe des Vegetationsträgers definiert dabei sowohl die Ausdehnung als auch den Umfang der Begrünung.

Die Vegetationsträger sind gleichmäßig auf der zu begrünenden Fläche zu verteilen, wobei in der Regel 50 %, mindestens jedoch 40 %, der Fläche bedeckt werden sollten. Die Begrünung muss je nach Jahreszeit sicherstellen, dass die Fläche zumindest über einen Zeitraum von sechs Monaten bedeckt ist.

Der angestrebte vollständige Deckungsgrad der Fläche gemäß dem Begrünungsziel wird in der Regel innerhalb von drei vollständigen Vegetationsperioden erreicht.

In dieser Kategorie kommen im Projekt keine der vorgesehenen Pflanzen zum Einsatz, da diese alle entweder bodengebundene Systeme oder Pflanztröge erfordern. [8]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 2.3.5 Kategorie V: Wandgebundene Vertikalbegrünung mit vollflächigen Vegetationsträgern

Die als wandgebundene Vertikalbegrünung bezeichnete Methode umfasst die Bepflanzung von Bauwerken und Fassaden, bei der die Pflanzen ihren gesamten Lebensraum, sowohl für die Wurzeln als auch für die oberirdischen Pflanzenteile, vollständig bodenunabhängig und direkt am Baukörper finden. Der Wurzelraum der Pflanzen ist dabei auf eine nahezu flächendeckende Vegetationstragschicht am Gebäude begrenzt.

In dieser Form der Begrünung wird das System typischerweise selbst zur hinterlüfteten Fassade. Der zu begrünende Bereich ist vollständig von den Systemkomponenten umschlossen, wobei der Pflanzenbewuchs als integraler Bestandteil des Systems betrachtet wird. Die Größe des Vegetationsträgers definiert dabei sowohl die maximale Ausdehnung als auch den Umfang der Begrünung. Die Gestaltung der Begrünung ist dahingehend zu gestalten, dass sie mindestens über einen Zeitraum von sechs Monaten pro Jahr die gesamte zu begrünende Fläche abdeckt.

In der Regel wird der vollständige Deckungsgrad der Fläche gemäß dem angestrebten Begrünungsziel innerhalb einer einzigen Vegetationsperiode erreicht. [8]

Für die vollflächige, wandgebundene Begrünung werden im Projekt keine der genannten Pflanzenarten verwendet, da diese vollständig boden- oder trogbasierte Lösungen bevorzugen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 3 Wissenschaftliche Vorarbeiten

Die im Folgenden dargestellten wissenschaftlichen Vorarbeiten bieten eine umfassende Grundlage für die Untersuchung der thermischen Auswirkungen von Fassadenbegrünungen sowie deren potenzielle Rolle in der städtischen Klimaanpassung. Sie umfassen sowohl empirische als auch simulationsbasierte Studien und behandeln verschiedene Aspekte der Begrünung, von deren direkter Kühlwirkung bis hin zu methodischen Herausforderungen bei der Modellierung und Validierung.

Ein besonderer Fokus liegt auf der Evaluation der Effekte von Fassadenbegrünungen auf das Mikroklima, die mit Hilfe langjähriger Messungen, Modellierungen und innovativer technischer Ansätze untersucht wurden. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass Fassadenbegrünungen ein vielseitiges Werkzeug zur Reduktion von Hitzeinseln und zur Verbesserung der Lebensqualität in urbanen Räumen darstellen.

Dieses Kapitel fasst bestehende Erkenntnisse zusammen und zeigt offene Fragen auf, die in dieser Arbeit behandelt werden. So wird eine Grundlage geschaffen, um die Ergebnisse im Kontext aktueller Forschung einzuordnen und ihre Relevanz für Wissenschaft und Praxis zu betonen.

## 3.1 N. Ribic Berbic „Evaluierung thermischer Auswirkungen von Fassadenbegrünung im historischen, renovierten Altbau“

Diese Arbeit baut auf dem gleichen Forschungsprojekt „Klimaresiliente Sanierungsmaßnahmen“ auf wie die vorliegende Untersuchung. Daher werden identische methodische Grundlagen angewandt, einschließlich der Art der Fassadenbegrünung, der eingesetzten Messtechnik und der grundlegenden Simulation. Im Rahmen dieser Studie wurden die Monitoring-Daten des ersten Jahres ausgewertet.

Die zentralen Forschungsfragen umfassen:

1. *„Welche thermischen Auswirkungen hat die Begrünung einer sanierten und wärmegedämmten Altbaufassade verglichen mit einer nicht begrünten?“*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

*2. „Wie groß sind die Abweichungen der Simulationsergebnisse im Vergleich zu den empirischen Daten?“*

*3. "Kann eine mathematische Korrelation zwischen den Simulationsergebnissen und den realen Messdaten formuliert werden?“*

Die Struktur dieser Arbeit wurde ähnlich gestaltet, um gut vergleichbare Ergebnisse für die anschließende Diskussion sicherzustellen. Die Ergebnisse werden fortlaufend verwendet, um die Messwerte des Jahres 2023 den Messwerten des Jahres 2024 gegenüberzustellen.

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit den thermischen Auswirkungen der Begrünung auf eine sanierte und wärmegedämmte Altbaufassade im Vergleich zu einer nicht begrünten Fassade. Die Ergebnisse zeigen, dass die Fassadenbegrünung signifikante thermische Vorteile bietet, wie z. B. eine Reduktion der Oberflächentemperaturen um bis zu 10 °C bei Tagesmaxima sowie geringere Temperaturschwankungen. Dies deutet darauf hin, dass die Begrünung eine effektive Verbesserungsmaßnahme zur lokalen Temperaturregulierung darstellt.

Die zweite Forschungsfrage untersucht die Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und empirischen Daten. Es wurden Unterschiede festgestellt, insbesondere in den Tagesmaxima, die mit zunehmender Höhe stärker ausfielen. Während die Simulation oft höhere Minimaltemperaturen annahm, zeigten die gemessenen Werte höhere Maxima im Vergleich mit den realen Wetterdaten, was auf direkte Sonneneinstrahlung zurückzuführen ist. Diese Diskrepanzen unterstreichen die Bedeutung von Vor-Ort-Messungen, um Simulationen zu validieren und deren Genauigkeit zu verbessern.

Die dritte Forschungsfrage untersucht, ob eine mathematische Korrelation zwischen den Simulationsergebnissen und den realen Messdaten formuliert werden kann. Aufgrund der unterschiedlichen Positionen der Messpunkte, Höhenvariationen und weiterer Einflussfaktoren konnte jedoch kein allgemeingültiger Korrelationsfaktor für die gesamte Fassade ermittelt werden. [9]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 3.2 A. Heinrich (2019) „Klimawandel und urbaner Hitzeinseleffekt: Potenziale und Herausforderungen der Fassadenbegrünung“

Diese Studie untersucht die vielfältigen Potenziale der Fassadenbegrünung, insbesondere deren klimatische Vorteile in urbanen Räumen, die stark vom Hitzeinseleffekt betroffen sind. Der Schwerpunkt liegt auf der Fähigkeit solcher Begrünungen, Oberflächentemperaturen signifikant zu reduzieren, die Luftqualität zu verbessern und somit zur Minderung der Auswirkungen des Klimawandels in Städten beizutragen. Die Arbeit zeigt, dass Fassadenbegrünungen durch die Verdunstungskühlung und Verschattung die Hitzeentwicklung an Gebäudefassaden effektiv minimieren können, was sowohl den Energieverbrauch als auch die thermische Belastung in Städten verringert.

Herausforderungen bei der Umsetzung werden ebenfalls beleuchtet, darunter wirtschaftliche Aspekte, technische Einschränkungen und ein mangelndes Bewusstsein für die Vorteile solcher Systeme bei planenden und investierenden Personen. Die Studie weist darauf hin, dass es an einheitlichen Planungsstrategien und Förderprogrammen fehlt, um die Integration von Fassadenbegrünungen zu beschleunigen. Zudem werden rechtliche und infrastrukturelle Hindernisse identifiziert, die eine breitere Anwendung begrenzen.

Abschließend werden konkrete Handlungsempfehlungen gegeben, um die Umsetzung in städtischen Gebieten zu fördern. Dazu gehören Anreize für Bauherren, die Förderung von Pilotprojekten und die stärkere Einbindung von Fassadenbegrünungen in städtische Klimaanpassungspläne. Die Studie liefert somit einen wertvollen Beitrag für die nachhaltige Stadtentwicklung und die Bekämpfung des urbanen Hitzeinseleffekts. [10]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 3.3 David Marx (2023): Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden auf das Innenraumklima

Die Arbeit von D. Marx analysiert detailliert die thermischen Effekte von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden und deren Einfluss auf das Innenraumklima. Mithilfe von Langzeitmessungen und Simulationsdaten wird gezeigt, dass die Begrünung von Fassaden die Oberflächentemperatur um bis zu 10 °C reduzieren kann. Diese Temperaturabsenkung trägt wesentlich zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen bei, insbesondere in sommerlichen Hochtemperaturphasen.

Ein zentraler Bestandteil der Arbeit ist der Vergleich von Simulationsergebnissen mit vor Ort erhobenen Daten. Die Simulationen bestätigen, dass die Begrünungen eine deutliche Energieeinsparung bewirken, indem sie die Kühlleistungen der Gebäude verringern. Neben den thermischen Effekten wird auch auf die ökologischen Vorteile eingegangen, etwa die Bindung von Feinstaub und die Erhöhung der Luftfeuchtigkeit, die zur Verbesserung des städtischen Mikroklimas beitragen.

Die Studie beschreibt praxisorientierte Anwendungsbeispiele, wie Fassadenbegrünungen nachträglich an Bestandsgebäuden installiert werden können, ohne die Bausubstanz zu gefährden. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei der Auswahl geeigneter Pflanzen, Substrate und Befestigungssysteme gewidmet. Die Ergebnisse sind von hoher Relevanz für Architekten, Bauherren und Stadtplaner, die nach effektiven Lösungen suchen, um den urbanen Hitzeinseleffekt zu mildern und die Energieeffizienz von Gebäuden zu steigern. [11]

## 3.4 Florian Teichmann (2024) „Validierung von Mikroklimasimulationen zur Quantifizierung der Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen“

Die Dissertation von Florian Teichmann beschäftigt sich mit der Validierung von Mikroklimasimulationen zur Quantifizierung der Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen. Im Zentrum steht die Frage, wie genau Simulationen sein müssen, um verlässliche Aussagen über die thermischen Effekte dieser Begrünungsmaßnahmen zu treffen, und ob sich Ergebnisse verschiedener

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Softwareansätze vergleichen lassen. Mit der Software *uhiSolver* wurden dynamische Simulationen durchgeführt, die auf vereinfachten Eingabedaten basieren. Ziel war es, die Eingabekomplexität zu reduzieren, ohne die Genauigkeit der Ergebnisse erheblich zu beeinträchtigen. Dabei zeigte sich, dass ein präziser, aber nicht übermäßig detaillierter Modellierungsansatz ausreichend ist, um lokale Mikroklimaeffekte zu bewerten.

Die Simulationsergebnisse zeigten, dass die Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen meist auf den direkten Nahbereich der begrünten Fassaden begrenzt bleibt. Dieser Effekt wird vor allem durch die Verdunstungskühlung und die Verschattung der Fassaden erzielt. In der Praxis bedeutet dies, dass der Nutzen solcher Begrünungsmaßnahmen stark von der Fassadenausrichtung, der Pflanzenart und den lokalen klimatischen Bedingungen abhängt. Eine hochdetaillierte Simulation ist daher nicht immer notwendig, insbesondere wenn der Fokus auf großflächigen Planungsentscheidungen liegt. Für präzise Aussagen über die unmittelbare Wirkung im Nahbereich, etwa an sensiblen Orten wie Schulhöfen, ist jedoch eine feinere Kalibrierung unerlässlich.

Ein wichtiger Aspekt der Arbeit war die Validierung der Simulationsergebnisse durch experimentelle Messungen vor Ort. Dabei traten Herausforderungen durch Messfehler auf, die insbesondere in sonnenexponierten Bereichen erhebliche Abweichungen verursachen können. Um die Zuverlässigkeit der Daten zu verbessern, wurde ein mechanisch belüfteter Strahlenschutzschirm entwickelt, der die Messgenauigkeit erheblich steigerte. Dies ist besonders wichtig, da Temperaturunterschiede durch Fassadenbegrünungen oft nur wenige Grad betragen und bereits kleine Fehler signifikante Auswirkungen auf die Validität der Simulation haben können.

Trotz der spezifischen Eigenschaften von *uhiSolver* können die Ergebnisse der Dissertation auch auf andere Software übertragen werden, da die grundlegenden Prinzipien der Mikroklimasimulation und deren Validierung universell anwendbar sind. Die Arbeit zeigt, dass die Genauigkeit einer Simulation nicht allein von der Detailtiefe der Eingabedaten abhängt, sondern auch von der Qualität der eingesetzten Messmethoden und der Kalibrierung der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Modelle. Simulationen sollten daher stets mit experimentellen Daten validiert werden, um eine fundierte Basis für die Integration von Begrünungsmaßnahmen in städtische Planungen zu schaffen.

Zusammenfassend beantwortet die Arbeit die Frage nach der notwendigen Genauigkeit mit einer pragmatischen Perspektive: Für viele Anwendungen ist eine moderate Detailtiefe ausreichend, um belastbare Aussagen über die Wirkung von Fassadenbegrünungen zu treffen. Eine präzise Validierung bleibt jedoch unverzichtbar, insbesondere wenn kleine Effekte untersucht oder die Ergebnisse als Grundlage für umfassende Planungsentscheidungen herangezogen werden sollen. [12]

### 3.5 Ileana Blanco, Evelia Schettini, Giuliano Vox „Predictive model of surface temperature difference between green facades and uncovered wall in Mediterranean climatic area"

Die Arbeit „Predictive model of surface temperature difference between green façades and uncovered wall in Mediterranean climatic area" untersucht, wie effizient ein Simulationsmodell zur Vorhersage der Temperaturdifferenzen zwischen begrünten und unbegrünten Fassaden in einem mediterranen Klima ist. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Validierung dieses Modells durch den Vergleich von gemessenen und simulierten Temperaturdaten.

Die Untersuchungen wurden in Bari, Italien, durchgeführt, wo zwei Fassaden mit immergrünen Kletterpflanzen (Pandorea jasminoides und Rhyncospermum jasminoides) sowie eine unbegrünte Kontrollwand über zwei Sommer (2015 und 2016) analysiert wurden. Ein Modell wurde entwickelt, um die Differenz der Oberflächentemperatur der Wände zu simulieren. Dabei wurden Klimadaten wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, horizontale und vertikale Solarstrahlung sowie Windgeschwindigkeit und -richtung als Einflussgrößen verwendet. [13]

Die Validierung des Modells erfolgte, indem die Temperaturdifferenzen der real gemessenen Werte aus dem Sommer 2016 mit den durch das Modell simulierten Werten verglichen wurden. Dabei erzielte das Modell Bestimmtheitskoeffizienten ($R^2$) von über 0,95, was auf eine hohe Vorhersagegenauigkeit hinweist. Die mittlere quadratische Abweichung lag

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

zwischen 0,4 °C und 0,6 °C. Die maximale Temperaturreduktion durch die grünen Fassaden betrug bis zu 7,7 °C im Vergleich zur Kontrollwand. [14]

Besonders während der stärksten Solarstrahlung (> 200 W/m²) wurde eine deutliche Absenkung der Wandtemperatur festgestellt, wobei die maximale Temperatur der begrünten Wände zeitlich verzögert erreicht wurde. Diese Ergebnisse bestätigen die isolierenden und kühlenden Effekte der grünen Fassaden. Das entwickelte Modell hat zudem den Vorteil, dass keine detaillierten Pflanzenparameter benötigt werden, was es zu einem praktikablen Werkzeug für die Planung energieeffizienter Gebäude in mediterranen Klimazonen macht. [15]

Im Vergleich zu ingenieurwissenschaftlichen Modellen, die oft detaillierte Informationen über Pflanzenmerkmale erfordern, zeigt das hier verwendete statistische Modell durch die alleinige Nutzung von Klimadaten hohe Effizienz. Die Forschung hebt hervor, dass statistische Modelle eine geeignete Alternative in der frühen Planungsphase darstellen und durch ihren geringen Rechenaufwand praktische Vorteile bieten. [16]

### 3.6 M. Potyka, M. Groth, M. Quante, S. Bender (2022) „Die Wirkung von Begrünungskonzepten auf das Mikroklima an hitzebelasteten Standorten Lüneburgs“

Diese Arbeit widmet sich der Untersuchung von Begrünungskonzepten in stark hitzebelasteten urbanen Gebieten, insbesondere in der Stadt Lüneburg. Die Autoren analysieren anhand von Modellierungen und Langzeitmessungen die Auswirkungen von Fassaden- und Dachbegrünungen auf das städtische Mikroklima. Die Ergebnisse zeigen, dass die Begrünung die Temperatur und Luftfeuchtigkeit signifikant regulieren kann.

Ein Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Identifikation optimaler Begrünungsstrategien für urbane Standorte. Die Autoren betonen die Bedeutung einer sorgfältigen Planung, um maximale Effekte zu erzielen. Beispielsweise wird dargelegt, dass die Wahl geeigneter Pflanzen und Substrate entscheidend ist, um sowohl die thermischen als auch die ökologischen Vorteile der Begrünung zu maximieren.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Arbeit hebt hervor, dass Begrünungskonzepte nicht nur das Mikroklima verbessern, sondern auch soziale und ästhetische Vorteile bieten. Begrünte Fassaden tragen zur Steigerung der Lebensqualität in Städten bei, indem sie Aufenthaltsräume kühlen, die Luftqualität erhöhen und städtebauliche Akzente setzen. Abschließend empfehlen die Autoren die systematische Integration solcher Konzepte in städtische Entwicklungspläne, um die positiven Effekte langfristig zu sichern. [17]

### 3.7 K. Rehfeldt, T. Zölch, S. Erlwein, S. Pauleit, S. Linke (2024) „Potenziale und Wirkungen grüner Infrastruktur für Klimaresilienz“

Diese Forschung beleuchtet die Rolle grüner Infrastrukturen, einschließlich Fassadenbegrünungen, als zentralen Bestandteil klimaresilienter Städte. Am Beispiel von Münchner Stadtquartieren wird untersucht, wie Begrünungen zur Verbesserung der Luftqualität, Temperaturstabilität und Wasserregulierung beitragen können.

Ein wesentlicher Aspekt der Arbeit ist die Analyse der Synergien zwischen verschiedenen grünen Infrastrukturelementen. Fassadenbegrünungen werden als multifunktionale Elemente dargestellt, die nicht nur das lokale Klima positiv beeinflussen, sondern auch ökologische Vorteile bieten, etwa durch die Förderung der Biodiversität.

Die Autoren stellen konkrete Empfehlungen für die Implementierung solcher Maßnahmen vor. Dazu zählen die Anpassung städtischer Bauvorschriften, die Förderung öffentlicher und privater Begrünungsprojekte sowie die Bereitstellung finanzieller Anreize. Die Studie liefert wertvolle Einblicke in die langfristigen Potenziale von Fassadenbegrünungen und deren Bedeutung für nachhaltige Stadtentwicklung. [18]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

# 4 Methodik

In der vorliegenden Arbeit werden zur Untersuchung der thermischen Effekte von Fassadenbegrünungen bei der Gebäudesanierung zwei verschiedene Ansätze umfassend untersucht. Der erste Ansatz basiert auf thermischen Gebäudesimulationen, die mit spezieller Software durchgeführt wurden, während der zweite Ansatz auf Langzeitmessungen der mikroklimatischen Einflüsse von Kletterpflanzensystemen sowie der anschließenden Auswertung der vor Ort gesammelten Daten beruht. Die Methodik dieser Untersuchung umfasst einen systematischen Vergleich der beiden Ansätze, wodurch eine fundierte Grundlage zur Bewertung der thermischen Einflüsse von begrünten Fassaden geschaffen wird. Andererseits liegt der Schwerpunkt auf der zeitlichen Veränderung, die durch das Wachstum der Fassadenbegrünung bedingt ist, und einem Vergleich der erzielten Daten.

Die Beschreibung des Simulationsverfahrens wurde aus einem Bericht von iC consulenten entnommen. Die bereits durchgeführten Analysen der thermischen Simulationen liefern zudem Erkenntnisse über ein Basismodell ohne Berücksichtigung der Begrünung. Die Ergebnisse beinhalten eine Analyse des Heiz- und Kühlenergiebedarfs sowie der daraus resultierenden Gesamtenergieeinsparungspotenziale. Allerdings ist zu betonen, dass der Fokus dieser Arbeit nicht auf den Energie- und Kosteneinsparungen liegt. Dies liegt daran, dass die Energie- und Kosteneinsparungen maßgeblich vom U-Wert des Gebäudes und somit von den einzelnen Bauteilen, insbesondere der Dämmung, abhängen und diese bereits in der Simulation behandelt werden.

Vielmehr wird auf die bereits festgelegten Rahmenbedingungen eingegangen, wobei den Wetterdaten besondere Bedeutung zukommt. Mithilfe der Simulationssoftware werden wichtige Parameter wie Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit und Oberflächentemperatur in den relevanten Bereichen simuliert, welche als Grundlage für den anschließenden Datenvergleich dienen. Der Datenvergleich aus dem ersten Messjahr liegt bereits vor, die beiden Messjahre werden miteinander verglichen.

Des Weiteren wird die vor Ort durchgeführte Messtechnik präzise beschrieben. Dies umfasst Angaben zu den verwendeten Fassadensystemen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

und Begrünungsarten. Aus den Temperaturmessungen, die mittels direkt an der Fassade angebrachter Sensoren erfasst wurden, werden Oberflächentemperaturen unter Berücksichtigung verschiedener Zeiträume analysiert. Diese Methode ermöglicht eine detaillierte Untersuchung der temperaturbedingten Veränderungen an der Fassade und trägt zur Gewinnung relevanter Erkenntnisse bei.

Die Ergebnisse der Simulationen und der Vor-Ort-Messungen des zweiten Messjahres werden anschließend verglichen. Es wird zudem untersucht, inwieweit die realen Messergebnisse von den Simulationsergebnissen abweichen. Der Vergleich der Temperaturdifferenzen bietet wertvolle Hinweise darauf, in welchem Umfang Fassadenbegrünungen in das ursprüngliche Modell integriert werden können. Diese Erkenntnisse könnten zukünftig als Basis für eine effiziente Modellierung und Simulation von Gebäuden mit Begrünung dienen.

Die Methodik wird in chronologischer Reihenfolge dargestellt, um den schrittweisen Aufbau und die Entwicklung der Untersuchung nachzuvollziehen. In den folgenden Kapiteln werden tiefergehende Analysen und detaillierte Erläuterungen der Methodik präsentiert.

## 4.1 **Grundlagen des Projekts**

Das Gebäude am Schwarzenbergplatz 13 (siehe Abb. 1 – gekennzeichnet mit rotem Marker), gelegen im vierten Wiener Gemeindebezirk, wurde im Jahr 1905 errichtet und umfasst sieben Stockwerke, von denen sich ein Teil unterirdisch befindet. Es wird primär für gewerbliche Zwecke genutzt und dient als Bürogebäude.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

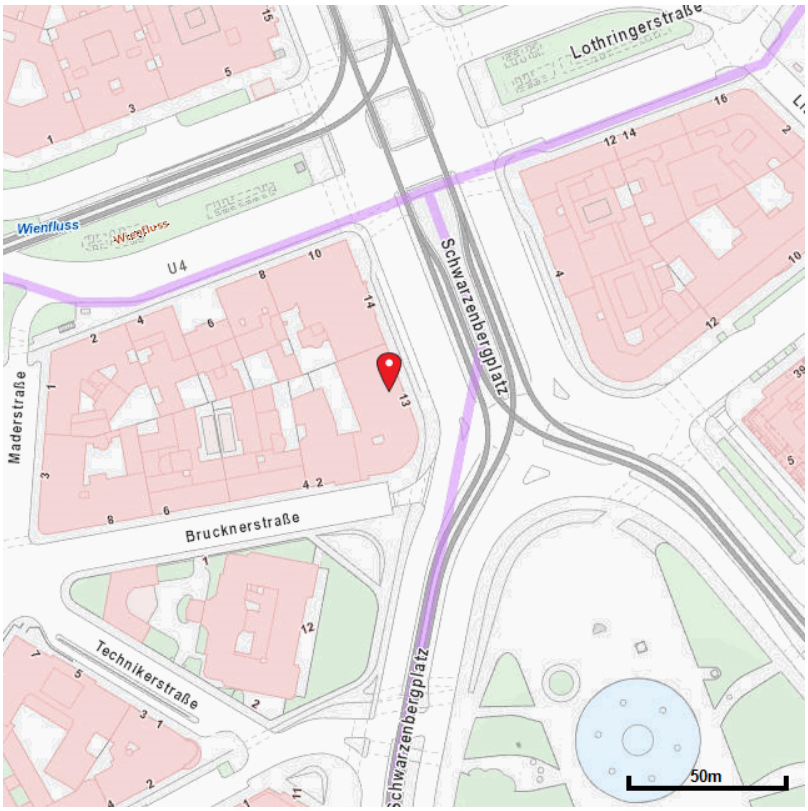


Abb. 1: Ausschnitt Stadtplan (Quelle: www.wien.gv.at)

Das Gebäude wurde umfassend renoviert. Eine vollständige Sanierung wurde durchgeführt, wobei das Dachgeschoss nach aktuellen technischen Standards neu aufgebaut wurde. Der Neubau erfolgt in einer Mischbauweise: Die hofseitige Dachkonstruktion besteht aus Stahlbeton, während die straßenseitige Konstruktion in Leichtbauweise ausgeführt ist. Die verbauten transparenten Elemente wurden mit wärmeisolierenden Isolierverglasungen ausgestattet, wobei an der Straßenseite elektrochromes Glas zum Einsatz kommt. Der Sonnenschutz wird automatisch gesteuert, basierend auf Sonnenstrahlung und Tageslicht. Die Innenwände wurden in Trockenbauweise errichtet, und an der Fassade des Innenhofs wurde ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aus Mineralwolle angebracht. Die Außenwand im Innenhof hatte im Bestand folgenden Aufbau: 1,5 cm Innenputz aus Kalk-Zement, 60 cm Vollziegelmauerwerk und 2 cm Außenputz. Im Zuge der Sanierung wurde dieser Aufbau folgendermaßen erweitert: Eine 16 cm starke mineralische Putzträgerplatte wurde ergänzt, gefolgt von einem 0,7 cm dicken, armierten Silikatputz. Da der methodische Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Untersuchung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

der Innenhoffassade und dem daran befestigten Fassadensystem mit Kletterpflanzen liegt, insbesondere im Hinblick auf deren thermische Wirkung, werden andere Gebäudeteile und Systeme nicht näher betrachtet.

## 4.2 **Grundlegende Annahmen der Simulation**

Im Jahr 2021 wurde das Unternehmen iC consulenten damit beauftragt, eine Gebäudesimulation für das betreffende Projekt durchzuführen. Zu diesem Zweck wurde ein Basismodell ohne Begrünung erstellt, dessen Ergebnisse anschließend analysiert wurden. Für die Simulation kam die Software IDA-ICE des schwedischen Unternehmens EQUA zum Einsatz. IDA-ICE ist eine fortschrittliche und bewährte Simulationssoftware, die eine detaillierte, dynamische und interdisziplinäre Analyse des Raumklimas sowie des Energieverbrauchs sowohl von ganzen Gebäuden als auch von einzelnen Gebäudeteilen ermöglicht. Die physikalischen Modelle der Software basieren auf dem neuesten Stand der Technik und liefern realitätsnahe Ergebnisse, die durch eine hohe Übereinstimmung mit gemessenen Daten validiert wurden. Die Verifikation des Programms erfolgte nach den CEN-Normen EN 15255 und EN 15265. Für die Bestimmung des thermischen Verhaltens eines Gebäudes und des Innenraumklimas werden spezielle Klimadaten verwendet, die den durchschnittlichen jährlichen Wetterverlauf sowie extreme Wetterbedingungen am jeweiligen Standort repräsentieren.

Die räumliche Geometrie des Bauprojekts wurde mithilfe des Simulationsprogramms dreidimensional modelliert, basierend auf den vorhandenen Architekturplänen, siehe Abb. 2. Dabei wurde die tatsächliche Ausrichtung des Gebäudes, die geographische Lage sowie die klimatischen Bedingungen des Standorts in die Modellierung einbezogen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

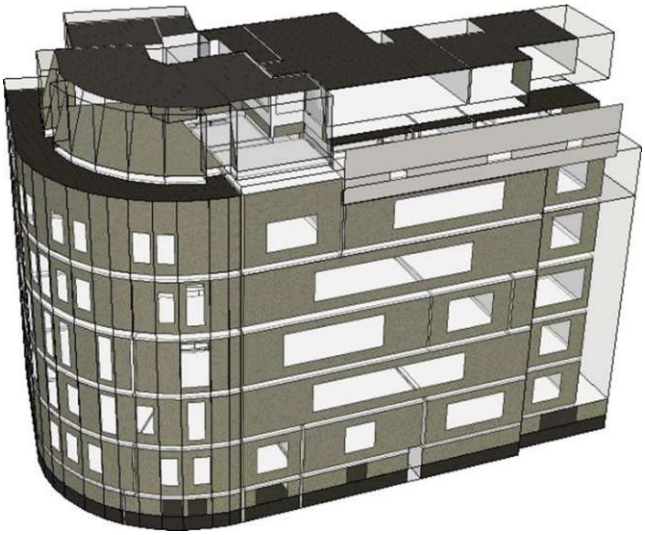

Abb. 2: Vogelperspektive des Simulationsmodells - Ansicht Ost © iC consulenten

Das erstellte Modell umfasste drei unterschiedliche Zonengrenzen:

a) Zone nach außen: Die Zone steht in Austausch mit dem Außenklima. Wärmetransport und Wärmespeicherung wird in beide Richtungen berücksichtigt.

b) Zone zu Zone: Die Zonen stehen im Austausch miteinander. Wärmetransport und Wärmespeicherung wird in beide Richtungen berücksichtigt.

c) Zone zu nicht untersuchten Bereichen innerhalb des Gebäudes: Die Zone steht in keinem Wärmeaustausch mit dem angrenzenden Bereich. Die Wärmespeicherung der Zonenbauteile wird jedoch berücksichtigt. Physikalisch verhält sich die Zonengrenze so, als ob die Nachbarzone idente Temperaturen aufweist (adiabatisch). Hierbei handelt es sich um einen simulationstechnisch üblichen Ansatz.

In der folgenden Abb. 3 ist die Einteilung des simulierten Gebäudes in die jeweiligen Zonen sichtbar. Dabei werden zur besseren Übersicht für alle Geschosse einzelne Schnitte dargestellt, dadurch sind alle bearbeiteten Räumlichkeiten abgebildet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

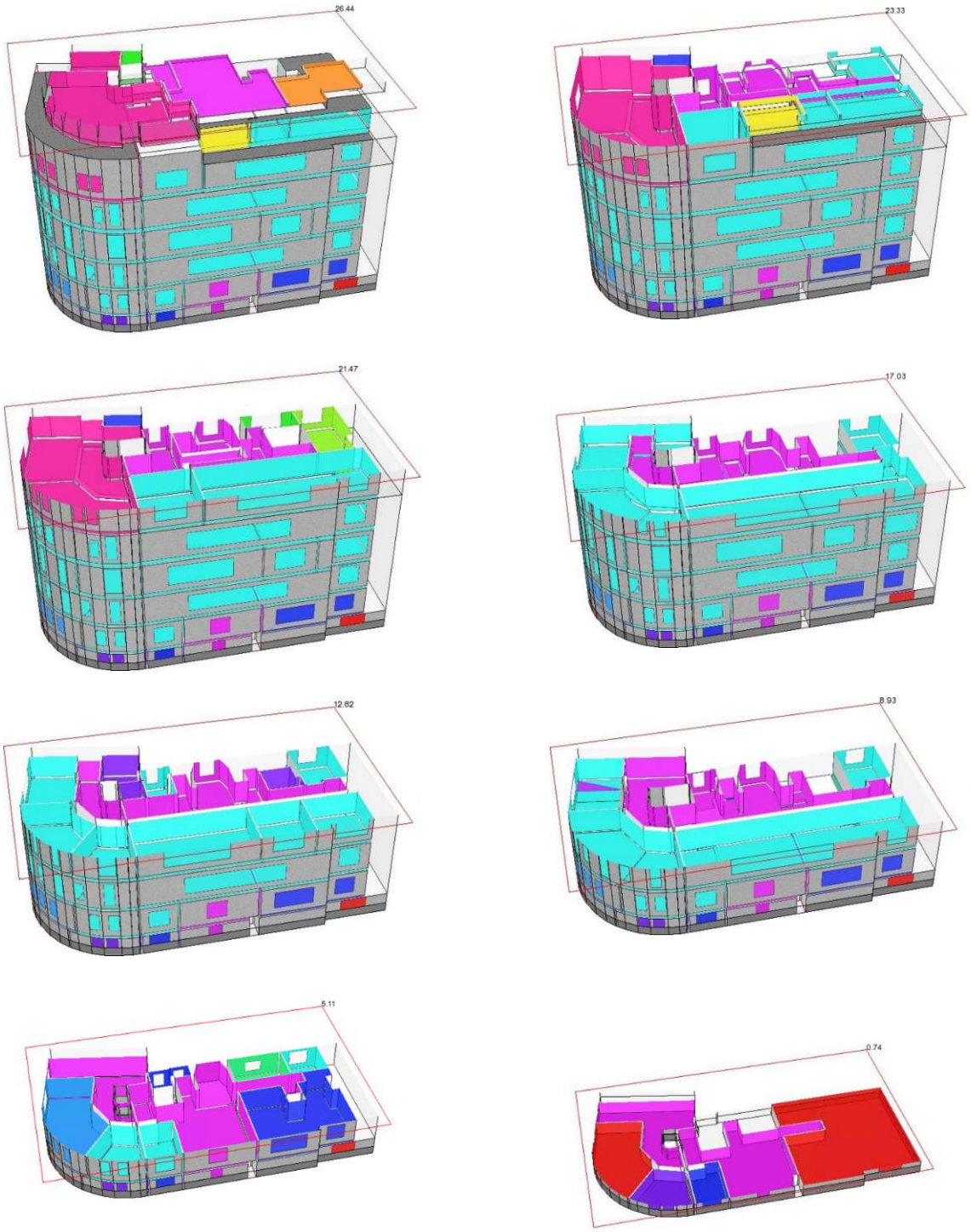


Abb. 3: Simulationsmodell - Zonengruppierungen © iC consulenten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die erste Grenze ermöglicht den Austausch mit dem Außenklima, wobei sowohl die Wärmeübertragung in beide Richtungen als auch die Wärmespeicherung berücksichtigt werden. Die zweite Grenze beschreibt die Wärmeübertragung zwischen den Zonen, wobei ebenfalls die Wärmespeicherung und der bidirektionale Wärmetransport berücksichtigt werden. Die dritte Grenze trennt die Zone von nicht untersuchten Bereichen im Gebäude ab, um einen direkten Wärmeaustausch zu verhindern. Dabei wurde jedoch die Wärmespeicherung der Gebäudeteile innerhalb der Zone berücksichtigt, und es wurde ein adiabatischer Zustand simuliert, wobei angenommen wurde, dass angrenzende Zonen identische Temperaturen aufweisen. Dieser Ansatz entspricht gängigen Simulationsmethoden.

## 4.3 **Randbedingungen**

Die Gebäudesimulation berücksichtigte verschiedene Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen. Dazu zählte die Sanierung der Hoffassade, bei der eine 20 cm dicke Wärmedämmschicht aus Mineralwolle verwendet wurde. Darüber hinaus wurde ein außenliegender Sonnenschutz integriert, der aktiviert wird, sobald die solare Einstrahlung auf die Fensterfläche 140 W/m² erreicht. Dies führt zu einem Verschattungsfaktor von 0,14. Zusätzlich wurden schräge Bauteile mit elektrochromem Glas simuliert, welches einen Verschattungsfaktor von 0,16 aufweist und bei Aktivierung den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) von 0,37 auf 0,06 verändert.

Die Infiltration durch Außenluft wurde mittels eines n50-Wertes beschrieben, welcher Undichtigkeiten in der Gebäudehülle berücksichtigt. Es fand keine natürliche Fensterlüftung statt; stattdessen kam eine CO2-gesteuerte, mechanische Lüftungsanlage zum Einsatz. Diese Anlage hat eine maximale Luftstromkapazität von 12.480 m³/h und liefert pro Person 35 m³/h Frischluft. Es wurde angenommen, dass die Lüftung an Wochenenden sowie außerhalb der Betriebszeiten (18:00 bis 07:00 Uhr) nicht in Betrieb ist. Die Zulufttemperaturen betrugen im Sommer 18°C und im Winter 22°C, wobei die Wärmerückgewinnung durch einen Rotationswärmetauscher erfolgte. Die Außenluft hatte eine CO2-Konzentration von 400 ppm.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Beheizung und Kühlung der Räume erfolgte hauptsächlich über Bodenkonvektoren mit mechanischer Unterstützung. Die benötigte Heizenergie wurde aus dem Wiener Fernwärmenetz bezogen, während die Kühlung über eine hocheffiziente Kältemaschine bereitgestellt wurde. Die Nutzung des Gebäudes orientierte sich an den Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagenplänen sowie an den Angaben zur Ausstattung für etwa 300 Personen. Bei der Simulation wurde auch die Abwärme von elektrischen Geräten berücksichtigt, mit 150 W pro Arbeitsplatz in Büros, 600 W für Projektoren oder Bildschirme, 10 W pro Person in Besprechungsräumen und 1,5 W/m² für weitere Geräte im gesamten Gebäude. Die Beleuchtung betrug 7 W/m² für Büros, Besprechungsräume, Kantine, Küche und Mehrzweckräume, sowie 4 W/m² für Verkehrsflächen und Sanitäranlagen. Für Nebenräume galten keine speziellen Beleuchtungsvorgaben.

In Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden verschiedene Szenarien untersucht. Die Variante „B00 (Basis)“ repräsentierte eine 100-prozentige Belegung des Gebäudes mit Zieltemperaturen von 22°C im Sommer und 26°C im Winter. Die Variante „B01 (Kalibrierung)“ diente der Kalibrierung des Simulationsmodells und dem Vergleich mit Heiz- und Kühllastberechnungen. Unter der Bezeichnung „V01 (Variante 1)“ wurde ein Szenario mit einer Auslastung von 30 % und Zieltemperaturen von 26°C im Sommer und 22°C im Winter untersucht.

Die Warmwasserversorgung sowie die Fördertechnik (Aufzüge und Rolltreppen) sind nicht Gegenstand der Simulation.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Rahmenbedingungen dienen als Hintergrundinformationen für die vorliegende Arbeit.

## 4.4 **Fassadenbegrünung**

### 4.4.1 Trogsystem

Das eingesetzte Fassadenbegrünungssystem setzt sich aus wandmontierten Trögen zusammen, in denen Kletterpflanzen platziert sind. Diese Pflanzen wurden in kleinere Pflanzbehälter mit integrierten Kletterhilfen eingesetzt (siehe Abb. 4).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abb. 4: Trogsystem ©Sebastian Rosenberger

Laut Angaben des Auftragnehmers waren für die Installation des Fassadenbegrünungssystems keine speziellen baulichen Anforderungen, Montagevorschriften oder Genehmigungsverfahren erforderlich. Die Befestigung der Pflanztröge erfolgt in einer Weise, dass die statische Stabilität der gesamten Konstruktion gewährleistet ist. Nach einem erfolgreichen Auszugsversuch erfolgte die Fixierung der Rinnen mittels Edelstahl-Gewindestangen an der Wand. Die Befestigungselemente sind derart konstruiert, dass sie unsichtbar bleiben und somit die ästhetische Wirkung der Fassade nicht beeinträchtigt wird. Die Anzahl der erforderlichen Befestigungselemente ist von der jeweiligen Fassadenkonstruktion sowie den statischen Erfordernissen abhängig. Um die Lastaufnahmefähigkeit der Fassade zu gewährleisten, wurden entsprechende statische Berechnungen durchgeführt. Wärmebrücken wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht berücksichtigt. [19]

Die in Abb. 4: Trogsystem ©Sebastian Rosenberger dargestellten Tröge weisen eine Querschnittsbreite von 400 mm sowie eine Höhe von 300 mm auf. Die Einzellänge der Tröge beträgt jeweils 2500 mm. Die Herstellung erfolgte unter Verwendung einer AlMg3-Aluminiumlegierung, welche sich durch eine mittlere Festigkeit auszeichnet und sich gleichzeitig gut umformen und schweißen lässt. Es sei insbesondere auf die exzellente Resistenz gegenüber Korrosion der Legierung hingewiesen, insbesondere gegenüber Salzwasser.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Aufgrund dieser Eigenschaften findet AlMg3 bevorzugt Verwendung in Bereichen, in denen die Anforderungen an die mechanische Festigkeit relativ gering sind. Sowohl die Tröge als auch ihre Befestigungen sind wartungsfrei. [20]

In den Trögen sind Schläuche für die Bewässerung verlegt. Das verwendete System für die Bewässerung ist das HUNTER Pro HC.

### 4.4.2 Substrat

Das für die Fassadenbegrünung ausgewählte Substrat „Optigrün Intensivsubstrat I - Leicht“ zeichnet sich durch eine hohe Wasserspeicherkapazität und eine stabile Struktur aus, die das Pflanzenwachstum fördert. Die Zusammensetzung besteht im Wesentlichen aus Blähschiefer, Blähton, Lava, Bims, Ziegelsplitt, Perlit und Grünschnittkompost (vgl. Optigrün, Produktinformation). [21]

Die Dichte des Substrats beträgt im verdichteten Zustand mindestens 830 kg/m³ (leichte Variante) bzw. 1.000 kg/m³ (schwere Variante), während sie im wassergesättigten Zustand zwischen 1.300 und 1.560 kg/m³ liegt. Die maximale Wasserspeicherkapazität beträgt mindestens 45 Volumenprozent. [21]

## 4.5 **Pflanzen**

Die Fassadenbegrünung des Gebäudes erstreckt sich vom Hochparterre bis zum ersten Obergeschoss und findet ihre Fortsetzung auf den Balkonen der darüberliegenden Stockwerke im zweiten und dritten Obergeschoss. Im Bereich des Hochparterres sowie des ersten Obergeschosses erfolgte eine Anordnung der Kletterpflanzen in zwei versetzten Trogreihen, wobei sie jeweils ein Stockwerk in die Höhe ragt.

Bei der Auswahl der Pflanzen wurde insbesondere darauf geachtet, dass diese an die örtlichen Klimabedingungen angepasst sind. Für die westlich ausgerichtete Fassade wurde die Verwendung selbstklimmender Pflanzenarten wie Kletterhortensien und Wildreben präferiert, da diese in der Lage sind, sich ohne zusätzliche Kletterhilfen an den Oberflächen zu verankern. Auf Wunsch des

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Bauherrn wurden bei den Balkonen im zweiten und dritten Stock Kletterrosen und Fingerblättrige Akebien gepflanzt.

Die Lage des Gebäudes innerhalb eines Innenhofs bedingt eine Einschränkung der Lichtverhältnisse, insbesondere in den unteren Etagen, was zu einer hohen Schattenwirkung führt. Dies machte die Verwendung von schattentoleranten Pflanzen in den unteren Bereichen der Begrünung erforderlich, wobei dennoch auf die individuellen Vorstellungen des Auftraggebers Rücksicht genommen wurde.

Abb. 5: Wandgebundene Tröge mit Kletterpflanzen @Sebastian Rosenberger

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die schematische Darstellung der Pflanzanordnung ist in Abb. 6 zu sehen. Die Fassadenbegrünung im Bereich des Mezzanins und des ersten Obergeschosses besteht überwiegend aus verschiedenen Arten der Geißblattgattung (Lonicera), darunter Lonicera henryii, Lonicera heckrottii und Lonicera japonica. Im Mezzanin wurden darüber hinaus weitere Kletterpflanzenarten integriert, insbesondere Clematis alpina 'Francis Rivis', Clematis 'Roter Kardinal' und Clematis montana.

Abb. 6: Bepflanzungsplan Fassadenbegrünung © FRICKE Gründächer und Gartengestaltung

### 4.5.1 Immergrünes Geißblatt - Lonica henryii

Die Lonicera henryii ist ein immergrünes bis halbimmergrünes Klettergehölz, das Höhen von drei bis fünf Metern erreicht. Mit ihrer Fähigkeit, sich rasch an Rankhilfen emporzuwinden, eignet sie sich hervorragend für die Begrünung von Wänden und Zäunen. Die Pflanze bevorzugt halbschattige bis sonnige Standorte und gedeiht am besten in humosem, lockerem Boden, der mäßig feucht gehalten wird. Ein regelmäßiger Rückschnitt im späten Winter fördert die Verzweigung und Blütenbildung. [22]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

### 4.5.2 Geißblatt / Geißschlinge - Lonicera heckrottii

Diese halbimmergrüne Geißblatt-Art zeichnet sich durch ihr starkes Wachstum und ihre dekorativen, duftenden Blüten aus, die von Juni bis September erscheinen. Lonicera heckrottii erreicht eine Höhe von bis zu vier Metern und klettert durch Windung der Triebe. Sie bevorzugt sonnige bis halbschattige Standorte und benötigt nährstoffreiche, gut durchlässige Böden. Ein gelegentlicher Rückschnitt fördert die Vitalität der Pflanze. [23] [24]

### 4.5.3 Japanisches Geißblatt - Lonicera japonica

Das Lonicera japonica ist eine schnellwachsende, halbimmergrüne bis immergrüne Kletterpflanze, die eine Höhe von fünf bis zehn Metern erreichen kann. Ihre stark duftenden Blüten, die von Juni bis September blühen, sind ein besonderer Vorteil. Sie bevorzugt sonnige bis halbschattige Standorte und gedeiht in einer Vielzahl von Böden, solange diese gut durchlässig sind. Regelmäßige Rückschnitte fördern die Verzweigung und dichten Wuchs. [22] [25]

### 4.5.4 Alpen Waldrebe - Clemantis alpina

Die Clematis alpina 'Frances Rivis' ist eine frühblühende Sorte, die im Frühjahr durch ihre hellblauen Blüten besticht. Mit einer Höhe von zwei bis drei Metern ist sie ideal für kleinere Fassaden geeignet. Diese Pflanze bevorzugt einen kühlen, schattigen Wurzelbereich und sonnige Triebspitzen. Sie gedeiht in durchlässigen, humosen Böden und benötigt nur einen leichten Rückschnitt nach der Blüte. [24] [25]

### 4.5.5 Clematis montana (Berg-Waldrebe)

Die Clematis montana ist eine starkwüchsige und blühfreudige Kletterpflanze, die Höhen von bis zu acht Metern erreichen kann. Ihre kleinen, weiß bis rosafarbenen Blüten erscheinen im Frühjahr und verleihen der Pflanze einen zarten Charme. Sie bevorzugt sonnige bis halbschattige Standorte und humose,

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

feuchte Böden. Rückschnitte sind selten erforderlich, es sei denn, die Pflanze muss in Form gehalten werden. [26]

### 4.5.6 Clematis 'Roter Kardinal'

Die Clematis 'Roter Kardinal' gehört zu den großblumigen Clematis-Sorten und beeindruckt mit tiefroten Blüten, die von Juni bis August erscheinen. Mit einer Wuchshöhe von drei bis vier Metern klettert sie an Rankhilfen und eignet sich hervorragend für sonnige bis halbschattige Standorte. Ein humoser, nährstoffreicher Boden sowie ein regelmäßiger Rückschnitt im Frühjahr sind essenziell für ihr Wachstum. [24] [27]

### 4.5.7 Kletterrose (Rosa)

Kletterrosen sind klassische Pflanzen für Fassadenbegrünung, die mit ihren prächtigen Blüten in verschiedenen Farben bestechen. Je nach Sorte können sie Höhen von zwei bis sechs Metern erreichen. Sie benötigen eine stabile Rankhilfe, da sie keine eigenständige Kletterfähigkeit besitzen. Sonnige Standorte und nährstoffreiche, gut durchlässige Böden sind ideal. Regelmäßiger Schnitt sorgt für eine üppige Blüte und verhindert Verkahlung. [26] [28]

### 4.5.8 Akebia quinata (Fünfblättrige Akebie)

Die Akebia quinata ist eine schnellwachsende, halbimmergrüne Kletterpflanze, die bis zu zehn Meter hoch klettern kann. Sie besticht durch ihre zierenden, purpurfarbenen Blüten im Frühjahr und ihre ungewöhnlichen, gurkenähnlichen Früchte im Herbst. Diese Pflanze bevorzugt sonnige bis halbschattige Standorte und durchlässige, humose Böden. Rückschnitte sind selten notwendig, können aber nach Bedarf durchgeführt werden. [22] [24]

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

## 4.6 **Wachstum – Entwicklung der Bepflanzung in einem Jahr**

### 4.6.1 Messung des Deckungsgrads

Nach ÖNORM L 1136:2021-04, S.15 gilt Folgendes:

> *Ein theoretischer Deckungsgrad von 100 % bedeutet, dass die zu begrünende Fläche projektiv vollständig mit Pflanzenmasse bedeckt und die darunterliegende Struktur optisch nicht mehr zu erkennen ist. Als Methode ist eine optische Projektion (Bildaufnahme, Foto) aus möglichst großer Entfernung mit möglichst geringer optischer Verzerrung zu wählen. Die Projektion ist im Regelfall mittels einer Aufnahme vom Boden aus durchzuführen. Der Deckungsgrad muss im voll belaubten Zustand gemessen werden.*

Aufgrund der baulichen Situation des Innenhofes sind keine Aufnahmen der Fassade aus großer Distanz mit geringen Verzerrungen möglich. Daher kann der Deckungsgrad nur anhand von Fotos optisch abgeschätzt werden. Für künftige Forschungsprojekte wäre es sinnvoll, diesen Punkt Beachtung zu schenken und eventuell ein optisches Monitoringsystem mittels Kameras für den Wachstum der Pflanzen in der Planung mitberücksichtigen.

Abb. 7: Aufnahme September 2023
@Nejra Ribic Berbic

Abb. 8: Aufnahme September 2024
@Sebastian Rosenberger

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 4.7 Messeinrichtungen und Monitoring

Die folgende Abb. 9 zeigt einen detaillierten Schnittplan der Wandkonstruktion, an der Sensoren sowie ein Fassadenbegrünungssystem integriert wurden. Der Aufbau beginnt mit einer massiven Wand, die als tragende Schicht fungiert und im Schnitt in Rot gezeichnet ist. Darauf folgt eine Dämmschicht, die durch ein gezacktes Muster in der Farbe Magenta dargestellt wird und der thermischen Isolierung dient. Die äußerste Schicht bildet eine Putzschicht, die den Wandaufbau abschließt.

An dieser Wand ist ein Fassadenbegrünungssystem montiert, das aus einem Trogsystem und Kletterhilfen besteht. Der Pflanztrog hat eine Größe von 30 x 30 cm und ist in der Darstellung im Schnitt sichtbar. Die Breite des Pflanzentroges geht über die gesamte Breite der Fassadenbegrünung, siehe Abb. 10. Die Kletterhilfen, die den Pflanzen das vertikale Wachstum ermöglichen, sind mit einem Abstand von 12,5 cm zur Außenwand angebracht.

Neben dem Begrünungssystem sind Sensoren an der Wand installiert, die wichtige Daten zur Überwachung der Umweltbedingungen und der Fassadeneigenschaften erfassen. In dieser Untersuchung wurden Rotronic HC2A-S3 Sensoren eingesetzt, die eine Messgenauigkeit von ±0,8 % relative Feuchte und ±0,1 K Temperatur aufweisen.

Direkt an der Putzoberfläche befindet sich ein Oberflächentemperatursensor, der die Temperatur der Wand misst. Ergänzt wird dieser durch einen Temperatur- und Luftfeuchtesensor, der mit einem Abstand von 20 cm zur Wand installiert ist. Dieser Sensor erfasst die Umgebungstemperatur sowie die relative Luftfeuchtigkeit. Die vertikale Positionierung der Sensoren ist im Plan mit Höhenangabe von ca. 110 cm über dem Pflanztrog angegeben.

Der zweite Schnitt im Sensorenplan zeigt die Wand ohne Fassadenbegrünung und die Position der Sensoren. Die Position der Sensoren ist von der Höhe gleich, der Abstand zur Wand ist beim Oberflächentemperatursensor auch gleich, da dieser sich direkt an der Fassade befindet. Die Temperatur und Luftfeuchtesensoren an der nicht begrünten Fassade haben einen Abstand von 20 cm zur Außenwand.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

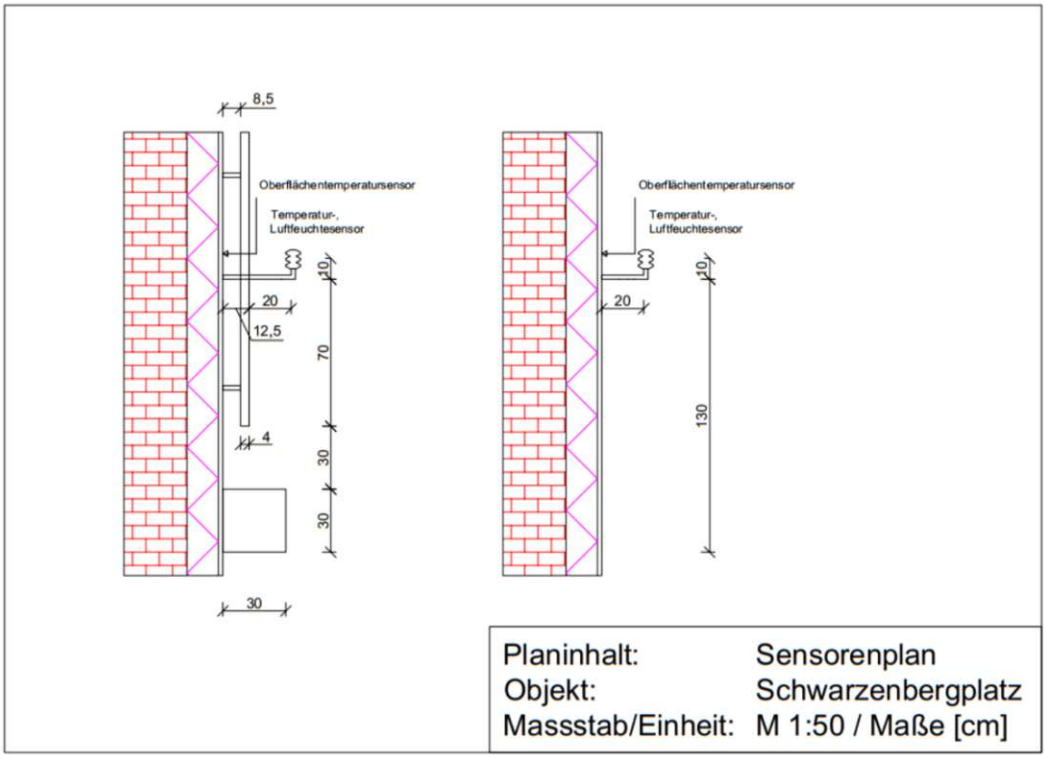


Abb. 9: Sensorenplan ©Technische Universität Wien

Die Abb. 10 zeigt die frontale Ansicht einer begrünten Fassade mit den eingezeichneten Sensorpositionen. Sensoren an begrünten Bereichen sind Grün dargestellt, während Sensoren an unbegrünten Bereichen blau markiert sind. Die Farbmarkierung zeigt den gezielten Vergleich der Umweltbedingungen zwischen begrünten und unbegrünten Flächen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 10: Sensorpositionen an der Fassade @Technische Universität Wien

Die Abb. 11 zeigt ein 3D-Modell der Position des Sensors T4/F4, erstellt von der Technischen Universität Wien. Der Sensor ist in einem Abstand von der Wand an einer metallischen Halterung angebracht, die durch zwei schräge Streben stabilisiert wird. Diese Konstruktion ermöglicht es dem Sensor, Messungen ohne direkte Einflüsse der Gebäudefläche vorzunehmen. Die Positionierung und Ausrichtung gewährleisten eine präzise Erfassung von den gewünschten Umweltdaten in einem unbegrünten Bereich der Fassade.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 11: Sensor T4/F4 3D Modell ©Technische Universität Wien

Abb. 12: Position Sensor T2/F2 @Sebastian Rosenberger

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

### 4.7.1 Gebäudesimulation

Für die Erstellung der Simulation wurden meteorologische Daten aus der globalen Wetterdatenbank Meteonorm 8 herangezogen. Diese Software stellt nicht nur eine umfangreiche Datenbank meteorologischer Werte bereit, sondern bietet auch Werkzeuge zur Simulation von Wetterbedingungen. Mit Hilfe von Meteonorm wurde ein Datensatz erstellt, der die klimatischen Gegebenheiten eines innerstädtischen Standorts in Wien unter den Bedingungen des A2-Szenarios abbildet. Dieses Szenario basiert laut den Berichten von iC consulenten auf Prognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), die einen durchschnittlichen Temperaturanstieg von +1,8 °C im Vergleich zum aktuellen Jahresmittel vorhersagen. [29]

Der generierte Datensatz umfasst extreme Wetterbedingungen, darunter einen besonders kalten Wintermonat und einen besonders heißen Sommermonat. Dabei handelt es sich jedoch nicht um jahresspezifische Werte, sondern um klimatische Verhältnisse, die für einen längeren Zeitraum von etwa 1990 bis 2020 repräsentativ sind. Dieser Zeitraum wurde ausgewählt, um das in Wien zukünftig zu erwartende Klima nachzuvollziehen.

Die verwendeten Parameter umfassen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Windrichtung sowie direkte und diffuse Strahlung, wobei bei den Strahlungsdaten auch die Bewölkung indirekt berücksichtigt wird. Niederschlagsdaten wurden hingegen nicht in die Berechnungen einbezogen. Die simulierten Temperatur- und Feuchtigkeitswerte wurden stündlich über den definierten Zeitraum modelliert, wobei die Ergebnisse in Diagrammen (Abb. 30, Abb. 31 und Abb. 32) dargestellt sind.

Die simulierten Wetterdaten in den folgenden Abbildungen (Abb. 13, Abb. 14, Abb. 15) sind sowohl für das Jahr 2023 als auch für das Jahr 2024 gültig.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

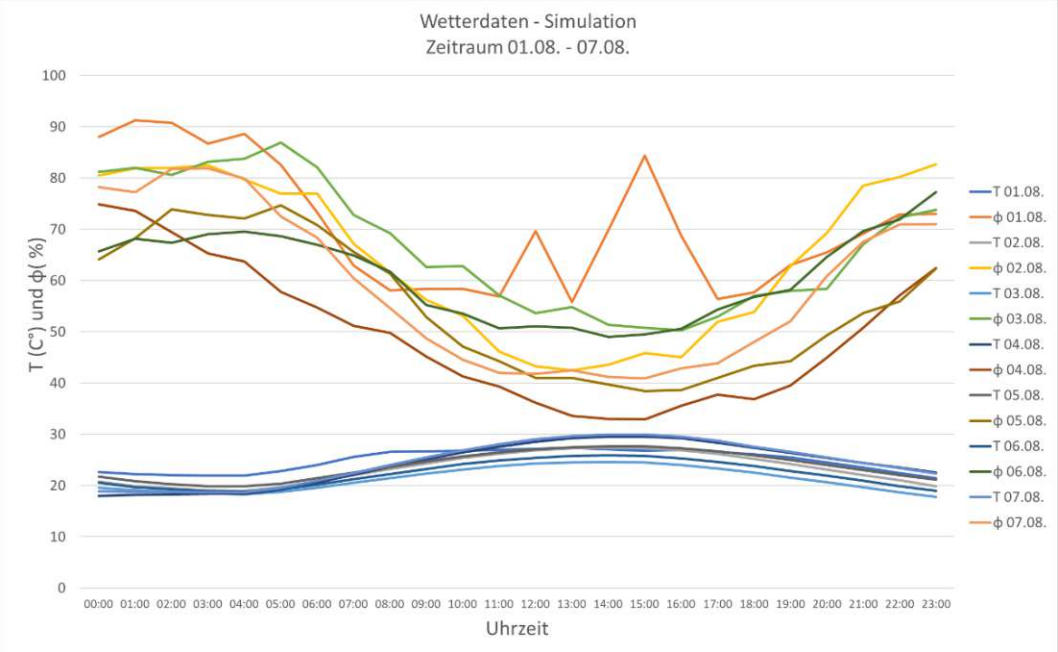


Abb. 13: Simulation der Wetterdaten 01.08.2024 bis 07.08.2024

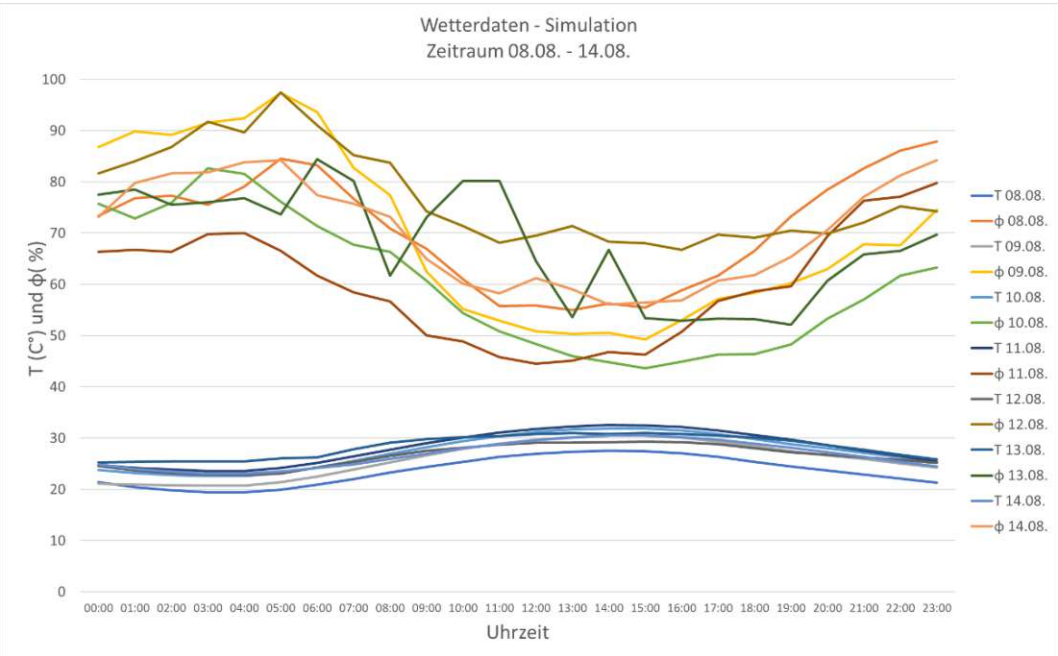


Abb. 14: Simulation der Wetterdaten 08.08.2024 bis 14.08.2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

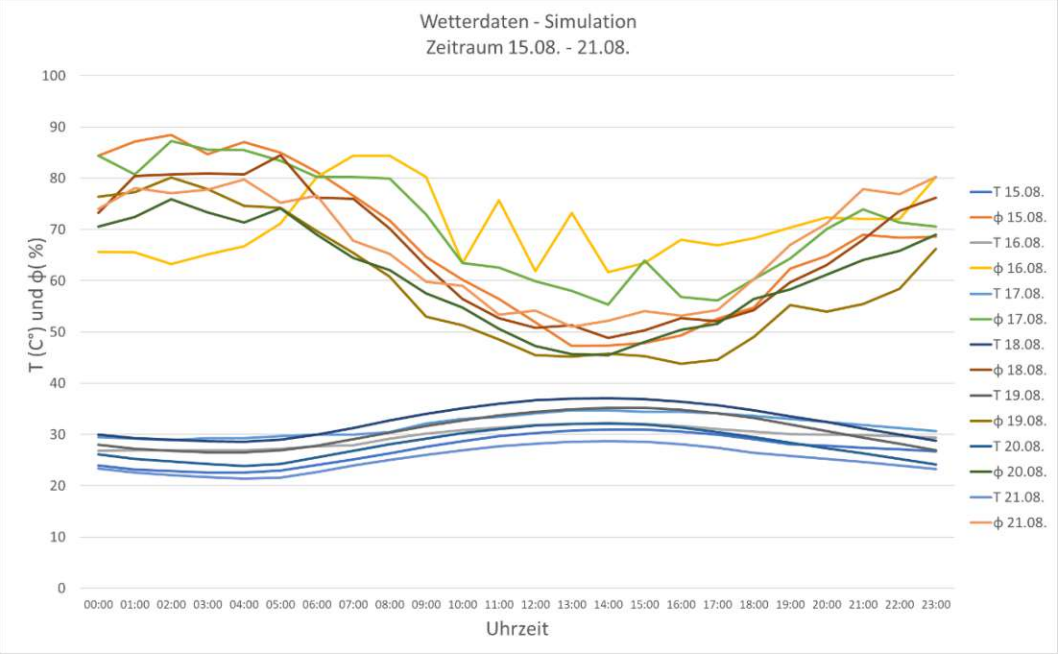


Abb. 15: Simulation der Wetterdaten 15.08.2024 bis 21.08.2024

### 4.7.2 Langzeitmonitoring

Die Wetterdaten für den ausgewählten Untersuchungszeitraum wurden aus der Datenbank von GeoSphere Austria bezogen (Abrufdatum 25.11.2024). GeoSphere Austria ist die nationale Einrichtung Österreichs für Geologie, Geophysik, Klimatologie und Meteorologie. Zu den Aufgaben dieser Institution gehören die Beratung der Bundesregierung in Fachfragen sowie die Warnung der Bevölkerung vor potenziellen Gefahren. Darüber hinaus stellt GeoSphere Austria eine zentrale Grundlage für die Entwicklung von Strategien zur Bewältigung des Klimawandels bereit und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung des Landes. [30]

Durch die Festlegung spezifischer Standorte auf der Karte mittels eingegebener Koordinaten konnten meteorologische Parameter wie Temperatur und Luftfeuchtigkeit für den gewählten Zeitraum stündlich aus der Wetterdatenbank extrahiert und analysiert werden. Die Ergebnisse dieser Auswertung, die den Verlauf der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Untersuchungszeitraum darstellen, sind in den nachfolgenden Diagrammen (Abb. 16, Abb. 17, Abb. 18) abgebildet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

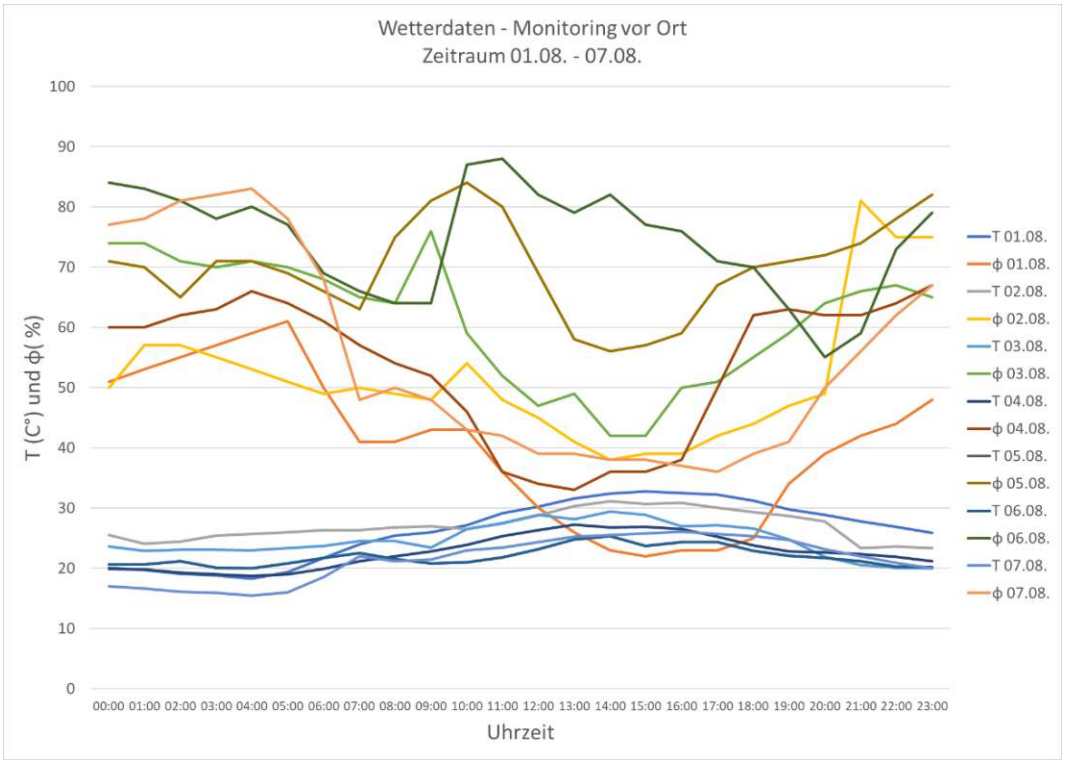


Abb. 16: Messungen vor Ort 01.08.2024 bis 07.08.2024

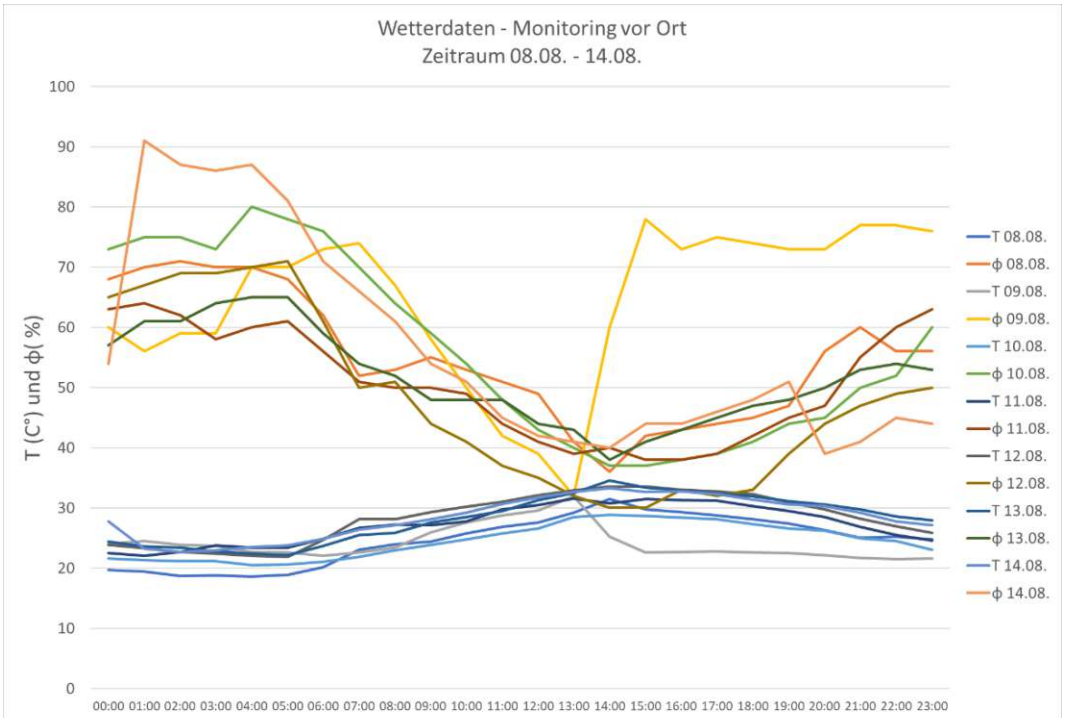


Abb. 17: Messungen vor Ort 08.08.2024 bis 14.08.2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

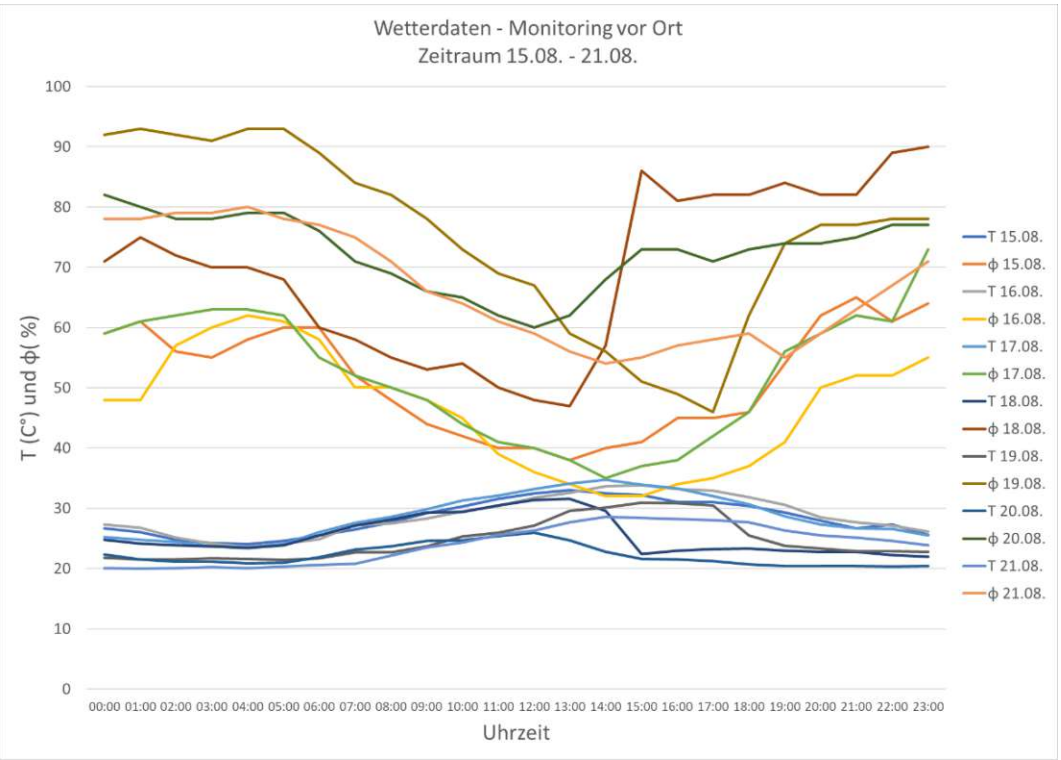


Abb. 18: Messungen vor Ort 15.08.2024 bis 21.08.2024

### 4.7.3 Sonnenstand

Der Verlauf der gemessenen Oberflächentemperaturen zeigt eine signifikante Korrelation mit dem Sonnenstand in den unterschiedlichen Geschossen (siehe Abb. 20, Abb. 19, Abb. 21, Abb. 22).

Der Sonnenstand unterliegt sowohl tages- als auch jahreszeitlichen Veränderungen, die auf die Rotation der Erde sowie die Neigung ihrer Achse zurückzuführen sind. Diese Veränderungen stehen in engem Zusammenhang mit den Temperaturverläufen, insbesondere bei der Analyse der Tageshöchstwerte. Der Sonnenstand liefert dabei wertvolle Informationen, da die direkte Sonneneinstrahlung die primäre Ursache für die Erwärmung von Gebäuden und Oberflächen darstellt.

Die systematische Erfassung des Sonnenstandes zu unterschiedlichen Zeiten und an verschiedenen Gebäudestandorten ermöglicht die Gewinnung wichtiger Daten über die Intensität der Sonneneinstrahlung in verschiedenen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tagesabschnitten und Bereichen eines Gebäudes. Diese Informationen ermöglichen eine detaillierte Analyse der Temperaturentwicklung und unterstützen das Verständnis der Auswirkungen der Sonneneinstrahlung auf die thermischen Eigenschaften von Oberflächen.

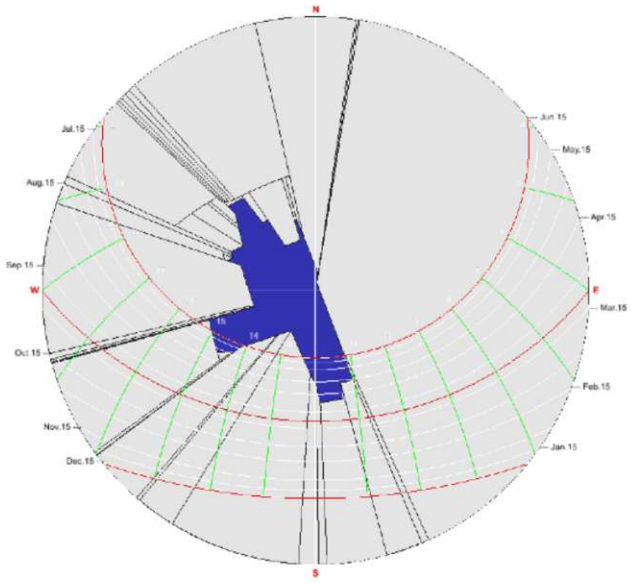


Abb. 20: Sonnenstand EG ©iC consulenten

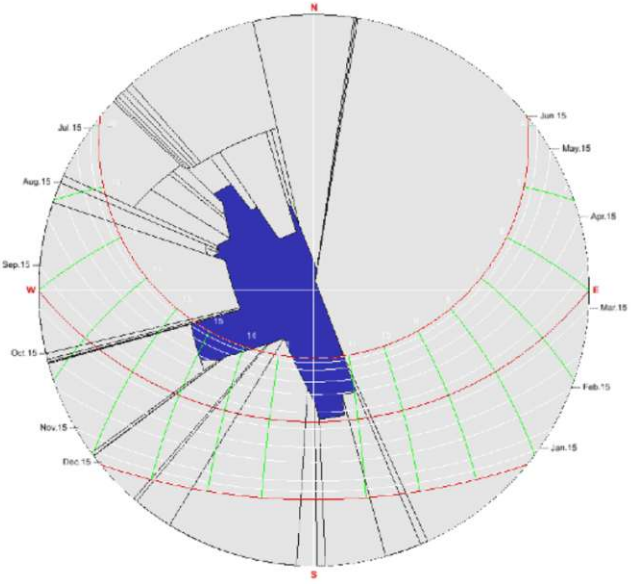


Abb. 19: Sonnenstand 1.OG ©iC consulenten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

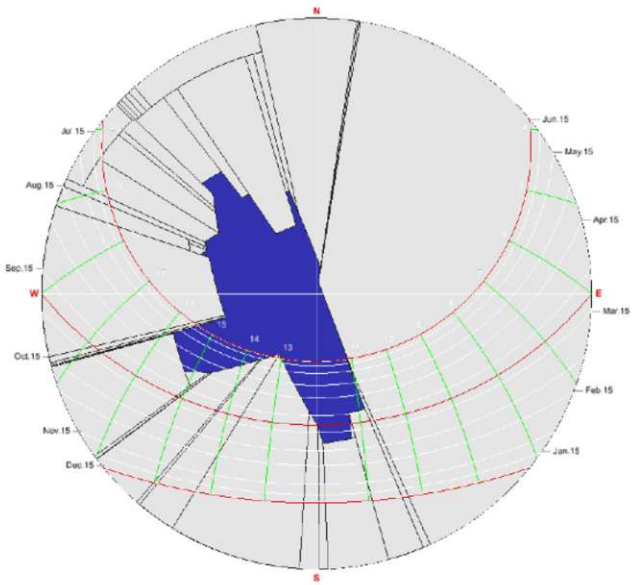


Abb. 21: Sonnenstand 2.OG ©iC consulenten

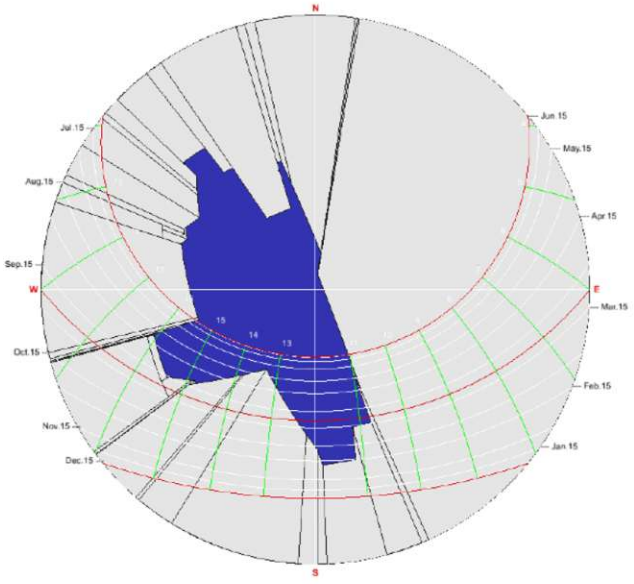


Abb. 22: Sonnenstand 3.OG ©iC consulenten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 5 Ergebnisse

## 5.1 Analyse der Entwicklung der Fassadenbegrünung im Zeitraum 2023 bis 2024

Vergleicht man die folgenden Abbildungen (Abb. 23 und Abb. 24) miteinander, ist auf dem ersten Blick zu sehen, dass sich die Pflanzen über ein Jahr deutlich weiterentwickelt haben. Zur Vereinfachung der Beschreibung wird jedes Stockwerk in fünf Bereiche eingeteilt und die Entwicklung wird für jeden Bereich einzeln beschrieben. Die Einteilung der Bereiche ist in den folgenden Abbildungen mit gelb strichlierten Linien dargestellt. Jeder Bereich umfasst eine Kletterhilfe.

Abb. 23: Mezzanin und 1.Stock - September 2023 ©Nejra Ribic Berbic

Abb. 24: Mezzanin und 1.Stock - September 2024 ©Sebastian Rosenberger

Ein Vergleich der von Abb. 23 und Abb. 24 zeigt auf den ersten Blick eine deutliche Weiterentwicklung der Pflanzen im Verlauf eines Jahres. Die Begutachtung erfolgt auf Basis einer optischen Analyse, wobei fünf Begrünungsbereiche je Stockwerk betrachtet werden. Diese Bereiche sind

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

jeweils mit Kletterhilfen ausgestattet, die das vertikale Wachstum der Pflanzen ermöglichen. Es wird darauf hingewiesen, dass die Ursachen für die unterschiedlichen Wachstumsfortschritte der Pflanzen nicht abschließend geklärt werden können. Zu den zentralen Wachstumsfaktoren zählen abiotische Umweltfaktoren wie Licht, Wärme, Wasser, essentielle Gase und Nährstoffe. Besonders die Lichtverhältnisse im Innenhof sind je nach Höhe sehr unterschiedlich. In Abb. 6 (Bepflanzungsplan Fassadenbegrünung) ist dargestellt, welche Pflanzen in den jeweiligen Bereichen angeordnet sind. Es wird in der folgenden Beschreibung der Entwicklung nicht explizit auf die unterschiedlichen Pflanzenarten eingegangen. [31]

### 5.1.1 Bereich 1: Mezzanin, links außen

Im ersten Bereich ist eine deutliche Veränderung des Pflanzenwachstums erkennbar. Der Bewuchs hat sich im Vergleich zum Vorjahr sowohl quantitativ als auch positionell verändert. Während die Pflanzen im Jahr 2023 (Abb. 9) überwiegend im unteren Bereich der Kletterhilfe gut angewachsen waren, zeigt sich 2024 (Abb. 10) eine Verlagerung des Wachstums nach oben. Im unteren Bereich ist eine leichte Ausdünnung des Bewuchses festzustellen, jedoch hat sich die obere Hälfte des Gitters deutlich stärker entwickelt. Der Deckungsgrad in diesem Bereich hat in diesem Bereich nach optischer Begutachtung um etwa 20 % zugenommen.

### 5.1.2 Bereich 2: Mezzanin, Mitte links

In diesem Bereich ist im Vergleich zum Vorjahr eine besonders starke Entwicklung des Pflanzenbewuchses zu beobachten. Während 2023 (Abb. 9) lediglich das linke untere Viertel der Kletterhilfe bewachsen war, ist im Jahr 2024 (Abb. 10) nahezu die gesamte Fläche stark bewachsen. Eine Ausnahme bildet die rechte Seite, die geringfügig ausgedünnt erscheint, sowie ein schmaler Streifen im unteren Bereich, der weniger stark bewachsen ist. Diese Fortschritte verdeutlichen die erfolgreiche Etablierung der Pflanzen in diesem Abschnitt der Fassade.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 5.1.3 Bereich 3: Mezzanin, Mitte

Im dritten Bereich des Mezzanins ist eine vollständige Ausbreitung der Pflanzen über die gesamte Fläche der Kletterhilfe erkennbar. Diese Entwicklung zeigt, dass die Begrünung im Vergleich zum Vorjahr deutlich homogener geworden ist. Allerdings fällt auf, dass die Pflanzen in diesem Bereich weniger dicht gewachsen sind und eine geringere Blattmasse aufweisen. Dies deutet möglicherweise auf Unterschiede in den Wachstumsbedingungen hin, wie beispielsweise Nährstoffversorgung oder Lichtverhältnisse, die jedoch im Rahmen dieser Analyse nicht abschließend bewertet werden können.

### 5.1.4 Bereich 4: Mezzanin, Mitte rechts

Im vierten Bereich war bereits im Jahr 2023 die gesamte Fläche der Kletterhilfe vollständig und gleichmäßig bewachsen. Dieser Zustand hat sich auch im Beobachtungsjahr 2024 nicht verändert, was als positives Ergebnis gewertet werden kann. Die stabile Begrünung zeigt, dass die etablierten Pflanzen sich optimal an die vorhandenen Bedingungen angepasst haben und eine dauerhafte Abdeckung gewährleisten.

### 5.1.5 Bereich 5: Mezzanin, rechts außen

Im fünften Bereich des Mezzanins, der 2023 etwa zu einem Drittel noch eher dünn bewachsen war, ist eine beeindruckende Entwicklung zu verzeichnen. Im Jahr 2024 hat sich der Bewuchs stark verdichtet, sodass die gesamte Konstruktion der Kletterhilfe in diesem Abschnitt nun vollständig und sehr dicht bedeckt ist. Dies spiegelt eine erfolgreiche Etablierung und ein optimales Wachstum der Pflanzen wider, die hier die Fläche maximal nutzen.

### 5.1.6 Bereich 1: 1. Stock, links außen

Im Jahr 2023 war die gesamte untere Hälfte der Kletterhilfe gut bewachsen, wobei die Pflanzen dicht und mit zahlreichen Blättern bedeckt waren. Die obere Hälfte war zu diesem Zeitpunkt jedoch noch unbewachsen. Im Jahr 2024 hat sich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

der Bewuchs deutlich ausgedehnt, und die Pflanzen haben den Großteil der Kletterhilfe bedeckt. Lediglich in den Ecken links oben und unten ist der Bewuchs noch spärlich. Der übrige Bereich ist hingegen dicht und kräftig bewachsen. Auffällig ist zudem, dass einige Pflanzen aus dem Trogsystem herabhängen und teils bis zu den Pflanzen im Mezzanin hinunterreichen.

### 5.1.7 Bereich 2: 1. Stock, Mitte links

Im Jahr 2023 war in diesem Bereich kaum Bewuchs vorhanden, lediglich drei kleine Pflanzen, die dünn und schwach wirkten. Diese Situation hat sich 2024 drastisch verändert. Der Bereich ist nun der am stärksten bewachsene Abschnitt im gesamten 1. Stockwerk. Die komplette Fläche ist sehr dicht mit zahlreichen Pflanzen und Blättern bedeckt, was auf ein außerordentlich erfolgreiches Wachstum hinweist.

### 5.1.8 Bereich 3: 1. Stock, Mitte

Im Jahr 2023 war dieser Bereich nur sehr spärlich bewachsen, mit einem dünnen Bewuchs im unteren Drittel der Kletterhilfe. Im Jahr 2024 zeigt sich eine deutliche Verbesserung. Bis auf die obere linke Ecke ist die gesamte Fläche vollständig bedeckt. Die Pflanzen wirken insgesamt kräftig, auch wenn sie etwas dünner sind als im benachbarten Bereich Mitte links. Auch hier hängen einige Ranken vom Trogsystem bis in das Mezzanin hinunter.

### 5.1.9 Bereich 4: 1. Stock, Mitte rechts

Im Jahr 2023 war in diesem Bereich lediglich eine kleine Pflanze im unteren Drittel der Kletterhilfe zu sehen, ähnlich wie im Bereich Mitte. Im Jahr 2024 zeigt sich jedoch kaum eine Verbesserung. Der Bewuchs ist in diesem Abschnitt äußerst spärlich geblieben, mit nur einer winzigen, dünnen Ranke ohne Blätter im unteren Viertel. Diese Entwicklung deutet darauf hin, dass die Wachstumsbedingungen in diesem Bereich möglicherweise ungünstig waren.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 5.1.10 Bereich 5: 1. Stock, rechts außen

Im Jahr 2023 war die untere Hälfte dieses Bereichs gut bewachsen, wobei die Pflanzen noch etwas dünn, aber gut verteilt waren. Im Jahr 2024 hat sich der Bewuchs auf die gesamte Fläche der Kletterhilfe ausgedehnt. Obwohl die Pflanzen weiterhin eher dünn erscheinen, ist der Bereich nun vollständig und gleichmäßig bewachsen.

### 5.1.11 Spontanvegetation

Neben der umgesetzten Begrünung der Fassade sind in den Trogsystemen zusätzlich einige nicht vorgesehene Pflanzen gewachsen. Dabei handelt es sich um spontane Ansiedlungen, die vermutlich durch Wind, Vögel oder andere natürliche Verbreitungsmechanismen entstanden sind. Zu den beobachteten Pflanzen zählen einige Gräser sowie möglicherweise ein Hollerstrauch und ein Götterbaum, die im Trogsystem des Mezzanins ungeplant gewachsen sind.

Diese Entwicklungen sind ein typisches Phänomen bei Begrünungssystemen, da sie nicht nur den gewünschten Pflanzen Raum bieten, sondern auch als potenzieller Lebensraum für unerwartete Vegetation dienen. Während dies einerseits die Biodiversität erhöhen kann, muss bei der weiteren Pflege überprüft werden, inwiefern diese Pflanzen die geplante Begrünung beeinflussen oder potenziell verdrängen könnten. Insbesondere der Götterbaum, der als invasive Art bekannt ist, ist zwingenderweise zu entfernen, um ein unkontrolliertes Wachstum und eine Beeinträchtigung der geplanten Vegetation zu vermeiden.

Die zufällig gewachsenen Pflanzen haben nur eine geringe Auswirkung auf die insgesamt begrünte Fassade im Innenhof. Ihr Vorkommen ist begrenzt, und sie beeinflussen das Erscheinungsbild der geplanten Vegetation nur minimal. Dennoch sollte im Rahmen der regelmäßigen Pflege geprüft werden, ob ihr Wachstum die geplanten Pflanzen beeinträchtigen könnte, um eine optimale Entwicklung der Fassadenbegrünung sicherzustellen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 5.2 Vergleich der Wetterdaten – Prognose und Messungen

Um die in dieser Arbeit formulierte Zielsetzung zu erreichen und die aufgeworfene Forschungsfrage zu beantworten, wird ein Vergleich zwischen den Ansätzen "Simulation" und "Langzeitmonitoring" unter Verwendung meteorologischer Daten durchgeführt. Die Analyse basiert auf meteorologischen Daten, welche sowohl durch Langzeitmonitoring als auch durch Simulation erfasst wurden. Die Ergebnisse sind in den entsprechenden Abbildungen veranschaulicht.

In Abb. 25 wird der Zeitraum dargestellt, der für die Auswertung des ersten Messjahres 2023 herangezogen wurde. Im Rahmen der Untersuchung des Temperaturverlaufs der Klimadaten wurde zunächst ein Zeitraum identifiziert, in dem die Temperaturkurven ein ähnliches Verhalten sowie vergleichbare Werte aufweisen.

Für die Auswertung des ersten Messjahres wurde der Zeitraum vom 11. bis zum 16. August definiert. Die Abbildung verdeutlicht, dass die Temperaturverläufe in dem rot markierten Bereich eine hohe Übereinstimmung aufweisen. Dies macht diesen Zeitraum zu einer geeigneten Basis für die weiteren Analysen und Darstellungen der Ergebnisse aus Simulation und Monitoring. Abb. 26 präsentiert eine Gegenüberstellung der tatsächlichen Temperaturverläufe mit den prognostizierten Werten aus der Simulation im zweiten Jahr der Messung (2024). Die Abweichung der Kurven ist an den ersten Tagen noch groß, im Zeitraum vom 4. bis zum 16. August (strichlierte rote Linie) ist eine gute Vergleichbarkeit der Daten gewährleistet. Ab 17.August weichen die Kurven wieder etwas mehr voneinander ab.

Für das zweite Jahr der Messungen wurde der Zeitraum vom 11. bis zum 16. August ausgewählt, also der exakt gleiche Zeitraum wie im Vorjahr. Die gleiche Dauer und eine ähnliche Wetterlage sind beim Vergleich von Ergebnissen der beiden Messjahre von Vorteil.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

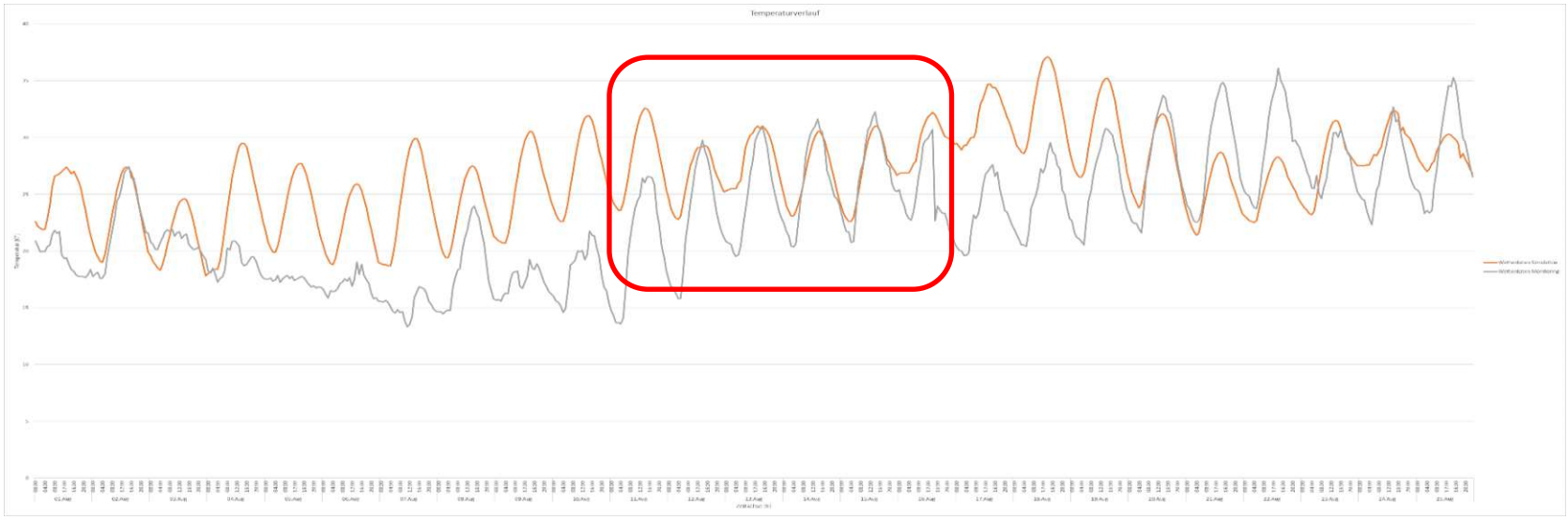

Abb. 25 Vergleich Simualtion mit Monitoring 2023 [9]

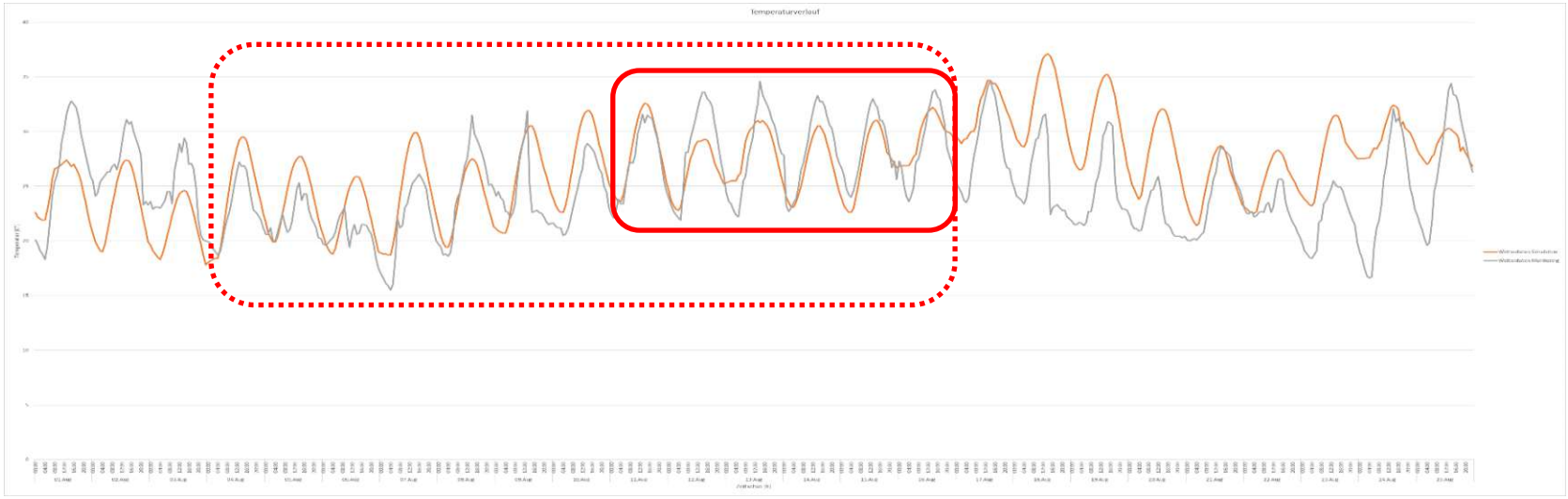

Abb. 26: Vergleich Simulation mit Monitoring 2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

## 5.3 Ergebnisse aus der Gebäudesimulation

Für diese Arbeit werden die Daten aus dem Bericht Thermische Simulation für ein Bürogebäude am Schwarzenbergplatz von ic Consulenten als Grundlage verwendet. Die simulierten Wetterdaten für den Auswertungszeitraum sind in der folgenden Abb. 27 zu sehen. Der Beobachtungszeitraum orientiert sich an den Daten der Messung abgeglichenen mit den Wetterdaten, siehe 5.2 Vergleich der Wetterdaten – Prognose und Messungen.

### 5.3.1 Simulierte Wetterdaten

Im Folgenden werden nicht nur die Wetterdaten, sondern auch die simulierten Daten für die Parameter Temperatur, Oberflächentemperatur und relative Luftfeuchtigkeit an den Messstellen verwendet.

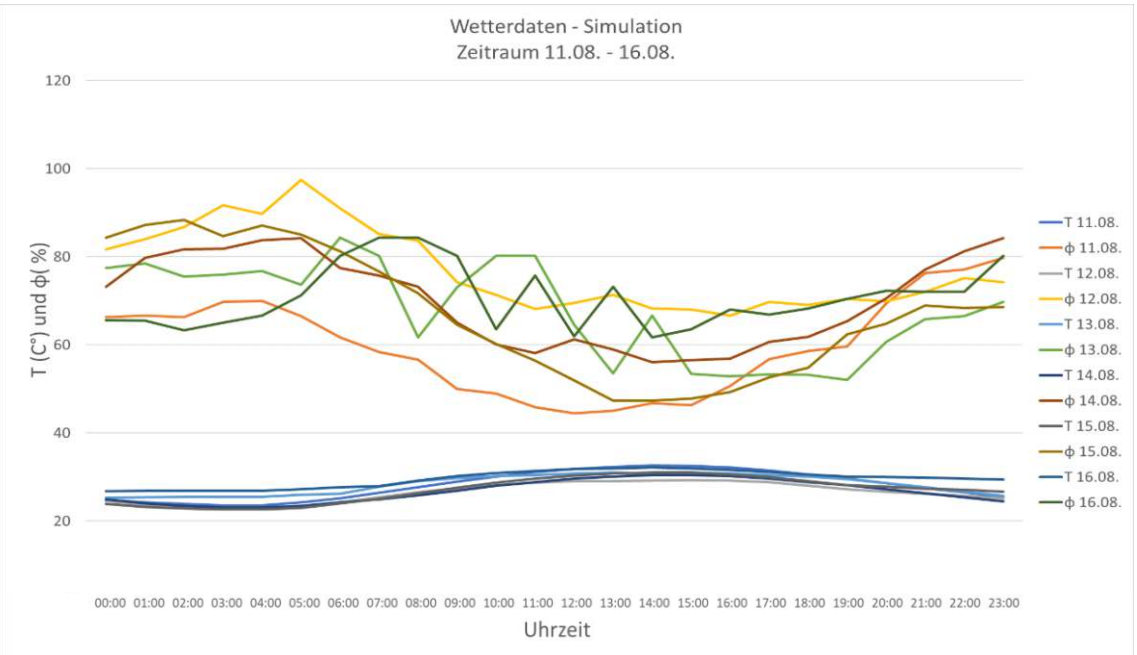


Abb. 27: simulierte Wetterdaten des gewählten Zeitraums

### 5.3.2 Simulierte Oberflächentemperatur

Die folgende Abb. 28 zeigt den zeitlichen Verlauf der Oberflächentemperatur an den sechs Messpunkten S1 bis S6 der Fassade im Rahmen einer Simulation. Die dargestellten Temperaturwerte repräsentieren Stellen der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Fassadenoberflächen mit und ohne Begrünung über den definierten Zeitraum, wobei die Werte stündlich erfasst wurden.

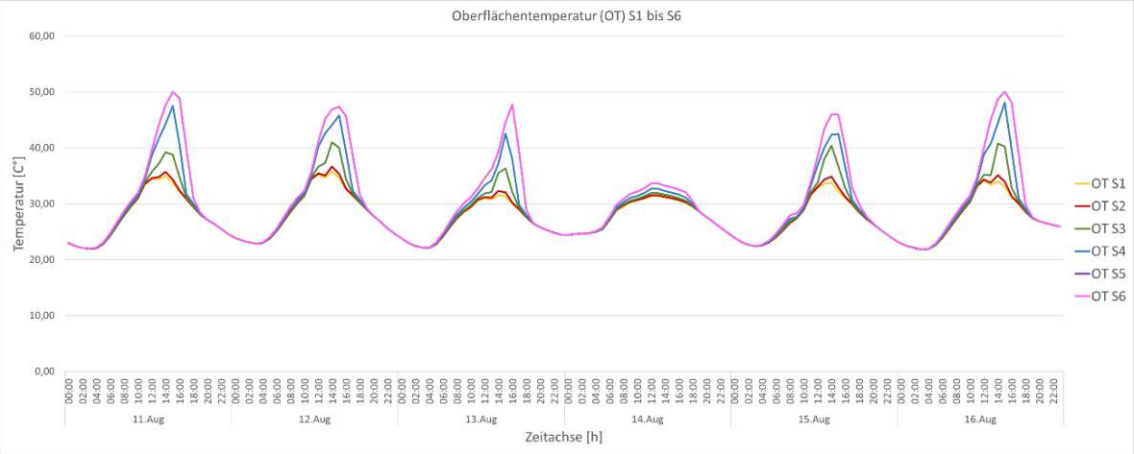


Abb. 28: Oberflächentemperaturen aus Simulation

Der Sensor S1 befindet sich auf einer Höhe von rund drei Meter über der Geländeoberkante im Innenhof. Da die direkte Sonneneinstrahlung bei diesem Sensor natürlich deutlich geringer ausfällt als bei den oberen Sensoren, werden hier nur Maximaltemperaturen von rund 35 °C erreicht. Die genauen Positionen der Sensoren sind in Abb. 10 dargestellt. Der Sensor S6 weist Spitzenwerte von bis zu 51 °C auf, was auf die länger direkte Sonneneinstrahlung an dieser Messstelle zurückzuführen ist.

## 5.4 **Ergebnisse aus dem Langzeitmonitoring**

Die Messungen im Rahmen des Langzeitmonitorings vor Ort erfassen kontinuierlich die Oberflächentemperatur, die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit an den sechs an der Fassade installierten Messpunkten. Der Beobachtungszeitraum orientiert sich an den Daten der Messung abgeglichenen mit den Wetterdaten, siehe 5.2 Vergleich der Wetterdaten – Prognose und Messungen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

### 5.4.1 Oberflächentemperatur aus Monitoring

Abb. 29 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf der sechs Messpunkte über den definierten Zeitraum im Jahr 2024. Die Temperatur wurde alle 15 Minuten gemessen und anschließend auf ganze Stunden gemittelt.

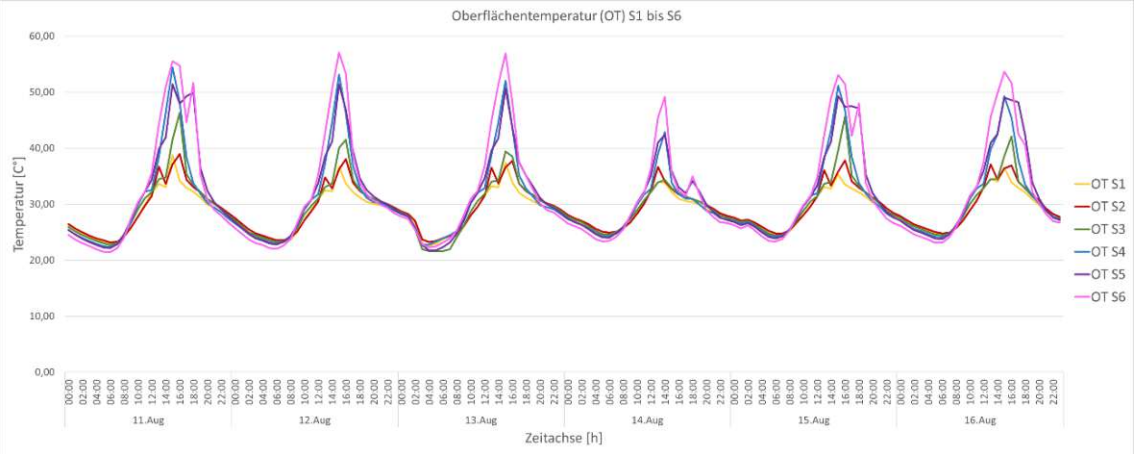


Abb. 29: Oberflächentemperatur aus Monitoring 2024

Es lässt sich erkennen, dass die Oberflächentemperaturen mit zunehmender Höhe der Sensoren steigen und sich Unterschiede in Abhängigkeit der Begrünung zeigen. Die Sensoren S1 und S2 im unteren Fassadenbereich erreichen maximale Temperaturen von etwa 38 °C. Der Sensor S3, der höher positioniert ist, zeigt Spitzenwerte von ungefähr 46 °C. Die höchsten Temperaturen werden bei den Sensoren S4, S5 und S6 gemessen, die im oberen Bereich der Fassade angeordnet sind. Diese Maximalwerte liegen bei 58 °C.

Die minimalen Oberflächentemperaturen variieren bei allen Messpunkten im gezeigten Zeitraum zwischen 22 und 25 °C und treten überwiegend während der Nachtstunden auf. Insgesamt zeigt die Abbildung ein regelmäßiges Tagesmuster, bei dem die Temperaturen während der Mittagszeit und am frühen Nachmittag ihre Höchstwerte erreichen und nachts absinken. Diese Temperaturschwankungen verdeutlichen den Einfluss der solaren Einstrahlung und der Umgebungstemperatur auf die Fassadenoberfläche.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 5.4.2 Lufttemperatur aus Monitoring

An den gleichen Stellen wurde mittels Sensoren auch die Lufttemperatur alle 15 Minuten aufgezeichnet und auf ganze Stunden gemittelt. In der Abb. 30 ist der Verlauf der Lufttemperatur in der Zeit von 11.August 2024 bis 16.August 2024 zu sehen.

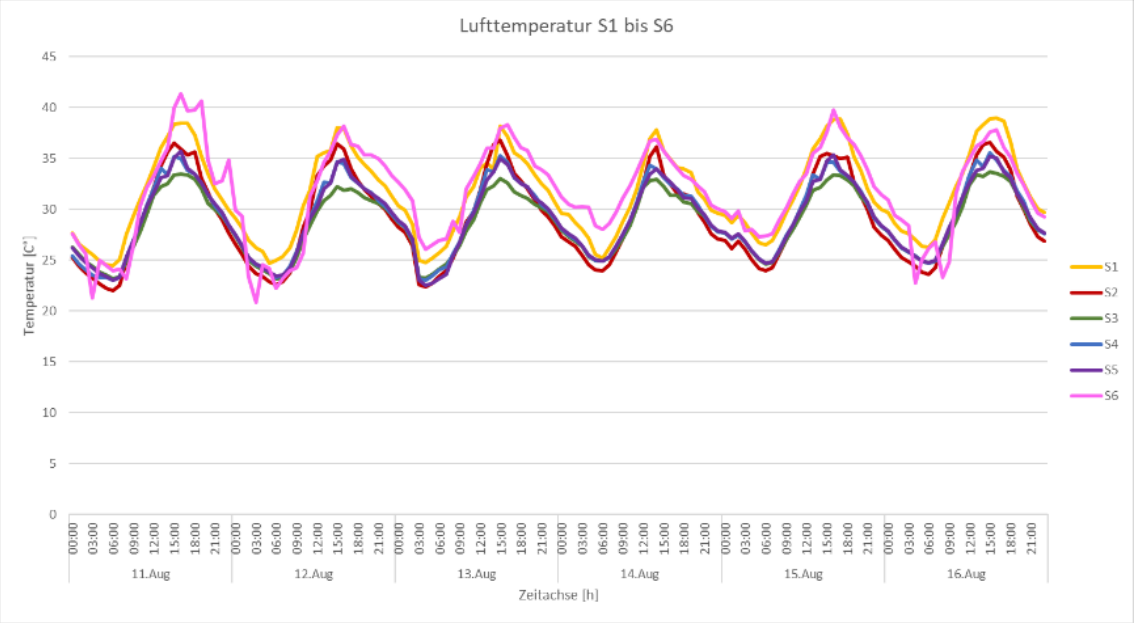


Abb. 30: Lufttemperatur aus Monitoring 2024

Im Vergleich zu den gemessenen Oberflächentemperaturen weisen die Werte der Lufttemperatur ein deutlich niedrigeres Maximum auf. Dieses beträgt 41 °C. 11 Stunden nach der maximal gemessenen Lufttemperatur stellt sich der Minimalwert des gewählten Zeitraums von 21 °C ein.

An den Tagen 11.August und 15.August gibt es hohe Spitzenwerte bei den Sensoren S1 und S6 im Vergleich zu den anderen Sensoren. Dies ist etwas verwunderlich, da die Positionen von S1 und S6 weit voneinander entfernt sind. S1 ist der Sensor mit der niedrigsten Position, S6 der Sensor mit der höchsten, das lässt darauf schließen, dass die Höhenlage in diesem Fall nicht von wesentlicher Bedeutung ist. Einfluss auf die gemessenen Werte haben unter anderem noch Schattenwurf, Wind oder die Luftfeuchtigkeit in der direkten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Umgebung der Sensoren. An den restlichen Tagen sind die Verläufe der Lufttemperatur recht homogen bei allen sechs Sensoren.

Es ist noch auffällig, dass der Sensor 3 über den gesamten Zeitraum die niedrigsten Temperaturen in den Spitzen anzeigt. Der Sensor ist positioniert im Bereich 1.Stock, ganz links außen. Wie in Kapitel 5.1.6 gezeigt, hat sich hier die Fassadenbegrünung mitunter am besten entwickelt. Die niedrigeren Temperaturen bei diesem Sensor korrelieren mit dem dichten Wachstum und der verdichteten Pflanzenstruktur der Fassadenbegrünung in diesem Bereich.

### 5.4.3 Luftfeuchtigkeit aus Monitoring

Die Werte der Luftfeuchtigkeit zeigen in Abb. 31 bei allen Messstellen ein vergleichbares Muster, was tageszeitabhängige Einflüsse, wie etwa Temperatur- und Wetterveränderungen, zeigt. Tagsüber ist ein Absinken der Luftfeuchtigkeit auf niedrigere Werte zu verzeichnen, während in den Nachtstunden ein deutlicher Anstieg zu beobachten ist.

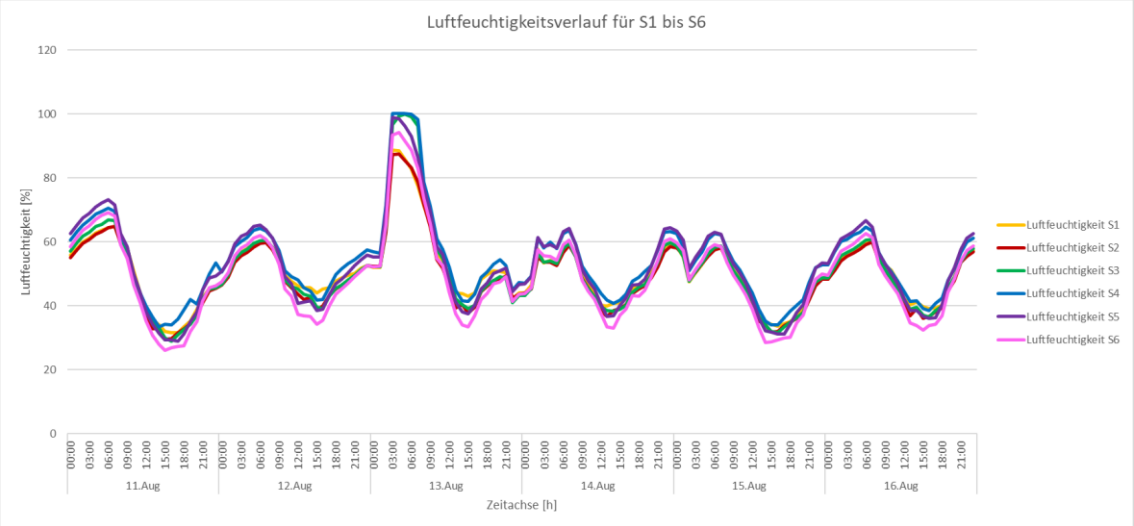


Abb. 31: Luftfeuchtigkeit Monitoring 2024

Ein signifikanter Höhepunkt der Luftfeuchtigkeit wird an einem der Tage verzeichnet, an dem alle Messstellen Werte von über 90 % erreichen. Dies könnte ein Indikator für ein Wetterereignis wie Regen oder Nebel in der Nacht von 12.August auf 13.August sein. Die Messstellen zeigen eine ähnliche

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Dynamik, wobei geringfügige Abweichungen in den Spitzenwerten und im zeitlichen Verlauf erkennbar sind. Dies deutet darauf hin, dass die Messstellen unterschiedlichem Mikroklima entlang der Fassade ausgesetzt sind.

In Abb. 34 werden die Luftfeuchtigkeitsverläufe zweier Messpunkte gegenübergestellt. Dabei befindet sich der Sensor S5 an einer begrünten Stelle der Fassade (siehe Abb. 32 ), während der Sensor S6 an einer unbegrünten Stelle der Fassade (siehe Abb. 33) positioniert ist. Für die Analyse wurden diese beiden Kurven ausgewählt, da S5 im betrachteten Zeitraum überwiegend die höchsten Luftfeuchtigkeitswerte aufweist, während S6 die niedrigsten Werte im zeitlichen Verlauf zeigt.

Abb. 32: Sensor S5 - begrünt ©Sebastian Rosenberger

Abb. 33: Sensor S6 - nicht begrünt ©Sebastian Rosenberger

Die Feuchtigkeitskurve des Sensors im begrünten Bereich S5 weist während des Tages leicht erhöhte Werte auf, was mit der Transpirationsaktivität der Pflanzen korreliert. Da die Stomata vieler Pflanzen nachts geschlossen sind, nimmt die Transpiration in dieser Zeit deutlich ab oder kommt vollständig zum Erliegen. Dennoch können in der Vegetationszone erhöhte Feuchtigkeitswerte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

auftreten, da die tagsüber durch die Pflanzen aufgenommene Bodenfeuchte nachts durch Kapillarwirkung wieder freigesetzt wird.

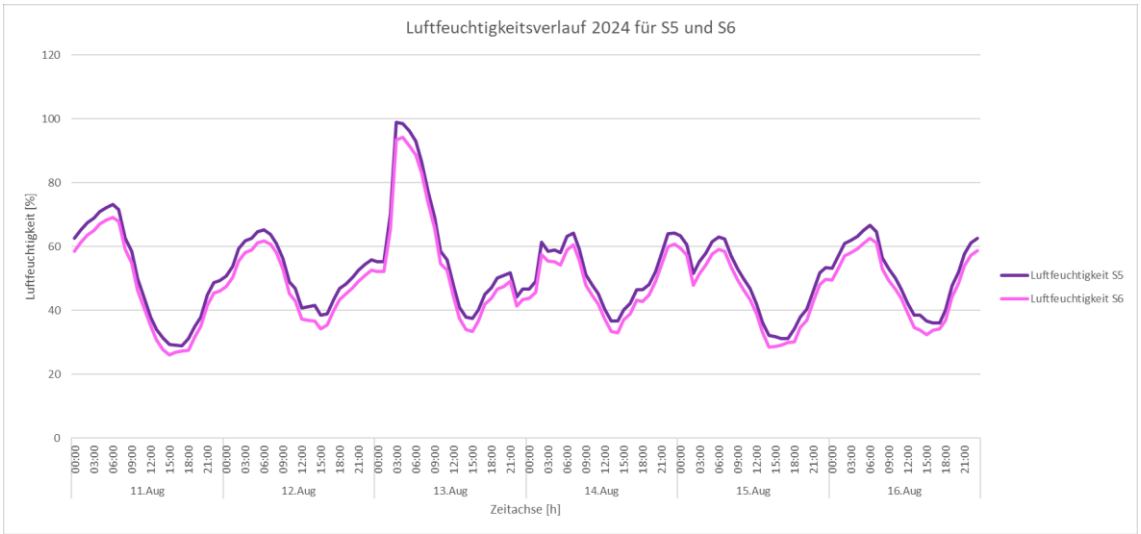


Abb. 34: Gegenüberstellung Luftfeuchtigkeit 2024: S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt)

In der folgenden Abb. 35 ist der gleiche Vergleich der Luftfeuchtigkeit der beiden Sensoren S5 und S6 aus dem Jahr 2023 zu sehen.

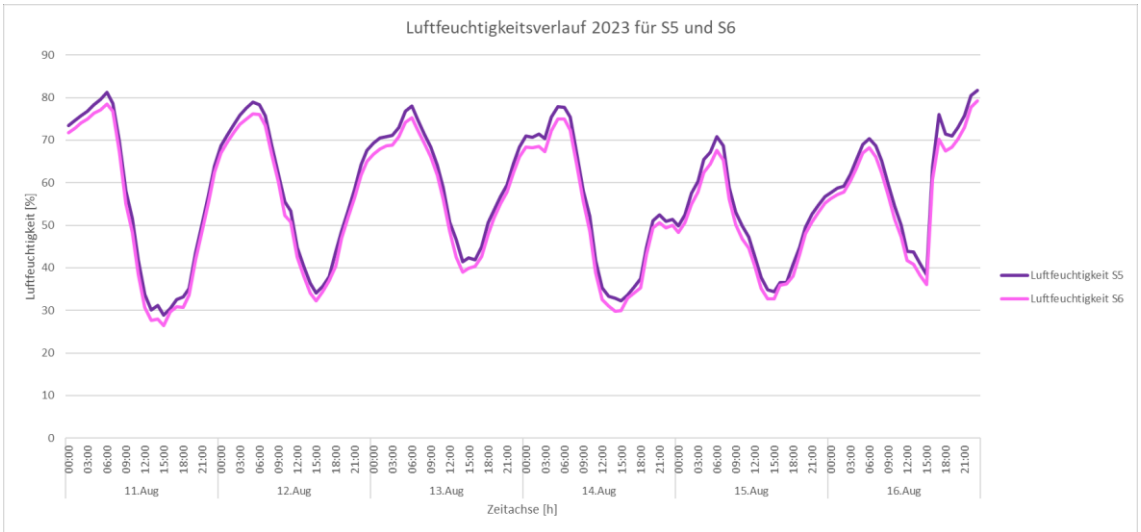


Abb. 35: Gegenüberstellung Luftfeuchtigkeit 2023: S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt)

Das Feuchteverhalten der beiden Sensoren zeigt im Untersuchungszeitraum 2023 eine ähnliche Entwicklung. Sensor 5 weist dabei durchgehend etwas

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

höhere Feuchtewerte auf als Sensor 6, der an der unbegrünten Stelle der Fassade positioniert ist.

Der Vergleich der beiden Kurven zeigt, dass trotz kleiner Unterschiede ein ähnlicher Verlauf und vergleichbare Werte beobachtet werden können. Dies deutet darauf hin, dass die Feuchtewerte in begrünten und nicht begrünten Bereichen, unabhängig von ihren Differenzen, ähnliche Muster aufweisen. Dieser Umstand lässt sich durch den Einfluss identischer Witterungsbedingungen auf beide Bereiche erklären.

Begrünte Fassaden tragen einerseits durch die Transpiration der Pflanzen als auch durch Evaporation des Substrats zur Erhöhung der Luftfeuchtigkeit und zur Temperaturregulierung bei, während die Luftfeuchtigkeit an nicht begrünten Fassaden hauptsächlich von äußeren Einflüssen wie Wind und Sonneneinstrahlung abhängt. In Abb. 34 sind die Feuchtigkeitswerte im begrünten Bereich (S5) über den gesamten Zeitraum leicht erhöht, was direkt mit der Transpirationsaktivität der Pflanzen in Verbindung steht. [32]

Diese Erkenntnisse stimmen mit den Ergebnissen aus dem Jahr 2023 überein. Die Ergebnisse beider Jahre zeigen somit ein konsistentes Muster und bestätigen die Wirksamkeit von Fassadenbegrünungen in Bezug auf die lokale Regulierung der Luftfeuchtigkeit.

## 5.5 **Vergleich der Oberflächentemperaturen von Sensor 5 und 6**

Um die Messdaten vergleichbar zu machen, ist es zunächst erforderlich, die Positionen der Sensoren zu berücksichtigen. Direkte Sonneneinstrahlung hat einen erheblichen Einfluss auf die Messergebnisse: Je höher ein Sensor positioniert ist, desto früher wird er der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, was zu höheren Tageshöchstwerten der Oberflächentemperaturen führt (siehe Abb. 29: Oberflächentemperatur aus Monitoring). Daher ist ein Vergleich von Sensoren auf gleicher Höhe sinnvoll, um den Einfluss der Begrünung von dem Effekt der Sonneneinstrahlung zu unterscheiden. Andernfalls lässt sich nicht eindeutig bestimmen, welcher Teil der Temperaturunterschiede durch die Begrünung und welcher Teil durch die Sonneneinstrahlung verursacht wird.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Aus diesem Grund sind für die Auswertung der Oberflächentemperaturen die Daten von Sensor S5 und S6 am besten vergleichbar. Dieser Vergleich wurde bereits in der vorherigen Arbeit für das Jahr 2023 durchgeführt. Zunächst werden die Ergebnisse der Jahre 2023 und 2024 einzeln erläutert. Anschließend werden die Resultate beider Jahre miteinander verglichen und daraus Schlussfolgerungen gezogen.

### 5.5.1 Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen 2023

Für jeden Tag wurden für die von den beiden Sensoren gemessenen Maximal- und Minimalwerte vor Ort analysiert (siehe Abb. 36: Analyse der Oberflächentemperaturen S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt) ). Die Messergebnisse des Sensors im begrünten Bereich (S5) sind in der Darstellung in Lila, während die des Sensors im nicht begrünten Bereich (S6) in Magenta wiedergegeben sind. Der untersuchte Zeitraum umfasst die Tage vom 11. bis zum 16. August.

Die Oberflächentemperaturen im begrünten Bereich (S5) fallen niedriger aus als im Bereich ohne Begrünung (S6). Dabei erreichten die durch direkte Sonneneinstrahlung beeinflussten Spitzenwerte im begrünten Bereich knapp 40 °C, während die durchschnittlichen Tiefstwerte bei etwa 20 °C lagen, mit einem Minimum von 15 °C am 11. August. Im Gegensatz dazu überstiegen die Tageshöchstwerte im nicht begrünten Bereich die 50 °C Marke, während die minimalen Temperaturen vergleichbar mit denen im begrünten Bereich blieben.

Der Vergleich zeigt, dass die Tageshöchsttemperaturen der begrünten und unbegrünten Messstellen sich um etwa 10 °C unterscheiden. Die etwas höheren Minimaltemperaturen im begrünten Bereich könnten auf die isolierenden Eigenschaften der Vegetation zurückzuführen sein. Zudem könnte eine höhere Bodenfeuchtigkeit unter der Begrünung die nächtliche Abkühlung verlangsamen, da feuchte Böden durch die höhere Wärmespeicherkapazität des enthaltenen Wassers mehr Wärme aufnehmen und speichern können.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

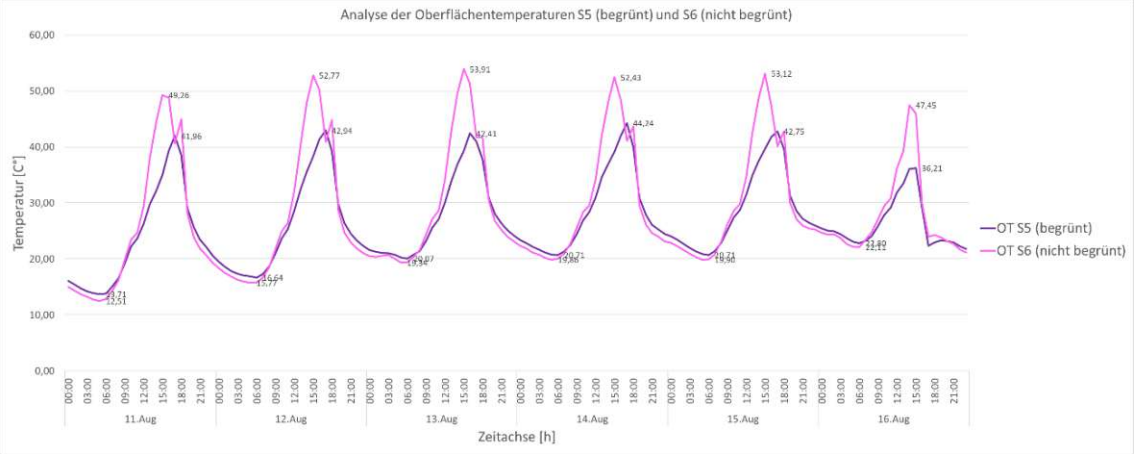


Abb. 36: Analyse der Oberflächentemperaturen S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt) [9]

Im Folgenden wird die Temperaturdifferenz zwischen den Sensoren S5 und S6 für die Maximal- und Minimaltemperaturen berechnet und in Tabelle 1 dargestellt. Die täglichen Temperaturabweichungen sowie deren Schwankungsbreiten werden dabei farblich markiert: rot steht für die Maximaltemperaturen, blau für die Minimaltemperaturen.

Tabelle 1: Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 5 und 6 [9]

| Tag | Verfahren | T max [C°] | Δ | T min [C°] | Δ |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.08. | S5 | 41,96 | -7,30 | 13,71 | 1,20 |
| | S6 | 49,26 | | 12,51 | |
| 12,08 | S5 | 42,94 | -9,83 | 16,64 | 0,87 |
| | S6 | 52,77 | | 15,77 | |
| 13,08 | S5 | 42,41 | -11,50 | 20,07 | 0,73 |
| | S6 | 53,91 | | 19,34 | |
| 14,08 | S5 | 44,24 | -8,19 | 20,71 | 1,85 |
| | S6 | 52,43 | | 18,86 | |
| 15,08 | S5 | 42,75 | -10,37 | 20,71 | 0,81 |
| | S6 | 53,12 | | 19,90 | |
| 16,08 | S5 | 36,21 | -11,24 | 22,80 | 0,69 |
| | S6 | 47,45 | | 22,11 | |

In Tabelle 2 wurden die Tagesmittelwerte der Maximal- und Minimaltemperaturen für den Zeitraum vom 11. bis 16. August berechnet. Diese

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Werte wurden separat für die Messstellen im begrünten und nicht begrünten Bereich ausgewertet. Zusätzlich wurde die Differenz zwischen den Tageshöchstwerten (rot) und den Tagesmindestwerten (blau) ermittelt.

Tabelle 2 zeigt die Standardabweichung, die die Streuung der Werte um den Mittelwert beschreibt. Diese wurde sowohl für die Maximaltemperaturen (rot) als auch für die Minimaltemperaturen (blau) berechnet. Hierfür wurde die Differenz jedes Datenpunkts zum Mittelwert quadriert, die Ergebnisse summiert und abschließend die Quadratwurzel gezogen.

Tabelle 2:Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S5 und S6 [9]

| | MAXIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T max [C°] | STABW T max [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S5 | 41,75 | 3,77 | -9,74 | ± 0.56 |
| S6 | 51,49 | 4,33 | | |

| | MINIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T min [C°] | STABW T min [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S5 | 19,11 | 6,60 | 1,03 | ± 0.08 |
| S6 | 18,08 | 6,68 | | |

Durch die Berechnung der Temperaturdifferenzen und -schwankungen wurde ein Differenzwert ermittelt, der den Einfluss der Begrünung verdeutlicht. Ziel ist es, die Auswirkungen der Fassadenbegrünung mithilfe dieser Ergebnisse in die weiteren Analysen einzubeziehen.

Die Auswertung zeigt, dass die Begrünung die Oberflächentemperaturen der sanierten Fassade signifikant reduziert. Die insgesamt niedrigeren Temperaturen im begrünten Bereich (S5) lassen sich auf die kühlende Wirkung der Vegetation zurückführen. Zusätzlich tragen begrünte Oberflächen durch ihre Beschattung zur Reduktion der direkten Sonneneinstrahlung bei, was eine weitere Abkühlung der Umgebungsluft begünstigt. Im Gegensatz dazu führen die höheren Temperaturen im unbewachsenen Bereich (S6) zu einer verstärkten Wärmeabstrahlung, die das Wärmeempfinden zusätzlich erhöht.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 5.5.2 Analyse der gemessenen Oberflächentemperaturen 2024

Für das Jahr 2024 wurden für jeden Tag die Maximal- und Minimalwerte der gemessenen Oberflächentemperaturen analysiert (Abb. 37: Analyse der Oberflächentemperaturen 2024 - S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt)). Der Sensor S5, der sich im begrünten Bereich befindet, ist in Lila dargestellt, während der Sensor S6 im nicht begrünten Bereich in Magenta angezeigt wird. Der betrachtete Zeitraum umfasst die Tage vom 11. bis 16. August 2024.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächentemperaturen im begrünten Bereich (S5) auch in diesem Jahr niedriger sind als im nicht begrünten Bereich (S6). Die höchste erreichte Temperatur im begrünten Bereich beträgt 52 °C, während die durchschnittlichen Tiefstwerte bei etwa 23 °C bis 24 °C liegen. Im Bereich ohne Begrünung hingegen liegen die Tageshöchstwerte über 57 °C. Die Minimaltemperaturen sind in beiden Bereichen ähnlich und variieren nur geringfügig.

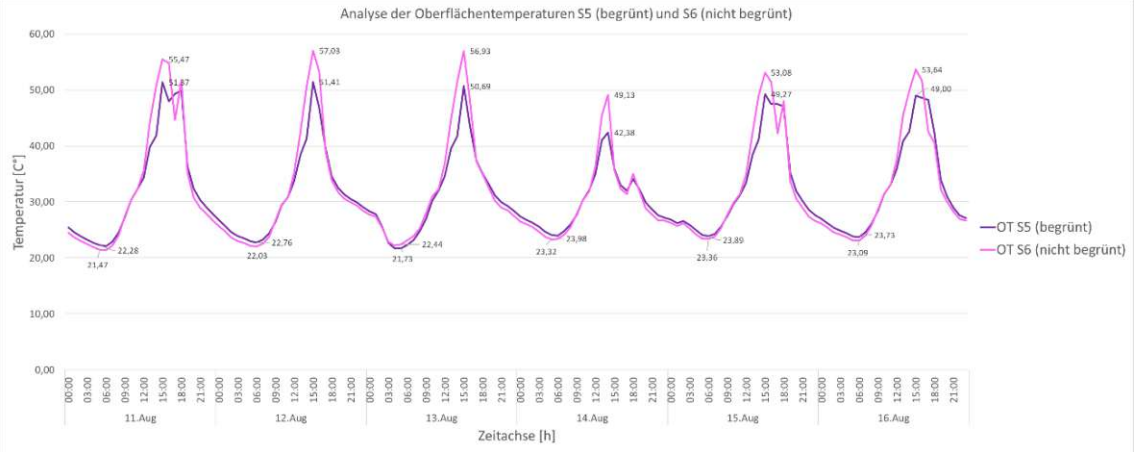


Abb. 37: Analyse der Oberflächentemperaturen 2024 - S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt)

Der Vergleich der jeweiligen Tageshöchsttemperaturen zeigt eine Differenz von 5,66 °C zwischen dem begrünten und unbegrünten Bereich.

In wurden die Tagesmittelwerte der Maximal- und Minimaltemperaturen berechnet, getrennt für den begrünten und nicht begrünten Bereich. Die Abweichungen der Maximaltemperaturen sind in Rot, die Abweichungen der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Minimaltemperaturen sind in blau dargestellt. Die Differenz zwischen Tagesmaxima und Tagesminima zeigt eine geringere Schwankung im begrünten Bereich, was auf die isolierende Wirkung der Vegetation zurückzuführen ist.

Tabelle 3 Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 5 und 6

| Tag | Verfahren | T max [C°] | Δ | T min [C°] | Δ |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.08. | S5 | 51,37 | -4,10 | 22,28 | 0,81 |
| | S6 | 55,47 | | 21,47 | |
| 12.08. | S5 | 51,41 | -5,62 | 22,76 | 0,73 |
| | S6 | 57,03 | | 22,03 | |
| 13.08. | S5 | 50,69 | -6,24 | 21,73 | -0,71 |
| | S6 | 56,93 | | 22,44 | |
| 14.08. | S5 | 42,38 | -6,75 | 23,98 | 0,66 |
| | S6 | 49,13 | | 23,32 | |
| 15.08. | S5 | 49,27 | -3,81 | 23,89 | 0,53 |
| | S6 | 53,08 | | 23,36 | |
| 16.08. | S5 | 49,00 | -4,64 | 23,73 | 0,64 |
| | S6 | 53,64 | | 23,09 | |
| | | | | | |
| | | | Δ max | | Δ min |
| MW | S5 | 49,02 | -5,19 | 23,06 | 0,44 |
| MW | S6 | 54,21 | | 22,62 | |

Die Mittelwerte der Maximal- und Minimaltemperaturen für den untersuchten Zeitraum sind in Tabelle 3 dargestellt. Der durchschnittliche Tageshöchstwert am Sensor 5 im begrünten Bereich beträgt 49,02 °C, während der entsprechende Wert am Sensor 6 im nicht begrünten Bereich bei 54,21 °C liegt. Somit ergibt sich eine durchschnittliche Differenz der Tageshöchsttemperaturen von 5,19 °C, wobei die Temperaturen an der begrünten Stelle deutlich niedriger ausfallen als an der unbegrünten.

Tabelle 4 zeigt die Standardabweichung der Messwerte. Die Daten verdeutlichen, dass die Temperaturen im unbegrünten Bereich stärkeren Schwankungen unterliegen, während die Begrünung zur Stabilisierung der Oberflächentemperaturen beiträgt. Die Mittelwerte der Temperaturdifferenzen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

betragen für die Maximaltemperaturen -5,19 °C ± 0,99, während sie für die Minimaltemperaturen bei 0,44 °C ± 0,35 liegen.

Tabelle 4: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S5 und S6

| | MAXIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T max [C°] | STABW T max [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S5 | 49,02 | 7,63 | -5,19 | ± 0.99 |
| S6 | 54,21 | 6,64 | | |

| | MINIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T min [C°] | STABW T min [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S5 | 23,06 | 2,02 | 0,44 | ± 0.35 |
| S6 | 22,62 | 1,67 | | |

Auch 2024 unterstreichen die Ergebnisse die kühlende Wirkung von Fassadenbegrünungen. Die Vegetation trägt durch die Transpiration zur Reduktion der Oberflächentemperaturen bei und mindert gleichzeitig die Schwankungen zwischen Tag- und Nachtwerten. Die beobachteten Werte bestätigen, dass begrünte Fassaden ein effektives Mittel zur Temperaturregulierung und zur Verbesserung des Mikroklimas darstellen.

### 5.5.3 Analyse - Vergleich Sensor 5 und 6 für beide Messjahre

Die Reduktion der Temperaturen durch die Begrünung ist im Jahr 2024 weniger ausgeprägt als im Jahr 2023. Die geringeren Temperaturunterschiede könnten auf eine Veränderung der Vegetationsdichte zurückzuführen sein.

Um eine Erklärung für diese Verringerung zu finden, wurde die Fassadenbegrünung an der Stelle des Sensor 5 genauer untersucht.

Die Fingerblättrige Akebie, welche an der Stelle von Sensor S5 gewählt wurde, ist dafür bekannt, dass sie sich "leicht verschlingt". Mit "leicht verschlingt" ist gemeint, dass die Pflanze durch ihr Wachstum und ihre Klettereigenschaften dazu neigt, sich um Objekte wie Rankhilfen, andere Pflanzen, Zäune oder Fassadenelemente zu wickeln. Diese Eigenschaft kann dazu führen, dass sie schnell andere Pflanzen überwuchert, ihre eigene Struktur verknotet oder

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

bauliche Elemente unerwünscht einnimmt. Betrachtet man Abb. 32: Sensor S5 - begrünt ©Sebastian Rosenberger, ist von dieser Eigenschaft der Pflanze allerdings nichts zu sehen. Die Ergebnisse lassen darauf deuten, dass sich die Pflanze im ersten Jahr gut entwickelt hat, dieser positive Trend sich allerdings nicht im zweiten Jahr fortgesetzt hat. Mit einer durchschnittlichen Senkung der Temperatur von rund 5 °C ist die Verbesserung durch diese Pflanze im Jahr 2024 nach wie vor signifikant, allerdings schwächer als noch im Jahr 2023. Hier lag die gemessene Temperatursenkung der Maximalwerte im Mittel bei etwa 9 °C.

## 5.6 **Analyse der Entwicklung der Fassadenbegrünung über die Zeit**

Zur Analyse der Entwicklung der Fassade im Zeitraum von 2023 bis 2024 wurde zunächst ein geeigneter Vergleich von Daten ermittelt. Wie bereits dargelegt, hat die direkte Sonneneinstrahlung einen entscheidenden Einfluss auf die von den Sensoren gemessenen Ergebnisse. Mit Ausnahme der Sensoren S5 und S6 befinden sich keine weiteren Sensorpaare auf der gleichen Höhe, was einen direkten Vergleich zwischen den anderen Sensoren erschwert.

Eine alternative Betrachtungsweise wäre die Analyse der Lufttemperatur anstelle der Oberflächentemperatur. In Abb. 30: Lufttemperatur aus Monitoring 2024 wird deutlich, dass die gemessenen Lufttemperaturen aller Sensoren nur geringe Abweichungen und sehr ähnliche Verläufe aufweisen. Der Vergleich zwischen Sensor 6 im dritten Obergeschoss und den Sensoren 1 und 2, die sich im Hochparterre und Mezzanin befinden, zeigt nahezu identische Werte. Daraus lässt sich ableiten, dass einerseits die Höhenlage der Sensoren und auch der Einfluss der Fassadenbegrünung in diesem Fall keinen oder nur einen minimalen Einfluss auf die gemessenen Lufttemperaturen hat. Daher ist ein Vergleich der Lufttemperaturen wenig aussagekräftig.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

### 5.6.1 Bewertung der Entwicklung der Begrünung von 2023 zu 2024

Zur Bewertung der Entwicklung der begrünten Fassade wurden folgende Vergleiche der Oberflächentemperaturen durchgeführt:

- Vergleich von Sensor 2 mit Sensor 4 im Jahr 2023
- Vergleich von Sensor 2 mit Sensor 4 im Jahr 2024
- Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2023
- Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2024

Die aus diesen Vergleichen ermittelten Temperaturdifferenzen können jedoch aufgrund der unterschiedlichen Positionen der Sensoren und der variierenden Sonneneinstrahlung nicht als absolute Werte interpretiert werden. Einzelbetrachtungen dieser Vergleiche sind daher wenig sinnvoll.

Ein direkter Vergleich beispielsweise der Temperaturwerte von Sensor 2 aus 2023 mit Sensor 2 aus 2024 wäre aufgrund der variierenden klimatischen Bedingungen in den beiden Jahren ebenfalls nicht sinnvoll. Stattdessen wurde ein anderer Ansatz gewählt: Es wurden die Temperaturdifferenzen aus dem Jahr 2023 mit den Temperaturdifferenzen aus dem Jahr 2024 verglichen.

Diese einzelnen Werte dürfen jedoch nicht isoliert als Verbesserung durch die Fassadenbegrünung interpretiert werden, da die Höhe der Sensoren und die damit verbundene direkte Sonneneinstrahlung eine wesentliche Rolle spielen. Dennoch ermöglicht dieser Ansatz, die Entwicklung der Verbesserungen zwischen 2023 und 2024 zu beurteilen, wenn die Daten der begrünten Stellen mit den Referenzwerten des unbegrünten Sensors 4 verglichen werden.

Auf diese Weise ist es möglich, einen Korrelationsfaktor zu ermitteln, der als zentrale Forschungsfrage dieser Arbeit behandelt wird.

Zunächst werden die Sensordaten verglichen und die Ergebnisse ausgewertet. Anschließend wird die zeitliche Entwicklung des jeweiligen Bereichs mit den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Auswertungsergebnissen verknüpft. Abschließend wird versucht, einen mathematischen Korrelationsfaktor abzuleiten, der den zusätzlichen Deckungsgrad der Vegetation durch Wachstum mit der Verbesserung der Oberflächentemperatur in Zusammenhang bringt.

### 5.6.2 Vergleich von Sensor 2 mit Sensor 4 im Jahr 2023

In der folgenden Abb. 38 ist in Rot der gemessene Oberflächentemperaturverlauf von Sensor 2 zu sehen. In blau ist die Kurve des Sensors 4. Wie erwartet ist zu erkennen, dass die Maximalwerte des Sensors 4 an jedem Tag deutlich höher sind als die Werte des tiefer gelegenen Sensors 2.

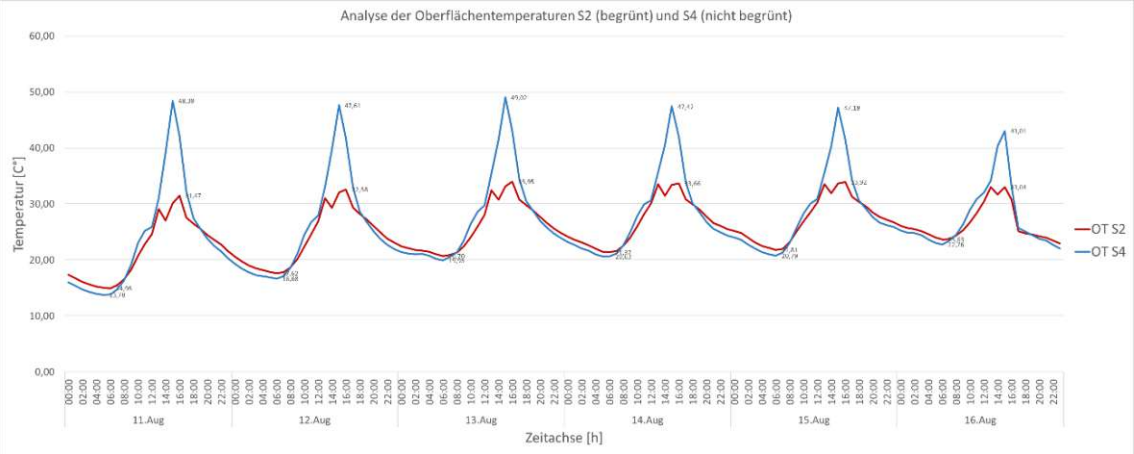


Abb. 38: Analyse der Oberflächentemperaturen S2 (begrünt) und S4 (nicht begrünt) 2023 [9]

Die Temperaturdifferenzen aus dem gewählten Zeitraum in 2023 zwischen den Sensoren S2 und S4 wurden für die maximalen und minimalen Messwerte berechnet und in Tabelle 5 dargestellt. Die Tabelle zeigt die entsprechenden Mittelwerte der berechneten Differenzen. Um die täglichen Temperaturabweichungen und deren Schwankungsbreite besser zu veranschaulichen, wurden die Maximaltemperaturen in rot und die Minimaltemperaturen in blau farblich gekennzeichnet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 5: Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 2 und 4 2023 [9]

| Tag | Verfahren | T max [C°] | Δ | T min [C°] | Δ |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.08.2023 | S2 | 31,47 | -16,92 | 14,95 | 1,17 |
| | S4 | 48,39 | | 13,78 | |
| 12.08.2023 | S2 | 32,58 | -15,03 | 17,62 | 0,94 |
| | S4 | 47,61 | | 16,68 | |
| 13.08.2023 | S2 | 33,95 | -15,07 | 20,70 | 0,75 |
| | S4 | 49,02 | | 19,95 | |
| 14.08.2023 | S2 | 33,66 | -13,76 | 21,37 | 0,74 |
| | S4 | 47,42 | | 20,63 | |
| 15.08.2023 | S2 | 33,92 | -13,26 | 21,81 | 1,02 |
| | S4 | 47,18 | | 20,79 | |
| 16.08.2023 | S2 | 33,04 | -9,97 | 23,63 | 0,87 |
| | S4 | 43,01 | | 22,76 | |

Die Tabelle 6 zeigt die Standardabweichung der Mittelwerte zwischen den maximalen und minimalen Temperaturen für die Sensoren S2 und S4 im Jahr 2023. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Differenz der maximalen Temperaturen zwischen den beiden Sensoren durchschnittlich 14,01 °C beträgt, wobei eine Standardabweichung von ±0,76 vorliegt. Für die minimalen Temperaturen beträgt die Differenz durchschnittlich 0,91 °C mit einer Standardabweichung von ±0,25.

Diese Werte verdeutlichen die Schwankungen der Temperaturmessungen und zeigen, dass die maximalen Temperaturen stärkeren Abweichungen unterliegen als die minimalen Temperaturen, was auf unterschiedliche Bedingungen wie Sonneneinstrahlung und die spezifische Position der Sensoren zurückzuführen sein könnte.

Tabelle 6: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S2 und S4 2023 [9]

| | MAXIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T max [C°] | STABW T max [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S2 | 33,1 | 2,15 | -14,01 | ± 0.76 |
| S4 | 47,11 | 2,91 | | |
| | | | | |
| | MINIMA | | | |
| | MW T min [C°] | STABW T min [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S2 | 20,01 | 6,25 | 0,91 | ± 0.25 |
| S4 | 19,1 | 6,5 | | |

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 5.6.3 Vergleich von Sensor 2 mit Sensor 4 im Jahr 2024

Die Abb. 39 zeigt den Verlauf der gemessenen Oberflächentemperaturen, wobei die Werte von Sensor 2 in rot und die von Sensor 4 in blau dargestellt sind. Wie zu erwarten war, liegen die Maximalwerte des höher positionierten Sensors 4 an allen Tagen deutlich über denen des tiefer gelegenen Sensors 2.

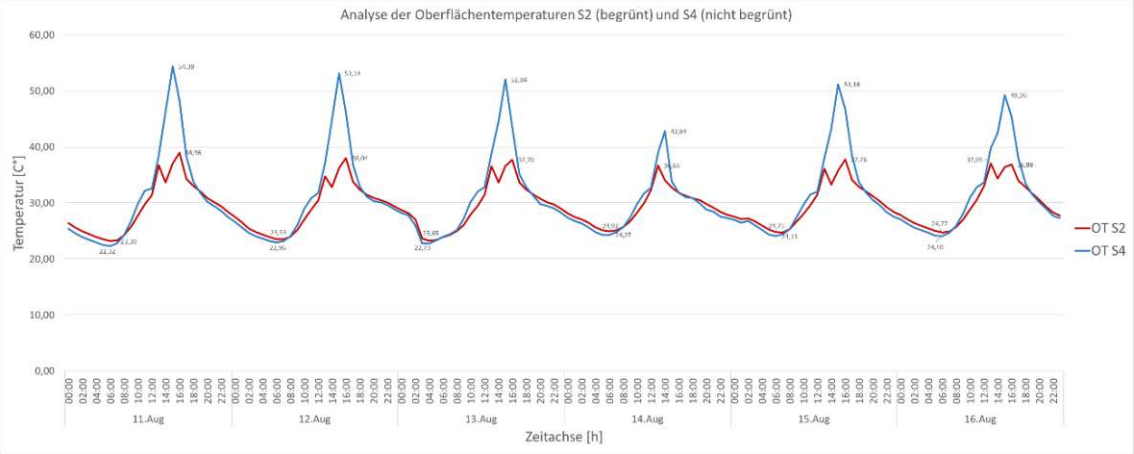


Abb. 39: Analyse der Oberflächentemperaturen S2 (begrünt) und S4 (nicht begrünt) 2024

In Tabelle 7 sind die Temperaturdifferenzen aufgelistet. Die Differenzen der Maximaltemperaturen sind in rot, die Minimaltemperaturen in blau gekennzeichnet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 7 Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 2 und 4 2024

| Tag | Verfahren | T max [C°] | Δ | T min [C°] | Δ |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.08.2024 | S2 | 38,96 | -15,43 | 23,30 | 0,98 |
| | S4 | 54,39 | | 22,32 | |
| 12.08.2024 | S2 | 38,04 | -15,10 | 23,53 | 0,57 |
| | S4 | 53,14 | | 22,96 | |
| 13.08.2024 | S2 | 37,70 | -14,34 | 23,65 | 0,92 |
| | S4 | 52,04 | | 22,73 | |
| 14.08.2024 | S2 | 36,65 | -6,19 | 24,92 | 0,65 |
| | S4 | 42,84 | | 24,27 | |
| 15.08.2024 | S2 | 37,76 | -13,40 | 24,75 | 0,64 |
| | S4 | 51,16 | | 24,11 | |
| 16.08.2024 | S2 | 37,05 | -12,21 | 24,77 | 0,67 |
| | S4 | 49,26 | | 24,10 | |
| | | | Δ max | | Δ min |
| MW | S2 | 37,69 | -12,78 | 24,15 | 0,74 |
| MW | S4 | 50,47 | | 23,42 | |

Tabelle 8 zeigt das Ergebnis aus der Mittelung der Differenz der Sensoren. Hier ist eine Abweichung von 12,78 °C an den beiden Stellen gegeben. Diese Abweichung hängt einerseits von der Messposition, andererseits von der Fassadenbegrünung ab.

Tabelle 8: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S2 und S4 2024

| | MAXIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T max [C°] | STABW T max [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S2 | 37,69 | 1,7 | -12,78 | ± 7.46 |
| S4 | 50,47 | 9,16 | | |

| | MINIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T min [C°] | STABW T min [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S2 | 24,15 | 1,54 | 0,73 | ± 0.24 |
| S4 | 23,42 | 1,78 | | |

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

### 5.6.4 Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2023

Die nachkommende Abb. 40 zeigen die Kurven von Sensor 3 in grün und Sensor 4 in blau.

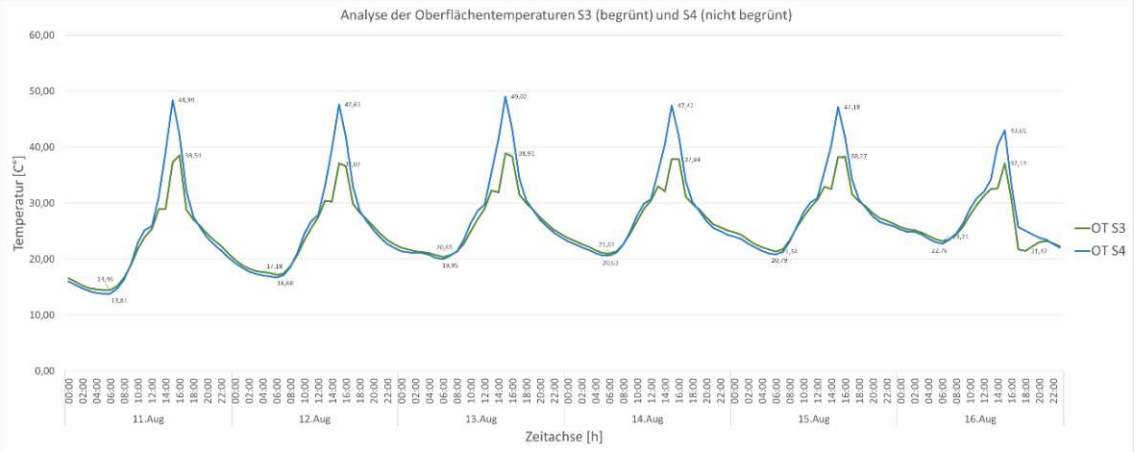


Abb. 40: Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2023 [9]

Tabelle 9 zeigt die Auflistung der Abweichungen zwischen den Sensoren im gewählten Zeitraum. Die Maxima sind in rot, die Minima in blau markiert.

Tabelle 9:Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 2 und 4 2023 [9]

| Tag | Verfahren | T max [C°] | Δ | T min [C°] | Δ |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.08.2023 | S3 | 38,54 | -9,85 | 14,46 | 0,65 |
| | S4 | 48,39 | | 13,81 | |
| 12.08.2023 | S3 | 37,07 | -10,54 | 17,18 | 0,50 |
| | S4 | 47,61 | | 16,68 | |
| 13.08.2023 | S3 | 38,91 | -10,11 | 20,65 | 0,70 |
| | S4 | 49,02 | | 19,95 | |
| 14.08.2023 | S3 | 37,84 | -9,58 | 21,01 | 0,38 |
| | S4 | 47,42 | | 20,63 | |
| 15.08.2023 | S3 | 38,27 | -8,91 | 21,34 | 0,55 |
| | S4 | 47,18 | | 20,79 | |
| 16.08.2023 | S3 | 37,13 | -5,88 | 23,21 | 0,45 |
| | S4 | 43,01 | | 22,76 | |

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die daraus folgenden Ergebnisse sind in Tabelle 10 ersichtlich. Hier zeigt sich eine Abweichung von 9,15 °C zwischen den beiden Sensoren im gemittelten Maximum.

Tabelle 10: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S3 und S4 2023 [9]

| | MAXIMA | | | |
|---|---|---|---|---|
| | MW T max [C°] | STABW T max [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S3 | 37,96 | 1,5 | -9,15 | ± 1.41 |
| S4 | 47,11 | 2,91 | | |
| | | | | |
| | MINIMA | | | |
| | MW T min [C°] | STABW T min [C°] | MW Δ | STABW Δ |
| S3 | 19,64 | 6,39 | 0,54 | ± 0.09 |
| S4 | 19,1 | 6,48 | | |

### 5.6.5 Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2024

Die Abb. 41 zeigt den Verlauf der gemessenen Oberflächentemperaturen, wobei die Werte von Sensor 3 in grün und die von Sensor 4 in blau dargestellt sind. Auch hier liegen die Maximalwerte des höher positionierten Sensors 4 an allen Tagen deutlich über denen des tiefer gelegenen Sensors 2.

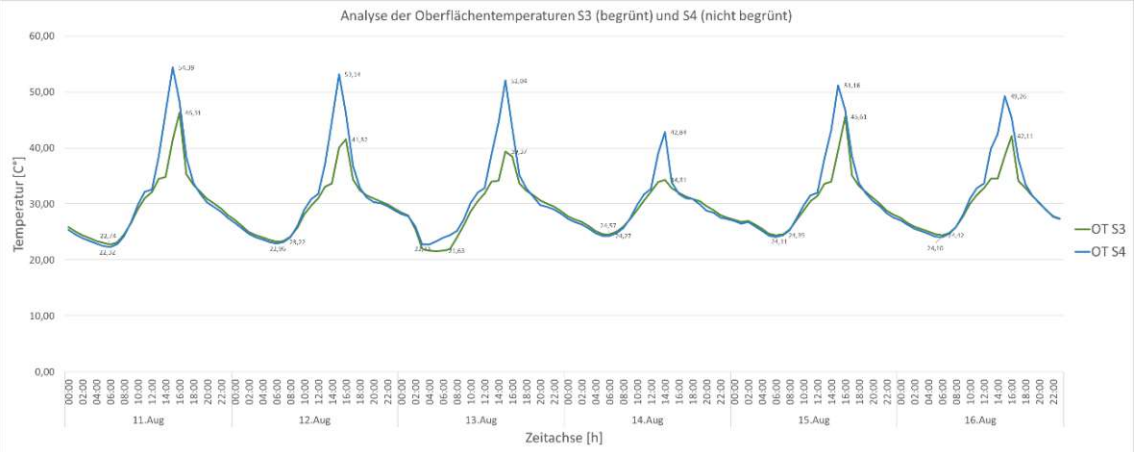


Abb. 41: Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die Tabelle 11 zeigt die Differenzen von den beiden Sensoren im gewählten Zeitraum. Hier sind wieder die Maximalwerte in rot und die Minimalwerte in blau gekennzeichnet.

Tabelle 11 Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 3 und 4 2024

| Tag | Verfahren | T max [C°] | Δ | T min [C°] | Δ |
|---|---|---|---|---|---|
| 11.08.2024 | S3 | 46,31 | -8,08 | 22,74 | 0,42 |
| | S4 | 54,39 | | 22,32 | |
| 12.08.2024 | S3 | 41,52 | -9,62 | 23,22 | 0,26 |
| | S4 | 51,14 | | 22,96 | |
| 13.08.2024 | S3 | 39,37 | -12,67 | 21,63 | -1,10 |
| | S4 | 52,04 | | 22,73 | |
| 14.08.2024 | S3 | 34,31 | -8,53 | 24,57 | 0,30 |
| | S4 | 42,84 | | 24,27 | |
| 15.08.2024 | S3 | 45,61 | -5,55 | 24,39 | 0,28 |
| | S4 | 51,16 | | 24,11 | |
| 16.08.2024 | S3 | 42,11 | -7,15 | 24,42 | 0,32 |
| | S4 | 49,26 | | 24,10 | |
| | | | | | |
| | | | Δ max | | Δ min |
| MW | S3 | 41,54 | -8,60 | 23,50 | 0,08 |
| MW | S4 | 50,14 | | 23,42 | |

Hier ergibt sich eine Abweichung der durchschnittlichen Maximalwerte von 8,6 °C, die Minimalwerte weichen nur geringfügig voneinander ab.

### 5.6.6 Auswertung der Entwicklung

Die in den beiden folgenden Tabellen dargestellten durchschnittlichen Abweichungen dürfen nicht als rein durch die Begrünung bedingte Verbesserung interpretiert werden, da die Messergebnisse des höher angebrachten Sensors, wie zu erwarten war, in jedem Zeitraum deutlich über denen der tiefer platzierten Sensoren lagen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Um eine Tendenz zum Einfluss des Deckungsgrads der Fassadenbegrünung auf die Temperatursenkung zu erkennen, wurde die nachfolgende Tabelle erstellt:

Tabelle 12: Ergebnisse Vergleich Sensor 2 und 4

| Zeitraum | MAXIMA MW Δ | MINIMA MW Δ | Deckungsgrad |
|---|---|---|---|
| 2023 | -14,01 °C | 0,91 °C | 40 % |
| 2024 | -12,78 °C | 0,73 °C | 60 % |

Der Deckungsgrad der Fassadenbegrünung, wie in Tabelle 12 dargestellt, wurde anhand einer optischen Analyse von Fotos abgeschätzt.

Beim Vergleich der Maximalwerte im ersten Fall (Sensor 2 im Vergleich zu Sensor 4) wird deutlich, dass trotz einer Zunahme des Deckungsgrads um etwa 20 Prozent die durchschnittlichen Tagesmaximaltemperaturen weniger stark reduziert wurden als im Vorjahr. Dieses Ergebnis lässt sich darauf zurückführen, dass die Position des Sensors, der die Oberflächentemperatur misst, eine entscheidende Rolle spielt.

Zwar hat sich die Pflanze im Laufe des Jahres gut entwickelt und der Deckungsgrad insgesamt zugenommen, jedoch befand sich im Jahr 2023 ein kleinerer, dichter bewachsener Bereich direkt in der Nähe des Sensors. Im Jahr 2024 hingegen hat sich die Pflanze stärker im oberen Bereich der Kletterhilfe ausgebreitet, während die Blattdichte im Bereich des Sensors geringer ausfiel als im Vorjahr. Der Schattenwurf, der durch die Blattdichte beeinflusst wird, hat dabei einen erheblichen Einfluss auf die von den Sensoren gemessenen Temperaturwerte.

Auch im zweiten Vergleich (Sensor 3 im Vergleich zu Sensor 4, Tabelle 13) lässt sich eine Steigerung des Deckungsgrades und somit eine positive Entwicklung der begrünten Fassade feststellen. Während im Jahr 2023 die durchschnittliche Temperatursenkung der Maximalwerte bei 9,15 °C lag, betrug

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

diese im darauffolgenden Jahr trotz der zunehmenden Begrünung nur noch 8,6 °C.

Tabelle 13: Ergebnisse Vergleich Sensor 3 und 4

| Zeitraum | MAXIMA MW Δ | MINIMA MW Δ | Deckungsgrad |
|---|---|---|---|
| 2023 | -9,15 °C | 0,54 °C | 50 % |
| 2024 | -8,60 °C | 0,08 °C | 80 % |

Die relativ geringen Abweichungen in den Messergebnissen des zweiten Vergleichs bestätigen die positiven Effekte der Fassadenbegrünung. Allerdings kann die Hypothese, dass eine Zunahme des Deckungsgrads auch zu einer Steigerung der kühlenden Effekte führt, in diesem Fall nicht bestätigt werden.

Aufgrund der begrenzten Möglichkeiten zur Positionierung der Sensoren kann im Rahmen dieses Forschungsprojekts kein aussagekräftiger mathematischer Korrelationsfaktor entwickelt werden, der den Deckungsgrad der Begrünung zuverlässig mit der Temperatursenkung in Beziehung setzt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# 6 Fazit

Die vorliegende Arbeit befasste sich mit der Untersuchung der hygrothermischen Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an einem sanierten Altbau im städtischen Kontext. Über den Zeitraum von zwei Jahren wurden umfangreiche Messdaten erhoben und analysiert, um die Effekte der Begrünung auf Oberflächentemperaturen, Lufttemperaturen und Luftfeuchtigkeit zu bewerten.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Fassadenbegrünungen signifikant zur Reduktion von Oberflächentemperaturen beitragen können. Dies gilt insbesondere für sommerliche Hochtemperaturphasen, in denen die Begrünung eine wirksame Maßnahme zur Entlastung der Gebäude und des umgebenden Mikroklimas darstellt. Die in Kapitel 3.3 dargestellte Studie *„Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden auf das Innenraumklima“ von David Marx* verdeutlicht, dass die Senkung der Oberflächentemperatur einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Innenräumen leistet, insbesondere während der Sommermonate.

Die vorliegende Untersuchung hat gezeigt, dass der Einfluss der Fassadenbegrünung auf die Ergebnisse stark von den lokalen Bedingungen auf die Sensoren abhängt. Eine Erkenntnis ist, dass eine Zunahme des Deckungsgrades in einem Bereich der Begrünung nicht immer proportional zu einer weiteren Reduktion der gemessenen Temperaturen führt. Die Analyse offenbarte methodische Herausforderungen. Insbesondere die Position der Messsensoren und die variierenden Lichtverhältnisse im Innenhof beeinflussten die Messergebnisse. Dieser große Einfluss wurde auch in der Arbeit „Validierung von Mikroklimasimulationen zur Quantifizierung der Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen“ von Florian Teichmann verdeutlicht.

Die Studie „Predictive model of surface temperature difference between green façades and uncovered wall in Mediterranean climatic area“ zeigt, dass statistische Modelle mit geringem Rechenaufwand zuverlässige Ergebnisse liefern, ohne spezifische Pflanzenmerkmale zu berücksichtigen. Die alleinige Verwendung von Klimadaten ermöglicht eine hohe Vorhersagegenauigkeit und Effizienz, unabhängig von den Eigenschaften der verwendeten Vegetation.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Für eine Analyse des Pflanzenwachstums einer begrünten Fassade ist die Implementierung eines Monitoringsystems erforderlich, dass eine regelmäßige und systematische optische Begutachtung der Fassade ermöglicht. Dabei sollte besonders darauf geachtet werden, Fotos aus ausreichender Entfernung und mit minimaler Verzerrung aufzunehmen, um eine möglichst objektive und vergleichbare Dokumentation zu gewährleisten. Durch die gezielte Auswahl sowie die optimale Platzierung von Sensoren und eines Monitoringsystems zur Erfassung des Pflanzenwachstums kann in einem zukünftigen Forschungsprojekt eine präzise Analyse ermöglicht werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Fassadenbegrünungen ein wirkungsvolles Instrument zur Anpassung an den Klimawandel darstellen und eine Vielzahl ökologischer sowie städtebaulicher Vorteile bieten. In den Kapiteln 3.4 und 3.7 wurden Praxisbeispiele für verschiedene Begrünungskonzepte vorgestellt und deren positive Effekte ausführlich untersucht.

Für zukünftige Forschungsarbeiten sind spezifische Rahmenbedingungen erforderlich, um die Langzeiteffekte des Pflanzenwachstums sowie die Effizienz solcher Systeme genauer analysieren, besser verstehen und gezielt optimieren zu können.

# 7 Ausblick

Die vorliegende Arbeit konnte wichtige Einblicke in die hygrothermischen Effekte von Fassadenbegrünungen gewinnen, zeigte jedoch auch auf, dass in zukünftigen Forschungsprojekten noch einige Fragestellungen offenbleiben.

Eine zentrale Erkenntnis ist, dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Sensoren an der Fassadenbegrünung im untersuchten Innenhof schwierig war. Hauptgrund dafür war die ungleichmäßige direkte Sonneneinstrahlung auf die Sensoren.

Zukünftige Studien sollten ein umfassendes Monitoringsystem für das Wachstum der Pflanzen integrieren, das eine kontinuierliche und systematische Überwachung der Fassadenbegrünung ermöglicht. Dieses System könnte durch regelmäßige Datenerhebungen, wie z. B. fotografische Dokumentationen aus

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

standardisierten Perspektiven, ergänzt werden, um die Entwicklung des Deckungsgrades präzise zu erfassen.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass eine deutlich größere Anzahl an Sensoren erforderlich ist, um zuverlässige Messergebnisse zu erzielen. Es wäre sinnvoll, an jedem Abschnitt der Fassade, also an jeder einzelnen Kletterhilfe, mehrere Sensoren zu installieren, um die lokalen Unterschiede im Pflanzenwachstum und deren Einfluss auf die Messwerte genauer zu analysieren. Zusätzlich sollten mindestens zwei oder mehr Sensoren an unbegrünten Bereichen der Fassade angebracht werden, um verlässliche Referenzwerte zu erhalten. Diese Erweiterungen würden eine umfassendere und differenziertere Bewertung der thermischen Effekte der Begrünung ermöglichen.

Ein weiteres vielversprechendes Forschungsthema ist die Untersuchung des Wasserverbrauchs der Pflanzen. Die Ergebnisse dieser Arbeit legen nahe, dass Fassadenbegrünungen zur Erhöhung der lokalen Luftfeuchtigkeit durch Transpiration der Pflanzen und Evaporation des Substrats beitragen können. Zukünftige Studien könnten untersuchen, wie sich diese Effekte bei verschiedenen Pflanzen, Substraten und Trogsystemen einstellen und wie sie mit dem jeweiligen Wasserverbrauch korrelieren.

Zusammenfassend bieten Fassadenbegrünungen großes Potenzial für die städtische Klimaanpassung. Um ihre Effekte jedoch umfassend zu quantifizieren und zu optimieren, bedarf es weiterer interdisziplinärer Studien, die sowohl die technischen als auch die biologischen und ökologischen Aspekte berücksichtigen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

# 8 Anhang

## 8.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Ausschnitt Stadtplan (Quelle: www.wien.gv.at) ....21
Abb. 2: Vogelperspektive des Simulationsmodells - Ansicht Ost © iC consulenten....23
Abb. 3: Simulationsmodell - Zonengruppierungen © iC consulenten ....24
Abb. 4: Trogsystem ©Sebastian Rosenberger....27
Abb. 5: Wandgebundene Tröge mit Kletterpflanzen @Sebastian Rosenberger29
Abb. 6: Bepflanzungsplan Fassadenbegrünung © FRICKE Gründächer und Gartengestaltung ....30
Abb. 7: Aufnahme September 2023 @Nejra Ribic Berbic....33
Abb. 8: Aufnahme September 2024 @Sebastian Rosenberger....33
Abb. 9: Sensorenplan ©Technische Universität Wien....35
Abb. 10: Sensorpositionen an der Fassade @Technische Universität Wien ....36
Abb. 11: Sensor T4/F4 3D Modell ©Technische Universität Wien ....37
Abbildung 12: Position Sensor T2/F2 @Sebastian Rosenberger ....37
Abb. 13: Simulation der Wetterdaten 01.08.2024 bis 07.08.2024 ....39
Abb. 14: Simulation der Wetterdaten 08.08.2024 bis 14.08.2024 ....39
Abb. 15: Simulation der Wetterdaten 15.08.2024 bis 21.08.2024 ....40
Abb. 16: Messungen vor Ort 01.08.2024 bis 07.08.2024....41
Abb. 17: Messungen vor Ort 08.08.2024 bis 14.08.2024....41
Abb. 18: Messungen vor Ort 15.08.2024 bis 21.08.2024....42
Abb. 19: Sonnenstand 1.OG ©iC consulenten....43
Abb. 20: Sonnenstand EG ©iC consulenten ....43
Abb. 21: Sonnenstand 2.OG ©iC consulenten....44
Abb. 22: Sonnenstand 3.OG ©iC consulenten....44
Abb. 23: Mezzanin und 1.Stock - September 2023 ©Nejra Ribic Berbic....45
Abb. 24: Mezzanin und 1.Stock - September 2024 ©Sebastian Rosenberger..45
Abb. 25 Vergleich Simualtion mit Monitoring 2023 [4]....51
Abb. 26: Vergleich Simulation mit Monitoring 2024....51
Abb. 27: simulierte Wetterdaten des gewählten Zeitraums....52
Abb. 28: Oberflächentemperaturen aus Simulation ....53
Abb. 29: Oberflächentemperatur aus Monitoring 2024 ....54

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abb. 30: Lufttemperatur aus Monitoring 2024 ..... 55
Abb. 31: Luftfeuchtigkeit Monitoring 2024 ..... 56
Abb. 32: Sensor S5 - begrünt ©Sebastian Rosenberger ..... 57
Abb. 33: Sensor S6 - nicht begrünt ©Sebastian Rosenberger ..... 57
Abb. 34: Gegenüberstellung Luftfeuchtigkeit 2024: S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt) ..... 58
Abb. 35: Gegenüberstellung Luftfeuchtigkeit 2023: S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt) ..... 58
Abb. 36: Analyse der Oberflächentemperaturen S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt) [4] ..... 61
Abb. 37: Analyse der Oberflächentemperaturen 2024 - S5 (begrünt) und S6 (nicht begrünt) ..... 63
Abb. 38: Analyse der Oberflächentemperaturen S2 (begrünt) und S4 (nicht begrünt) 2023 [4] ..... 68
Abb. 39: Analyse der Oberflächentemperaturen S2 (begrünt) und S4 (nicht begrünt) 2024 ..... 70
Abb. 40: Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2023 [4] ..... 72
Abb. 41: Vergleich von Sensor 3 mit Sensor 4 im Jahr 2024 ..... 73

## 8.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 5 und 6 ©Nejra Ribic Berbic ..... 61
Tabelle 2:Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S5 und S6 ©Nejra Ribic Berbic ..... 62
Tabelle 3 Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 5 und 6 ..... 64
Tabelle 4: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S5 und S6 ..... 65
Tabelle 5: Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 2 und 4 2023 ..... 69
Tabelle 6: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S2 und S4 2023 ..... 69
Tabelle 7 Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 2 und 4 2024 ..... 71
Tabelle 8: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S2 und S4 2024 ..... 71
Tabelle 9:Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 2 und 4 2023 ..... 72

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tabelle 10: Standardabweichung des Mittelwerts zwischen maximaler und minimaler Temperatur für S3 und S4 2023 ..... 73
Tabelle 11 Temperaturdifferenz zwischen Höchst- und Tiefsttemperatur für Sensor 3 und 4 2024 ..... 74
Tabelle 12: Ergebnisse Vergleich Sensor 2 und 4 ..... 75
Tabelle 13: Ergebnisse Vergleich Sensor 3 und 4 ..... 76

## 9 Literatur

[1] Wiener Umweltschutzabteilung - Magistratsabteilung 22*, www.wien.gv.at: Urban Heat Island Strategieplan Wien., 2015.*

[2] Howard, L. (1820), *The Climate of London: Deduced from Meteorological Observations Made at Different Places in the Neighbourhood of the Metropolis.* London: W. Phillips

[3] Oke, T. R. (1981), *Canyon Geometry and the Nocturnal Urban Heat Island: Comparison of Scale Model and Field Observations.* Journal of Climatology

[4] Eliasson I. (2000), *The Use of Climate Knowledge in Urban Planning.* Landscape and Urban Planning

[5] Böttner H., Graf W., & von Stülpnagel A. (2012), *Einfluss der Flächennutzung auf das Mikroklima in urbanen Räumen.* Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 230, Offenbach

[6] Kuttler W. (2011), *Stadtklima.* In W. Kuttler (Ed.), Handbuch der Stadtökologie. Stuttgart: Ulmer Verlag

[7] EPA (U.S. Environmental Protection Agency) (2008), *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies.* Washington, DC: EPA

[8] ÖNORM L 1136:2021-04

[9] N. Ribic Berbic (2024), *Evaluierung thermischer Auswirkungen von Fassadenbegrünung im historischen, renovierten Altbau*

[10] A. Heinrich (2019), *Klimawandel und urbaner Hitzeinseleffekt: Potenziale und Herausforderungen der Fassadenbegrünung*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[11] D.Marx (2023), *Auswirkungen von Fassadenbegrünungen an Bestandsgebäuden auf das Innenraumklima*

[12] Florian Teichmann (2024), *Validierung von Mikroklimasimulationen zur Quantifizierung der Kühlwirkung von Fassadenbegrünungen*

[13] Blanco, I., Schettini, E., & Vox, G. (2019), *Predictive model of surface temperature difference between green façades and uncovered wall in Mediterranean climatic area.* Applied Thermal Engineering

[14] Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., & Cabeza, L. F. (2014), *Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings:* A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews

[15] Djedjig, R., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2017), *Modeling and optimization of living walls for buildings using experimental data.* Applied Energy

[16] Scarpa, M., Vasco, D., & Ruiz, P. (2018), *Dynamic simulation and validation of living walls through field measurements.* Renewable Energy

[17] M. Potyka, M. Groth, M. Quante, S. Bender (2022), *Die Wirkung von Begrünungskonzepten auf das Mikroklima an hitzebelasteten Standorten Lüneburgs*

[18] K. Rehfeldt, T. Zölch, S. Erlwein, S. Pauleit, S. Linke (2024), *Potenziale und Wirkungen grüner Infrastruktur für Klimaresilienz*

[19] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2015), *Wandgebundene Begrünungen Quantifizierung einer neuen Bauweise in der Klima-Architektur*

[20] Alufritze - Technisches Datenblatt EN AW-5754 (AlMg3), *https://alufritze.de/media/products/datenblatt-alufritze-almg3.pdf. [Zugriff am 15.12.2024]*

[21] *https://www.optigruen.de/produkte/substrate/intensivsubstrat-i-leicht [Zugriff am 19.12.2024]*

[22] Brickell, C., & Zuk, J. D. (2004), *The American Horticultural Society Encyclopedia of Plants and Flowers*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

[23] Hess, D. (2016), *Ziergehölze: Beschreibung von Klettergehölzen mit Fokus auf Standort, Pflege und Wuchs*

[24] Grünberger, S. (2019), *Kletterpflanzen: Planung und Gestaltung mit Rankern und Schlingern*

[25] Roloff, A., & Bärtels, A. (2020), *Flora der Gehölze: Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung*

[26] Royal Horticultural Society (2025), *Plant Profiles: Clematis, Lonicera, Akebia*

[27] Huxley, A. (1999), *The New Royal Horticultural Society Dictionary of Gardening*

[28] Deutscher Gartenratgeber 2025, *www.gartenratgeber.de Fassadenbegrünung: Tipps und Pflanzenporträts*

[29] Meteotest AG (2022), *Meteonorm 8 Handbook part I – Global Meteorological Database Version 8.2; Sortware and Data for Engineers, Planers and Education*

[30] *https://www.geosphere.at/de* [Zugriff am 25.11.2024]

[31] Simon Greta (2020), *Risiken und Chancen von Fassadenbegrünung im urbanen Raum und der Vergleich von vertikalen Begrünungssystemen*

[32] Bundesverband GebäudeGrün e.V. (BuGG) *Schützen, dämmen, kühlen – Grüner Alleskönner?*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.