

Diplomarbeit

Begrünungsmonitoring mit bildgebenden Verfahren

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieurin

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Imaging techniques for monitoring green walls

submitted in satisfaction of the requirements for the degree

Diplom-Ingenieurin

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

Zorica Milosevic, BSc

Matr.Nr.: 01428312

Betreuung: Univ.Prof.in Dipl.-Ing.in Dr.in techn. **Azra Korjenic**
 Univ.Ass. Dipl.-Ing.. **Florian Teichmann**
 Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
 Forschungsbereich Ökologische Bautechnologien
 Technische Universität Wien
 Karlsplatz 13/E 207-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2024



Danksagung

Ich möchte meine aufrichtige Dankbarkeit gegenüber meiner Professorin, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Azra Korjenic, ausdrücken. Ihre fachliche Expertise, unterstützende Anleitung und konstruktive Kritik haben maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss dieser Masterarbeit beigetragen. Ich schätze die investierte Zeit und Mühe, um mich zu leiten und zu inspirieren.

Ein besonderer Dank geht auch an meinen Assistenten, Univ.Ass. Dipl.-Ing. Florian Teichmann, der stets zur Verfügung stand, um meine Fragen zu beantworten, Feedback zu geben und wertvolle Einblicke in die Forschung zu teilen. Die Zusammenarbeit mit ihm hat meine Perspektive erweitert und mein wissenschaftliches Verständnis vertieft.

Ein weiteres Dankeschön gilt Alexander Pichlhöfer, der mich tatkräftig im experimentellen Teil unterstützt hat. Seine technische Expertise und Engagement haben dazu beigetragen, dass die experimentellen Aspekte dieser Arbeit erfolgreich umgesetzt werden konnten.

Diese Masterarbeit ist meinem Vater, Desimir Milosevic, gewidmet, dessen unermüdlicher Einsatz für Bildung und inspirierende Hingabe meine akademische Reise maßgeblich beeinflusst hat.

Ich möchte mich außerdem bei meinen Mitstudierenden und meiner Familie bedanken, die mich während des gesamten Prozesses ermutigt und unterstützt haben. Euer Vertrauen und moralische Unterstützung waren entscheidend für den Erfolg dieser Reise.

Dankeschön an alle, die auf ihre Weise zu diesem bedeutenden Kapitel meines akademischen Lebens beigetragen haben.

Zorica Milosevic

Kurzfassung

Begrünungsmonitoring mit bildgebenden Verfahren

In dieser Arbeit wird die Machbarkeit der Nutzung von bildgebenden Verfahren wie der Thermografie zur Überprüfung der ordnungsgemäßen Funktion von Bewässerungssystemen von Innenraumbegrünungen untersucht. Erste Versuche zu diesem Thema wurden im Rahmen des Zukunftsstadt-Projekts "DRoB -Drohnen und Robotik für effizientes Monitoring und Pflegemanagement von Gebäudebegrünungen" an horizontalen Begrünungen durchgeführt. Die vorliegende Diplomarbeit baut auf den Ergebnissen dieses Forschungsprojekts auf und führt vergleichbare Experimente an einer vertikalen grünen Wand durch. Für die Messung relevante Einflussfaktoren wie Pflanzenart, Umgebungsbedingungen und Bewässerungsgrad werden im Rahmen dieses Versuchs untersucht.

In diesem Versuch geht es darum, einen passenden Prüfaufbau zu entwickeln, mit dem die Temperatur von Grünwänden in Innenräumen mithilfe einer Wärmebildkamera gemessen werden kann. Das Hauptziel ist, die effektive Nutzung von Temperaturmessungen durch eine Wärmebildkamera unter realen Bedingungen zu testen, um unterschiedliche Bewässerungsmengen zu erkennen. Dadurch soll in Zukunft die automatische Bewässerung von Grünwänden bedarfsgesteuert ermöglicht werden. Nach Auswertung des Versuchs ergaben sich folgende Ergebnisse:

- Ein allgemeiner Vergleich der beiden Messungen zu Beginn des Versuchs und nach 14 Tagen zeigt, dass sich die gemessene Temperatur bei allen Pflanzenarten in Abhängigkeit von den verschiedenen Bewässerungsbedingungen verändert. Die Grünlilie und das Einblatt wiesen einen durchschnittlichen Temperaturunterschied von $0,85^{\circ}\text{C}$ auf, gefolgt vom Kletterphilodendron mit $0,70^{\circ}\text{C}$.
- Grünlilie - es zeigt sich, dass eine angemessene Bewässerung für eine gleichbleibend niedrige Temperatur bei Pflanzen sorgt, während eine unzureichende Bewässerung zu höheren Temperaturunterschieden führt. Die nicht bewässerten Pflanzen wiesen nach 19 Tagen ohne ausreichende Bewässerung eine Temperaturdifferenz von $1,25^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zu den bewässerten Pflanzen auf.
- Kletterphilodendron - die Temperaturunterschiede des Kletterphilodendrons nach der Bewässerung sind im Vergleich zu Grünlilie und Einblatt geringer. Die Temperaturunterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Kletterphilodendron-Pflanzen variieren im Laufe des Experiments und liegen bei etwa $0,5^{\circ}\text{C}$, bevor sie in den letzten drei Tagen auf $0,7-0,85^{\circ}\text{C}$ ansteigen.
- Einblatt - die Untersuchung von Einblatt-Pflanzen unter Bedingungen von Wassermangel zeigt, dass diese Pflanzen als erste Anzeichen einer Temperaturerhöhung aufweisen, die auf einen Mangel

an Wasser zurückzuführen ist. Die erhöhte Temperatur und visuelle Anzeichen von Stress deuten darauf hin, dass die Pflanzen unter Wassermangel leiden und ihre Gesundheit beeinträchtigt ist.

Abstract

Imaging techniques for monitoring green walls

The topic of this work is the feasibility analysis of the use of imaging techniques (e.g. thermography) to determine the proper functioning of the irrigation system of indoor green spaces. Initial investigations have already taken place on horizontal greenery as part of the City of the Future project "DRoB - Drones and Robotics for Efficient Monitoring and Maintenance Management of Green Buildings". Following on from the results of this research project, comparable tests will be carried out on a vertical green wall as part of this work. Influencing factors relevant to the measurement, such as plant type, environmental conditions, lighting and degree of irrigation, are to be investigated in the context of these trials.

The aim of this experiment is to develop a suitable test set-up to measure the temperature of indoor plants using a thermal imaging camera. The main objective is to test the effective use of thermal imaging camera temperature measurements under real-life conditions to detect different amounts of watering.

After evaluating the experiment, the following results were obtained:

- A general comparison of the two measurements at the beginning of the experiment and after 14 days shows, the measured temperature changes for all plant species depending on the different irrigation conditions. The green lily and the peace lily exhibited an average temperature difference of 0.85°C , followed by the climbing philodendron with 0.70°C .
- Green lily - it can be seen that adequate watering ensures a consistently low temperature of plants, while insufficient watering leads to higher temperature differences. After 19 days without adequate irrigation, the non-irrigated plants had a temperature difference of watering, the non-irrigated plants showed a temperature difference of 1.25°C compared to the irrigated plants.
- Climbing philodendron - the temperature differences in climbing philodendron after irrigation are lower compared to green lily and monocot. The temperature differences between irrigated and non-irrigated climbing philodendron plants vary over the course of the experiment. and are around 0.5°C before increasing to $0.7-0.85^{\circ}\text{C}$ in the last three days.
- Monocot - the study of monocot plants under conditions of water deficiency shows, that these plants are the first to show signs of a temperature increase that is due to a lack of water. The increased temperature and visual signs of stress indicate that the plants are suffering from a lack of water and that their health is impaired.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Hintergrund und Motivation	8
1.2	Fragestellung und Zielformulierung	9
2	Grundlagen	10
2.1	Pflanzenphysiologie	10
2.1.1	Theoretische Grundlagen	11
2.1.2	Auswirkungen von Umweltfaktoren auf Pflanzenphysiologie	14
2.2	Bildgebende Verfahren	18
2.2.1	Grundlagen der Bildgebung	18
2.2.2	Anwendungsbereiche und -möglichkeiten in der Begrünungsüberwachung	19
2.3	Innenraumbegrünungen	20
2.3.1	Verschiedene Arten von Innenraumbegrünungssystemen im Überblick	21
2.3.2	Erfolgsfaktoren für eine Innenraumbegrünung	24
3	Methodik	26
3.1	Standort	26
3.2	Auswahl der Pflanzen	27
3.3	Ausrüstung	32
3.3.1	Wärmebildkamera	32
3.3.2	Wandsystem	33
3.3.3	Bewässerungssysteme	34
3.4	Fertiggestelltes Modell	35
3.5	Datenerfassung	37
3.5.1	Probenahme	37
3.5.2	Messdatenerfassung	40
3.5.3	Bildverarbeitung und -analyse	40
3.6	Methode der Auswertung	41
4	Ergebnisse	44
4.1	Ergebnisse der Bildanalyse	45
4.1.1	Grünlilie	50
4.1.2	Kletterphilodendron	51
4.1.3	Einblatt	53

4.2	Ergebnisse der statistischen Analyse	54
4.2.1	Grünlilie	54
4.2.2	Kletterphilodendron	56
4.2.3	Einblatt	58
5	Diskussion	61
6	Fazit und Ausblick	65
	Tabellenverzeichnis	67
	Abbildungsverzeichnis	68
	Anhang A	69
	Literaturverzeichnis	80

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Sowohl der öffentliche Sektor als auch private Unternehmen haben ein zunehmendes Interesse an der Verbesserung von Innen- und Außenräumen durch Begrünungsmaßnahmen. Doch wie effektiv sind diese Maßnahmen tatsächlich?

Grüne Infrastrukturen spielen in der Stadtplanung eine immer größere Rolle. In der modernen Architektur sehen wir, dass immer mehr Gebäude mit Dach- und Fassadenbegrünung ausgestattet sind. Ein noch größeres Potenzial liegt in der Innenraumbegrünung als sogenannte grüne Wände. Viele Studien [25] [20] [31] zeigen, dass die Innenraumbegrünung zum allgemeinen Wohlbefinden der Menschen beitragen kann. In Anbetracht der Tatsache, dass der moderne Mensch einen Großteil seines Lebens in geschlossenen Umgebungen verbringt, in denen die Präsenz von Innenraumbegrünungen zunehmend relevant ist, wird eine effektive und zeitsparende Pflege unerlässlich. Hier bietet der Einsatz von Drohnen und/oder Robotern ein großes Potenzial, indem sie den Zustand der Pflanzen überwachen und automatisch Pflegemaßnahmen wie Bewässerung oder Düngung durchführen können.

Im Kontext der kosten- und zeiteffizienten Pflege von Innenraumbegrünungen wird ein Projekt namens "DRoB - Drohnen und Robotik für effizientes Monitoring und Pflegemanagement von Gebäudebegrünungen"[2] durchgeführt. Ziel des Projekts ist es, den Markt und die Kosten für die Überwachung und Pflege von Gebäudebegrünungen zu analysieren, Fernerkundungssensoren zu bewerten und den Einsatz von Drohnen und Robotik für die Pflege von Gebäudebegrünungen zu untersuchen. Eine der Schlussfolgerungen dieser Studie ist, dass derzeit noch keine Bereitschaft in der Pflegebranche, auf Roboter und Drohnen zur Pflege von Fassadenbegrünungen besteht. Um ein stabiles Marktsegment für die Pflege von Gebäudebegrünungen zu schaffen, müssen jedoch noch einige Herausforderungen bewältigt werden. Dazu gehören die Steigerung der Akzeptanz und des Bedarfs an Pflegemaßnahmen sowie die Entwicklung von Begrünungssystemen, die weniger Wartungs- und Pflegeaufwand erfordern. [2]

Das künftige Ziel solcher Studien ist die Entwicklung eines Roboters, der zwischen Art, Wachstum, Standort, Zustand und Pflegebedarf von Pflanzen unterscheiden und den Pflegeeingriff entsprechend anpassen kann. [2]

1.2 Fragestellung und Zielformulierung

Natürliches Zimmergrün ist nicht nur ästhetisch ansprechend, sondern trägt auch zur Verbesserung des Raumklimas bei [44]. Die richtige Bewässerung ist jedoch entscheidend für die Vitalität und Gesundheit der Pflanzen. Ein häufiges Problem bei Innenraumbegrünungen ist allerdings, dass eine Über- oder Unterbewässerung oft erst spät bemerkt wird und sich negativ auf das Wachstum und die Gesundheit der Pflanzen auswirkt. Hier kann die Thermografie als bildgebendes Verfahren eingesetzt werden, um Temperaturschwankungen in den Pflanzen zu erkennen und so mögliche Probleme im Bewässerungssystem frühzeitig zu signalisieren.

Um die Einsatzmöglichkeiten der Thermografie an der vertikalen Innenraumbegrünung zu untersuchen, wird in dieser Arbeit ein repräsentativer Versuchsaufbau entwickelt. Dabei wird eine Wärmebildkamera eingesetzt, um die Oberflächentemperatur an verschiedenen Pflanzen der vertikalen Begrünung zu messen. Die Tests werden unter kontrollierten Umgebungsbedingungen und mit unterschiedlichen Bewässerungsraten durchgeführt, um mögliche Einflussfaktoren auf die Messergebnisse zu ermitteln.

Die Untersuchung zur Machbarkeit des Einsatzes bildgebender Verfahren wie der Thermografie zur Bewässerungsüberwachung in Innenräumen lieferte wertvolle Erkenntnisse. Dafür wurde ein repräsentativer Versuchsaufbau entwickelt, der die Messung der Pflanzentemperatur mittels Thermografie ermöglichte und reale Bedingungen in Innenräumen widerspiegelte. Dabei wurde zusätzlich die Wirksamkeit der Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera zur Erkennung unterschiedlicher Temperaturen unter realen Bedingungen überprüft.

Zusammenfassend ist es das Ziel, die effektive Nutzung der Temperaturmessung mittels Wärmebildkamera und die Auswirkungen verschiedener Bewässerungsmengen auf die Temperatur der Pflanzen unter realen Bedingungen zu testen.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Pflanzenphysiologie

Die Pflanzenphysiologie ist ein Teilgebiet der Botanik, das sich auf die Erforschung der biologischen Vorgänge von Pflanzen spezialisiert hat und dabei die zugrundeliegenden physikalischen und biochemischen Prozesse untersucht [8]. Die Pflanzenphysiologie kann laut [24] in verschiedene Teilbereiche untergliedert werden:

- Stoffwechselphysiologie - untersucht die chemischen und physikalischen Prozesse, die es einem Organismus ermöglichen, sich von seiner Umgebung abzugrenzen und ein metabolisches Gleichgewicht aufrechtzuerhalten. [24]
- Entwicklungsphysiologie - erforscht die Ursachen für Wachstum, Differenzierung und Fortpflanzung in Pflanzen und versucht, die molekularen Abläufe zu verstehen, die für die Umsetzung der genetischen Information in Struktur und Funktion verantwortlich sind [24]
- Bewegungsphysiologie - untersucht die Wechselwirkungen zwischen Organismen und ihrer Umgebung durch die Aufnahme und Reaktion auf physikalische oder chemische Reize, die aus der unbelebten oder belebten Umgebung stammen, um die Orientierung von Organen, Zellen oder sogar Zellorganellen im Raum zu ermöglichen. [24]
- Allelophysiologie - untersucht die vielfältigen Wechselwirkungen von Pflanzen mit anderen Organismen ihrer Umgebung wie Konkurrenten, Parasiten, Pathogenen, Herbivoren oder Symbionten, wobei die molekularen Grundlagen dieser biotischen Interaktionen im Fokus der Forschung stehen. [24]
- Ökophysiologie - beschäftigt sich mit der Erforschung der Wechselwirkungen zwischen Pflanzen und ihrer natürlichen Umwelt, einschließlich der abiotischen Faktoren wie Klima und Boden und der biotischen Faktoren wie anderen Organismen.[24]

2.1.1 Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt wird eine nähere Betrachtung der zentralen Themenbereiche der Pflanzenphysiologie vorgenommen, darunter die Stoffwechsel- und Entwicklungsphysiologie.

2.1.1.1 Stoffwechselphysiologie

Lebewesen benötigen Stoffe und Energie aus der Umwelt, nehmen sie auf und geben sie überwiegend als Wärmeenergie wieder ab. Die Energie für das Leben der Pflanzen kommt hauptsächlich von der Sonne und wird von ihnen durch Photosynthese in chemische Energie umgewandelt. Autotrophe Organismen, auch Primärproduzenten genannt, können aus anorganischen Stoffen organische Verbindungen aufbauen. Pflanzen sind photoautotroph und nutzen Lichtenergie für die Photosynthese.[24]

- **Mineralstoffe** - Pflanzen nehmen aus der Umgebung nicht nur Lichtenergie auf, sondern auch verschiedene anorganische Stoffe wie Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus der Atmosphäre, eine Vielzahl von ionischen Elementen und Wasser aus dem Boden. Damit Pflanzen wachsen können, benötigen sie nicht nur die organischen Elemente Kohlenstoff (CO_2), Sauerstoff (O_2) und Wasser (H_2O), sondern auch sechs mineralische Elemente in größeren Mengen, nämlich Stickstoff (N), Schwefel (S), Phosphor (P), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Kalzium (Ca), die auch als Makronährstoffe bezeichnet werden. Diese Nährstoffe müssen in ausreichender Menge über das Nährmedium zugeführt werden. Es gibt auch Spurenelemente, die in geringeren Mengen benötigt werden, wie Eisen (Fe), Mangan (Mn), Zink (Zn), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Bor (B), Molybdän (Mo) und Chlor (Cl). Einige dieser Spurenelemente wie Natrium, Selen, Kobalt und Silizium sind jedoch nur für bestimmte Pflanzenarten notwendig oder können das Wachstum fördern.[24]

Die meisten für Pflanzen benötigten Elemente werden in Form von Ionen aufgenommen, ausgenommen Bor, das als Borsäure (H_3BO_3) und Silicium, das als Kieselsäure ($\text{Si}(\text{OH})_4$) aufgenommen wird. Die Wurzeln sind in der Regel für die Aufnahme dieser Ionen verantwortlich, während die Blätter nur begrenzt dazu in der Lage sind, außer bei einigen epiphytischen Arten. Die Mineralstoffaufnahme durch die Wurzel verläuft in vier Schritten: Zunächst müssen die Ionen mobilisiert werden, indem sie durch Austauschadsorption oder Komplexierung in die Bodenlösung überführt werden. Anschließend erfolgt ihr Transport in den frei zugänglichen Wurzelraum durch Diffusion oder Massenfluss. Dann dringen sie durch die Plasmamembran in die Zelle ein, um schließlich ins Xylem des Zentralzylinders transportiert zu werden. Die Wurzel kann Nährstoffe selektiv und sättigbar anreichern, indem sie passive und aktive Transportprozesse kombiniert. Obwohl die Zelle ein gewisses Maß an Auswahl hat, welche Stoffe bevorzugt aufgenommen werden (z.B. K^+ statt Na^+), gibt es immer noch eine gewisse nichtselektive passive Stoffaufnahme. Die Transporter und Ionenkanäle sind auch nicht streng spezifisch.[24]

- **Wasser**- Wasser ist für lebende Zellen unentbehrlich, da es als Lösungsmittel dient und im Zellstoffwechsel als Elektronen- und Protonenspender bei der Photosynthese fungiert. Es hat auch eine strukturelle Funktion in der Zelle und ist ein Hauptbestandteil des Zellvolumens. Bei Pflanzen trägt Wasser zum Wachstum bei, indem es als Wachstumswasser fungiert. Pflanzen können Wasser nicht

aktiv transportieren, daher bewegt es sich immer passiv entlang seines chemischen Potenzialgradienten. Das Wasser fließt von einem Ort mit höherem zu einem Ort mit niedrigerem Wasserpotenzial sowohl auf zellulärer als auch auf makroskopischer Ebene.[24]

Die Bewegung von Wasser beruht auf Diffusion und Massenströmung. Diffusion führt zu einem Nettofluss von Teilchen in eine Richtung aufgrund von Unterschieden im chemischen Potenzial. Massenströmungen hingegen werden hauptsächlich durch Unterschiede im Druckpotenzial angetrieben und treten beim Ferntransport von Wasser auf. Innerhalb des Wasserpotenzials spielen verschiedene Teilpotenziale eine Rolle bei der Triebkraft für den Wassertransport durch Diffusion oder Massenströmung. [24]

Die Wasseraufnahme durch die Wurzel erfolgt in mehreren Schritten, einschließlich der Aufnahme von Wasser aus dem Apoplasten in die Zelle, der Lieferung von Wasser aus der Bodenlösung in den Apoplasten und dem Transport des Wassers innerhalb der Wurzel bis zu den Xylemgefäßen. Damit die Wurzel Wasser aus dem Boden aufnehmen kann, muss ein Wasserpotenzialgefälle () vorhanden sein.[24]

Pflanzen geben den Großteil des aufgenommenen Wassers als Transpirationswasser ab, wobei ein Teil als Wachstumswasser für die Volumenvergrößerung der Pflanze genutzt wird. Der Übertritt von Wassermolekülen aus der flüssigen Phase in die Gasphase erfolgt an allen Grenzflächen einer Pflanze gegen nicht mit Wasserdampf gesättigte Luft. Dabei machen die cuticuläre Transpiration (über die Cuticula der Blätter und anderer Organe) und die stomatäre Transpiration (über die Öffnungen der Stomata auf den Blättern) den Hauptteil der Wasserdampfabgabe aus. Die Stomata haben die Aufgabe, einerseits den Gasaustausch zur Fotosynthese zu ermöglichen, andererseits bei angespanntem Wasserhaushalt die Transpiration zu drosseln. Im Vergleich zur cuticulären Transpiration stellt die stomatäre Transpiration den größeren Teil der Gesamttranspiration dar.[24]

Die Wasserbilanz ist die Differenz zwischen der Wasseraufnahme und der Wasserabgabe einer Pflanze. Eine negative Wasserbilanz tritt auf, wenn die Transpiration größer ist als die Wasseraufnahme, während eine positive Wasserbilanz vorliegt, wenn die Wasseraufnahme größer ist als die Transpiration. Tagsüber kann es zu einer negativen Wasserbilanz aufgrund von hoher Transpiration kommen, die jedoch in der Nacht ausgeglichen wird. [24]

- **Photosynthese-** die Abb.2.1 zeigt die grundlegenden Schritte der Photosynthese, die in Pflanzen stattfindet. Die Photosynthese ist ein Prozess, bei dem Energie aus Sonnenlicht in chemische Energie umgewandelt wird, die von Pflanzen und anderen Organismen genutzt werden kann.

Im ersten Schritt der Photosynthese, der Lichtreaktion, wird Lichtenergie von den Pigmentmolekülen in den Thylakoidmembranen der Chloroplasten aufgenommen. Diese Energie wird genutzt, um Wasser zu spalten und Sauerstoff als Nebenprodukt freizusetzen. Die in diesem Prozess freigesetzten Elektronen werden von der Photosynthesemaschine aufgenommen, die aus einer Gruppe von Proteinen besteht, die als Photosystem II bezeichnet wird. Diese Elektronen werden dann auf einen

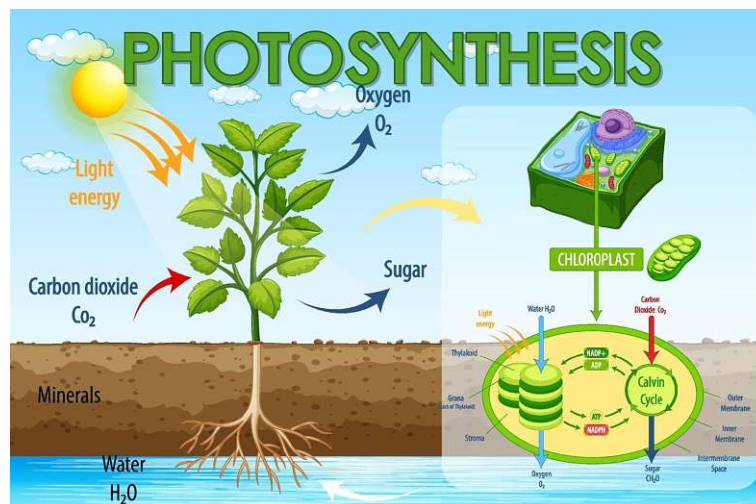


Abb. 2.1: Photosynthese [4]

Transporteur übertragen, der als Plastochinon bezeichnet wird, und schließlich auf Photosystem I.[24]

Im zweiten Schritt der Photosynthese, der Dunkelreaktion oder Calvin-Zyklus, wird Kohlenstoffdioxid von der Atmosphäre durch spezielle Enzyme in der Chloroplastenmatrix aufgenommen. Diese Enzyme binden Kohlenstoffdioxid an Ribulose-1,5-bisphosphat (RuBP) und bilden ein instabiles Sechskohlenstoff-Zwischenprodukt, das in Kohlenstoff-Ketten umgewandelt wird, die als Zucker-Moleküle bezeichnet werden. Diese Zucker können von der Pflanze als Energiequelle verwendet werden oder als Strukturmaterial in der Zellwand dienen.[24]

Insgesamt ist die Photosynthese ein grundlegender Prozess, der das Leben auf der Erde ermöglicht. Es ist wichtig zu verstehen, wie es funktioniert, um besser zu verstehen, wie Pflanzen und andere Organismen Energie gewinnen und Kohlenstoff im Ökosystem zirkulieren lassen.

2.1.1.2 Entwicklungsphysiologie

Pflanzen passen sich durch ihre Entwicklung an unterschiedliche Umweltbedingungen an. Diese Entwicklung umfasst sowohl Wachstums- als auch Differenzierungsprozesse, die qualitativ und quantitativ unterschiedlich ablaufen können. Es wurde gezeigt, dass Wachstums- und Differenzierungsprozesse experimentell getrennt werden können, aber normalerweise laufen sie nebeneinander ab.[24]

- **Wachstum** - das Wachstum einer Einzelzelle ist komplex und bei vielzelligen Lebewesen muss das Wachstum jeder Zelle mit dem der Nachbarzellen in Einklang gebracht werden. Das Zellwachstum umfasst das Plasmawachstum und das Streckungswachstum, bei dem die Zellen entweder gleichmäßig in alle Richtungen wachsen oder in bestimmte Vorzugsrichtungen expandieren. Das Streckungswachstum ist mit einer erheblichen Vergrößerung des Zellvolumens verbunden und als Differenzierungsprozess zu verstehen. Normalerweise umfasst das Wachstum von Mehrzellern

nicht nur das Wachstum jeder einzelnen Zelle, sondern auch die Vermehrung von Zellen durch Zellteilung. Bei Pflanzen erfolgt die Zelldifferenzierung während der Entwicklung von Geweben und Organen. Dabei gibt es verschiedene Mechanismen, die zur Bildung von unterschiedlichen Zelltypen führen können. [24]

- **Zelldifferenzierung** Bei Pflanzen wird die Zelldifferenzierung durch komplexe Regulationsmechanismen gesteuert, die sowohl die Aktivität bestimmter Gene als auch die zelluläre Kommunikation umfassen. Pflanzen haben spezialisierte Gene, die für die Entwicklung unterschiedlicher Zelltypen verantwortlich sind und durch spezifische regulatorische Muster gesteuert werden. Dies führt zur Bildung von spezialisierten Zellen mit charakteristischen Merkmalen. [24]

Die Zellkommunikation spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Zelldifferenzierung. Pflanzenzellen können miteinander kommunizieren und sich gegenseitig beeinflussen, was zur Bildung von unterschiedlichen Zelltypen beitragen kann. Diese Kommunikation erfolgt durch komplexe Prozesse und kann durch verschiedene Mechanismen wie beispielsweise Hormone erfolgen. [24]

Ein Beispiel für die Zelldifferenzierung bei Pflanzen ist die Entwicklung von Wurzeln. In den Wurzelspitzen gibt es spezielle Zellen, die für das Wachstum und die Aufnahme von Nährstoffen zuständig sind. Diese Zellen werden durch spezifische Gene reguliert und sind durch einzigartige Merkmale wie Wurzelhaare oder Wurzelkappen gekennzeichnet. Zusammenfassend ist die Zelldifferenzierung bei Pflanzen ein komplexer Prozess, der durch verschiedene Mechanismen gesteuert wird und zur Bildung von spezialisierten Zelltypen führt.[24]

2.1.2 Auswirkungen von Umweltfaktoren auf Pflanzenphysiologie

Im Abschnitt 2.1 wurde die Ökophysiologie als Teilbereich der Pflanzenphysiologie genannt, die sich mit den Auswirkungen von Umweltfaktoren auf die Physiologie von Pflanzen beschäftigt. Die Ökophysiologie untersucht, wie Pflanzen mit den verschiedenen Faktoren ihrer Umgebung, wie Licht, Temperatur, Wasser und Nährstoffen, interagieren und wie sich diese Interaktionen auf das Wachstum, die Entwicklung und den Stoffwechsel von Pflanzen auswirken. [24]

2.1.2.1 Strahlung und Licht

Die Globalstrahlung bezeichnet die Gesamteinstrahlung an Sonnenenergie auf die Erdoberfläche, die aufgrund von Reflexion und Absorption in der Atmosphäre in mittleren geografischen Breiten im Durchschnitt um ein Drittel kleiner ist als die außerhalb der Atmosphäre gemessene Strahlung. Etwa die Hälfte der Globalstrahlung entfällt auf den Bereich der sichtbaren Strahlung, der dem Spektralbereich der photosynthetisch aktiven Strahlung entspricht. Ein Blatt kann die absorbierte Energie durch thermische Abstrahlung, photochemische Energiebindung, Transpiration von Wasser und Wärmekonvektion entsorgen". Pflanzen können mit ihren Blättern Einfluss auf ihr eigenes Klima und das der Umgebung nehmen, abhängig von der Wasserversorgung.[24]

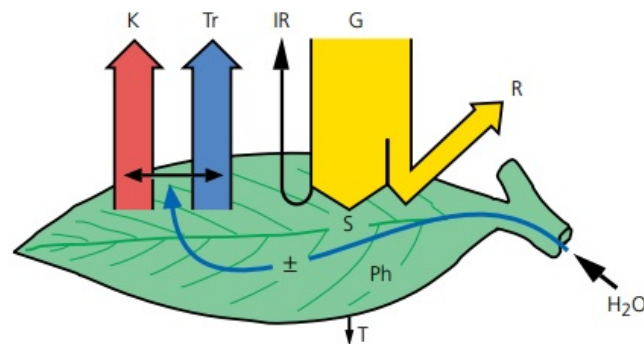


Abb. 2.2: Energiebilanz eines Blattes. Von der einfallenden Globalstrahlung (G) wird ein Teil reflektiert (R), abgestrahlt (IR) und photochemisch genutzt (Ph), während der Rest als Strahlungsbilanz (S) vom Blatt abgegeben werden muss, da es zu leicht ist, um nennenswert Energie zu speichern. Abhängig von der Wasserversorgung erfolgt diese Abgabe entweder durch Verdunstungswärme (Transpiration, Tr) oder konvektive Wärmeabgabe (K) an die Luft. Die Strahlungstransmission (T) ist in der Regel weniger als 1% von S. [24]

Wenn es genug Bodenfeuchte gibt, kann die von Pflanzen aufgenommene Energie durch latente Wärmeabgabe entsorgt werden, was die Blatttemperatur nahe der Lufttemperatur hält. Wenn es jedoch Wassermangel und geschlossene Stomata gibt, geht die Energie in Form von fühlbarer Wärme durch Wärmekonvektion ab und kann zu Überhitzung und Hitzetod führen. Pflanzen in heißen und trockenen Gebieten haben oft steil gestellte und reflektierende Blätter, um die Strahlungsabsorption zu reduzieren und eine gute Wärmeableitung durch Luft zu erreichen, um Überhitzung zu vermeiden.[24]

Die Photonenflussdichte schwächt sich beim Durchtritt durch die Laubkrone einer Pflanze oder eines Pflanzenbestands ab. Der Blattflächenindex (LAI) in einem Pflanzenbestand hängt davon ab, wie stark das Licht abgeschwächt wird und ob genügend Licht für eine positive Kohlenstoffbilanz der Blätter vorhanden ist. Der LAI kann durch Bestimmung in verschiedenen Schichten ermittelt werden und gibt Aufschluss über die vertikale Blattflächenverteilung und die Lichtabsorption im Bestand. [24]

Pflanzen in saisonalen Klimazonen nutzen ihr Phytochromsystem, um wichtige Entwicklungsabläufe an den richtigen Zeitpunkt im Jahresverlauf zu koordinieren (Photoperiodismus). Dies hat verschiedene ökologische Vorteile: in kühleren Regionen vermeiden Pflanzen durch Photoperiodiksensitivität Schäden durch Spät- und Frühfröste, indem sie Austrieb und Seneszenz in sicherere Perioden verlegen. In Gebieten mit stark saisonalem Niederschlag sorgt die Photoperiodiksensitivität dafür, dass Pflanzen trotz suboptimaler vegetativer Entwicklung blühen und Früchte tragen können.[24]

2.1.2.2 Temperatur

Unter den wichtigen klimatischen Faktoren für die Verbreitung von Pflanzen auf der Erde zählen das Wasserangebot und die Resistenz gegen niedrige Temperaturen. Frost ist ein wichtiges Selektionskriterium für Pflanzen, da es das erste "Hindernis" ist, das eine Pflanzenart überwinden muss, bevor sie sich außerhalb frostfreier Gebiete ansiedeln kann. Pflanzen, die diese Selektion erfolgreich durchlaufen haben, sind

resistent gegen Frost und somit nicht existenziell gefährdet. Pflanzen, deren Spross nicht ausreichend resistent ist, können die frostige Zeit als Samen oder mit Überdauerungsorganen unter der Erde überleben. Dies wird oft als Flucht-Strategie der Frostbewältigung bezeichnet. Um frostresistent zu sein, müssen Pflanzen die Eiskristallbildung im Cytoplasma verhindern. Es gibt zwei Mechanismen der Frostresistenz: Gefrierverhinderung und Gefriertoleranz, wobei letztere eine spezielle Form der Austrocknungstoleranz darstellt. [24]

Hitzebeständigkeit variiert bei höheren Pflanzen, liegt jedoch im Allgemeinen bei 50-55°C und kann bei einigen Arten bis zu 60°C erreichen. Hitzeschäden können durch die Morphologie der Pflanzen, ihre Nähe zum Boden, die Selbstbeschattung ihrer Teile und das Wasserangebot beeinflusst werden. Viele Pflanzen nutzen die Transpirationskühlung, um Hitze zu bewältigen. Wenn die Wurzeln nicht ausreichend mit Wasser versorgt werden, können Pflanzen Blätter abwerfen oder als Samen überdauern.[24]

2.1.2.3 Wasser

Die Entwicklung von effizienten Wurzeln, einem druckfesten Leitungssystem (Xylem) und einem Schutzmechanismus gegen Verdunstung (Stomata und Cuticula) ermöglichte es Pflanzen, an Land zu überleben. Bei Wassermangel können Pflanzen ihre Wasseraufnahme und den Schutz gegen Wasserverluste verstärken. Die Regulierung des Wasserhaushalts von Pflanzen hängt von einem komplexen Zusammenspiel von Wasserpotenzial, Wassertransportwiderstand und Wasserfluss ab und beeinflusst auch den Wasserhaushalt des Ökosystems.[24]

Pflanzen durchlaufen verschiedene Phasen im Umgang mit Wassermangel. Gemäß [24] sechs Stufen, von denen die ersten beiden noch nicht vollständig verstanden sind.

- In **Stufe 1** regulieren die Stomata den Wasserfluss im Xylem und verhindern das Absinken des Wasserpotenzials unter einen kritischen Wert, der nahe an der Kavitationsgrenze liegt. Die Stomata reagieren auf Veränderungen der Transpirationsrate, indem sie bei hoher Bodenfeuchte den Wasserfluss begrenzen und bei trockener Luft weniger weit geöffnet sind. Aktuelle Theorien diskutieren hydraulische Druckveränderungen als Auslöser für diese Reaktionen in der Umgebung der Schließzellen. [24]
- In **Stufe 2** reagieren die Stomata auf ein Signal, das durch Feuchtedefizite in der Umgebung der Feinwurzeln ausgelöst wird. Experimente zeigen, dass die Spaltöffnungen bei sinkendem Wassergehalt des Bodens auch bei hoher Luftfeuchtigkeit kontinuierlich verengt werden, wenn das Wasserpotenzial in der Pflanze künstlich hochgehalten wird. Es besteht eine enge Korrelation zwischen der Spaltöffnungsweite und dem Wassergehalt des Bodens. [24]
- **Stufe 3** - der Reaktionen der Pflanzenstomata auf Wasserstress bezieht sich auf den Turgorverlust. Wenn das Blattwasserpotenzial trotz der Maßnahmen in den vorherigen Stufen dem osmotischen Potenzial des Zellsafts näher kommt, wird der Gegendruck der Zellwand auf den Protoplasten aufgehoben. Weichblättrige Pflanzen welken bereits bevor dieser Punkt erreicht ist. Wenn der

Turgor weiter sinkt, wird der Stomataschluss aufgrund von Dehydration passiv stattfinden (das kritische Wasserpotenzial). Ein anhaltend niedriger Turgor erhöht die Empfindlichkeit der Stomata für trockene Luft (wie in Stufe 1). [24]

- **Stufe 4** betrifft die Verteilung der Biomasse. Pflanzen, die häufig und längerem Wassermangel ausgesetzt sind, reagieren mit einer vermehrten Entwicklung des Wurzelsystems, was zulasten des Blattwachstums geht. Dadurch wird ein Gleichgewicht zugunsten der Wasseraufnahme aus dem Boden erreicht, indem tiefer liegende Bodenschichten erschlossen werden. Wenn jedoch die Maßnahmen der Stufen 1-4 nicht ausreichen, wird die nächste Stufe, Stufe 5, aktiviert. [24]
- **Stufe 5** - wenn Pflanzen aufgrund von Wassermangel ihre Blätter abwerfen oder absterben und auch das Reduzieren der Blattfläche (LAIs) nicht ausreicht, um den Wassermangel zu kompensieren, dann tritt die sechste Stufe ein. [24]
- Die **Stufe 6** tritt ein, wenn der Wassermangel auch durch das Reduzieren der Blattfläche nicht aufgefangen werden kann. In dieser Stufe werden die bestehenden Pflanzenarten durch neue, trockenheitsresistentere Arten ersetzt, die bestimmte Anpassungsstrategien wie besondere Phänorhythmik, tiefe Wurzeln oder Sukkulenz oder echte Austrocknungstoleranz aufweisen. [24]

2.1.2.4 Nährstoffe

Die Verfügbarkeit von Nährstoffen für Pflanzen hängt nicht nur von der Menge im Boden ab, sondern auch von der Form, in der sie vorliegen. In künstlichen Substraten ist die Verfügbarkeit oft gleichzusetzen mit der Konzentration in der Substratlösung, aber in natürlichen Systemen hängt sie von Faktoren wie dem Mineralstoffkreislauf und dem natürlichen Bewuchs ab. Die Rate der Nährstoffzufuhr und nicht die Konzentration im Boden bestimmt die Wachstumsrate. Überschüsse können in der Bodenlösung und im Grundwasser auftreten, wenn Versorgung und Bedarf phasenweise entkoppelt sind. [24]

Bodennährstoffe sind ungleichmäßig verteilt und jede Pflanzenart erschließt unterschiedliche Bodenbereiche mit ihren Wurzeln. Diese Heterogenität hat vier Komponenten: ungleichmäßige Verteilung im Bodenraum, Hindernisse im Boden, artenspezifische Durchwurzelung und ungleichmäßiges Feuchteangebot. Bodennährstoffe sind nur verfügbar, wenn der Boden ausreichend feucht ist, da in trockenem Boden der Transport und die Aufnahme von Nährstoffen blockiert sind. Viele Entwicklungsstörungen und Schäden werden oft als Folge von Bodentrockenheit interpretiert, sind jedoch in Wirklichkeit Ernährungsmängel. Die Nährstoffblockade im Oberboden macht Wassermangel zu einem Ernährungsproblem. Trockenheit kann Nährstoffmangel verursachen und es ist oft schwer zu beurteilen, ob der Wassermangel oder die Nährstoffblockade das größere Problem darstellt. [24]

In Gewässern hängt die Menge, Zusammensetzung und jahreszeitliche Rhythmik der Pflanzenwelt von Nährstoffen wie Stickstoff und Phosphor ab. [24]

2.2 Bildgebende Verfahren

Bildgebende Verfahren spielen in vielen Bereichen der Naturwissenschaften eine wichtige Rolle. In der Innenraumbegrünung können sie eingesetzt werden, um den Zustand von Pflanzen zu überwachen und Probleme wie Stress, Krankheiten oder Schädlingsbefall frühzeitig zu erkennen.

Zu den Grundlagen der Bildgebung gehören die physikalischen und technischen Prinzipien, mit denen Bilder erzeugt und ausgewertet werden. Die Anwendungsgebiete und Möglichkeiten bildgebender Verfahren im Begrünungsmonitoring reichen von der Untersuchung der photosynthetischen Aktivität über die Erfassung von Temperaturverteilungen bis hin zur Analyse des Stoffwechsels von Pflanzen.

Insgesamt bieten bildgebende Verfahren in der Innenraumbegrünung ein breites Spektrum an Möglichkeiten zur Überwachung von Pflanzen und zur Optimierung der Wachstumsbedingungen. Sie können dazu beitragen, den Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden zu reduzieren, die Qualität der Pflanzen zu verbessern und letztlich die Lebensqualität der Menschen in Innenräumen zu erhöhen.

2.2.1 Grundlagen der Bildgebung

Die Grundlagen der Bildgebung beinhalten die physikalischen und technischen Grundlagen, die zur Erzeugung und Analyse von Bildern verwendet werden. Die drei wichtigsten Aspekte der Bildgebung sind die Bilderzeugung, -übertragung und -analyse. Die Erzeugung eines Bilds erfolgt durch die Transformation von geometrischen Informationen in eine visuell darstellbare Form. Die Übertragung des Bilds beinhaltet die Erfassung und Speicherung des erzeugten Bilds [46]. Die Analyse des Bilds umfasst die Verarbeitung der gespeicherten Bildinformationen. Hierzu werden verschiedene Verfahren wie Bildverarbeitung oder Mustererkennung eingesetzt, um die gewünschten Informationen aus dem Bild zu extrahieren.

Es gibt verschiedene Techniken der Bildgebung, die für die Überwachung von Pflanzen eingesetzt werden können.

- Die optische Bildgebung umfasst verschiedene Verfahren, bei denen Bilder durch optische Linsen und Objektive erzeugt werden. Kameras und Mikroskope sind Instrumente, die optische Bildgebungstechnologie nutzen, um Bilder aufzunehmen. Fluoreszenz-Bildgebung, Nahinfrarotfluoreszenz (NIRF), multispektrale und hyperspektrale Bildgebung sind einige der speziellen Anwendungen optischer Technologien zur Erzeugung von Bildern. Bei Fluoreszenz-Bildgebung und Nahinfrarotfluoreszenz (NIRF) können durch Anregung von Fluoreszenz oder durch Verwendung spezieller Wellenlängen bestimmte Proben oder Strukturen sichtbar gemacht werden. Die multispektrale und hyperspektrale Bildgebung erzeugen Bilder durch die Verwendung von Licht mit verschiedenen Wellenlängen und ermöglichen so eine detaillierte Analyse der spektralen Eigenschaften der Proben oder Strukturen.[37][10]

- Die digitale Bildgebung hingegen erzeugt Bilder mit digitalen Kameras oder anderen digitalen Bildgebungsgeräten. Die Bilder werden in digitaler Form gespeichert und können später auf einem Computer oder einem anderen Gerät angezeigt und verarbeitet werden.[17]
- Infrarotbildgebung ist eine Technik, die für die Pflanzenüberwachung laut Pineda et al. [33] in der Landwirtschaft eingesetzt werden kann, da sie Informationen über den Wassermangel und Stress bei Pflanzen liefert. Nach Vidal et al. [42] können auch durch diese Technik Informationen über die Gesundheit der Pflanzen gewonnen werden. Diese Technik nutzt die Wärmeabstrahlung von Objekten, um ein Bild zu erzeugen, das die Temperaturverteilung auf der Oberfläche von Pflanzen anzeigt. Obwohl die Infrarotbildgebung derzeit noch nicht weit verbreitet ist, wurde das Thema intensiv erforscht und es wird erwartet, dass sich diese Technik in Zukunft weiterentwickeln wird, um eine wertvolle Methode für die Überwachung von Pflanzen zu bieten.
- Die Tomographie ist eine Bildgebungstechnik, die eine Schicht-für-Schicht-Ansicht eines Objekts bietet. Es gibt verschiedene Arten von Tomographie-Techniken, wie z.B. die Computertomographie (CT) und die optische Kohärenztomographie (OCT). In der Pflanzenforschung wurde CT bereits zur Untersuchung von Wurzelwachstum und zur Charakterisierung von Porenstrukturen in Böden eingesetzt [22]. OCT ist eine Technik, die hauptsächlich in der medizinischen Bildgebung verwendet wird, aber auch in der Pflanzenforschung vielversprechend ist. Sie ermöglicht es nach Saporznikova et al. [36], die internen Strukturen von Pflanzengewebe detailliert und in situ zu untersuchen. Darüber hinaus ist OCT auch laut Larimer et al. [26] für die Untersuchung des Wurzelwachstums in lebenden Pflanzen geeignet. Direkte Beobachtungen des Wurzelwachstums im Boden mithilfe von OCT können wichtige Wechselwirkungen zwischen der Wurzelmorphologie und verschiedenen Bestandteilen der Bodenumgebung, wie der Bodenstruktur, den mikrobiellen Gemeinschaften und Nährstoff-Patches, aufklären.

2.2.2 Anwendungsbereiche und -möglichkeiten in der Begrünungsüberwachung

Im Bereich der Begrünungsüberwachung ergeben sich vielfältige Anwendungsbereiche und Möglichkeiten durch den Einsatz von bildgebenden Verfahren und Technologien.

- **Überwachung von Wassermangel, Stress und Gesundheit in Pflanzen:** Durch die optische Bildgebung und Infrarotbildgebung können Informationen über den Wassermangel, Stress und die Gesundheit von Pflanzen gewonnen werden. Über die Jahre hinweg wurde die Thermografie zur frühzeitigen Erkennung und Überwachung von Schädlingen und Krankheiten eingesetzt (Ahmed et al. [1]; Vidal und Pitarma, et al. [41]), sogar noch bevor Symptome auftreten (Awad et al. [3]), obwohl ihre Anwendbarkeit im großen Maßstab begrenzt ist. Die Hauptanwendungen der Thermografie liegen jedoch in der Erkennung von Wasserstress bei Pflanzen für landwirtschaftliche und phänotypische Zwecke. Sie wird beispielsweise zur Erstellung von Bewässerungsplänen eingesetzt (Gutierrez et al. [19]), zur Identifizierung von Anomalien in Bewässerungssystemen (Matese et al. [30]) und als Teil eines basierten automatisierten Bewässerungsnetzwerks (Roopaei et al. [35]).

Diese Techniken ermöglichen eine detaillierte Analyse der physiologischen Zustände von Pflanzen und können Hinweise auf Wassermangel, Stressreaktionen und Gesundheitsprobleme liefern.

- **Untersuchung der Bodenbeschaffenheit:** CT und andere Tomographie-Techniken können zur Charakterisierung von Porenstrukturen in Böden und zur Untersuchung des Wurzelwachstums eingesetzt werden. Dadurch können Bodenmerkmale wie Dichte und Porosität bestimmt werden, die für das Pflanzenwachstum und die Bodenqualität wichtig sind. Eine Studie von Tracy et al. [40] zeigte, dass die Verteilung von Wasser in Bodenporen unter verschiedenen Bedingungen analysiert und der Einfluss der Bodenstruktur auf das hydraulische Verhalten untersucht werden kann. Die Ergebnisse dieser Untersuchung belegen eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen hydraulischen Leitfähigkeitswerten, was dazu beiträgt, eine repräsentative Probengröße für eine präzise Charakterisierung zu bestimmen.
- **Überwachung von Indoor-Pflanzen:** Digitale Bildgebung kann zur Überwachung von Indoor-Pflanzen eingesetzt werden, indem sie den Wachstumsfortschritt und eventuelle Schäden oder Krankheiten aufzeichnet. Dadurch können Pflanzenpflege und -bewässerung optimiert werden.
- **Erforschung von Pflanzenbiologie:** Tomographie-Techniken und optische Bildgebung ermöglichen die Untersuchung der internen Strukturen von Pflanzen. Zum Beispiel kann die optische Kohärenztomographie (OCT) verwendet werden, um das Wurzelwachstum in lebenden Pflanzen zu erforschen und wichtige Wechselwirkungen zwischen der Wurzelmorphologie und verschiedenen Bestandteilen der Bodenumgebung zu untersuchen. Mehrere Studien in diesem Bereich wurden bereits in Abschnitt 2.2.1 unter dem Thema Tomographie erwähnt.

Obwohl es noch weitere Anwendungsmöglichkeiten gibt, wie beispielsweise die Untersuchung von Pflanzengewebe mittels OCT, die Erkennung von Schädlingsbefall und die Überwachung von Gewächshäusern durch optische- und Infrarotbildgebung sowie die Optimierung des Ertrags und die Überwachung von Frosts Schäden, werden diese in der vorliegenden Masterarbeit nicht ausführlich behandelt. Dennoch sollten sie erwähnt werden, um das breite Spektrum der Anwendungsbereiche der Bildgebungstechniken in der Pflanzenforschung zu verdeutlichen, die über das spezifische Thema dieser Arbeit hinausgehen.

2.3 Innenraumbegrünungen

Im 16. Jahrhundert entwickelte sich eine Sammelleidenschaft für exotische Pflanzen an Königs- und Fürstenhöfen, wodurch der Trend der Orangerien entstand. Die Blütezeit der Innenraumbegrünung begann im viktorianischen England des 19. Jahrhunderts, und seit den 1960-70er Jahren erlebt die Bepflanzung von Innenräumen einen Aufschwung mit der Einführung von Wintergärten und Hydrokultur. Heutzutage werden professionell geplante Innenlandschaften in verschiedenen Gebäuden immer häufiger, und neue Begrünungsformen wie die "Vertical Gardens" setzen neue Trends und stellen neue Anforderungen an die Technik. [50]

2.3.1 Verschiedene Arten von Innenraumbegrünungssystemen im Überblick

Die Innenraumbegrünungssysteme lassen sich grundlegend in zwei Kategorien einteilen: horizontale und vertikale Systeme. Diese Unterteilung basiert auf der Platzierung und Ausrichtung der Begrünungselemente im Raum. Horizontale Systeme beziehen sich auf die Anordnung von Pflanzen in horizontaler Ausdehnung, wie beispielsweise Pflanzgefäßen, Blumenkästen oder Regalen. Vertikale Systeme hingegen konzentrieren sich auf die vertikale Platzierung von Pflanzen an Wänden oder anderen vertikalen Oberflächen. Durch diese Unterscheidung eröffnen sich vielfältige Möglichkeiten zur Integration von Pflanzen in den Innenraum und ermöglichen eine abwechslungsreiche Gestaltung.

Im Folgenden sind einige Beispiele für horizontale Innenbegrünungssysteme aufgeführt:

- **Pflanzgefäße und Blumenkästen:** Dies sind beliebte und traditionelle Optionen für die Innenraumbegrünung. Pflanzen werden in Gefäßen oder Blumenkästen platziert und können auf Fensterbänken, Regalen oder anderen Oberflächen im Raum arrangiert werden. Diese Systeme ermöglichen eine flexible Gestaltung und können leicht an unterschiedliche Räume angepasst werden.
- **Regalsysteme:** Spezielle Regale werden als Pflanzflächen verwendet, um eine vertikale Anordnung von Pflanzen zu ermöglichen. Diese Regale können in verschiedenen Höhen und Ebenen angeordnet sein, um eine attraktive und platzsparende Lösung zu schaffen. Regalsysteme bieten die Möglichkeit, eine Vielzahl von Pflanzenarten und -größen zu präsentieren und schaffen so eine beeindruckende grüne Atmosphäre im Raum.
- **Tisch- und Arbeitsflächenbegrünung:** Bei dieser Art der Innenraumbegrünung werden Pflanzen direkt auf Tischen, Arbeitsflächen oder anderen horizontalen Oberflächen platziert. Kleine Pflanzen in Töpfen oder Gefäßen können in Arbeitsbereichen, Essbereichen oder auf Beistelltischen arrangiert werden, um eine natürliche und beruhigende Umgebung zu schaffen.

Die vertikalen Begrünungssysteme werden weiterhin in Vlies- und Trogsysteme unterteilt. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Systemen, die für die vertikale Innenraumbegrünung herangezogen werden können. Das Trog- und das Vliessystem. Die wichtigsten Merkmale werden verglichen und erörtert, wobei die endgültige Entscheidung erst nach der Auswahl der richtigen Pflanzen getroffen wird.

Das Vliessystem wird aus Pflanztaschen gebildet, die aus mehreren Vliesschichten bestehen. Bei der Bepflanzung werden die Pflanzen wurzelnackt (ohne Erde) eingepflanzt. Das Wurzelwachstum wird daher auf den Bereich der Taschen beschränkt. Da bei diesem System keine Erde benutzt wird, ist die Speicherkapazität für Wasser im System sehr gering. Aufgrund der geringen Wasserspeicherkapazität des Vliessystems eignen sich für diese Art der vertikalen Begrünung vor allem Pflanzenteile, die mit Trockenperioden zurechtkommen. Für das Vliessystem sind buschige, flache und hängende Arten geeignet. [25]

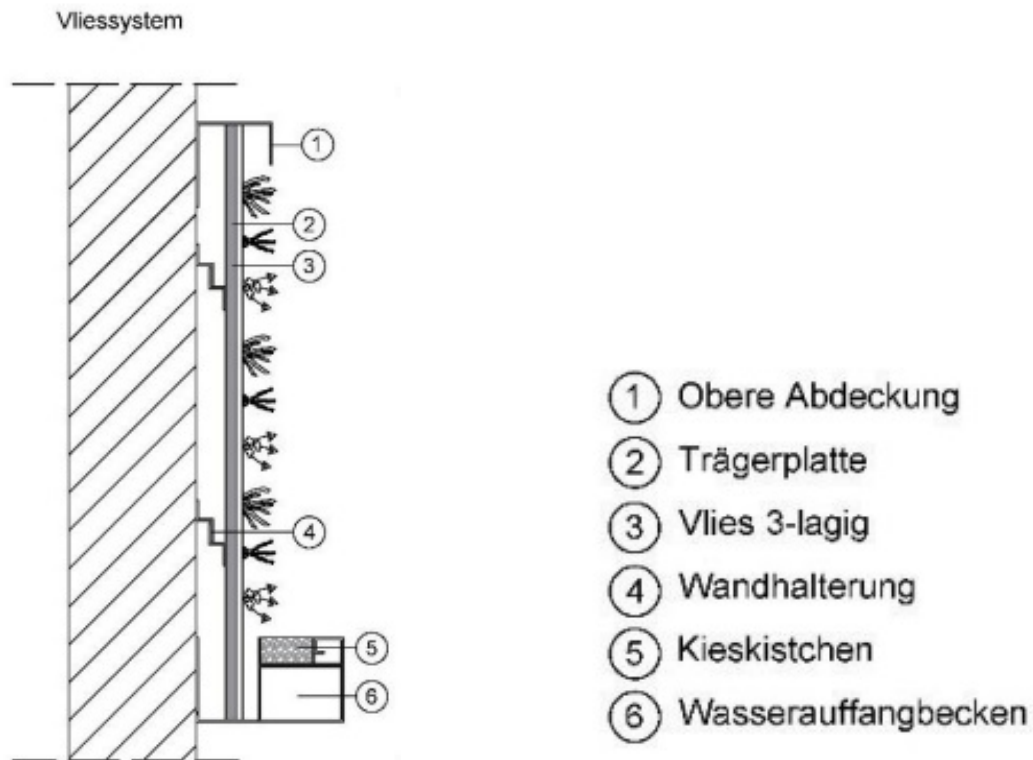


Abb. 2.3: Vliessystem [21]

Das Trogssystem für Innen ist eine kaskadierte Aluminiumkonstruktion. Die einzelnen Pflanzkästen sind mit Multifunktionsvlies ausgekleidet und mit dem passenden Substrat und Pflanzen befüllt. Vlies sorgt für eine optimale Wasserverteilung und -speicherung und verhindert das Auswaschen feiner Partikel. Bewässerung durch ein Tropfrohr, überschüssiges Wasser läuft durch den Schlitz vor der Rinne in die darunter liegende Rinne. Es ist wichtig, Pflanzen mit ähnlichem Wasserbedarf zu wählen, damit das Bewässerungssystem gleichmäßig funktioniert. Um die Tröge nicht zu verdecken, eignen sich besonders flache, dichte oder überhängende Pflanzen, die nicht zu hochwachsen. [25]

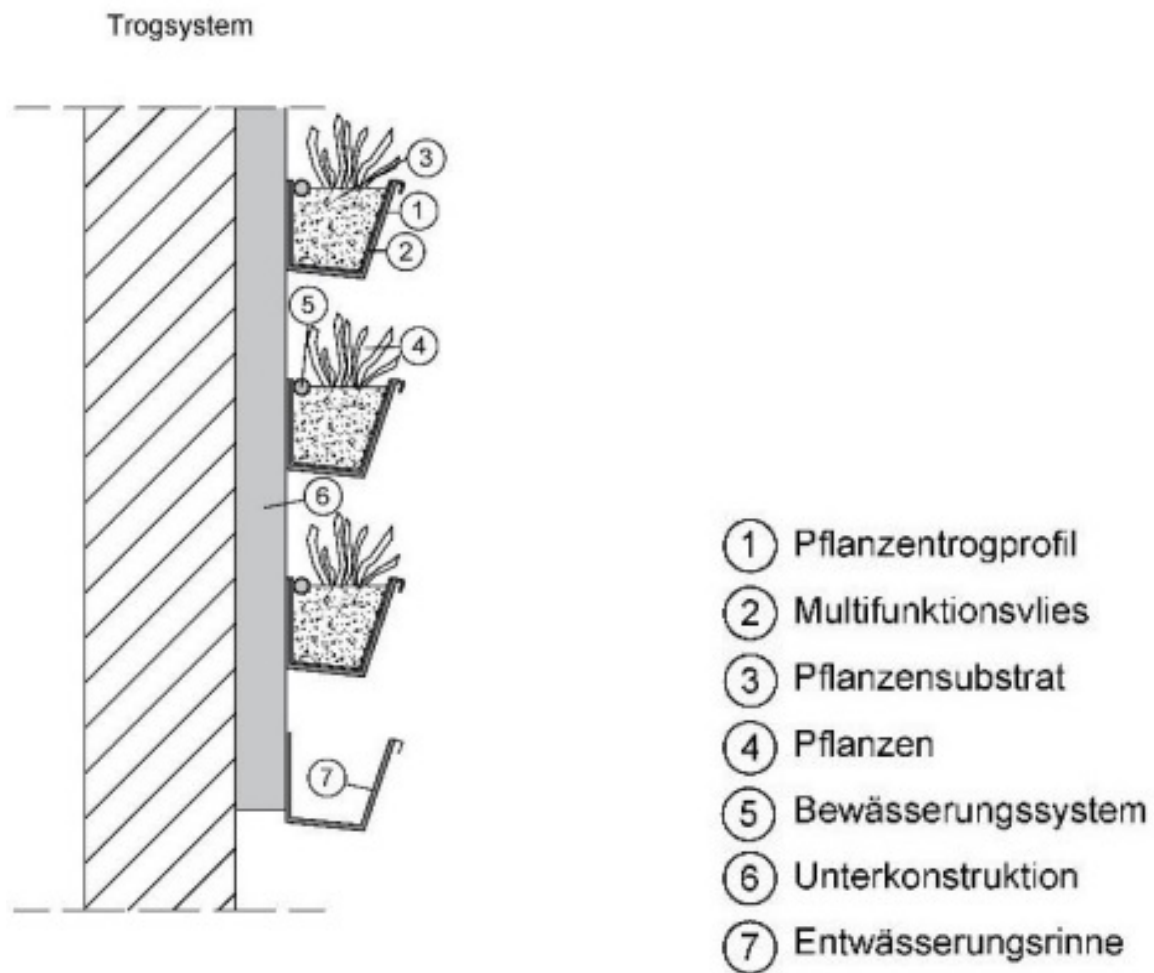


Abb. 2.4: Trogsystem[21]

Die Klassifizierung der Begrünungssysteme kann basierend auf den Bewässerungsarten in offene und geschlossene Systeme unterteilt werden.

Offene Bauweisen zeichnen sich dadurch aus, dass überschüssiges Gießwasser ungehindert abfließen kann, was das Risiko von Gießfehlern reduziert. In offenen Systemen ist regelmäßiges Gießen und die Zugabe von Nährstoffen erforderlich, da kein Wasservorrat vorhanden ist. [50]

Im Gegensatz dazu bleiben bei geschlossenen Bauweisen Wasser und Nährstoffe im System, wodurch nur ein geringer Zusatzanschluss erforderlich ist. Es muss nur das verdunstete Wasser oder das von den Pflanzen verbrauchte Wasser ersetzt werden. Bei diesen Systemen kann es jedoch zu einer Ansammlung von Wasser kommen, insbesondere wenn Fehler bei der Bewässerung auftreten. Um dies zu verhindern, kann ein Wasserstandanzeiger eingesetzt werden, um übermäßiges Gießen oder Düngen zu kontrollieren. [50]

Hinsichtlich der Schichtung des Bodenmaterials in den Gefäßen wird empfohlen, bei organischen Substraten in geschlossenen Systemen eine mehrschichtige Struktur zu verwenden, um das Risiko von Fäulnis zu minimieren. In der wasserführenden Schicht wird mineralisches Substrat empfohlen, während die Vegetationstragschicht aus mineralisch-organischem oder rein organischen Material bestehen kann. Gegebenenfalls kann eine Filterschicht eingebaut werden, um das System zu optimieren. [50]

Zusammenfassend ermöglichen offene Bauweisen ein einfaches Abfließen überschüssigen Wassers und verringern Gießfehler, während geschlossene Bauweisen das Wasser und die Nährstoffe im System halten. Die Gestaltung der Schichtstruktur sollte entsprechend den verwendeten Materialien und dem gewählten System angepasst werden, um optimale Wachstumsbedingungen für die Pflanzen zu schaffen.

2.3.2 Erfolgsfaktoren für eine Innenraumbegrünung

Eine erfolgreiche Innenraumbegrünung hängt maßgeblich von der optimalen Anpassung des Raumklimas, des Lichts, der Bodenfeuchte, des Bodens und der Nährstoffversorgung ab. Diese Faktoren sind miteinander verbunden und beeinflussen das Pflanzenwachstum. Wenn die spezifischen Bedürfnisse einer Pflanze in Bezug auf einen dieser Faktoren nicht erfüllt werden, wirkt sich dies begrenzend auf ihr Wachstum aus. Es ist daher wichtig, ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit, Lichtintensität, Bewässerung, Bodenqualität und Düngung zu schaffen, um optimale Bedingungen für das Pflanzenwachstum in Innenräumen zu gewährleisten. [50]

- **Raumklima:** In Innenräumen herrschen klimatische Bedingungen, die durch Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und Luftbewegung geprägt sind. Diese Faktoren spielen eine wichtige Rolle für das Pflanzenwachstum. [50]
- **Licht:** Licht ist essenziell für die Photosynthese und das Pflanzenwachstum. Unterschiedliche Pflanzenarten haben spezifische Lichtansprüche, sowohl in Bezug auf Intensität als auch spektrale Zusammensetzung. Lichtmangel kann zu Krankheitsanfälligkeit und schwachem Wachstum führen. Zusatzlicht kann eingesetzt werden, um den Lichtbedarf der Pflanzen zu decken und ein gesundes Pflanzenwachstum zu gewährleisten. Dabei kommen verschiedene Lampentypen zum Einsatz, um den spezifischen Anforderungen der Pflanzen gerecht zu werden. [50]
- **Bodenfeuchte:** Der Wasserbedarf der Pflanzen variiert je nach Art und reicht von Pflanzen, die hohe Bodenfeuchtigkeit benötigen, bis zu solchen, die längere Trockenperioden vertragen. Es ist wichtig, die Bewässerung entsprechend anzupassen, um eine optimale Versorgung sicherzustellen. Die Bewässerungsmethoden können unterschiedlich sein und reichen von Anstauverfahren bis hin zur Tröpfchenbewässerung. Die richtige Einstellung der Bewässerung ist entscheidend und hängt von verschiedenen Faktoren wie Pflanzenart, -größe, Raumtemperatur und Jahresverlauf ab. Die Wasserqualität spielt ebenfalls eine Rolle, da hoher Kalkgehalt oder zu weiches Wasser Probleme bei der Nährstoffverfügbarkeit verursachen können. [50]
- **Boden:** Der Boden oder das Substrat, in dem die Pflanze wächst, spielt eine entscheidende Rolle für ihre Wasserversorgung, Sauerstoffzufuhr, Stabilität und Nährstoffversorgung. Es gibt organische

und mineralische Substrate sowie Mischungen aus beiden. Organische Substrate bestehen aus Torf oder alternativen Materialien wie Kokosfasern, Rindenkompost oder Holzfasern. Sie haben gute Puffer- und Wasserspeicherfähigkeiten, neigen jedoch dazu, bei extremem Wassermangel auszutrocknen. Der Abbau organischer Substanzen im Substrat kann den Nährstoffhaushalt und die Bodenstruktur beeinflussen. Mineralische Substrate bestehen aus Materialien wie Bims, Lava oder Blähton und erfordern eine gezielte Düngung, da sie wenig Pufferwirkung haben. Sie ermöglichen längere Gießintervalle und sind anfälliger für unsachgemäße Düngung. Es ist wichtig, die richtige Substratzusammensetzung für die Innenraumbegrünung zu wählen, um optimale Bedingungen für das Pflanzenwachstum zu gewährleisten. [50]

- **Nährstoffversorgung:** Pflanzen benötigen Kohlenstoff, Sauerstoff, Wasserstoff und Nährstoffe aus dem Boden. Zimmerpflanzen benötigen eine Erhaltungsdüngung für ein gesundes Erscheinungsbild. Substrate ohne organische Substanz benötigen regelmäßige Nährstoffzugabe. Hauptnährstoffe sind Stickstoff, Phosphor, Kalium und Magnesium, Spurenelemente sind ebenfalls wichtig. Düngung kann in verschiedenen Formen erfolgen. Der pH-Wert und Nährstoffbedarf der Pflanzen beeinflussen die Düngerauswahl. Eine genaue Analyse ist für einen Düngplan notwendig. [50]

Mit der detaillierten Betrachtung der Grundlagen in Kapitel 2 haben wir die essenziellen Faktoren für die Umsetzung eines repräsentativen Modells untersucht, das den realen Innenraumbedingungen nahek kommt. Der Fokus verschiebt sich nun von der theoretischen Basis zur praktischen Umsetzung. Kapitel 3 behandelt die konkrete Implementierung des Modells, beginnend mit dem Entwurf und der Errichtung des Prüfstands bis hin zur tatsächlichen Durchführung der Temperaturmessungen an der vertikalen Innenraumbegrünung unter Berücksichtigung der definierten Parameter und der Pflanzenauswahl.

Kapitel 3

Methodik

Um ein Modell zu erstellen, das gleichzeitig repräsentativ ist, d.h. den realen Bedingungen so nahe wie möglich kommt, sollten alle Aspekte berücksichtigt werden. Um die Temperatur einer vertikalen Innenraumbegrünung mit einer Wärmebildkamera zu messen, wird der gesamte Prozess in mehrere Abschnitte unterteilt. Neben den Zielen für dieses Experiment sollten als nächster Schritt Parameter festgelegt werden, die die Umgebungsbedingungen in Innenräumen widerspiegeln. Dazu gehören die Umgebungstemperatur, Luftfeuchtigkeit, Bewässerungsrate sowie die Auswahl der geeigneten Pflanzenarten für die Innenraumbegrünung, die unter den definierten Umständen gedeihen können.

Danach wird der Prüfstand gebaut. Faktoren wie die Größe, Ausrichtung und das Modelltyp des Wandsystems werden mit den Ansprüchen der ausgewählten Pflanzen in Einklang gebracht. Der Abstand zur Wärmebildkamera muss so gewählt werden, dass die Bilder in bestmöglicher Qualität aufgenommen werden können. Die Art der Bewässerung spielt eine entscheidende Rolle und erfordert sorgfältige Abwägung verschiedener Faktoren. Hierzu zählen unter anderem die Häufigkeit und Menge der Bewässerung sowie die Methode der Wasserversorgung, sei es durch Tropfbewässerung, Sprinkler oder eine andere Form. Zudem ist die Berücksichtigung der Pflanzentypen und ihrer individuellen Bedürfnisse von großer Bedeutung, um sicherzustellen, dass jede Pflanzenart unter den gegebenen Bedingungen angemessen versorgt wird.

3.1 Standort

Für die Durchführung des Experiments wurde das Labor der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften im Science Center (OC-Gebäude) der Technischen Universität Wien zur Verfügung gestellt. TU Wien ist ein hochmodernes Forschungs- und Bildungszentrum, das speziell auf die Bedürfnisse von Studierenden und Forschenden im Bereich Bau- und Umweltingenieurwesen ausgerichtet ist. Das Labor, in dem das Experiment durchgeführt wird, ist mit modernster Ausrüstung und Technologie ausgestattet, so dass genaue und zuverlässige Messungen durchgeführt werden können. Das Labor ist nach modernsten Standards ausgestattet und bietet optimale Bedingungen für Forschung und Entwicklung im Bereich Bau- und Umweltingenieurwesen.

Die Umgebungsbedingungen in Innenräumen hinsichtlich Aspekte wie natürlicher Beleuchtung, Luftzirkulation und Temperatur können variieren, vor allem, wenn der Raum nicht klimatisiert ist. Um stabile

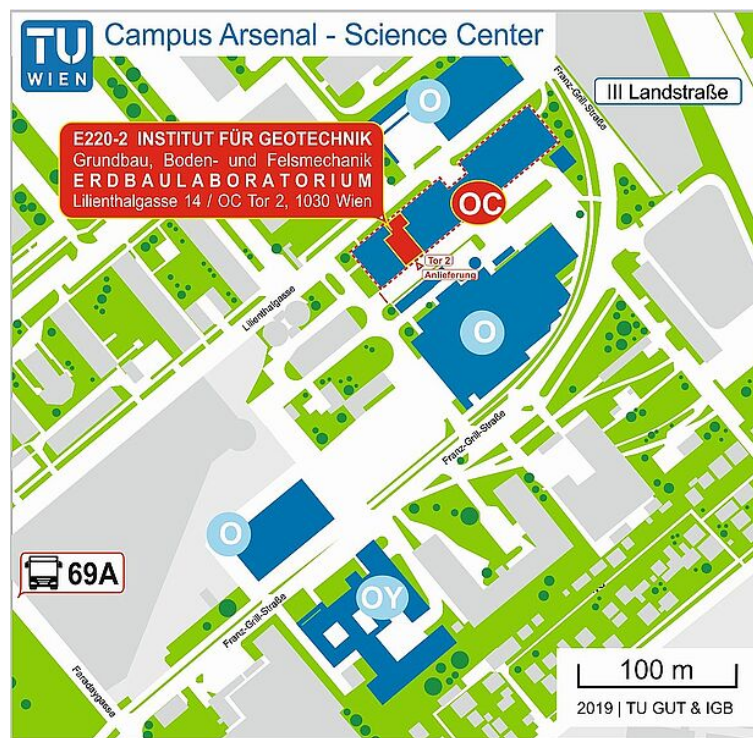


Abb. 3.1: OC Gebäude [45]

und reproduzierbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten, müssen diese Faktoren sowie Optionen zur Kontrolle der Umgebung festgelegt werden. Der Raum, der für dieses Experiment zur Verfügung gestellt wurde, ist klimatisiert und natürlich beleuchtet, wobei die Umgebungsparameter während des gesamten Wachstumsprozesses unverändert bleiben.

3.2 Auswahl der Pflanzen

Bei der Auswahl der Pflanzen wurden vor allem pflegetechnische Gesichtspunkte berücksichtigt. Es wurden Pflanzen ausgewählt, die regelmäßig gegossen werden müssen und bei denen eine konstante Bodenfeuchtigkeit wichtig ist, um Temperaturunterschiede in der Pflanzenblätter zu gewährleisten. Auch die optimale Temperatur, bei der die Pflanzen am besten gedeihen, wurde berücksichtigt, um ein gesundes Wachstum zu gewährleisten.

Ein weiteres wichtiges Kriterium bei der Pflanzenauswahl war das Licht. Es wurde darauf geachtet, Pflanzen auszuwählen, die kein direktes Sonnenlicht benötigen und in Innenräumen weiter vom Fenster entfernt stehen können, aber dennoch ausreichend Licht erhalten. Außerdem wurden Pflanzen mit größeren Blättern bevorzugt, da sie bessere Messwerte liefern können. Die Berücksichtigung der idealen Klimazonen, in denen die Pflanzen optimal gedeihen, erwies sich als besonders relevant. Es war von entscheidender Bedeutung sicherzustellen, dass die ausgewählten Pflanzenarten den klimatischen Bedingungen des Raumes entsprechen, um unter diesen spezifischen Umständen optimal zu wachsen.

Die Berücksichtigung der Umgebungstemperatur erwies sich als vorrangiger Aspekt bei der Pflanzenauswahl, da sie einen unmittelbaren Einfluss auf die optimalen Wachstumsbedingungen sowie das Gedeihen der ausgewählten Pflanzenarten hatte. Daraufhin wurden drei spezifische Arten als besonders geeignet erachtet: *Chlorophytum comosum* (Grünlilie), *Philodendron scandens* (Kletterphilodendron) und *Spathiphyllum wallisii* (Einblatt).

Für jede Pflanzenart wurden die Merkmale tabellarisch aufgeführt, um ihre spezifischen Erfordernisse und Eigenschaften zu darzustellen. Zu den Merkmalen gehörten Informationen über die optimale Temperatur, die Erfordernisse an Licht, Bewässerung, Bodenbeschaffenheit, Wachstumsgewohnheiten und Größe der Pflanzen. Die Grünlilie, auch unter dem Namen *Chlorophytum comosum* (Ocean) bekannt, ist eine Pflanzenart mit geringem Pflegeaufwand, die wenig Wasser erfordert und am besten bei einer Temperatur von 20 °C gedeiht. Sie ist für indirekte Beleuchtung geeignet und kann auch in trockener Luft gedeihen. [25]

Der Kletterphilodendron oder *Philodendron scandens* erfordert eine Temperatur von 16-20 °C und regelmäßiges Gießen, um gesund zu bleiben. Er bevorzugt helles, indirektes Licht und kann als Hängepflanze oder an Kletterstützen befestigt werden. [25]

Der einkeimblättrige *Spathiphyllum wallisii* erfordert eine warme Temperatur von 18- 22 °C und regelmäßiges Gießen. Sie ist eher für helles, indirektes Licht geeignet und kann auch in schlecht beleuchteten Räumen wachsen. [25]



Abb. 3.2: Grönlilje [11]

Tab. 3.1: Chlorophytum comosum 'Ocean' - Grönlilje [25] [13]

Familie	Antheriacaceae
Herkunft	Südafrika
Aussehen	In der Heimat bis zu 60cm
Wuchsform	Krautig, horstbildend
Wuchshöhe	10-50 cm
Temperatur	20°C
Licht	Hell, Mittagssonne meiden
Vermehrung	Ableger durch Brutpflanzen
Pflege	Durchgehend feucht halten, mäßig düngen, abgestorbene Pflanzanteile entfernen
Anfälligkeiten	Blatt- oder Schmierläuse, Thripse
Systeme	Vlies- oder Trogssysteme
Substrat	Einheitserde, humose Erdmischungen, handelsübliche Blumenerde



Abb. 3.3: Kletterphilodendron [32]

Tab. 3.2: Philodendron scandens - Kletterbaumfreund, Kletterphilodendron [25] [13]

Familie	Araceae
Herkunft	Ostmexiko
Aussehen	In der Heimat bis zu 5m hoch
Wuchsform	dünntriebige Kletter- und Hängepflanze, herzförmige dunkelgrüne Blätter
Wuchshöhe	3-6 m
Temperatur	16-20°C
Licht	hell bis schattig, keine volle Sonne
Vermehrung	Kopf-, Triebteil- und Blattaugenstecklinge
Pflege	gleichmäßig feucht halten, mäßig düngen, ältere Triebspitzen ausbrechen, kahle und abgestorbene Pflanzenteile zurückschneiden
Anfälligkeiten	Blatt- und Schildläuse
Systeme	Trogsysteme
Substrat	eine Mischung aus Blumenerde und Kompost, gut verrottetem Laub und Topf. Alternativ kann auch Blumenerde und Kokosfaser zu gleichen Teilen zurückgreifen werden.



Abb. 3.4: Einblatt [5]

Tab. 3.3: Spathiphyllum wallisii - Kleine Blattfahne, Einblatt [25] [13]

Familie	Araceae
Herkunft	Kolumbien, Venezuela
Aussehen	In der Heimat bis zu 70cm hoch
Wuchsform	grundständig, aufstrebend bis ausladende Blätter, klobige Blütenstände
Wuchshöhe	25-30 cm
Temperatur	18-22°C
Licht	kein vollsonniger Standort, auch schattige Lagen
Vermehrung	Teilung der Pflanze, Abnahme von Seitentrieben
Pflege	reichlich gießen und mäßig düngen, abgestorbene Pflanzenanteile entfernen
Anfälligkeiten	Spinnmilben
Systeme	Vlies- und Trogsysteme
Substrat	lockere, durchlässigen Substrat, z. B. einem Gemisch aus einem Teil Komposterde, einem Teil Lauberde und einem Teil Sand. Ganz normale Blumenerde soll auch ausreichen, wenn Sie eine Drainageschicht aus Bimskugeln, Kies oder Scherben unten in den Topf einbringen.

3.3 Ausrüstung

Für eine erfolgreiche Auswertung der angewandten Maßnahmen und der gewonnenen Daten ist es entscheidend, über die richtige Ausrüstung zu verfügen und diese auch einzusetzen. Die benötigte Ausrüstung kann je nach den spezifischen Anforderungen des Experiments variieren. In diesem Versuch sind Messgeräte, Wand- und Bewässerungssysteme wesentlich, wenn es darum geht, die Versuchsbedingungen genau zu kontrollieren und zuverlässig Daten zu sammeln. Darüber hinaus können spezielle Düngemittel oder Nährstofflösungen erforderlich sein, um die Pflanze mit den benötigten Nährstoffen zu versorgen. Eine gezielte Düngung kann sich positiv auf das Wachstum und die Gesundheit der Pflanzen auswirken und zu besseren Erträgen führen. Andererseits kann sich eine Überdüngung oder eine falsche Düngung nachteilig auf die Pflanze auswirken [27]. Aus diesem Grund ist es wichtig, fundierte Entscheidungen zu treffen und die Pflanzen sorgfältig zu beobachten, um festzustellen, ob und welche Art von Dünger benötigt wird. Die besten Ergebnisse erhält man durch kontinuierliche Beobachtung und Anpassung der Versuchsbedingungen.

Der Einsatz der richtigen Geräte erleichtert die Kontrolle über die Versuchsbedingungen erheblich und erhöht die Genauigkeit der Ergebnisse. Dadurch werden vergleichbare Bedingungen für alle Pflanzen erreicht, wodurch die Daten genauer und zuverlässiger werden.

3.3.1 Wärmebildkamera

Besonders unerlässlich sind dabei Messgeräte wie Wärmebildkamera zur Überwachung von Pflanzen- und Lufttemperatur, um ein optimales Wachstum der Pflanzen zu gewährleisten. Zur Aufzeichnung der Pflanzentemperatur wurde eine Wärmebildkamera der Marke Testo 890 eingesetzt. Die Kamera hat eine Auflösung von 640 x 480 Pixel und bietet eine manuelle oder automatische Fokuseinstellung. Zusätzlich ist ein Laser integriert, um das Messobjekt präzise anzuvisieren. Die Kamera ist mit einem Wechselobjektiv ausgestattet, das den Bereich und den Blickwinkel an bestimmte Anforderungen anpasst [16]. Mit Hilfe dieser Wärmebildkamera (Abb.3.5) können Temperaturprofile von Pflanzen aufgenommen



Abb. 3.5: Wärmebildkamera-testo 890 [15]

und ausgewertet werden. Da die Pflanzen bis zum Ende des Versuchs gesund blieben und keine Probleme aufwiesen, wurde beschlossen, vorerst auf zusätzliche Nährstoffe und Düngemittel zu verzichten. Dies ermöglicht eine bessere Beurteilung der natürlichen Entwicklung und Gesundheit der Pflanzen.

3.3.2 Wandsystem

Anhand der in Kapitel 3.2 genannten Merkmale der drei Pflanzenarten wird deutlich, dass ein Trogsystem eine geeignete Option ist. Während es möglich ist, Grünlilien und Einblatt in einem Vliessystem zu pflanzen, ist ein Trogsystem die einzige Alternative für den Kletterphilodendron.

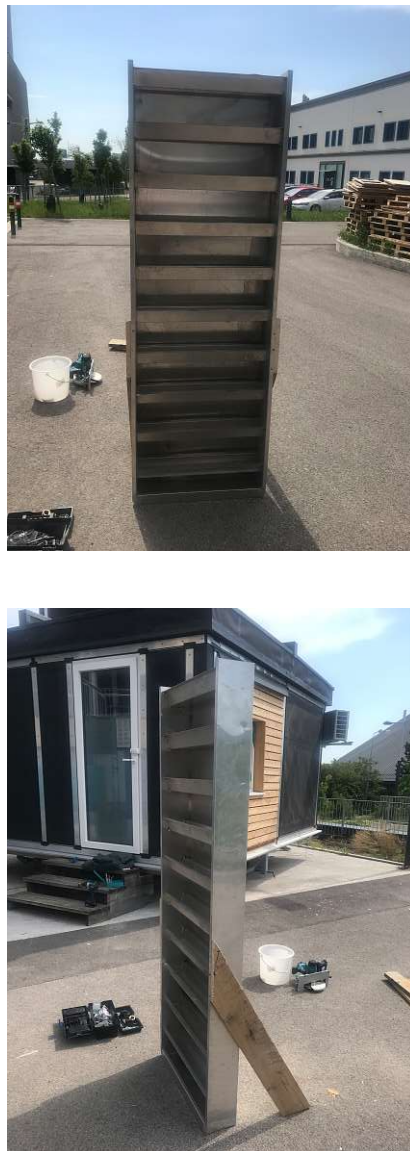


Abb. 3.6: Das verwendete Trogsystem für den Versuch (eigene Fotos)

3.3.3 Bewässerungssysteme

Einige Bewässerungsmethoden für Innenraumbegrünung sind:

- Gießkanne: Diese Methode ist einfach und weit verbreitet. Eine Gießkanne wird mit Wasser gefüllt und die Pflanzen werden nach Bedarf gegossen.
- Automatische Bewässerungssysteme: Es gibt eine Vielzahl von automatischen Bewässerungssystemen, die speziell für Zimmerpflanzen entwickelt wurden. Diese Systeme reichen von einfachen bis hin zu komplexen Systemen, die eine kontinuierliche Wasserversorgung und Feuchtigkeitskontrolle ermöglichen. [38]
- Hydrokultur: Die Hydrokultur ist eine pflegeleichte Form der Zimmerpflanzenhaltung. Das Substrat besteht in der Regel aus Blähtonkugeln. Im Pflanzenbehälter befindet sich immer eine bestimmte Menge Wasser, die sich infolge der Kapillarität des Substrats im gesamten Wurzelbereich verteilt. [47]
- Wasserspender mit Saugschlauch - Ein Tonkegel wird in die Pflanzenerde gesteckt. Dieser Kegel ist jedoch mit einem Schlauch versehen, durch den Wasser aus einem nebenstehenden Gefäß geleitet wird. Das System ist auch ideal für Topfpflanzen auf Balkonen und Terrassen, wo ein relativ großer Wasservorrat platziert werden kann. [38]

Es ist besonders wichtig, die Bedürfnisse der einzelnen Zimmerpflanzen zu berücksichtigen, um eine adäquate Bewässerung zu ermöglichen. Einige Pflanzen benötigen mehr Wasser als andere, während andere empfindlicher auf übermäßige Feuchtigkeit reagieren.

Für die drei ausgewählten Pflanzenarten (*Chlorophytum comosum*, *Philodendron hederaceum* und *Spathiphyllum wallisii*) wurde eine Bewässerungsmenge von 500 mL pro Woche und Pflanze gewählt, um das Substrat kontinuierlich feucht zu halten. Eine Möglichkeit, die Bewässerungsmenge zu überprüfen, besteht darin, das Substrat zu beobachten und darauf zu achten, dass es stets leicht feucht bleibt.

Nach einer Beobachtung, dass viel Wasser aus den Töpfen austritt, wurde die Bewässerungsmenge auf 300 mL pro Woche und Pflanze reduziert. Eine zu geringe oder zu hohe Bewässerungsmenge kann zu Problemen wie Wurzelfäule oder vertrockneten Blättern führen. Während der Wachstumsphase wurde festgestellt, dass die Bewässerungsmenge von 300 mL pro Woche und Pflanze, insbesondere für das *Spathiphyllum wallisii*, nicht ausreichend war. Es wurde daher beschlossen, die Bewässerungsmenge auf 200 mL und diese Menge zweimal wöchentlich zu geben. Am 13. Oktober 2022 wurden alle zwölf Pflanzen in den vier Reihen des Versuchsstandes zum letzten Mal bewässert. Danach wurden nur noch die unteren beiden Reihen regelmäßig bewässert. In der folgenden Tabelle wurden nur die Bewässerungstermine für die Hälfte der Pflanzen aufgeführt.

Tab. 3.4: Termine zum Gießen der Pflanzen

Datum	Wochentag
17.10.2022	Montag
20.10.2022	Donnerstag
24.10.2022	Montag
27.10.2022	Donnerstag
31.10.2022	Montag
03.11.2022	Donnerstag

3.4 Fertiggestelltes Modell

Die Pflanzen wurden Ende August 2022 in den Boden gepflanzt. Für die Drainage wurde zusätzlich zu den Löchern an jedem Pflanzgefäß ein Universal-Pflanzenvlies verwendet. Ein Pflanzvlies dient der richtigen Drainage im Pflanzgefäß. Es sorgt für einen reibungslosen Wasserabfluss und ohne ein solches Vlies würde die Pflanzerde nach einiger Zeit ausgewaschen werden. [14]

Die für alle Pflanzen verwendete Substrat ist normale Pflanzerde. Es handelt sich um ein Universal-substrat, das in der Mischung ein Langzeit-Düngerdepot enthält und mit Nährstoffen angereichert ist. Auf die Erde wurde Pflanzgranulat aufgebracht, das die Pflanzen besser mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt, strukturstabil ist und verhindert, dass sich die Wurzeln im Boden verdichten.

**Abb. 3.7:** Anordnung der Pflanzen im Trogsystem (eigene Darstellung)

Die Abbildungen 3.7 und 3.8 zeigen die Anordnung und das fertiggestellte Modell des Systems. Abbildung 3.7 verdeutlicht die präzise Platzierung der Pflanzen im Trogsystem, während das Foto 3.8 das tatsächliche System in seiner Vollständigkeit darstellt.



Abb. 3.8: Das fertiggestellte System (eigenes Foto)

3.5 Datenerfassung

Bei physikalischen Phänomenen, die sich im analogen Bereich abspielen, müssen diese zunächst im physischen Sektor gemessen und anschließend in den digitalen Bereich übertragen werden. Dieser Prozess nutzt eine Vielzahl von Sensoren. Die Ausgangssignale werden von analog in digital umgewandelt und dann auf einem digitalen Medium gespeichert. Die Konvertierung von physikalischen Signalen in digitale Daten zwecks Anzeige, Speicherung und Analyse wird als Datenerfassung definiert [6]. Die Erfassung von Messdaten ist ein grundlegender Schritt in jeder Forschungsstudie, da sie es ermöglicht, empirische Daten aus verschiedenen Quellen wie Sensoren, Kameras oder anderen Messgeräten zu sammeln, um wichtige Erkenntnisse zu gewinnen.

Es wurden täglich Bilder von Pflanzen in einem Trogsystem aufgenommen, um Veränderungen der Pflanzentemperatur im Laufe der Zeit zu beobachten. Diese Daten wurden dann mit dem Programm IIRSoft (Abb.3.9) verarbeitet und gesammelt, sodass sie ausgewertet werden konnten.

Diese Diplomarbeit zielt darauf ab, den Einfluss von Bewässerung auf das Wachstum und Temperaturschwankungen von Pflanzen in einem Trogsystem zu untersuchen. Dazu wurden drei verschiedene Pflanzenarten in zwei Gruppen aufgeteilt, von denen eine Gruppe regelmäßig bewässert wurde, während die andere Gruppe nicht bewässert wurde. Die sorgfältige Erfassung und Analyse der Messdaten ergab signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen, die Aufschluss darüber geben, wie die Bewässerung die Pflanzentemperatur beeinflusst.

Es ist wichtig zu betonen, dass eine gründliche Erhebung von Messdaten entscheidend ist, um fundierte Schlussfolgerungen und Interpretationen der Ergebnisse zu gewährleisten. Durch die Erhebung empirischer Daten können Forscher eine solide Grundlage für ihre Analysen und Interpretationen schaffen, die dazu beitragen können, vorhandenes Wissen zu erweitern oder neue Erkenntnisse zu gewinnen.

3.5.1 Probenahme

Die Probenahme von Messdaten ist ein entscheidender Schritt bei der Datenerfassung, um genaue und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen. Bei diesem Experiment war ursprünglich geplant, die Kamera so zu positionieren, dass stündlich Fotos aufgenommen werden konnten. Allerdings stellte sich heraus, dass dies technisch nicht realisierbar war, und die Probenahmepläne mussten entsprechend angepasst werden.

Die Messung der Blättertemperatur mit einer Wärmebildkamera setzt eine regelmäßige Datenerfassung voraus, um den zeitlichen Verlauf der Temperaturveränderungen zu verfolgen. Zu diesem Zweck werden in regelmäßigen Zeitintervallen Bilder der Pflanzen mit der Kamera aufgenommen und die Temperaturwerte der einzelnen Punkte auf der Oberfläche der Pflanzenblätter gemessen.

Die Kamera fängt die von der Pflanzenoberfläche ausgehende Infrarotstrahlung ein und erzeugt daraus ein farbiges Wärmebild. Die verschiedenen Farben des Wärmebildes stehen für unterschiedliche Temperaturbereiche und sorgen für eine schnelle und einfache Auswertung der Daten. Für die Datenerfassung und -verarbeitung wurde Testo IIRSoft verwendet. [15]

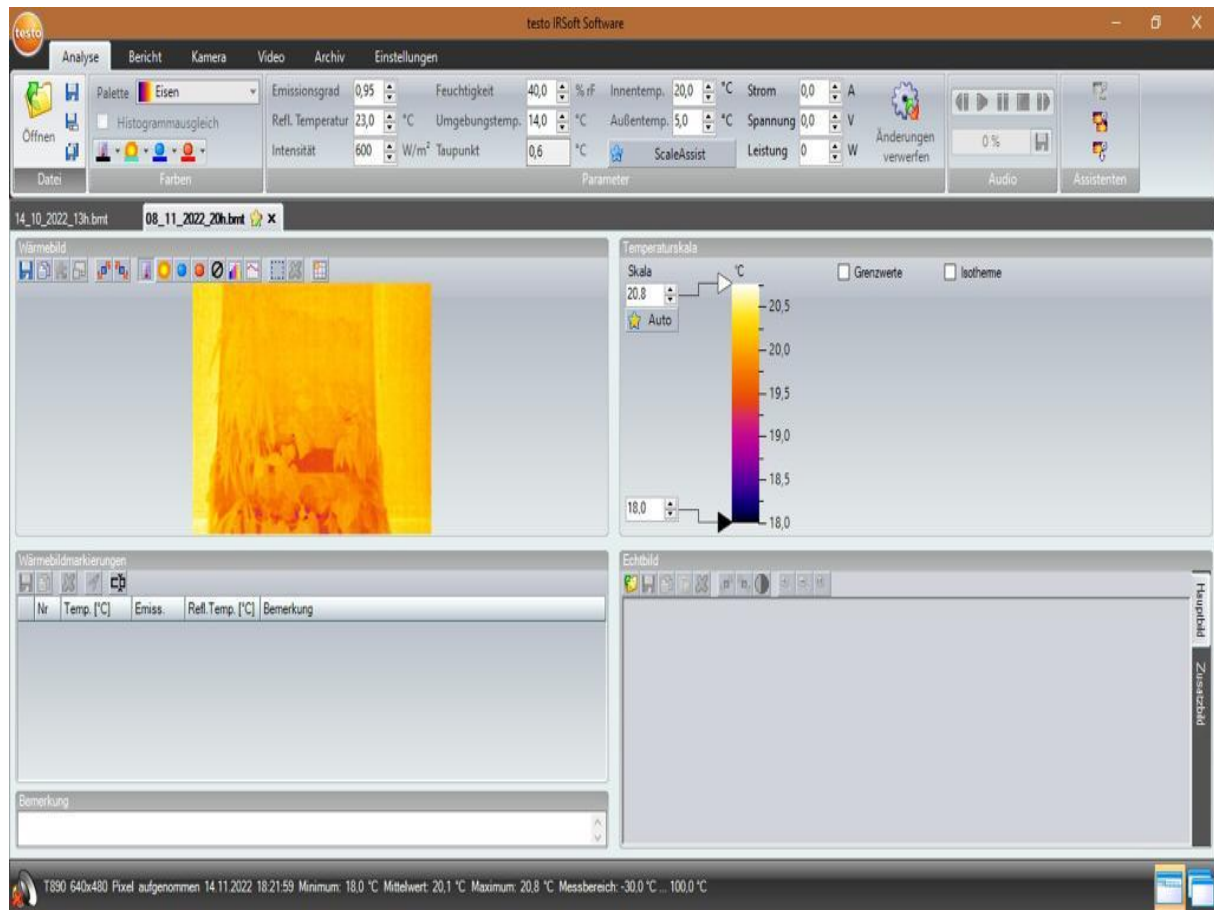


Abb. 3.9: Software IIRSoft (eigenes Foto)

Für präzise Messergebnisse ist es wichtig, dass die Wärmebildkamera richtig kalibriert ist und die Aufnahmen unter standardisierten Bedingungen durchgeführt werden. Dies schließt z. B. die Messung unter ähnlichen Lichtbedingungen und Umgebungstemperaturen ein. Die Wärmebildkamera wurde in einem Abstand von 2 Metern zum Prüfstand aufgestellt. Um zu prüfen, ob sich die gemessenen Werte tagsüber (um 13 Uhr) und nachts (um 20 Uhr) unterscheiden, wurden über mehrere Tage hinweg zwei Mal pro Tag Temperaturmessungen durchgeführt.

Beim Vergleich der Werte, die am 15.10.2022 um 13 Uhr und um 20 Uhr aufgezeichnet wurden, sind die Abweichungen der Messwerte vernachlässigbar. Besonders im Vergleich zur Bildqualität, die von anderen Faktoren wie den Lichtverhältnissen und den Kameraeinstellungen beeinflusst wird. Die um 13 Uhr aufgenommenen Bilder hatten eine bessere Qualität, was die Datenerfassung erleichtert.

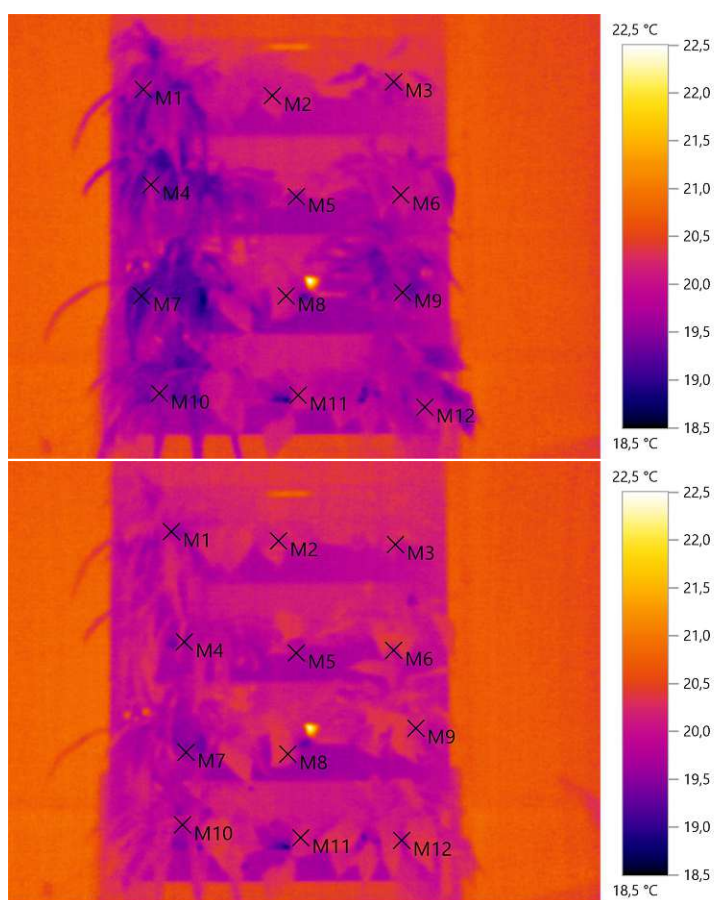


Abb. 3.10: Aufnahmen am 15.10.2022 um 13 (oben) und 20 Uhr (unten) (eigene Fotos)

Tab. 3.5: Temperaturmessungen am 15.10.2022 um 13 und 20 Uhr

	13 Uhr	20Uhr
Nr	Temp.[°C]	Temp.[°C]
M1	19,6	19,7
M2	20	20,1
M3	19,9	20
M4	19,7	19,7
M5	19,6	19,7
M6	20	20
M7	19,1	19,5
M8	20,1	20,2
M9	19,7	20
M10	19,6	19,7
M11	20	20,1
M12	19,9	19,8

Es ist jedoch zu beachten, dass Fotos, die bei Nacht aufgenommen werden, aufgrund des reduzierten Lichts eine schlechtere Qualität aufweisen. Dies kann dazu führen, dass die Messwerte weniger zuverlässig sind oder einige Daten nicht erfasst werden können. Zur Gewährleistung einer möglichst genauen Messung sollten die Rahmenbedingungen während der Datenerfassung standardisiert werden. Im Interesse der Vergleichbarkeit der Daten wurde beschlossen, die Messungen um 13 Uhr vorzunehmen und die Fotos nacheinander als Sequenz aufzunehmen. Hierbei wurden 10 Fotos im Abstand von 10 Sekunden aufgenommen, in einem .vmt-Format gespeichert, wodurch eine hohe Bildqualität sichergestellt wurde.

3.5.2 Messdatenerfassung

Mit der regelmäßigen Datenerfassung und Analyse der Blättertemperatur können wertvolle Informationen über die Gesundheit und das Wachstum der Pflanzen gewonnen werden. Zusätzlich können auch geeignete Maßnahmen zur Optimierung des Erfolgs dieses Versuchs mit der vertikalen Innenraumbegrünung eingeleitet werden. Zur weiteren Analyse der Daten wurden Fotos aus den Videoaufnahmen extrahiert. Jedes Foto wurde visuell geprüft, um das Foto mit der besten Qualität als repräsentativ auszuwählen. Die Beleuchtung wurde bei der Auswahl der Pflanzen nicht im Detail berücksichtigt, abgesehen davon, dass die Pflanzen kein direktes Sonnenlicht benötigen. Dennoch wurde die Fotoqualität mit einer Wärmebildkamera überprüft, um sicherzustellen, dass die Lichtverhältnisse ausreichend sind. Wie in Abschnitt 3.5.1 ausführlich erläutert, waren die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht im Vergleich zur Qualität der aufgenommenen Fotos gering. Daher wurde der Schwerpunkt auf die Verbesserung der Fotoqualität durch Minimierung unerwünschter Reflexionen gelegt. Zu diesem Zweck wurde das Aluminiumrinnensystem mit Isolierband abgedeckt, was dazu beitrug, die Reflexionen zu verringern und somit die Qualität der Fotos zu verbessern. Darüber hinaus wurde die Blättertemperatur von den Pflanzenblättern gemessen. In der IRSoft-Software war es möglich, die Blättertemperatur entlang einer Profilinie oder durch Markierungspunkte zu messen. Um genauere Daten zu erhalten, wurden in dieser Untersuchung die Temperaturen mittels Markierungspunkten für jede Pflanze, möglichst für einzelne Blätter, gemessen. Das bedeutet, dass für jedes Foto 12 Messpunkte verwendet wurden, um eine umfassende Messung der Temperaturverteilung in der Pflanze zu gewährleisten.

3.5.3 Bildverarbeitung und -analyse

Um Daten in der IRSoft-Software zu erfassen, müssen einige Parameter angepasst werden. Der Emissionsgrad von Pflanzen bezieht sich auf die Fähigkeit von Pflanzen, elektromagnetische Strahlung auszusenden, insbesondere in Form von Infrarotstrahlung. Pflanzen emittieren Wärmeenergie durch ihren Stoffwechsel, Atmung und durch die Absorption von Sonnenlicht. Dies führt dazu, dass Pflanzen eine bestimmte Temperatur haben und Infrarotstrahlung abgeben, die von Sensoren wie Infrarotkameras erfasst werden kann.

Der Emissionsgrad von Pflanzen bezieht sich auf die Fähigkeit von Pflanzen, elektromagnetische Strahlung, insbesondere in Form von Infrarotstrahlung, abzugeben. Pflanzen geben durch ihren Stoffwechsel, ihre Atmung und durch die Absorption von Sonnenlicht Wärmeenergie ab. Daraus ergibt sich, dass

Pflanzen eine bestimmte Temperatur haben und Infrarotstrahlung aussenden, die von Sensoren wie Infrarotkameras erfasst werden kann. Der Emissionsgrad richtet sich nach verschiedenen Faktoren, z. B. nach der Art der Pflanze, ihrer Größe und Form, der Zusammensetzung der Blätter und der Umgebungstemperatur. Verschiedene Pflanzenarten haben unterschiedliche Emissionsgrade, und innerhalb einer Pflanzenart kann der Emissionsgrad je nach Wachstumsstadium variieren. Im Allgemeinen haben Pflanzen einen Emissionsgrad zwischen 0,95 und 0,98, was darauf hindeutet, dass sie fast die gesamte einfallende Strahlung in Wärme umwandeln und nur einen kleinen Teil als reflektierte oder durchgelassene Strahlung zurückgeben.

In dieser Studie wurde ein Emissionsgrad von 0,98 angenommen, um sicherzustellen, dass die untersuchten Pflanzenarten diesen hohen Grad an Wärmeabgabe aufweisen [34]. Die Luftfeuchtigkeit wurde auf einem konstanten Niveau gehalten.

Die Reflexionstemperatur bezieht sich auf die Temperatur, die von Objekten wahrgenommen wird, die Strahlungsenergie vom Zielobjekt in die Kamera reflektieren. Diese Effekte sind bei Objekten mit hohem Emissionsgrad weniger bedeutend, aber die reflektierte Temperatur spielt bei Objekten mit niedrigem Emissionsgrad eine wichtige Rolle. In solchen Fällen wird nicht so sehr die tatsächliche Strahlungsenergie wahrgenommen, sondern vielmehr die Reflexion der Umgebung [9]. Aufgrund des hohen Emissionsgrades von Pflanzen wurde die reflektierte Temperatur als Umgebungstemperatur für Wärmebildkammermessungen angenommen.

Um die Vergleichbarkeit und Einheitlichkeit aller aufgenommenen Fotos zu gewährleisten, wurde die Temperaturskala für jedes Foto auf einen einheitlichen Bereich von 18,5°C bis 22,5°C festgelegt. Um die Informationen aus den Fotos weiter zu analysieren, wurden für jede Pflanzenart separate Excel-Tabellen erstellt. Anschließend wurden diese Tabellen mithilfe von Grafiken und Diagrammen visuell dargestellt, um eine detailliertere Betrachtung und Analyse der Daten zu ermöglichen.

3.6 Methode der Auswertung

Zur Analyse der Blättertemperatur der Pflanzen und zur Untersuchung möglicher Unterschiede zwischen den bewässerten und ungewässerten Pflanzen wurden statistische Methoden, grafische und tabellarische Darstellungen angewandt. Zu diesem Zweck wurde zunächst eine Datentabelle erstellt und die Daten nach den Behandlungsbedingungen (Pflanzentyp, Wassersättigung) sortiert, um mit Hilfe von Diagrammen einen Gesamtüberblick zu erhalten. Anschließend wurde die deskriptive Statistik angewandt, um die zentrale Tendenz der Daten zu bestimmen. Der Mittelwert, die Standardabweichung und der Standardfehler der Mittelwerte der Blättertemperatur wurden für jede Gruppe bestimmt.

Die Standardabweichung bezeichnet die Streuung einer Variablen um ihren Mittelwert und wird oft in der Statistik verwendet. Sie gibt an, wie weit die einzelnen Werte einer Verteilung von ihrem Mittelwert abweichen [23]. Die Formel für die Standardabweichung s gemäß [23] ist :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.1)$$

x_i - die einzelnen Datenwerte

$\bar{x}$ - der Mittelwert der Daten

n - die Anzahl der Datenpunkte in der Stichprobe

Die Standardabweichung wird oft zusammen mit dem Mittelwert angegeben, um einen Hinweis auf die Verteilung der Daten zu geben. Ein kleiner Wert für die Standardabweichung bedeutet, dass die Daten eng um den Mittelwert gruppiert sind, während ein großer Wert anzeigt, dass die Daten weit gestreut sind [23]. Die Formel für den Mittelwert $\bar{x}$ gemäß [23] ist:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i) \quad (3.2)$$

x_i - die einzelnen Datenwerte

$\bar{x}$ - der Mittelwert der Daten

n - die Anzahl der Stichprobe

Der Standardfehler des Mittelwerts (SEM) ist ein Messwert für die Genauigkeit der Schätzung des Mittelwerts einer Stichprobe aus einer Grundgesamtheit. Er drückt die Abweichung aus, die der Mittelwert der Stichprobe vom tatsächlichen Mittelwert der Grundgesamtheit haben kann. Der SEM wird berechnet, indem die Standardabweichung (s) der Stichprobe durch die Quadratwurzel des Stichprobenumfangs (n) geteilt wird [12]. Die Formel für die Standardfehler SEM gemäß [12] ist:

$$SEM = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (3.3)$$

s - die Standardabweichung

n - die Anzahl der Stichprobe

Der SEM ist umso kleiner, je größer die Stichprobe und je genauer die Schätzung des Mittelwerts ist [12]. In der Regel wird der SEM zusammen mit dem Mittelwert und der Standardabweichung angegeben, um die Ergebnisse einer Stichprobe zu beschreiben und zu interpretieren. Um signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen zu ermitteln, wurde eine t-Test-Analyse durchgeführt. Mit diesem statistischen Test lässt sich prüfen, ob der Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden

Gruppen signifikant von Null abweicht oder nicht. Ein signifikanter Unterschied bedeutet, dass die beobachteten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen nicht zufällig sind. [29]

Die detaillierten Methoden zur Datenerfassung, wie sie in Kapitel 3 ausführlich beschrieben wurden, legen den Grundstein für die folgende Analyse der Daten in Kapitel 4. Insbesondere wird in diesem Abschnitt der Fokus darauf liegen, die Unterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen in Bezug auf ihre Blattemperaturen zu erforschen. Die Ergebnisse der deskriptiven Statistik, welche die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen und die Signifikanz der Ergebnisse zeigen, wurden in Kapitel 4.2 anhand von Tabellen und Diagrammen präsentiert.

Kapitel 4

Ergebnisse

Nachdem die Daten erfasst wurden, ist es wichtig, sie zu analysieren, um Erkenntnisse zu gewinnen und das Experiment zu bewerten. Hierfür gibt es verschiedene Methoden, darunter statistische Analysen und grafische Darstellungen. Statistische Analysen können dabei helfen, Zusammenhänge zwischen den Variablen zu identifizieren und Hypothesen zu überprüfen. Hierfür können verschiedene statistische Verfahren angewendet werden, wie beispielsweise tTests, SPSS oder STATA [28]. Grafische Darstellungen wie Diagramme oder Graphen können dabei helfen, die Daten visuell zu interpretieren und Muster oder Trends zu erkennen. Beispielsweise können Histogramme verwendet werden, um die Verteilung der Daten zu untersuchen. [7]

Beim Analysieren der Daten ist es wichtig, nach eventuellen Fehlern zu suchen und diese gegebenenfalls zu korrigieren. Weiterhin sollten die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden, ob es alternative Erklärungen oder Ursachen für die beobachteten Effekte gibt. Generell kann eine sorgfältige Datenanalyse dazu einen Beitrag leisten, neue Erkenntnisse zu gewinnen und die Ergebnisse des Experiments zu validieren. Auch hier lassen sich die Erkenntnisse zur Optimierung von Prozessen und Produkten oder für weitere Forschungsarbeiten nutzen.

In diesem Versuch wurden die Blättertemperaturen von kultivierten Pflanzen unter realen Bedingungen gemessen, um die Frage zu untersuchen, auf welche Weise die Wasserversorgung den Einfluss auf die Blättertemperatur hat. Die Pflanzen wurden in zwei Gruppen eingeteilt: die bewässerten Pflanzen, die regelmäßig bewässert wurden, und die unbewässerten Pflanzen, die kein zusätzliches Wasser erhielten. Die Blättertemperatur wurde täglich gemessen, um die Veränderungen im Laufe der Zeit aufzuzeichnen.

Die Daten wurden sorgfältig gesammelt und zur einfachen Analyse in einer Excel Datei zusammengestellt. Ferner wurden für jede Gruppe Mittelwert, Standardabweichung und Standardfehler der Mittelwerte berechnet. Anschließend wurde eine t-Test-Analyse durchgeführt, um festzustellen, ob es signifikante Unterschiede zwischen den beiden Gruppen gibt. Die t-Test-Analyse ist ein statistischer Test, der anzeigt, ob der Unterschied zwischen den Mittelwerten einer Stichprobe und einem hypothetischen Mittelwert signifikant ist oder nicht. In diesem Fall wurde getestet, ob der Unterschied der Mittelwerte der Blättertemperatur zwischen den beiden Gruppen signifikant von Null abweicht oder nicht.

Die Ergebnisse der Analyse werden in diesem Abschnitt dargestellt und interpretiert, um die wichtigsten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen hervorzuheben. Darüber hinaus werden mögliche Auswirkungen der Ergebnisse auf die Pflanzengesundheit erörtert. Diese Diskussion erfolgt in Kapitel 6, in den auch möglichen Einschränkungen der Studie und Empfehlungen für künftige Forschungsarbeiten erörtert werden.

4.1 Ergebnisse der Bildanalyse

Die Analyse beginnt mit einem allgemeinen Vergleich der zwei Aufnahmen. Anschließend wird eine ausführliche Analyse jeder Pflanzenart einzeln durchgeführt.

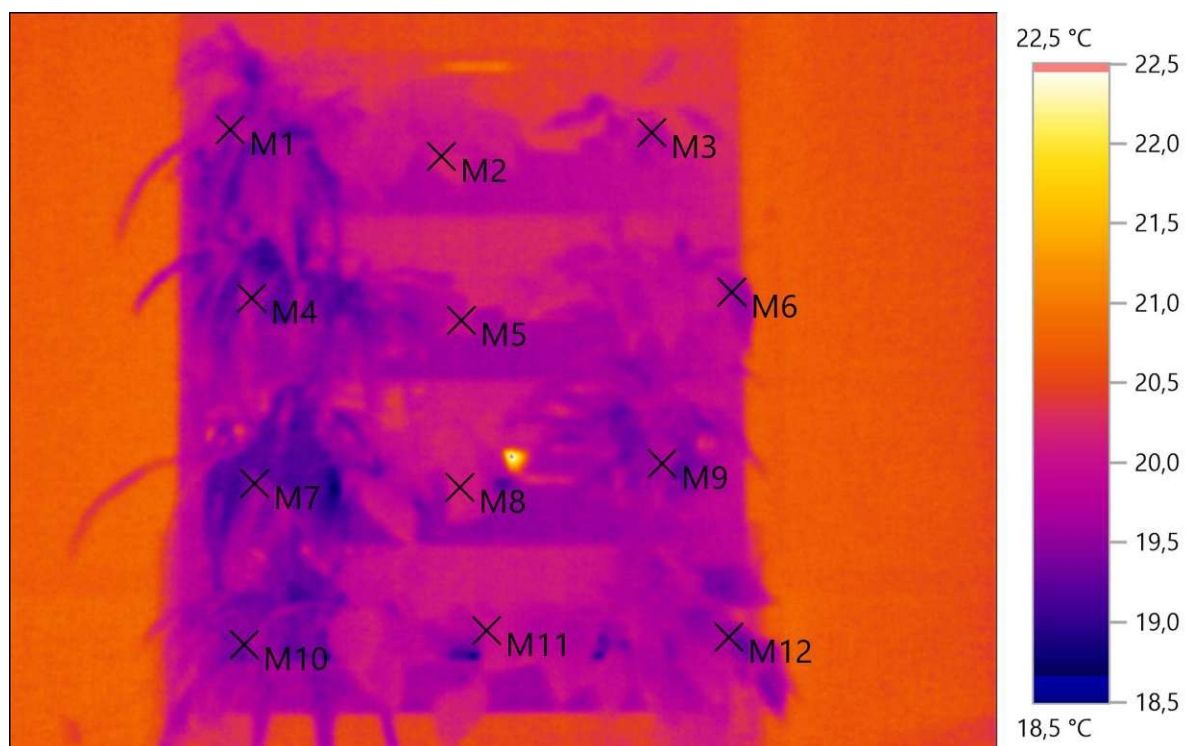


Abb. 4.1: Aufnahme von Pflanzen mit der Wärmebildkamera am 14.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

Tab. 4.1: Temperaturmessungen am 14.10.2022 um 13 Uhr

Nr.	Temp. [°C]	Emiss.	Refl. Temp. [°C]	Bemerkung
M1	19,6	0,98	21,4	Grünlilie 1
M2	20,1	0,98	21,4	Kletterphilodendron 1
M3	19,7	0,98	21,4	Einblatt 1
M4	19,6	0,98	21,4	Grünlilie 2
M5	19,9	0,98	21,4	Kletterphilodendron 2
M6	19,6	0,98	21,4	Einblatt 2
M7	19,4	0,98	21,4	Grünlilie 3
M8	20,1	0,98	21,4	Kletterphilodendron 3
M9	19,6	0,98	21,4	Einblatt 3
M10	19,4	0,98	21,4	Grünlilie 4
M11	19,9	0,98	21,4	Kletterphilodendron 4
M12	19,6	0,98	21,4	Einblatt 4

Am 14.10.2022 um 13 Uhr wurde eine erste Messung durchgeführt, nachdem alle Pflanzen am Vortag vollständig bewässert wurden. Die Ergebnisse dieser Temperaturmessungen für jede Pflanze sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Alle Pflanzen wurden mit einer Menge von 300 mL Wasser pro Pflanze bewässert.

Auf der Abb.4.1 sind leichte Temperaturunterschiede zwischen den Pflanzen zu erkennen. Die Temperatur der Grünlilien variiert zwischen den Reihen um 0,2 Grad mit einer durchschnittlichen Temperatur von 19,5 Grad. Der Kletterphilodendron zeigt eine etwas höhere durchschnittliche Temperatur von 20 Grad im Vergleich zu den anderen Pflanzenarten. Der Temperaturunterschied zwischen den Reihen beträgt ebenfalls 0,2 Grad. Die durchschnittliche Temperatur des Einblatts liegt bei 19,625 Grad. Nur die Pflanze in der ersten Reihe zeigt eine um 0,1 Grad höhere Temperatur als die anderen Reihen, die eine Temperatur von 19,6 Grad aufweisen. Die Umgebungstemperatur beträgt 21,4 Grad.

Die zweite Abb.4.2 wurde ungefähr 2 Wochen später am 01.11.2022 um 13 Uhr aufgenommen. Die Ergebnisse dieser Temperaturmessungen für jede Pflanze sind in Tabelle 4.2 aufgeführt. Die ersten beiden Reihen wurden nicht bewässert, während die dritte und vierte Reihe am 27.10.2022 bewässert wurden. Es ist ein signifikanter Temperaturunterschied zwischen den nicht bewässerten und bewässerten Pflanzenreihen zu erkennen. Alle drei Pflanzenarten in den ausgetrockneten Reihen zeigen eine höhere Temperatur als in den vollständig bewässerten Reihen. Die Grünlilie zeigt einen Temperaturunterschied von 0,8 bis 0,9 Grad (durchschnittlich 0,85 Grad) zwischen den nicht bewässerten und den bewässerten Pflanzen. Beim Kletterphilodendron ist der Temperaturunterschied etwas geringer, bei 0,6-0,8 Grad (durchschnittlich 0,7 Grad). Die höchste Temperatur des Kletterphilodendrons beträgt 20,4 Grad, was nur 0,3 Grad höher ist als die höchste Temperatur des Kletterphilodendrons, die am 14.10.2022 (20,1 Grad) gemessen wurde. Bei den anderen zwei Pflanzenarten beträgt dieser Unterschied zwischen 0,7-0,8 Grad, was mehr als doppelt so hoch ist wie beim Kletterphilodendron. Das Einblatt zeigt einen Temperaturunterschied von 0,8-0,9 Grad (durchschnittlich 0,85 Grad) zwischen den nicht bewässerten und den vollständig bewässerten Reihen. Die Umgebungstemperatur beträgt 21,2 Grad.

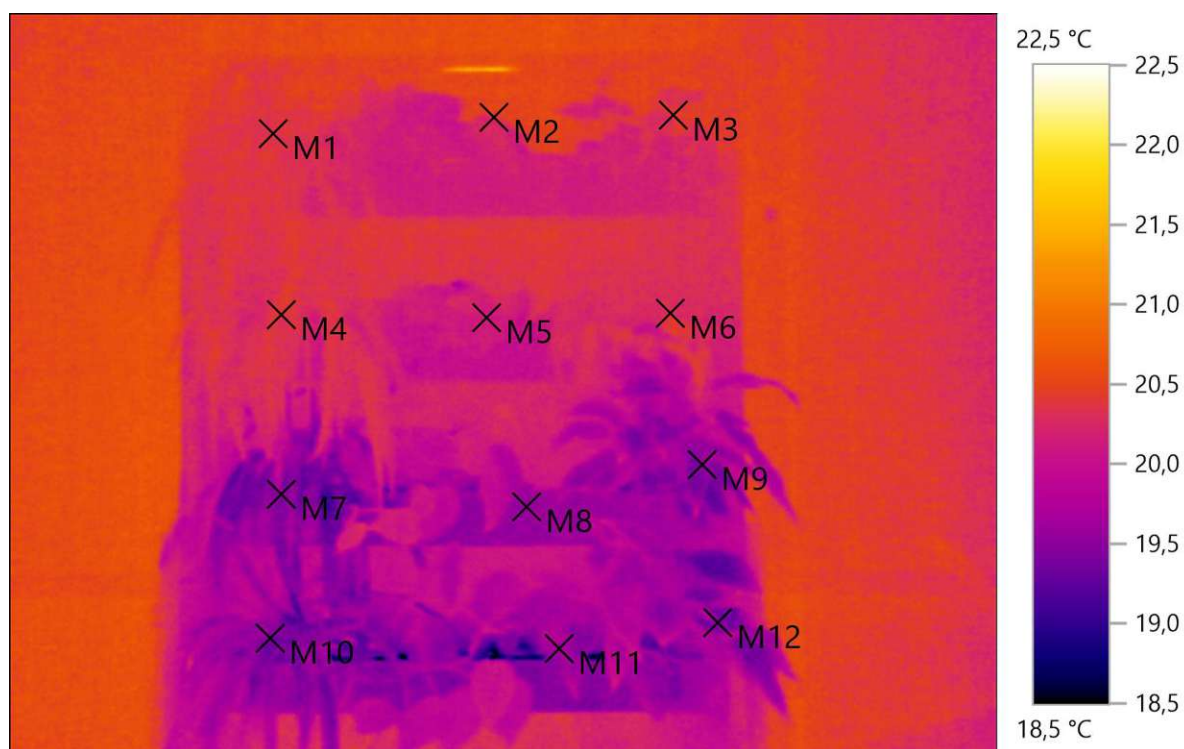


Abb. 4.2: Aufnahme von Pflanzen mit der Wärmebildkamera am 01.11.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

Tab. 4.2: Temperaturmessungen am 01.11.2022 um 13 Uhr

Nr.	Temp. [°C]	Emiss.	Refl. Temp. [°C]	Bemerkung
M1	20,4	0,98	21,2	Grünlilie 1
M2	20,4	0,98	21,2	Kletterphilodendron 1
M3	20,4	0,98	21,2	Einblatt 1
M4	20,4	0,98	21,2	Grünlilie 2
M5	20,2	0,98	21,2	Kletterphilodendron 2
M6	20,3	0,98	21,2	Einblatt 2
M7	19,5	0,98	21,2	Grünlilie 3
M8	19,6	0,98	21,2	Kletterphilodendron 3
M9	19,5	0,98	21,2	Einblatt 3
M10	19,4	0,98	21,2	Grünlilie 4
M11	19,6	0,98	21,2	Kletterphilodendron 4
M12	19,5	0,98	21,2	Einblatt 4

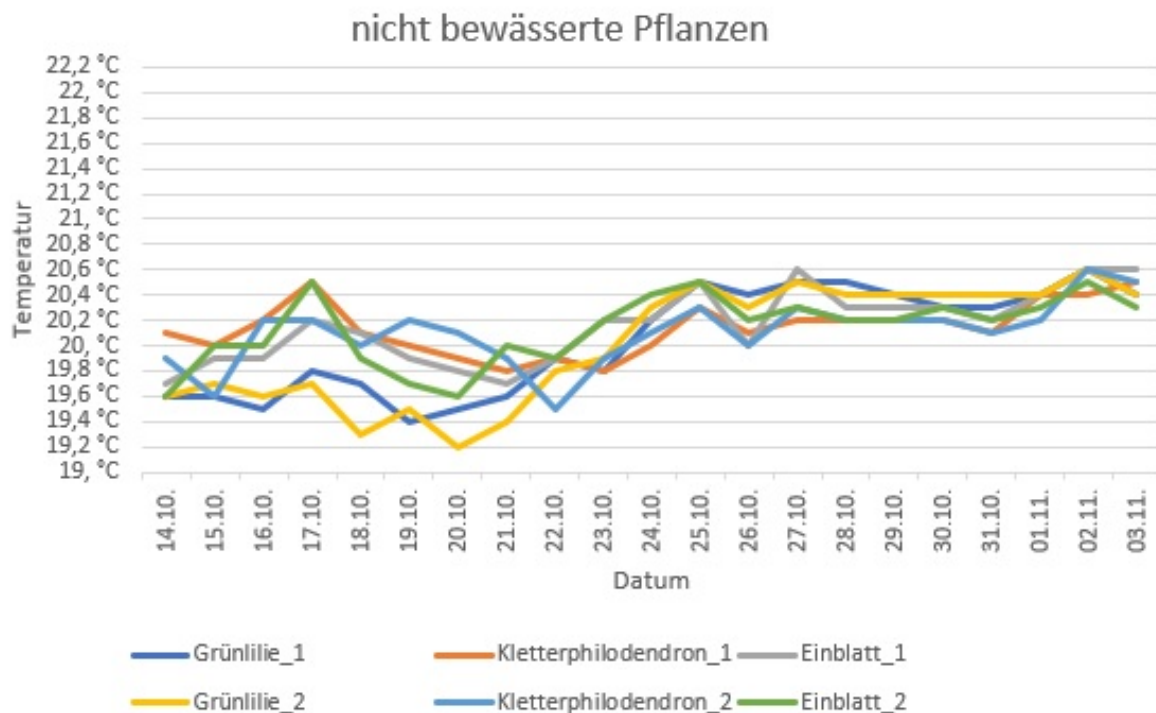


Abb. 4.3: Grafik der nicht bewässerten Pflanzen (eigene Dargestellung)

In der ersten Grafik handelt es sich also um die Temperaturänderungen von ungesättigten Pflanzen aufgrund von Wassermangel über einen Zeitraum von 21 Tage. In dieser Grafik ist deutlich zu sehen, dass die Temperatur stetig ansteigt und keine auffälligen Abweichungen von diesem Trend aufweist. Dies deutet darauf hin, dass die ungesättigten Pflanzen möglicherweise nicht genügend Wasser erhalten, um ihre Transpiration und somit auch ihre Wärmeabgabe zu regulieren. Die stetige Erhöhung der Temperatur kann Auswirkungen auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen haben und ihre Fähigkeit, in ihrem Umfeld zu überleben, beeinträchtigen.

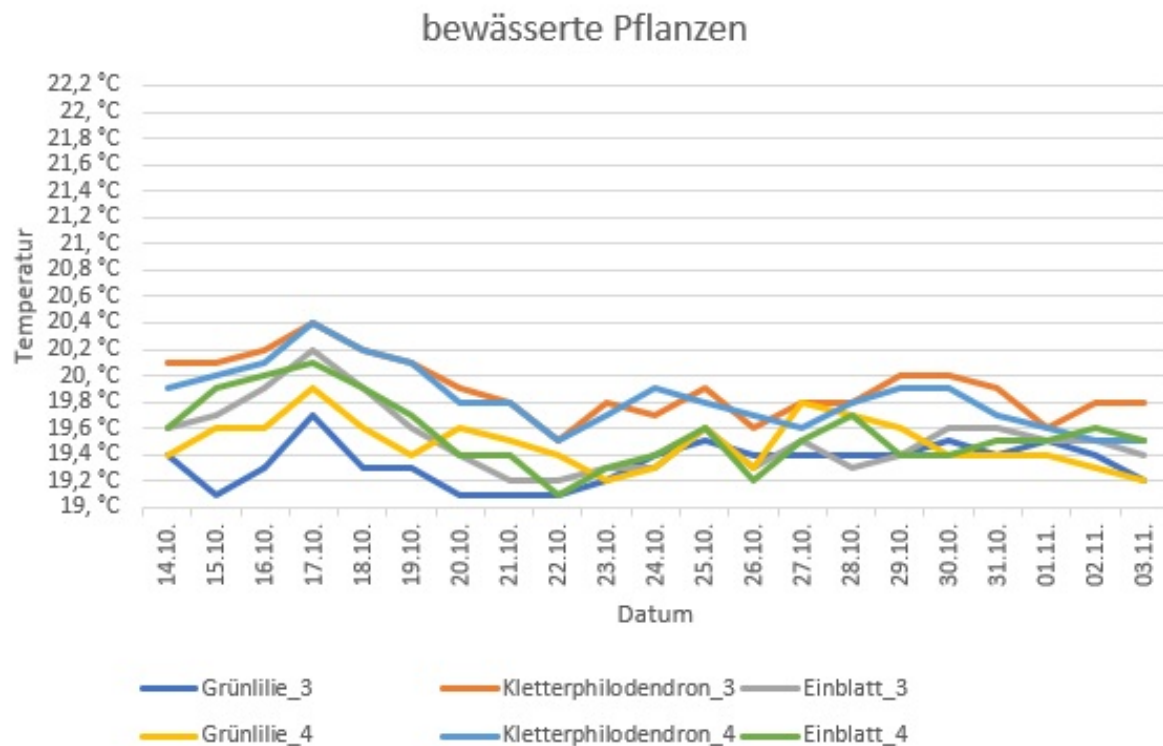


Abb. 4.4: Grafik der bewässerten Pflanzen (eigene Darstellung)

Im Gegensatz dazu zeigt die zweite Grafik die Temperaturänderungen von gesättigten Pflanzen über denselben Zeitraum. Hier ist zu erkennen, dass die Temperatur mehr oder weniger konstant bleibt und nur geringe Schwankungen aufweist. Dies kann darauf hinweisen, dass die gesättigten Pflanzen ausreichend Wasser erhalten, um ihre Transpiration und somit auch ihre Wärmeabgabe zu regulieren. Die konstante Temperatur kann dazu beitragen, dass die gesättigten Pflanzen ihre Stoffwechselprozesse aufrechterhalten und ein optimales Wachstum und Überleben sicherstellen können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die beiden Grafiken die Temperaturänderungen von nicht bewässerten und bewässerten Pflanzen aufgrund von Wassermangel zeigen und dass es Unterschiede in der Art und Weise gibt, wie diese Pflanzen auf ihre Wassersättigung reagieren.

4.1.1 Grönlilie

Tab. 4.3: Temperaturmessungen von Grönlilie

Datum	Grönlilie 1	Grönlilie 2	Grönlilie 3	Grönlilie 4	T.Differenz
14.10.2022	19,6 °C	19,6 °C	19,4 °C	19,4 °C	0,2 °C
15.10.2022	19,6 °C	19,7 °C	19,1 °C	19,6 °C	0,3 °C
16.10.2022	19,5 °C	19,6 °C	19,3 °C	19,6 °C	0,1 °C
17.10.2022	19,8 °C	19,7 °C	19,7 °C	19,9 °C	-0,05 °C
18.10.2022	19,7 °C	19,3 °C	19,3 °C	19,6 °C	0,05 °C
19.10.2022	19,4 °C	19,5 °C	19,3 °C	19,4 °C	0,1 °C
20.10.2022	19,5 °C	19,2 °C	19,1 °C	19,5 °C	0,2 °C
21.10.2022	19,6 °C	19,4 °C	19,1 °C	19,5 °C	0,2 °C
22.10.2022	19,9 °C	19,8 °C	19,1 °C	19,4 °C	0,6 °C
23.10.2022	19,8 °C	19,9 °C	19,2 °C	19,2 °C	0,65 °C
24.10.2022	20,2 °C	20,3 °C	19,4 °C	19,3 °C	0,9 °C
25.10.2022	20,5 °C	20,5 °C	19,5 °C	19,6 °C	0,95 °C
26.10.2022	20,4 °C	20,3 °C	19,4 °C	19,3 °C	1 °C
27.10.2022	20,5 °C	20,5 °C	19,4 °C	19,8 °C	0,9 °C
28.10.2022	20,5 °C	20,4 °C	19,4 °C	19,7 °C	0,9 °C
29.10.2022	20,4 °C	20,4 °C	19,4 °C	19,6 °C	0,9 °C
30.10.2022	20,3 °C	20,4 °C	19,5 °C	19,4 °C	0,9 °C
31.10.2022	20,3 °C	20,4 °C	19,4 °C	19,4 °C	0,95 °C
01.11.2022	20,4 °C	20,4 °C	19,5 °C	19,4 °C	0,95 °C
02.11.2022	20,6 °C	20,6 °C	19,4 °C	19,3 °C	1,25 °C
03.11.2022	20,4 °C	20,4 °C	19,2 °C	19,2 °C	1,2 °C

Die Temperaturveränderungen der Grönlilie werden in Tabelle 4.3 und Abbildung 4.5 genauer untersucht. Es zeigt sich, dass gut bewässerte Pflanzen im Laufe der 21 Tage nur geringe Temperaturschwankungen aufweisen und ihre Temperatur stets unterhalb von 20 Grad Celsius bleibt. Die höchste gemessene Temperatur bei bewässerten Pflanzen betrug 19,9°C, als die Umgebungstemperatur am höchsten war (22,1°C).

Im Gegensatz dazu weisen nicht bewässerte Pflanzen deutlich höhere Temperaturunterschiede auf. Erst 9 Tage nach dem letzten Gießen der Pflanzen am 22. Oktober 2022 konnten Unterschiede von 0,6°C festgestellt werden. Zwei Tage später stieg die Temperatur auf über 20°C an (die Temperaturdifferenz erhöhte sich auf 0,9°C) und stieg kontinuierlich bis zum Ende des Experiments an. Nach einem Zeitraum von 19 Tagen ohne ausreichende Wasserversorgung wiesen die Pflanzen, die nicht bewässert wurden, eine Temperaturdifferenz von 1,25°C im Vergleich zu den gesättigten Pflanzen auf.

Diese Ergebnisse unterstreichen die zentrale Bedeutung einer ausreichenden Wasserversorgung für die Regulierung der Blättertemperatur von Pflanzen. Eine unzureichende Bewässerung kann zu Störungen in der Körpertemperaturregulation führen, was wiederum Auswirkungen auf das Überleben der Pflanzen in ihrer Umgebung hat.

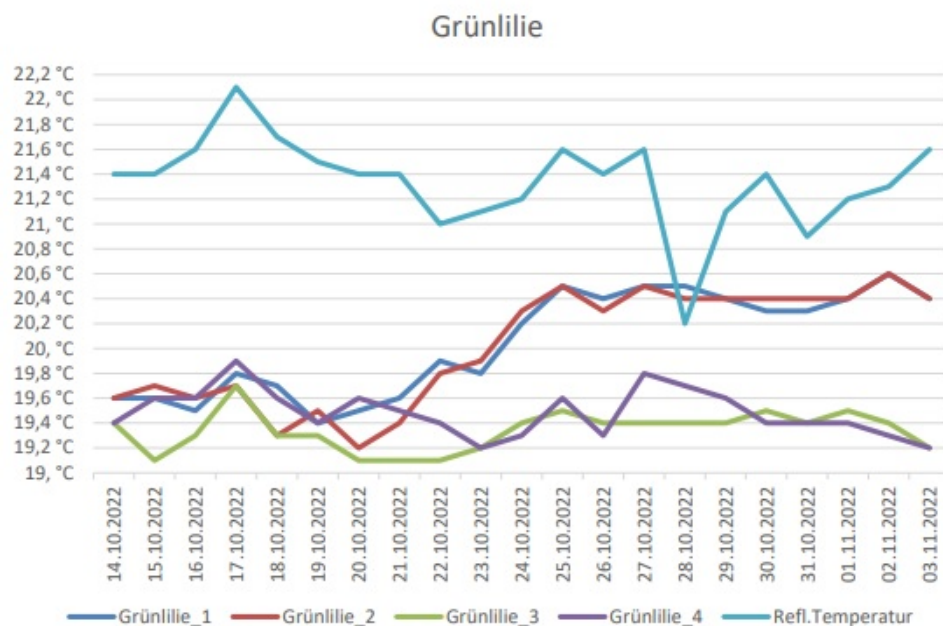


Abb. 4.5: Grafische Visualisierung der Temperaturschwankungen von Grünlilie (eigene Darstellung)

4.1.2 Kletterphilodendron

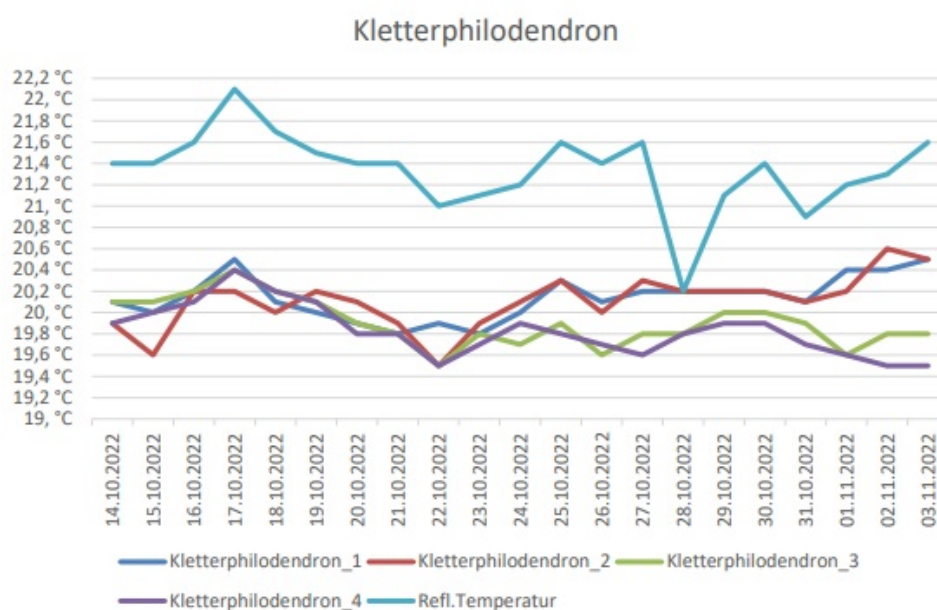
Die Messergebnisse, dargestellt in Tabelle 4.4 und Abbildung 4.6, zeigen, dass sich die Temperaturunterschiede bei Kletterphilodendron in den ersten Tagen nach der Bewässerung im Vergleich zu Grünlilie und Einblatt stärker unterscheiden. Insbesondere fällt auf, dass bei Kletterphilodendron am vierten Tag nach der Bewässerung die Temperatur höher ist bei Pflanzen, die in der Zwischenzeit nicht bewässert wurden, im Vergleich zu Pflanzen, die bewässert wurden. Die bewässerten Kletterphilodendren hatten im Durchschnitt eine Temperatur von 19,9°C, was im Vergleich zu den anderen beiden Pflanzenarten eine 0,4-0,5°C höhere Temperatur darstellt. Erst am 25. Oktober 2022, 12 Tage nach der Bewässerung, zeigen sich etwas größere Unterschiede in der Temperatur von Kletterphilodendron im Vergleich zu den anderen Pflanzen. Die Unterschiede in der Temperatur liegen hier bei etwa 0,45°C.

Im Vergleich zur Grünlilie, die am 23. Oktober 2022, also 9 Tage nach der Bewässerung, einen Temperaturunterschied von 0,6°C aufweist, zeigt Kletterphilodendron am selben Tag nur eine Temperaturdifferenz von 0,2°C. Bis zum 1. November 2022 variieren die Temperaturunterschiede zwischen den Kletterphilodendronpflanzen bei etwa 0,5°C, bevor in den letzten drei Tagen der Unterschied größer wird und bei Kletterphilodendron eine Abweichung von 0,7-0,85°C auftritt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bewässerung bei Kletterphilodendron weniger Einfluss auf die Temperatur hat als bei Grünlilie und Einblatt. Ein möglicher Grund dafür könnte in den Unterschieden in den physiologischen Eigenschaften und Bedürfnissen der Pflanzen liegen. Kletterphilodendron ist eine epiphytische Pflanze, die normalerweise in den tropischen Regenwäldern beheimatet ist und sich an das Leben auf Bäumen angepasst hat. [48]

Tab. 4.4: Temperaturmessungen von Kletterphilodendron

Datum	Kl.Philodendron 1	Kl.Philodendron 2	Kl.Philodendron 3	Kl.Philodendron 4	T.Differenz
14.10.2022	20,1 °C	19,9 °C	20,1 °C	19,9 °C	0 °C
15.10.2022	20 °C	19,6 °C	20,1 °C	20 °C	-0,25 °C
16.10.2022	20,2 °C	20,2 °C	20,2 °C	20,1 °C	0,05 °C
17.10.2022	20,5 °C	20,2 °C	20,4 °C	20,4 °C	-0,05 °C
18.10.2022	20,1 °C	20 °C	20,2 °C	20,2 °C	-0,15 °C
19.10.2022	20 °C	20,2 °C	20,1 °C	20,1 °C	0 °C
20.10.2022	19,9 °C	20,1 °C	19,9 °C	19,8 °C	0,15 °C
21.10.2022	19,8 °C	19,9 °C	19,8 °C	19,8 °C	0,05 °C
22.10.2022	19,9 °C	19,5 °C	19,5 °C	19,5 °C	0,2 °C
23.10.2022	19,8 °C	19,9 °C	19,8 °C	19,7 °C	0,1 °C
24.10.2022	20 °C	20,1 °C	19,7 °C	19,9 °C	0,25 °C
25.10.2022	20,3 °C	20,3 °C	19,9 °C	19,8 °C	0,45 °C
26.10.2022	20,1 °C	20 °C	19,6 °C	19,7 °C	0,4 °C
27.10.2022	20,2 °C	20,3 °C	19,8 °C	19,6 °C	0,55 °C
28.10.2022	20,2 °C	20,2 °C	19,8 °C	19,8 °C	0,4 °C
29.10.2022	20,2 °C	20,2 °C	20 °C	19,9 °C	0,25 °C
30.10.2022	20,2 °C	20,2 °C	20 °C	19,9 °C	0,25 °C
31.10.2022	20,1 °C	20,1 °C	19,9 °C	19,7 °C	0,3 °C
01.11.2022	20,4 °C	20,6 °C	19,8 °C	19,5 °C	0,7 °C
02.11.2022	20,4 °C	20,6 °C	19,8 °C	19,5 °C	0,85 °C
03.11.2022	20,5 °C	20,5 °C	19,8 °C	19,5 °C	0,85 °C

**Abb. 4.6:** Grafische Visualisierung der Temperaturschwankungen von Kletterphilodendron (eigene Darstellung)

Es könnte also sein, dass die Pflanze im Vergleich zu Grünliebe und Einblatt eine höhere Toleranz gegenüber Trockenheit aufweist und sich besser an Wassermangel anpassen kann, was zu einer geringeren Temperaturdifferenz zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen führt.

4.1.3 Einblatt

Tab. 4.5: Temperaturmessungen von Einblatt

Datum	Einblatt 1	Einblatt 2	Einblatt 3	Einblatt 4	T.Differenz
14.10.2022	19,7 °C	19,6 °C	19,6 °C	19,6 °C	0,05 °C
15.10.2022	19,9 °C	20 °C	19,7 °C	19,9 °C	0,15 °C
16.10.2022	19,9 °C	20 °C	19,9 °C	20 °C	0 °C
17.10.2022	20,2 °C	20,5 °C	20,2 °C	20,1 °C	0,2 °C
18.10.2022	20,1 °C	19,9 °C	19,9 °C	19,9 °C	0,1 °C
19.10.2022	19,9 °C	19,7 °C	19,9 °C	19,9 °C	0,1 °C
20.10.2022	19,8 °C	19,6 °C	19,4 °C	19,4 °C	0,3 °C
21.10.2022	19,7 °C	20 °C	19,2 °C	19,4 °C	0,55 °C
22.10.2022	19,9 °C	19,9 °C	19,2 °C	19,1 °C	0,75 °C
23.10.2022	20,2 °C	20,2 °C	19,3 °C	19,3 °C	0,9 °C
24.10.2022	20,2 °C	20,4 °C	19,3 °C	19,4 °C	0,95 °C
25.10.2022	20,5 °C	20,5 °C	19,6 °C	19,6 °C	0,9 °C
26.10.2022	20 °C	20,2 °C	19,3 °C	19,2 °C	0,85 °C
27.10.2022	20,6 °C	20,3 °C	19,5 °C	19,5 °C	0,95 °C
28.10.2022	20,3 °C	20,2 °C	19,3 °C	19,7 °C	0,75 °C
29.10.2022	20,3 °C	20,2 °C	19,4 °C	19,4 °C	0,85 °C
30.10.2022	20,3 °C	20,3 °C	19,6 °C	19,4 °C	0,8 °C
31.10.2022	20,2 °C	20,2 °C	19,6 °C	19,5 °C	0,65 °C
01.11.2022	20,4 °C	20,3 °C	19,5 °C	19,5 °C	0,85 °C
02.11.2022	20,6 °C	20,5 °C	19,5 °C	19,6 °C	1 °C
03.11.2022	20,6 °C	20,3 °C	19,4 °C	19,5 °C	1 °C

Die vorliegenden Daten werden in Tabelle 4.5 und Abbildung 4.7 präsentiert, um das Verhalten von Einblatt-Pflanzen unter Bedingungen von Wassermangel zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass Einblatt als erste von allen Pflanzenarten Anzeichen einer Temperaturerhöhung aufweist, die auf einen Mangel an Wasser zurückzuführen ist. Am 21. Oktober 2022 betrug die Differenz der Temperatur zwischen ausreichend bewässerten und nicht bewässerten Einblatt-Pflanzen 0,55 Grad. Bis zum 1. November 2022 variierte die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Gruppen auf 0,85 Grad und stieg in den letzten beiden Tagen auf 1 Grad an.

Die Pflanzen von Einblatt zeigten deutliche Anzeichen von Stress, die sowohl visuell als auch durch die erhöhten Temperaturen erkennbar waren. Die Beobachtungen deuten darauf hin, dass die Pflanzen unter Wassermangel leiden und ihre Gesundheit beeinträchtigt sind.

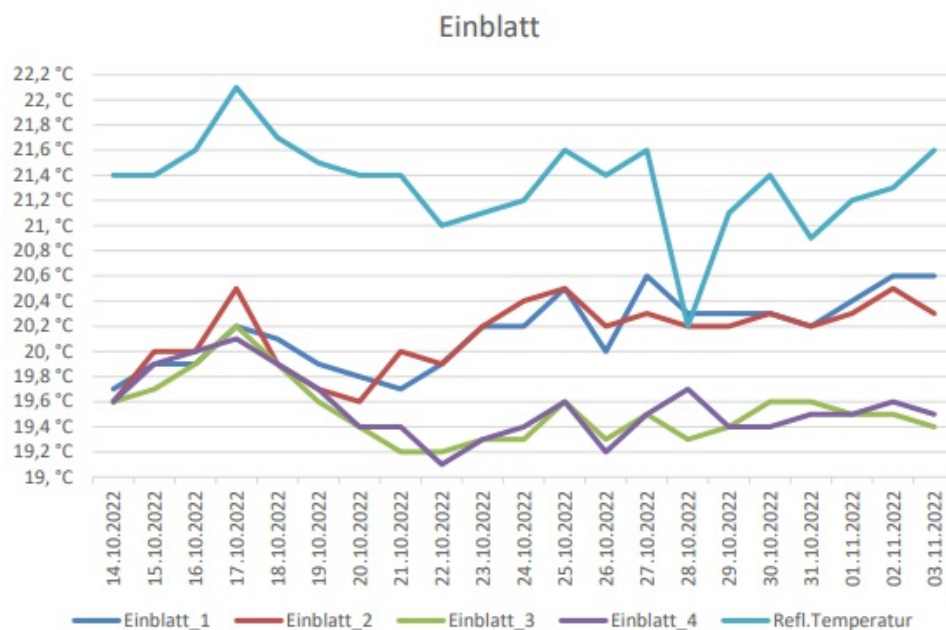


Abb. 4.7: Grafische Visualisierung der Temperaturschwankungen von Einblatt (eigene Darstellung)

4.2 Ergebnisse der statistischen Analyse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der deskriptiven Statistik der durchgeführten Temperaturmessungen präsentiert. Die deskriptive Statistik hat das Ziel, die vorliegenden Daten zu analysieren, zu organisieren und zusammenzufassen, um wichtige Charakteristiken der Temperaturmessungen zu identifizieren.

Die präsentierten statistischen Maße bieten Einblicke in die Eigenschaften der Temperaturdaten. Dazu gehören der arithmetische Mittelwert, die Standardabweichung, der Median und weitere relevante Kennzahlen.

Zusammenfassend bieten die Ergebnisse der deskriptiven Statistik eine kompakte Zusammenfassung und Interpretation der vorliegenden Temperaturdaten. Sie ermöglichen eine grundlegende Erfassung der Eigenschaften der Temperaturmessungen und dienen als Ausgangspunkt für weitere Analysen und Interpretationen. Durch die Beschreibung und Zusammenfassung der Daten ermöglicht die deskriptive Statistik ein besseres Verständnis der Temperaturmessungen, ohne dabei auf eine größere Stichprobe zu verallgemeinern.

4.2.1 Grönlilie

Die vorliegende Tabelle 4.6 zeigt statistische Werte für die Temperatur der Grönlilie unter ungesättigten und gesättigten Bedingungen. Die Daten umfassen den Mittelwert, den Median, den Modus, den Bereich, die Standardabweichung, das Minimum, das Maximum und den Standardfehler des Mittelwerts. Die Ergebnisse dienen der Interpretation und dem Vergleich der beiden Bedingungen.

Tab. 4.6: Statistische Werte von Grönlilie

	ungesättigt	gesättigt
Mittelwert	20 °C	19,4 °C
Median	20,3 °C	19,4 °C
Mode	20,4	19,4
Bereich	1,4	0,8
St.Abweichung	0,42944	0,18542
MIN	19,2 °C	19,1 °C
MAX	20,6 °C	19,9 °C
SEM	0,0960	0,04146

Unter ungesättigten Bedingungen beträgt der Mittelwert der Temperatur 20 °C, während er unter gesättigten Bedingungen leicht niedriger bei 19,4 °C liegt. Der Median, der den zentralen Wert repräsentiert, ist in beiden Bedingungen nahezu gleich, wobei er für ungesättigte Bedingungen bei 20,3 °C und für gesättigte Bedingungen bei 19,4 °C liegt. Der Modus, der den am häufigsten auftretenden Wert angibt, liegt bei 20,4 °C für ungesättigte Bedingungen und bei 19,4 °C für gesättigte Bedingungen. Dies deutet darauf hin, dass 20,4 °C die häufigste Temperatur in der ungesättigten Umgebung ist, während in der gesättigten Umgebung 19,4 °C die häufigste Temperatur ist.

Der Bereich gibt die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert an und beträgt 1,4 °C für ungesättigte Bedingungen und 0,8 °C für gesättigte Bedingungen. Dies bedeutet, dass die Temperatur in der ungesättigten Umgebung stärker variiert als in der gesättigten Umgebung. Die Standardabweichung gibt an, wie stark die einzelnen Datenpunkte um den Mittelwert streuen. Sie beträgt 0,42944 °C für ungesättigte Bedingungen und 0,18542 °C für gesättigte Bedingungen. Eine geringere Standardabweichung deutet auf eine geringere Streuung der Daten um den Mittelwert hin, was darauf hindeutet, dass die Temperatur in der gesättigten Umgebung weniger variiert als in der ungesättigten Umgebung.

Das Minimum und Maximum geben die niedrigsten bzw. höchsten gemessenen Temperaturen an. In der ungesättigten Umgebung liegt das Minimum bei 19,2 °C und das Maximum bei 20,6 °C. In der gesättigten Umgebung liegt das Minimum bei 19,1 °C und das Maximum bei 19,9 °C. Diese Werte zeigen, dass die Temperatur in der ungesättigten Umgebung einen größeren Bereich abdeckt als in der gesättigten Umgebung. Der Standardfehler des Mittelwerts gibt an, wie genau der berechnete Mittelwert die tatsächliche Population repräsentiert. Er beträgt 0,0960 für ungesättigte Bedingungen und 0,04146 für gesättigte Bedingungen. Ein geringerer Standardfehler deutet auf eine höhere Genauigkeit des Mittelwerts hin.

Insgesamt lässt sich sagen, dass die Temperatur in der ungesättigten Umgebung im Durchschnitt etwas höher ist als in der gesättigten Umgebung. Die Temperatur in der ungesättigten Umgebung variiert stärker und weist eine größere Standardabweichung sowie einen größeren Bereich auf. Die gesättigte

Umgebung weist hingegen eine geringere Streuung, einen kleineren Bereich und eine geringere Standardabweichung auf. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Sättigung einen Einfluss auf die Temperatur der Grönlilie haben kann. Andere Faktoren, die die Temperatur beeinflussen könnten, wurden jedoch berücksichtigt und ausgeschlossen, um sicherzustellen, dass die gemessenen Unterschiede tatsächlich auf die Sättigung zurückzuführen sind.

Die durchgeführten t-Tests zeigen bemerkenswerte statistische Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen bei der Grönlilie. Es wurden niedrige p-Werte erzielt, darunter $1,10082 \times 10^{-7}$ zwischen den Pflanzen der Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser), was auf einen bedeutenden Temperaturunterschied hinweist. Ebenfalls signifikante p-Werte ergaben sich bei Vergleichen zwischen den Pflanzen der Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) mit $1,34284 \times 10^{-6}$ sowie zwischen den Pflanzen der Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) mit $5,49518 \times 10^{-6}$. Diese Ergebnisse legen nahe, dass es statistisch signifikante Unterschiede in der Temperatur zwischen diesen Gruppen gibt.

Ein weiterer interessanter Befund zeigt sich im Vergleich zwischen den Pflanzen der Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser), bei dem ein signifikanter p-Wert von $4,82383 \times 10^{-5}$ ermittelt wurde. Dies weist auf eine statistisch signifikante Differenz in der Temperatur zwischen diesen beiden Gruppen hin. Hingegen wurde beim t-Test zwischen den Pflanzen der Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) kein signifikanter Unterschied in der Temperatur festgestellt, da der p-Wert von $0,355279222$ über dem festgelegten Signifikanzniveau liegt. Dies bedeutet, dass die Temperatur zwischen diesen beiden Gruppen statistisch nicht signifikant variiert. Interessanterweise zeigte der t-Test zwischen den Pflanzen der Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) eine statistisch signifikante Differenz in der Temperatur mit einem p-Wert von $0,004112671$.

Zusammenfassend lassen die Ergebnisse der t-Tests darauf schließen, dass es bemerkenswerte Unterschiede in der Temperatur zwischen den verschiedenen Gruppen der Grönlilie gibt. Insbesondere zeigen sich signifikante Unterschiede zwischen den nicht gesättigten Pflanzen (Gruppe 1) und den gesättigten Pflanzen (Gruppe 3) sowie zwischen den verschiedenen Kombinationen von gesättigten und nicht gesättigten Pflanzen. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass die Wassersättigung einen messbaren Einfluss auf die Temperatur der Grönlilie hat. Weitere Untersuchungen sind jedoch erforderlich, um die genauen Mechanismen und Auswirkungen dieser Beziehung zu verstehen.

4.2.2 Kletterphilodendron

In der Tabelle 4.7 sind statistische Werte zur Temperatur des Kletterphilodendrons in ungesättigter und gesättigter Umgebung aufgeführt. Diese Daten bieten eine umfassende Grundlage zur Interpretation und zum Vergleich der beiden Umweltbedingungen. Unter ungesättigten Bedingungen zeigt sich ein durchschnittlicher Temperaturwert von $20,1^\circ\text{C}$, während er unter gesättigten Bedingungen leicht auf $19,8^\circ\text{C}$ abfällt.

Tab. 4.7: Statistische Werte von Kletterphilodendron

	ungesättigt	gestättigt
Mittelwert	20,1 °C	19,8 °C
Median	20,2 °C	19,8 °C
Mode	20,2	19,8
Bereich	1,1	0,9
St.Abweichung	0,22734	0,22956
MIN	19,5 °C	19,5 °C
MAX	20,6 °C	20,4 °C
SEM	0,05083	0,05133

Der Median, der den mittleren Wert repräsentiert, liegt bei 20,2 °C für ungesättigte Bedingungen und bei 19,8 °C für gesättigte Bedingungen. Der Modus, der den am häufigsten auftretenden Wert angibt, beträgt 20,2 °C für ungesättigte Bedingungen und 19,8 °C für gesättigte Bedingungen. Dies deutet darauf hin, dass 20,2 °C die vorherrschende Temperatur unter ungesättigten Bedingungen ist, während es unter gesättigten Bedingungen 19,8 °C ist. Der Bereich, der die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert angibt, beträgt 1,1 °C für ungesättigte Bedingungen und 0,9 °C für gesättigte Bedingungen. Dies weist darauf hin, dass die Temperatur unter ungesättigten Bedingungen tendenziell eine größere Variation aufweist als unter gesättigten Bedingungen.

Die Standardabweichung, die die Streuung der Daten um den Mittelwert angibt, beträgt 0,22734 °C für ungesättigte Bedingungen und 0,22956 °C für gesättigte Bedingungen. Dies zeigt, dass die Temperaturwerte in beiden Bedingungen eine ähnliche Streuung aufweisen. Das Minimum und Maximum repräsentieren die niedrigsten und höchsten gemessenen Temperaturen. Unter ungesättigten Bedingungen liegt das Minimum bei 19,5 °C und das Maximum bei 20,6 °C, während es unter gesättigten Bedingungen 19,5 °C bzw. 20,4 °C beträgt. Der Standardfehler des Mittelwerts, der die Genauigkeit des berechneten Mittelwerts angibt, beträgt 0,05083 für ungesättigte Bedingungen und 0,05133 für gesättigte Bedingungen.

Im Durchschnitt zeigt das Kletterphilodendron unter ungesättigten Bedingungen eine höhere Temperatur im Vergleich zu den gesättigten Bedingungen. Das deutet auf eine potenzielle Einflussnahme der Wasserversorgung auf die Temperatur hin. Die Temperatur weist in ungesättigter Umgebung eine größere Variation auf, während sie in gesättigter Umgebung stabiler ist. Die vorliegende Studie liefert wichtige Einblicke in die Temperaturunterschiede zwischen verschiedenen Gruppen des Kletterphilodendrons. Durch die Durchführung von t-Tests konnten signifikante Ergebnisse erzielt werden, die auf den Einfluss der Wassersättigung auf die Temperatur der Pflanzen hinweisen. Ein auffälliger Unterschied in der Temperatur zeigte sich zwischen den Pflanzen in Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) mit einem bemerkenswerten p-Wert von 0,001140677. Dies legt nahe, dass die Wassersättigung einen bedeutsamen Einfluss auf die Temperatursprägung des Kletterphilodendrons hat, wobei die gesättigten Pflanzen eine höhere Temperatur aufweisen. Ebenso zeigte der Vergleich zwischen

den Pflanzen in Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) signifikante Unterschiede mit einem p-Wert von 0,010390982. Dies unterstützt die Annahme, dass die Wassersättigung die Temperatur der Pflanzen maßgeblich beeinflusst. Weitere signifikante Unterschiede wurden zwischen den Pflanzen in Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) festgestellt, wobei der p-Wert 6,05161E-05 betrug. Dies verdeutlicht den Zusammenhang zwischen der Wassersättigung und der Temperatur des Kletterphilodendrons.

Interessanterweise ergab sich auch ein signifikanter Unterschied zwischen den Pflanzen in Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) mit einem p-Wert von 0,000835584. Dies zeigt, dass die Wassersättigung einen nachweisbaren Einfluss auf die Temperatursausprägung der Pflanzen hat. Hingegen ergab der Vergleich zwischen den Pflanzen in Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Temperatur, da der p-Wert 0,644628292 beträgt. Dies deutet darauf hin, dass die Wassersättigung allein möglicherweise nicht ausreicht, um die Temperatur des Kletterphilodendrons wesentlich zu beeinflussen. Die Ergebnisse dieser Studie liefern wertvolle Informationen über den Einfluss der Wassersättigung auf die Temperatur des Kletterphilodendrons. Die Feststellung, dass gesättigte Pflanzen tendenziell höhere Temperaturen aufweisen, trägt zum Verständnis der physiologischen Anpassungen dieser Pflanzenart bei verschiedenen Wasserversorgungsbedingungen bei.

4.2.3 Einblatt

Tab. 4.8: Statistische Werte von Einblatt

	ungesättigt	gestättigt
Mittelwert	20,1 °C	19,45 °C
Median	20,2 °C	19,5 °C
Mode	20,2	19,6
Bereich	1,0	1,1
St.Abweichung	0,27620	0,24790
MIN	19,6 °C	19,1 °C
MAX	20,6 °C	20,2 °C
SEM	0,06176	0,05543

Insgesamt zeigen die statistischen Werte der Tabelle 4.8, dass das Einblatt unter ungesättigten Bedingungen eine durchschnittlich höhere Temperatur von 20,1 °C aufweist, verglichen mit 19,45 °C unter gesättigten Bedingungen. Der Median bestätigt diese Tendenz mit 20,2 °C unter ungesättigten Bedingungen und 19,5 °C unter gesättigten Bedingungen. Die am häufigsten auftretenden Werte, dargestellt durch den Modus, sind 20,2 °C für ungesättigte Bedingungen und 19,6 °C für gesättigte Bedingungen. Dies deutet darauf hin, dass 20,2 °C bei ungesättigten Bedingungen am häufigsten beobachtet wird, während es bei gesättigten Bedingungen 19,6 °C ist.

Der Bereich der Temperatur, der die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Wert angibt, beträgt $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ für ungesättigte Bedingungen und $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ für gesättigte Bedingungen. Dies zeigt, dass die Temperaturwerte des Einblatts unter beiden Bedingungen eine ähnliche Variabilität aufweisen. Die Standardabweichung gibt an, wie stark die Temperaturwerte um den Mittelwert streuen. Sie beträgt $0,27620\text{ }^{\circ}\text{C}$ für ungesättigte Bedingungen und $0,24790\text{ }^{\circ}\text{C}$ für gesättigte Bedingungen. Damit weisen die Temperaturwerte unter gesättigten Bedingungen eine etwas geringere Streuung auf als unter ungesättigten Bedingungen.

Das Einblatt erreicht unter ungesättigten Bedingungen eine minimale Temperatur von $19,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine maximale Temperatur von $20,6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Unter gesättigten Bedingungen liegen die entsprechenden Werte bei $19,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $20,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Standardfehler des Mittelwerts, der die Genauigkeit der Schätzung des Durchschnitts angibt, beträgt $0,06176$ für ungesättigte Bedingungen und $0,05543$ für gesättigte Bedingungen. Ein niedrigerer Standardfehler deutet auf eine präzisere Schätzung des Mittelwerts hin. Die statistischen Werte der Tabelle 4.8 zeigen somit, dass das Einblatt unterschiedliche Temperaturen unter ungesättigten und gesättigten Bedingungen aufweist, wobei es unter ungesättigten Bedingungen tendenziell wärmer ist.

Die Ergebnisse der durchgeführten t-Tests zeigen signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Gruppen. Es konnte ein äußerst niedriger p-Wert von $3,31587\text{E-}09$ zwischen den Pflanzen der Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) festgestellt werden, was auf einen statistisch signifikanten Temperaturunterschied hinweist. Ebenso wurde ein signifikanter p-Wert von $4,22244\text{E-}09$ zwischen den Pflanzen der Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) ermittelt. Dies bestätigt ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied in der Temperatur zwischen diesen beiden Gruppen. Die Vergleiche zwischen den Pflanzen der Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) ergaben einen weiteren signifikanten p-Wert von $1,38395\text{E-}08$. Dies unterstreicht die statistisch signifikante Differenz in der Temperatur zwischen den beiden Gruppen. In ähnlicher Weise zeigt der t-Test zwischen den Pflanzen der Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) ein signifikantes Ergebnis mit einem p-Wert von $1,87604\text{E-}08$. Dies verdeutlicht erneut den statistisch signifikanten Unterschied in der Temperatur zwischen den beiden Gruppen.

Interessanterweise ergab der t-Test zwischen den Pflanzen der Gruppe 1 (nicht gesättigt mit Wasser) und Gruppe 2 (nicht gesättigt mit Wasser) keinen signifikanten Unterschied in der Temperatur, da der p-Wert von $0,786372391$ höher ist als das übliche Signifikanzniveau von $0,05$. Somit gibt es keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Temperaturen dieser beiden Gruppen. Ebenso zeigte der t-Test zwischen den Pflanzen der Gruppe 3 (gesättigt mit Wasser) und Gruppe 4 (gesättigt mit Wasser) keinen signifikanten Unterschied in der Temperatur, da der p-Wert von $0,672273755$ höher ist als das festgelegte Signifikanzniveau. Dies deutet darauf hin, dass die Temperatur zwischen diesen beiden Gruppen nicht statistisch signifikant variiert.

Zusammenfassend legen die Ergebnisse des t-Tests nahe, dass es signifikante Unterschiede in der Temperatur zwischen den Pflanzen gibt, je nachdem, ob sie mit Wasser gesättigt sind oder nicht. Die Unterschiede zwischen den nicht gesättigten Pflanzen (Gruppe 1) und den gesättigten Pflanzen (Gruppe 3) sowie zwischen den verschiedenen Kombinationen der gesättigten und nicht gesättigten Pflanzen sind statistisch signifikant. Dies weist darauf hin, dass die Wassersättigung einen messbaren Einfluss auf die Temperatur der Einblatt hat.

Die Analyse der Ergebnisse in Kapitel 4 konzentriert sich auf die Auswirkungen von Wassermangel auf die Temperatur von Zimmerpflanzen in vertikalen Anbaustrukturen. Hierbei zeigt sich, dass unzureichende Bewässerung messbare Temperaturunterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen hervorruft. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Wasserversorgung eine entscheidende Rolle bei der Regulation der Blatttemperatur spielt. Es ist besonders interessant zu beobachten, dass verschiedene Pflanzenarten unterschiedlich auf Wassermangel reagieren. Während Grönlilie und Einblatt Anzeichen von Stress aufweisen und leichte Temperaturerhöhungen zeigen, weist der Kletterphilodendron eine geringere Temperaturdifferenz zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen auf. Dies legt nahe, dass der Kletterphilodendron möglicherweise besser an Trockenheit angepasst ist und eine höhere Toleranz gegenüber Wassermangel aufweist. Die festgestellten Temperaturunterschiede könnten jedoch insgesamt moderate Auswirkungen auf das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen haben. Im nachfolgenden Kapitel 5 werden diese Ergebnisse detaillierter diskutiert, um ihre Implikationen für das Pflanzenwachstum und die Anpassungsfähigkeit an Trockenheit zu beleuchten.

Kapitel 5

Diskussion

Die vorliegende Studie untersucht die Auswirkungen von Wassermangel auf die Temperatur von Pflanzen, insbesondere anhand von Untersuchungen an Zimmerpflanzen in vertikalen Anbaustrukturen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine unzureichende Bewässerung zu messbaren Temperaturdifferenzen zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen führt. Dies deutet darauf hin, dass eine ausreichende Wasserversorgung eine entscheidende Rolle bei der Regulierung der Blatttemperatur von Pflanzen spielt. Interessanterweise zeigen die Ergebnisse auch, dass verschiedene Pflanzenarten unterschiedlich auf Wassermangel reagieren. Die Grүнlilie und das Einblatt zeigen klare Anzeichen von Stress und weisen leicht erhöhte Temperaturen auf, während der Kletterphilodendron eine geringere Temperaturdifferenz zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen aufweist. Dies lässt vermuten, dass der Kletterphilodendron möglicherweise besser an Trockenheit angepasst ist und eine höhere Toleranz gegenüber Wassermangel aufweist.

Die vorgestellte Studie von Gräf et al. [18] ist von besonderer Bedeutung, da sie sich auf Zimmerpflanzen konzentriert und deren Blatttemperaturen unter Wassermangelbedingungen untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass wasser-gestresste Pflanzen nicht in der Lage sind, ihre Blattoberflächentemperatur durch Kühlung zu regulieren, was darauf hindeutet, dass Wassermangel die temperaturregulierenden Mechanismen in den Pflanzen beeinträchtigt. Graf et.al. [18] wurden Geranium, Bergenia, Heuchera und Brunnera-Pflanzen vor und nach einer Dürreperiode untersucht. Dabei zeigten sich signifikante Temperaturunterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen während des Dürrezeitraums. Besonders bei Geranium, Bergenia und Heuchera waren die Temperaturunterschiede ausgeprägt. Zehn Tage nach der letzten Bewässerung erreichten die maximalen Temperaturunterschiede 2,2 Grad Celsius bei Geranium, 2,0 Grad Celsius bei Bergenia und 3,1 Grad Celsius bei Heuchera. Die höchsten Temperaturunterschiede, bevor die Pflanzen welkten, betrugen 6,7 Grad Celsius für Geranium, 5,7 Grad Celsius für Bergenia und 6,5 Grad Celsius für Heuchera. Ein bemerkenswerter Aspekt ist die stärkere Reaktion auf Wassermangel, insbesondere bei Geranium, Bergenia und Heuchera, im Vergleich zur vorliegenden Studie mit Grүнlilien, Kletterphilodendron und Einblatt. Dies könnte auf Unterschiede in der Anfälligkeit verschiedener Pflanzenarten für Wassermangel hinweisen. Während die vorliegende Studie eine stetige Temperaturerhöhung ohne auffällige Abweichungen zeigte, deutete die Untersuchungen von Graf et al. [18] darauf hin, dass die Pflanzen empfindlicher auf Wassermangel reagierten und ihre Temperaturen signifikant anstiegen. Dies legt nahe, dass verschiedene Pflanzenarten unterschiedliche Strategien zur Bewältigung von Wassermangel entwickeln können.

Die Untersuchungen von Zia et al. [49] zielen darauf ab, die Infrarot-Thermografie als eine wirksame Methode zur Beurteilung des Wasserstatus von Pflanzen zu validieren. Diese Methode ermöglicht es, die Temperatur genau und nicht-invasiv zu messen, um den Stresszustand von Pflanzen zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Untersuchung tragen zur wachsenden Evidenz bei, die besagt, dass die Infrarot-Thermografie ein wertvolles Werkzeug zur Beurteilung des Wasserstatus von Pflanzen darstellt und somit dazu beitragen kann, Stressbedingungen zu identifizieren. Untersuchungen von Zia et al. [49] führten Experimente mit Maispflanzen (Genotypen Amadeo und Sileno) durch, wobei die Tagestemperaturen etwa 25°C betragen und die Nachttemperaturen etwa 17°C betragen. Die gemessenen Werte für die Blattoberflächentemperatur und den Wassergehalt im Boden wurden verwendet, um den Crop Water Stress Index (CWSI) zu berechnen, der als Indikator für den Wasserstatus der Pflanzen diene.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen von Zia et al. [49] zeigen, dass die Infrarot-Thermografie potenziell nützlich sein kann, um den Bewässerungszeitpunkt für Mais zu optimieren. Sie ermöglicht die Untersuchung großer Flächen im Pflanzenbestand und kann direkte Blattmessungen ersetzen, um ein robusteres Signal für den Wasserstatus der Pflanzen zu liefern. Dies ist insbesondere in der Landwirtschaft von Bedeutung, da eine effiziente Bewässerung zur Vermeidung von Stressbedingungen und Ertragsverlusten beitragen kann. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass die Interpretation der Temperaturdaten mithilfe der Infrarot-Thermografie einige Herausforderungen aufwirft, da verschiedene Pflanzenarten unterschiedliche thermische Eigenschaften aufweisen können. In der vorliegenden Studie wurde betont, dass die Temperaturänderungen im Blatt auf andere physiologische Prozesse zurückzuführen sein könnten, was die Interpretation erschwert. Insgesamt zeigen diese Untersuchungen von Zia et al. [49], dass die Infrarot-Thermografie eine vielversprechende Methode zur Überwachung des Wasserstatus von Pflanzen darstellt. Sie bietet Vorteile bei der Untersuchung großer Flächen im Pflanzenbestand und kann zur Bewässerungsplanung beitragen. Dennoch sind weitere Untersuchungen erforderlich, um die Anwendbarkeit dieser Methode unter verschiedenen Umweltbedingungen und bei verschiedenen Pflanzensorten zu validieren.

Die Studie von Stoll et al. [39] präsentiert interessante Einblicke in die Untersuchung von Pflanzentemperaturen unter dem Einfluss von Wassermangel, insbesondere anhand von Weinreben. Die Autoren verwenden Infrarot-Thermografie, um Temperaturdaten zu sammeln, und bieten damit eine differenzierte Methode zur Analyse der Temperaturverteilung in verschiedenen Teilen der Reben. Ein herausragendes Merkmal dieser Untersuchungen von Stoll et al. [39] ist die Verwendung von Infrarot-Thermografie, die es ermöglicht, genaue Temperaturdaten aus verschiedenen Teilen der Weinreben zu erhalten. Dies steht im Gegensatz zur Verwendung herkömmlicher Infrarot-Thermometer, die möglicherweise Temperaturen von umgebenden Flächen wie Boden oder Himmel erfassen, was zu ungenauen Ergebnissen führen kann. Dank der präzisen Auswahl von Blättern innerhalb des Reben-Canopys und der Verwendung von Referenzflächen gelingt es den Forschern, externe Flächen auszuschließen und die tatsächliche Temperatur der Weinreben genauer zu erfassen.

Ein bedeutsamer Befund der Untersuchungen von Stoll et al. [39] besteht darin, dass Wassermangel in signifikanten Temperaturunterschieden innerhalb der Weinreben resultiert. Dies unterstreicht die entscheidende Rolle der Wasserversorgung bei der Regulation der Blatttemperatur von Pflanzen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass unzureichende Bewässerung zu Temperaturerhöhungen führt, die wiederum erhebliche Auswirkungen auf die Gesundheit der Pflanzen und die Qualität der Ernte haben können. Diese Untersuchungen von Stoll et al. [39] heben auch hervor, dass verschiedene Rebsorten unterschiedlich auf Wassermangel reagieren. Dies ist von Bedeutung, da es aufzeigt, dass bestimmte Sorten möglicherweise besser für Trockenheit geeignet sind und eine höhere Toleranz gegenüber Wassermangel aufweisen. Dieses Erkenntnis kann für Weinbauern wertvoll sein, da sie bei der Auswahl der am besten geeigneten Rebsorten für bestimmte Anbauflächen helfen kann. Stoll und Jones betonen in ihrer Arbeit [39] die Bedeutung der Wärmebildgebung zur Überwachung von Pflanzenstress. Diese Methode ermöglicht es, Veränderungen in der Blatttemperatur genau zu erfassen und somit Rückschlüsse auf den Stresszustand der Pflanzen zu ziehen. Die Ergebnisse ihrer Studie unterstützen die Schlussfolgerungen der vorliegenden Untersuchung und betonen die Bedeutung einer präzisen Temperaturmessung für das Verständnis der Auswirkungen von Wassermangel auf Pflanzen.

Im Bereich der thermografischen Untersuchungen ergaben sich interessante Erkenntnisse in der Studie von Vieria et al. [43]. Die Untersuchung konzentrierte sich auf die Auswirkungen von Bewässerungstiefen auf die Canopy-Temperatur von 'Ruby Red' Grapefruits und 'Valencia' Sweet Oranges. Es wurde festgestellt, dass die Canopy-Temperatur bei einer Erhöhung der Bewässerungstiefe in Bezug auf die ET_c für beide Arten abnahm. Dabei zeigte sich, dass das Modell für Grapefruits eher einem Polynom und für Sweet Oranges eher einer linearen Funktion entsprach. Die beiden Arten wiesen unterschiedliche Verhaltensweisen auf. Eine interessante Beobachtung war, dass bei Grapefruits in der ersten Messung keine ähnliche Tendenz wie bei Sweet Oranges beobachtet wurde. Die Pflanzen, die ausreichend bewässert wurden, um die Bodenfeuchtigkeit nahe am Feldkapazität zu halten, zeigten Temperaturen, die der Lufttemperatur nahekamen. Die höchsten Temperaturunterschiede (bis zu 6 °C höher als die Lufttemperatur) wurden in der letzten Messung für beide Arten festgestellt.

Die Untersuchung von Vieria et al. [43] ergab eine gute Beziehung zwischen der Canopy-Temperatur und der physiologischen Reaktion der Pflanzen auf unterschiedliche Bewässerungsniveaus. Pflanzen, die weniger Wasser erhielten und Wassereinschränkungen unterlagen, zeigten höhere Canopy-Temperaturen im Vergleich zur Luft für 'Ruby Red' Grapefruits und 'Valencia' Sweet Oranges. Die thermografischen Bilder ermöglichten eine schnelle Identifizierung von Pflanzen mit Wassermangel. Die Ergebnisse der Untersuchungen von Vieria et al. [43] tragen dazu bei, ein Verfahren zur schnellen Messung der Canopy-Temperatur von einjährigen Pflanzen mit einer handgeführten Wärmebildkamera zu entwickeln und zu testen. Dieses Verfahren könnte dazu beitragen, den Wasserstatus von Zitruspflanzen zu bewerten, sowohl in Gewächshäusern als auch möglicherweise in kommerziellen Betrieben mit ausgewachsenen Bäumen im Freiland.

In Bezug auf alle erwähnten Studien, bestätigen diese Ergebnisse die Bedeutung der Canopy-Temperatur als Indikator für den Wasserstatus von Pflanzen. Die thermografische Technik ermöglicht es, den Zeitpunkt von Wassermangel zu identifizieren, was für die Bewässerungsplanung von großer Bedeutung sein kann. Die Automatisierung dieser Methode zur Echtzeitanalyse der thermografischen Bilder und zur Entfernung von Störeinflüssen wie Unkraut im Hintergrund könnte dazu beitragen, diese Technik für den praktischen Einsatz auf größeren Flächen und in kommerziellen Betrieben zu optimieren.

Kapitel 6

Fazit und Ausblick

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen wird klar, dass die Bewässerung einen entscheidenden Faktor für die Temperaturregulierung von Grүнlilien, Kletterphilodendren und Einblatt-Pflanzen darstellt. Gut bewässerte Grүнlilien zeigten über einen Zeitraum von 21 Tagen nur minimale Schwankungen in ihrer Temperatur, während nicht bewässerte Exemplare deutlich höhere Unterschiede aufwiesen. Insbesondere wiesen nicht bewässerte Einblatt-Pflanzen frühzeitig Anzeichen von Temperaturerhöhungen aufgrund von Wassermangel auf, was auf Stress und gesundheitliche Beeinträchtigungen hindeutet.

Interessanterweise zeigen die Ergebnisse, dass das Kletterphilodendron im Vergleich zu anderen Pflanzenarten weniger anfällig für Temperaturveränderungen aufgrund von Wassermangel ist. Dies könnte darauf hindeuten, dass diese Pflanze besser an Trockenheit angepasst ist und daher geringere Temperaturunterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Exemplaren aufweist.

Diese Beobachtungen betonen die essenzielle Bedeutung einer angemessenen Wasserversorgung für Zimmerpflanzen. Die deutlichen Temperaturunterschiede zwischen bewässerten und nicht bewässerten Pflanzen verdeutlichen die Auswirkungen von Wassermangel auf ihre Gesundheit und verdeutlichen die Notwendigkeit einer sorgfältigen Bewässerung für ihre Lebensfähigkeit und Anpassungsfähigkeit. Die Schlüsselerkenntnisse dieser Studie zeigen sich in:

- **Wassermangel und die Pflanzentemperatur:** Ein zentrales Ergebnis, das sich aus der vorliegenden Studie ergibt, ist die enge Beziehung zwischen Wassermangel und den Temperaturveränderungen in Pflanzen, insbesondere in ihren Blättern. Wassermangel führt zu signifikanten Temperaturunterschieden und beeinflusst damit direkt die thermische Dynamik von Pflanzen.
- **Differenzierte Reaktionen:** Diese Studie verdeutlicht auch, dass verschiedene Pflanzenarten unterschiedlich auf Wassermangel reagieren. Während einige Pflanzen deutliche Anzeichen von Stress zeigen und ihre Blätter erhöhte Temperaturen aufweisen, scheinen andere Arten eine höhere Toleranz gegenüber Trockenheit zu haben und weniger ausgeprägte Temperaturveränderungen zu zeigen. Diese Vielfalt in den Reaktionen unterstreicht die Notwendigkeit, Pflanzenarten spezifisch zu betrachten.
- **Nutzung von Infrarot-Thermografie:** Die Anwendung von Infrarot-Thermografie und Wärmebildgebung hat sich als äußerst nützlich erwiesen, um Temperaturveränderungen in Pflanzen genau

zu erfassen. Diese Techniken ermöglichen eine präzise Identifizierung von Stressbedingungen in Pflanzen und könnten für die Bewässerungsplanung und das Pflanzenmanagement von großer Bedeutung sein.

Ausblick:

- **Untersuchung verschiedener Pflanzenarten:** Zukünftige Forschungen könnten sich auf eine noch breitere Palette von Pflanzenarten konzentrieren, um deren Reaktionen auf Wassermangel genauer zu verstehen. Dies wäre besonders wichtig, um mögliche Anpassungsmechanismen und genetische Unterschiede zwischen Arten zu erkennen.
- **Verbesserung der thermografischen Methoden:** Die Automation und Echtzeitanalyse von thermografischen Bildern könnte weiterentwickelt werden, um diese Techniken effizienter und praktikabler zu gestalten. Dies würde es ermöglichen, die Überwachung des Wasserstatus von Pflanzen in Echtzeit zu realisieren und somit eine schnellere Reaktion auf Stressbedingungen zu ermöglichen.
- **Anwendung in der Pflanzenwandgestaltung:** Eine vielversprechende Anwendung der gewonnenen Erkenntnisse liegt in der Gestaltung von vertikalen Pflanzenwänden, insbesondere in Innenräumen. Die Optimierung der Bewässerungsplanung und des Pflanzenmanagements in solchen Strukturen könnte nicht nur zur Verbesserung der Raumluftqualität beitragen, sondern auch ästhetische und ökologische Vorteile bieten.
- **Nachhaltige Landwirtschaft:** Die Ergebnisse dieser Studien könnten auch in der landwirtschaftlichen Praxis von großer Bedeutung sein. Eine präzisere Überwachung der Pflanzentemperaturen kann dazu beitragen, Ressourcen wie Wasser und Energie effizienter einzusetzen, was wiederum zur Förderung einer nachhaltigen Landwirtschaft beitragen kann.

Insgesamt verdeutlichen diese Ergebnisse die essenzielle Bedeutung der Bewässerung für die Gesundheit und Anpassungsfähigkeit von Zimmerpflanzen. Durch die enge Beziehung zwischen Wassermangel und den Temperaturschwankungen wird die Relevanz einer angemessenen Bewässerung unterstrichen, wobei die Vielfalt der Pflanzenreaktionen auf Wassermangel besondere Beachtung verdient. Zukünftige Forschungen könnten sich auf eine breitere Palette von Pflanzenarten konzentrieren, um ihre Reaktionen genauer zu verstehen und thermografische Methoden zur Echtzeitüberwachung zu verbessern. Die Anwendung dieser Erkenntnisse in vertikalen Grünnwänden oder in der Landwirtschaft könnte nicht nur die Raumluftqualität verbessern, sondern auch zu ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen führen, indem sie zu einer effizienteren Nutzung von Ressourcen beiträgt.

Tabellenverzeichnis

3.1	Chlorophytum comosum 'Ocean'- Grünlilie [25] [13]	29
3.2	Philodendron scandens - Kletterbaumfreund, Kletterphilodendron [25] [13]	30
3.3	Spathiphyllum wallisii - Kleine Blattfahne, Einblatt [25] [13]	31
3.4	Termine zum Gießen der Pflanzen	35
3.5	Temperaturmessungen am 15.10.2022 um 13 und 20 Uhr	39
4.1	Temperaturmessungen am 14.10.2022 um 13 Uhr	46
4.2	Temperaturmessungen am 01.11.2022 um 13 Uhr	47
4.3	Temperaturmessungen von Grünlilie	50
4.4	Temperaturmessungen von Kletterphilodendron	52
4.5	Temperaturmessungen von Einblatt	53
4.6	Statistische Werte von Grünlilie	55
4.7	Statistische Werte von Kletterphilodendron	57
4.8	Statistische Werte von Einblatt	58

Abbildungsverzeichnis

2.1	Photosynthese [4]	13
2.2	Energiebilanz eines Blattes. Von der einfallenden Globalstrahlung (G) wird ein Teil reflektiert (R), abgestrahlt (IR) und photochemisch genutzt (Ph), während der Rest als Strahlungsbilanz (S) vom Blatt abgegeben werden muss, da es zu leicht ist, um nennenswert Energie zu speichern. Abhängig von der Wasserversorgung erfolgt diese Abgabe entweder durch Verdunstungswärme (Transpiration, Tr) oder konvektive Wärmeabgabe (K) an die Luft. Die Strahlungstransmission (T) ist in der Regel weniger als 1% von S. [24]	15
2.3	Vliessystem [21]	22
2.4	Trogssystem[21]	23
3.1	OC Gebäude [45]	27
3.2	Grünlilie [11]	29
3.3	Kletterphilodendron [32]	30
3.4	Einblatt [5]	31
3.5	Wärmebildkamera-testo 890 [15]	32
3.6	Das verwendete Trogssystem für den Versuch (eigene Fotos)	33
3.7	Anordnung der Pflanzen im Trogssystem (eigene Darstellung)	35
3.8	Das fertiggestellte System (eigenes Foto)	36
3.9	Software IIRSoft (eigenes Foto)	38
3.10	Aufnahmen am 15.10.2022 um 13 (oben) und 20 Uhr (unten) (eigene Fotos)	39
4.1	Aufnahme von Pflanzen mit der Wärmebildkamera am 14.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)	45
4.2	Aufnahme von Pflanzen mit der Wärmebildkamera am 01.11.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)	47
4.3	Grafik der nicht bewässerten Pflanzen (eigene Darstellung)	48
4.4	Grafik der bewässerten Pflanzen (eigene Darstellung)	49
4.5	Grafische Visualisierung der Temperaturschwankungen von Grünlilie (eigene Darstellung)	51
4.6	Grafische Visualisierung der Temperaturschwankungen von Kletterphilodendron (eigene Darstellung)	52
4.7	Grafische Visualisierung der Temperaturschwankungen von Einblatt (eigene Darstellung)	54

Anhang A

Thermografische Messungen der Pflanzen über den gesamten Zeitraum

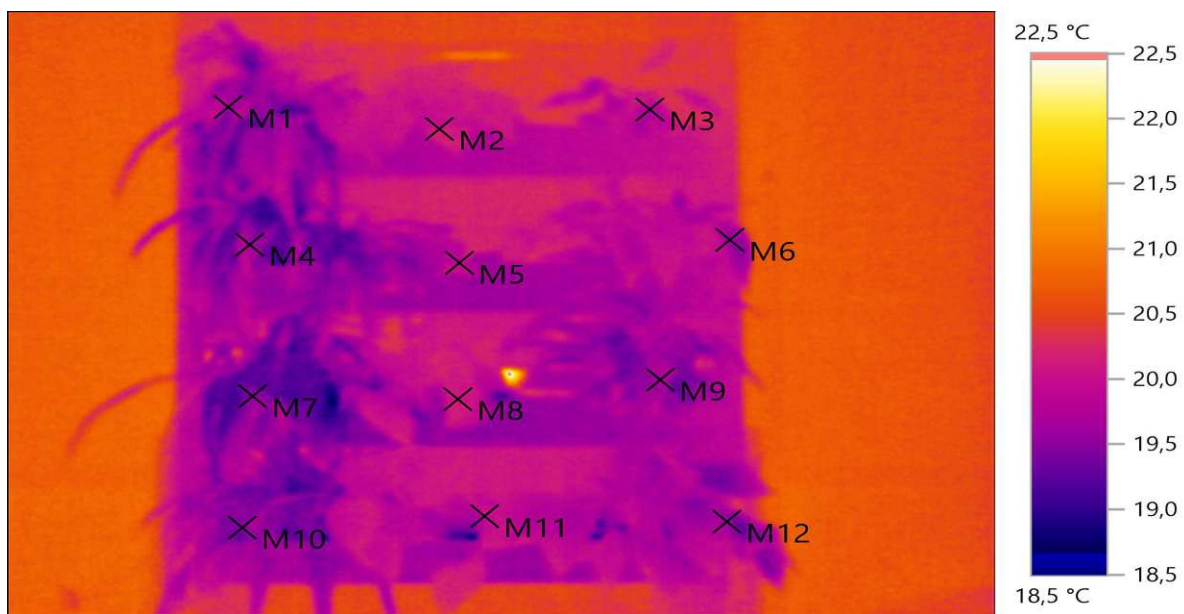


Abb. A.1: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 14.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

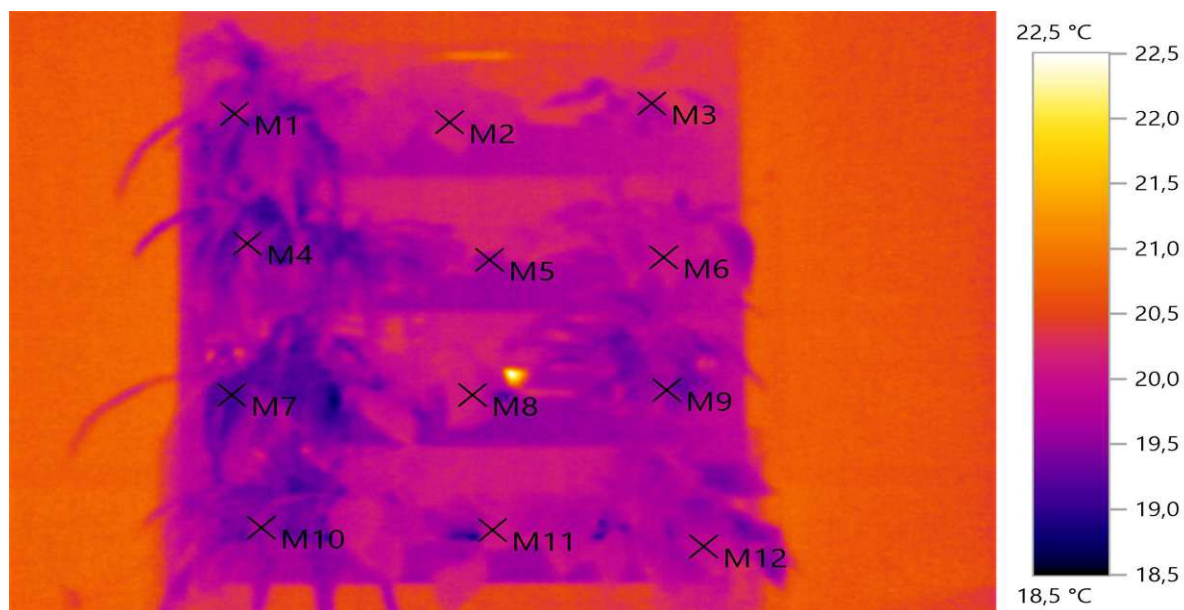


Abb. A.2: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 15.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

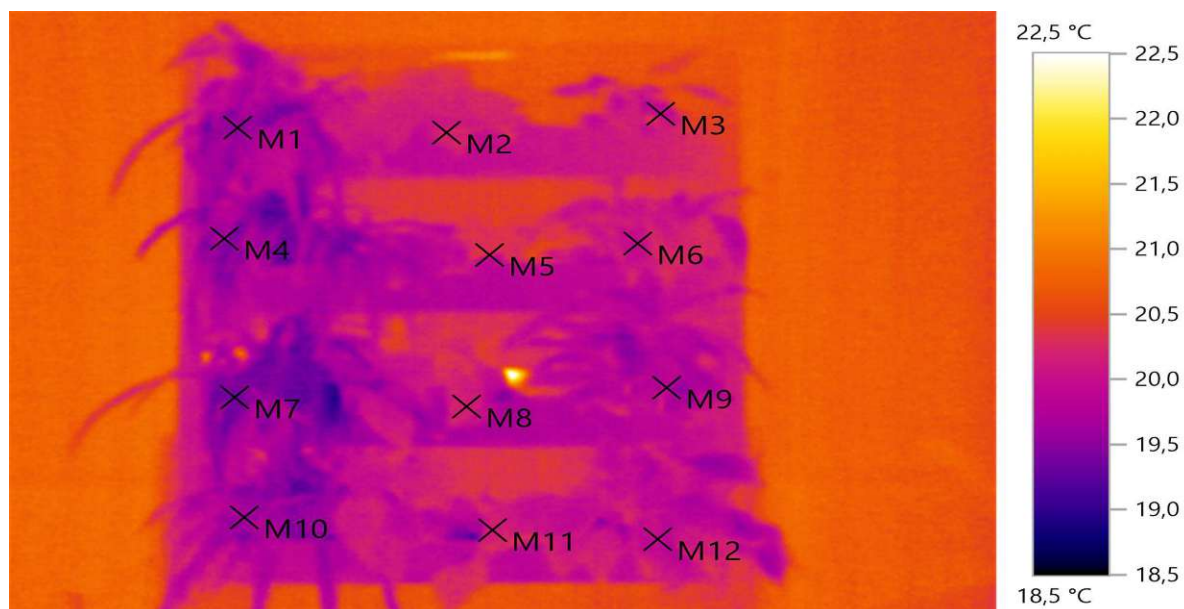


Abb. A.3: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 16.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

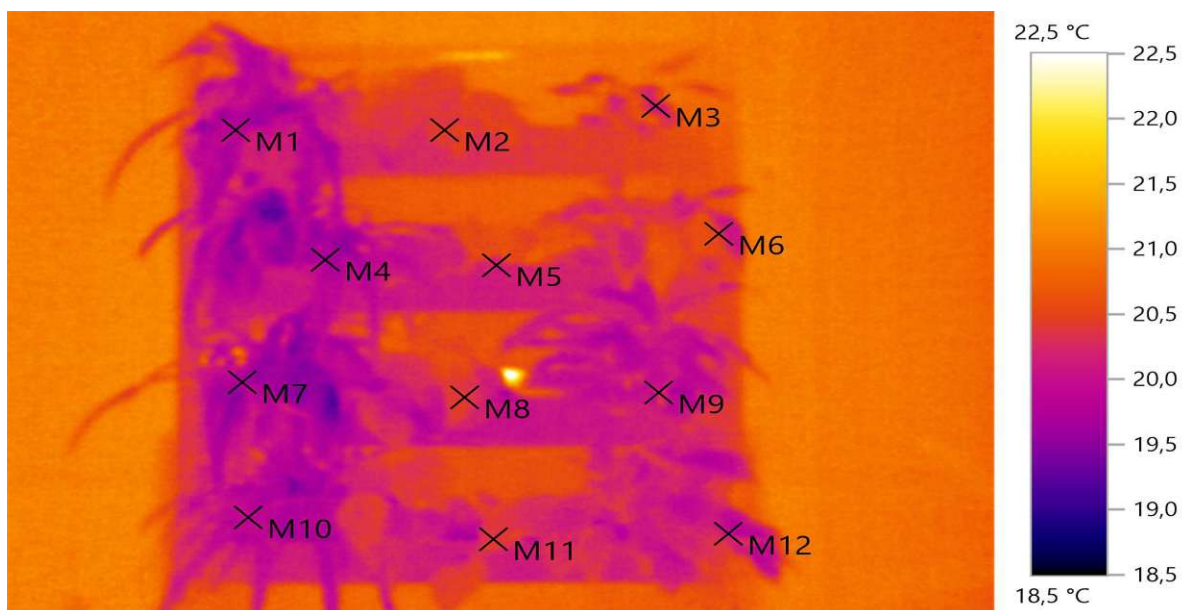


Abb. A.4: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 17.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

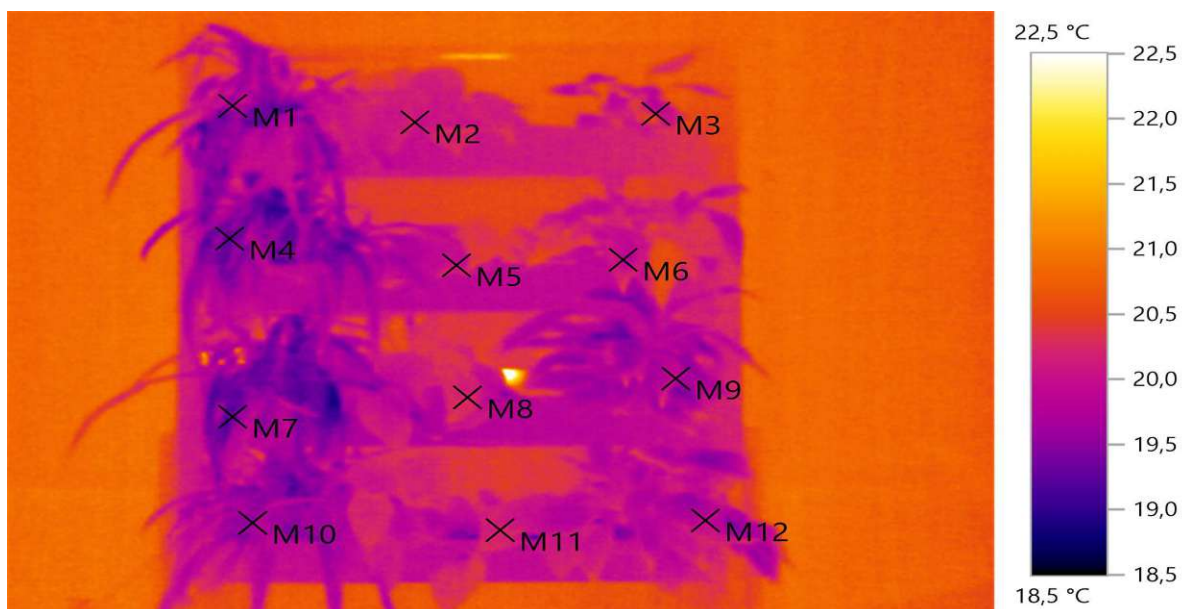


Abb. A.5: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 18.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

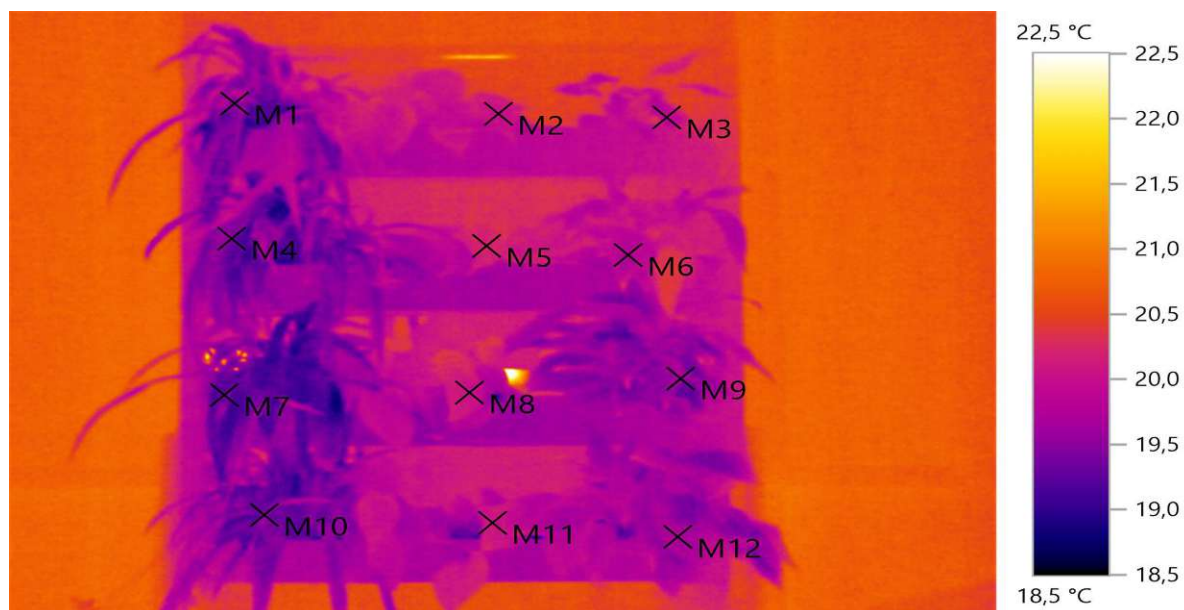


Abb. A.6: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 19.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

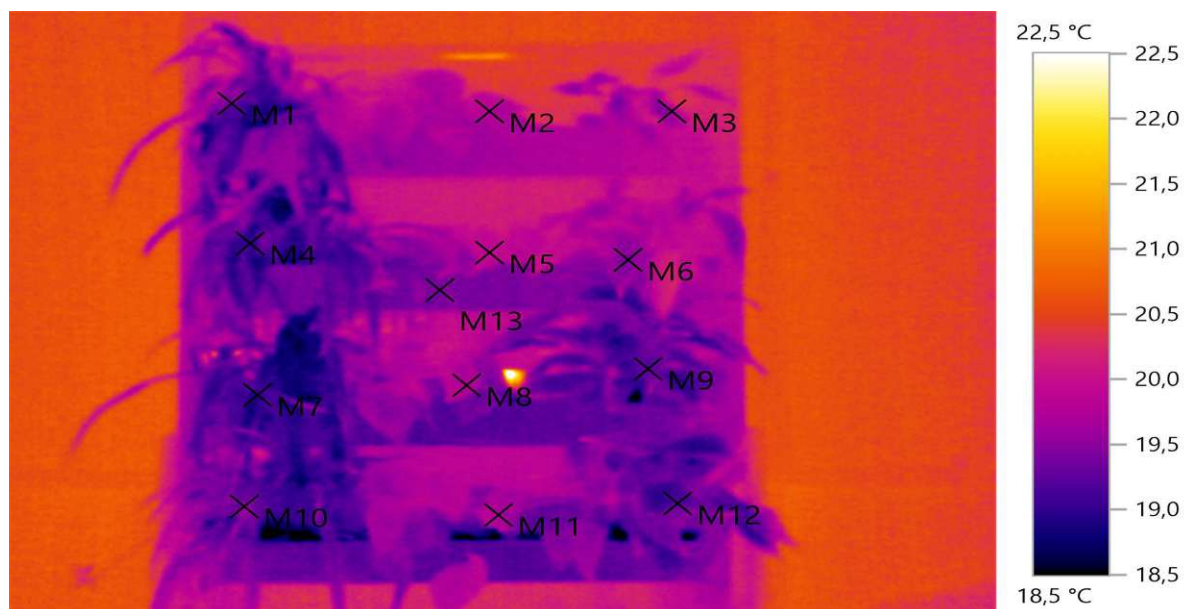


Abb. A.7: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 20.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

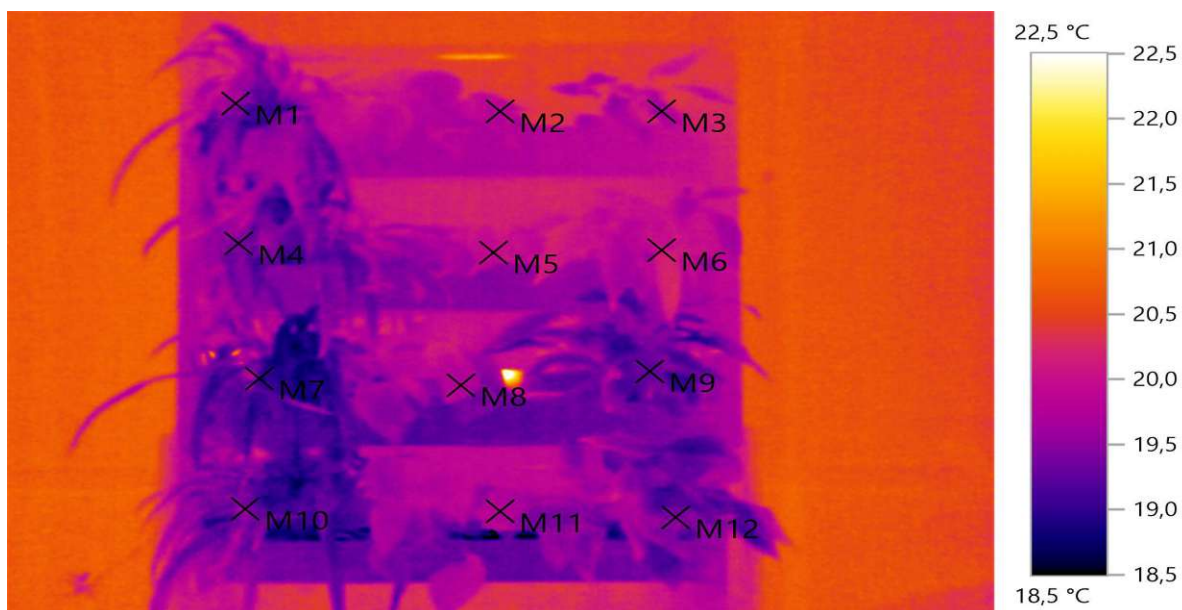


Abb. A.8: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 21.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

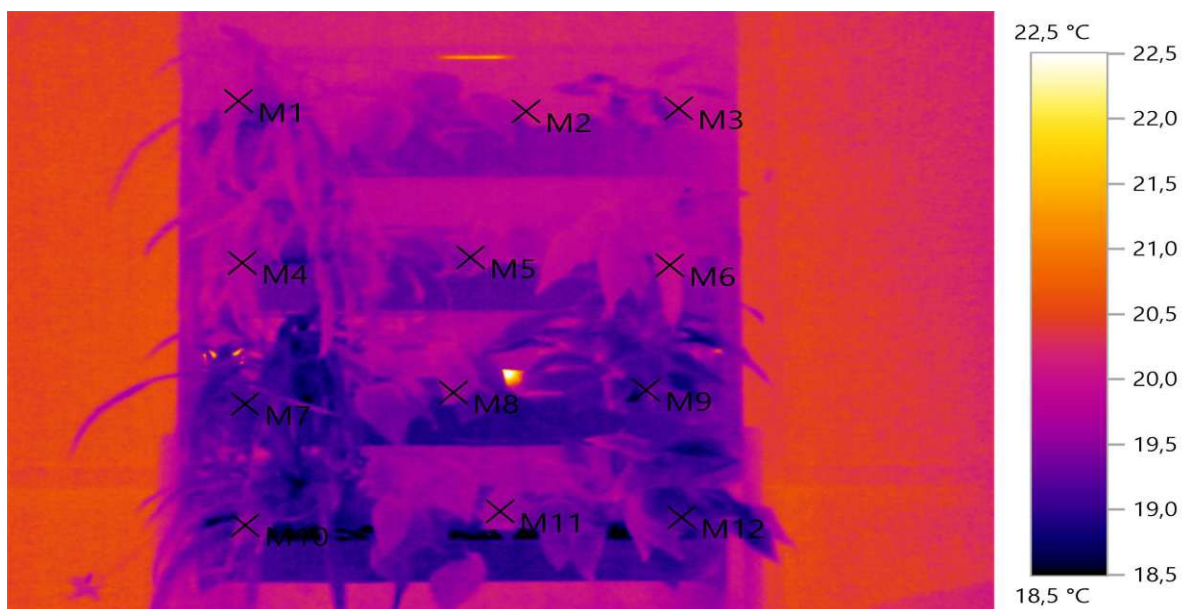


Abb. A.9: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 22.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

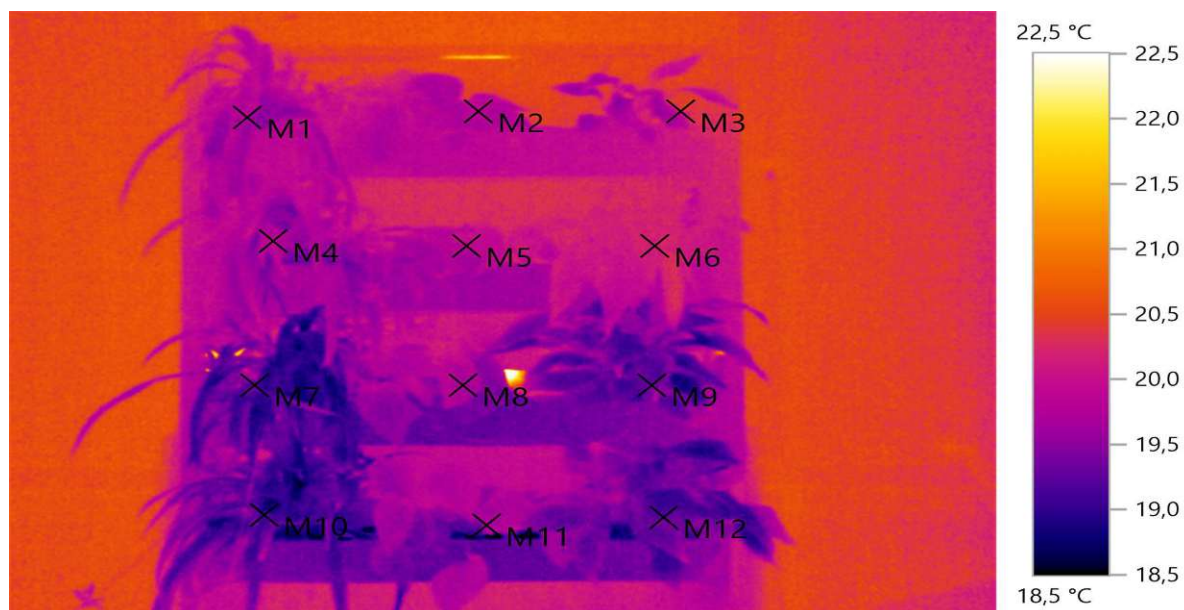


Abb. A.10: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 23.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

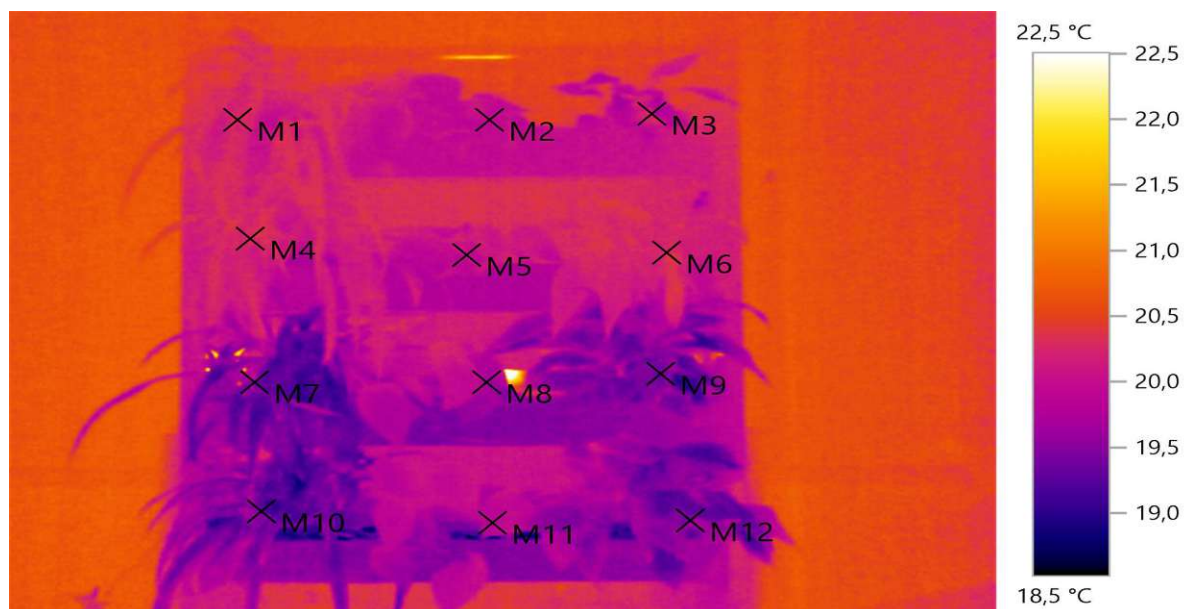


Abb. A.11: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 24.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

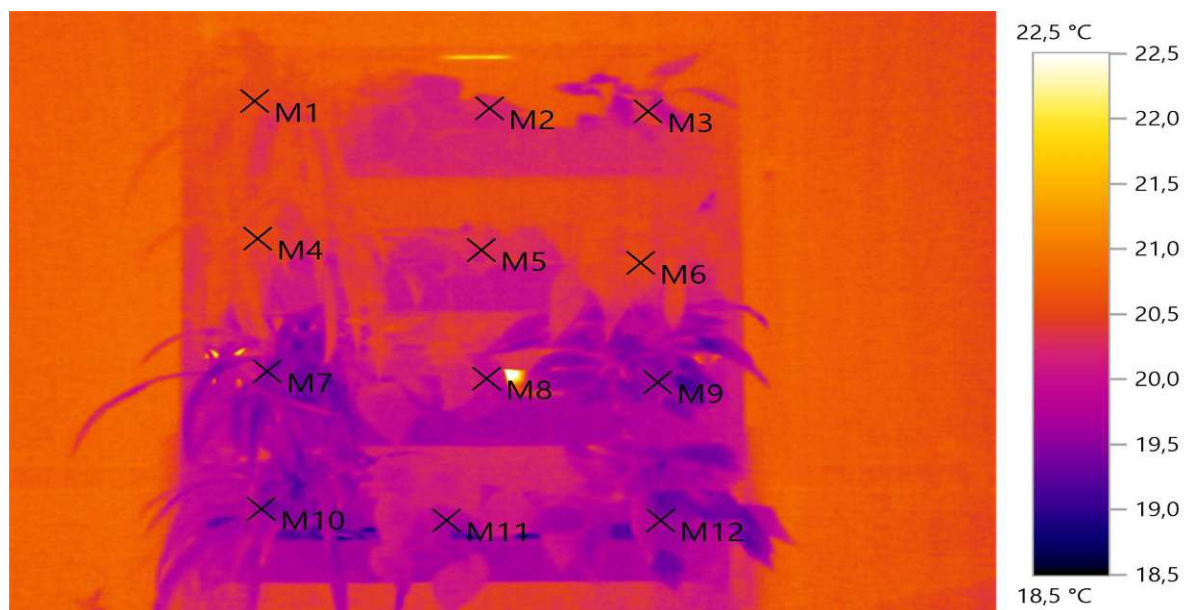


Abb. A.12: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 25.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

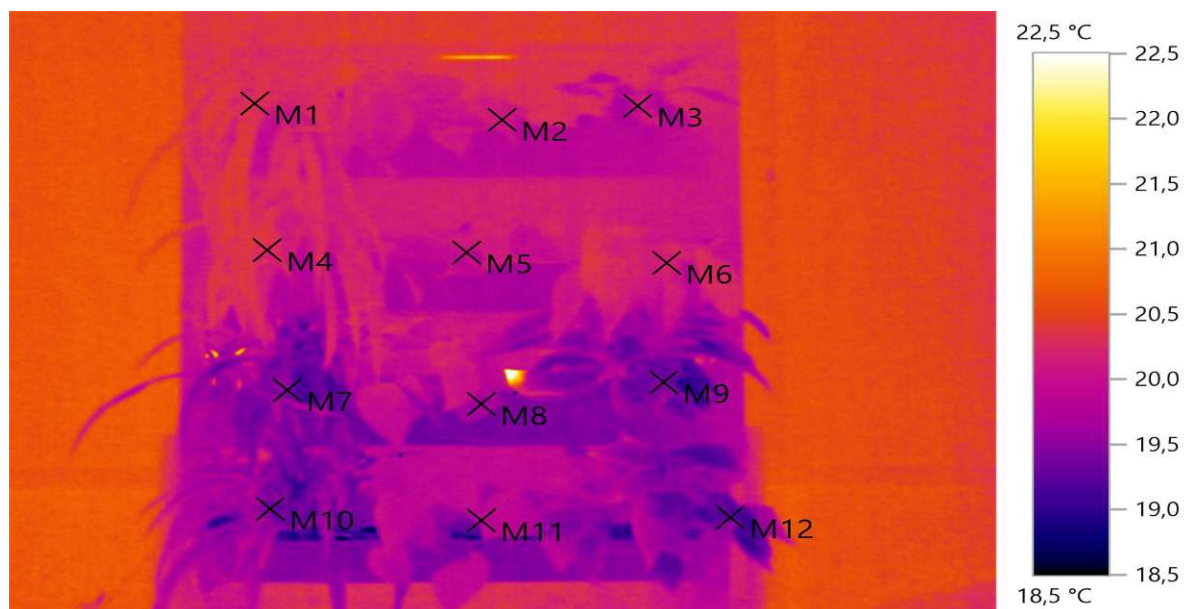


Abb. A.13: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 26.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

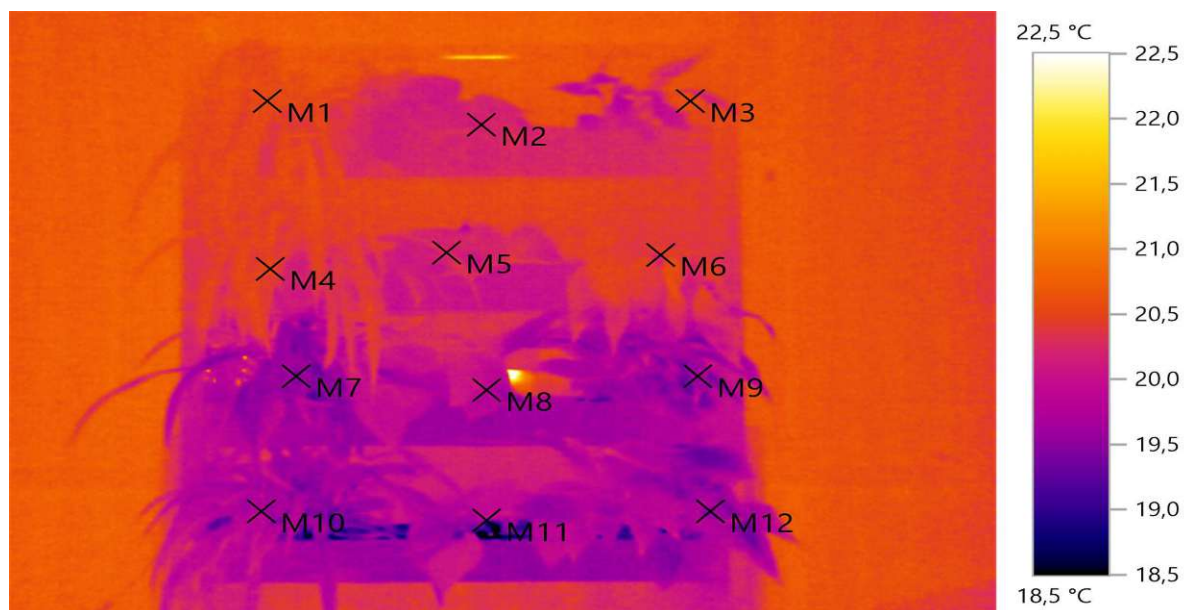


Abb. A.14: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 27.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

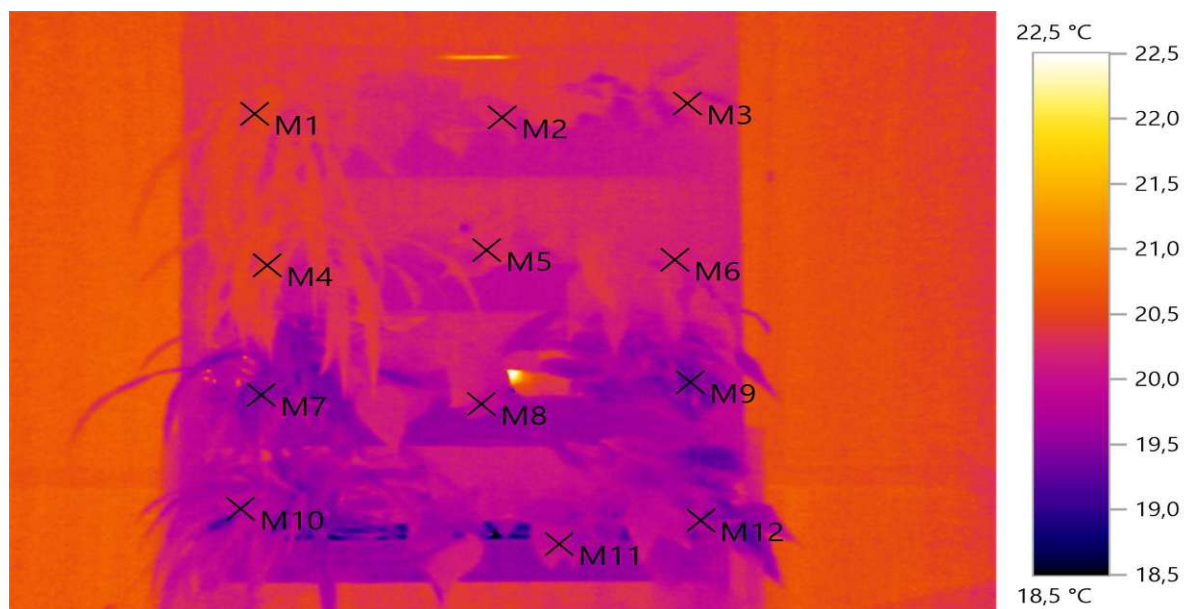


Abb. A.15: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 28.10.2022 um 14 Uhr (eigenes Foto)

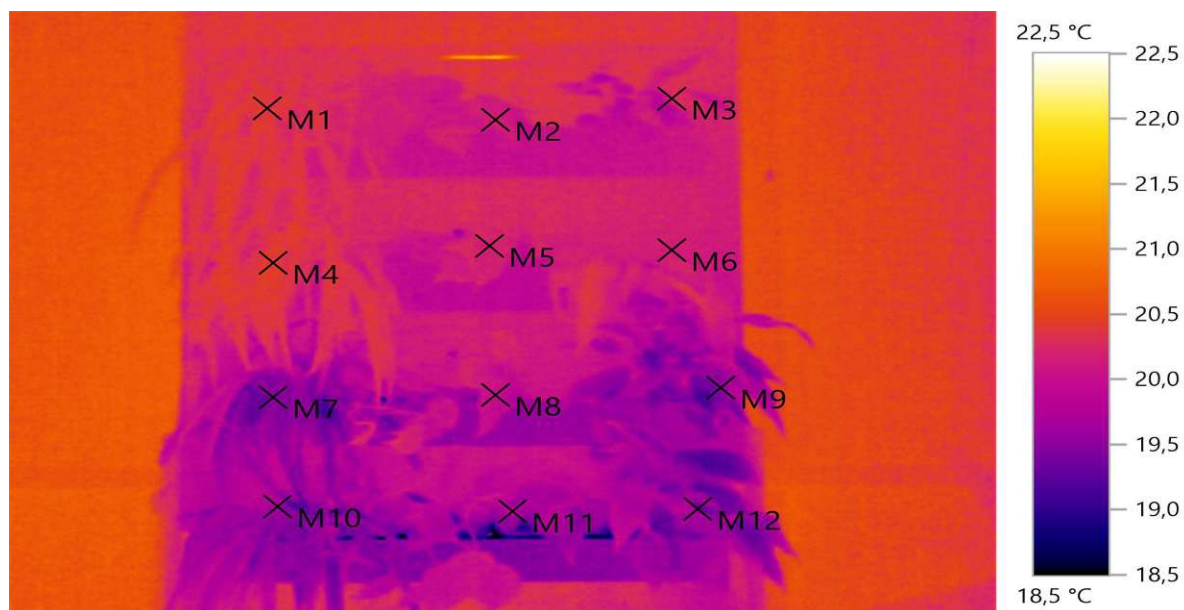


Abb. A.16: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 29.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

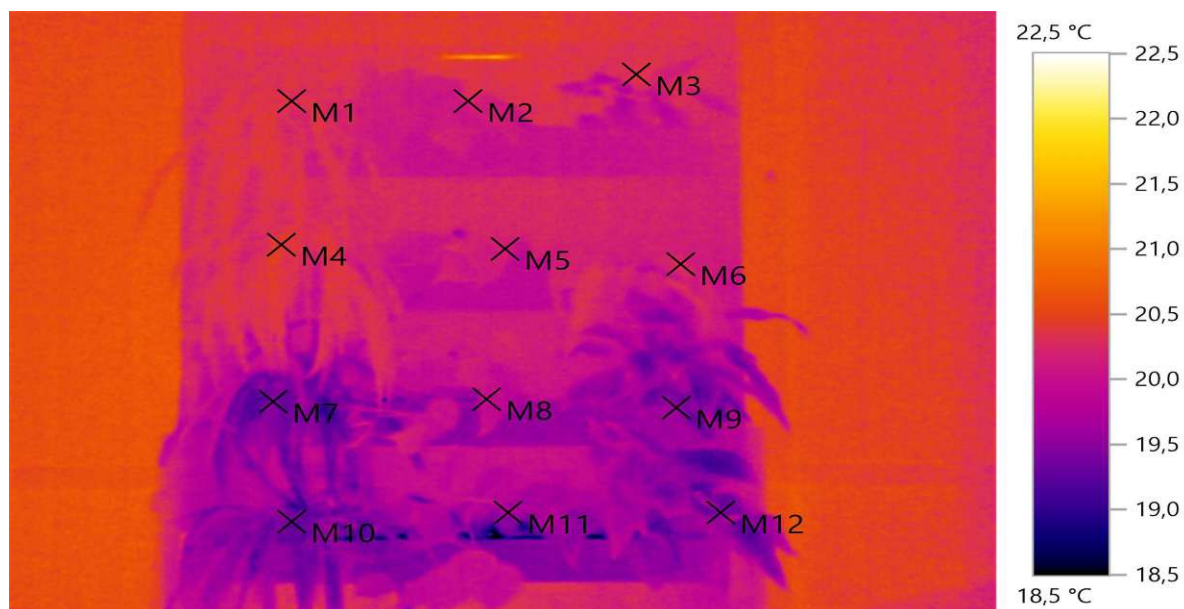


Abb. A.17: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 30.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

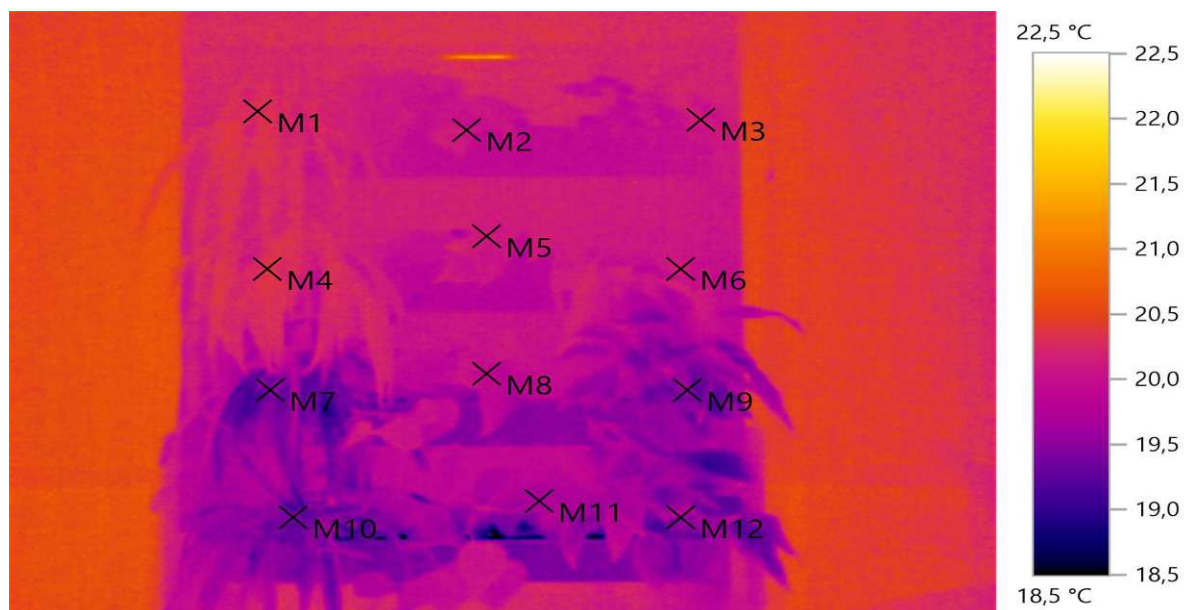


Abb. A.18: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 31.10.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

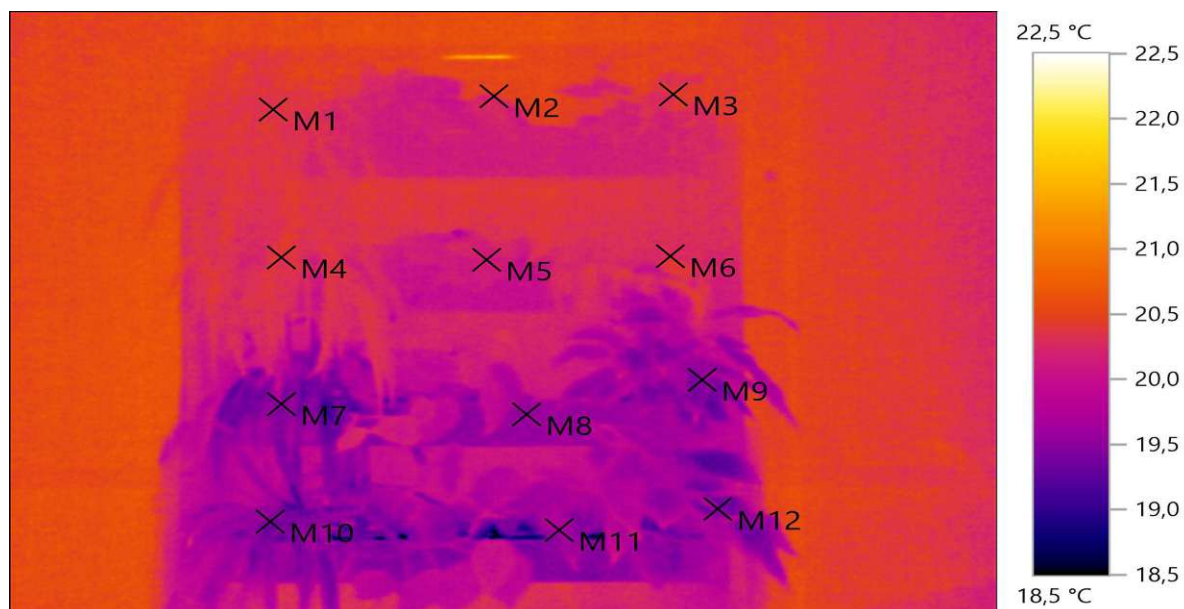


Abb. A.19: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 01.11.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

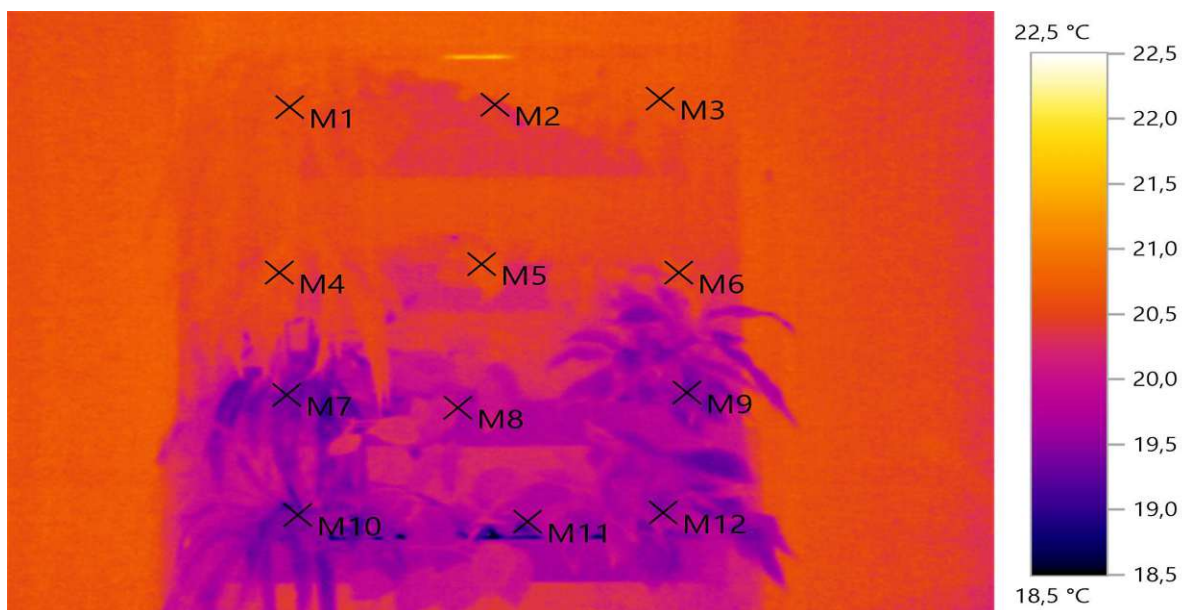


Abb. A.20: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 02.11.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

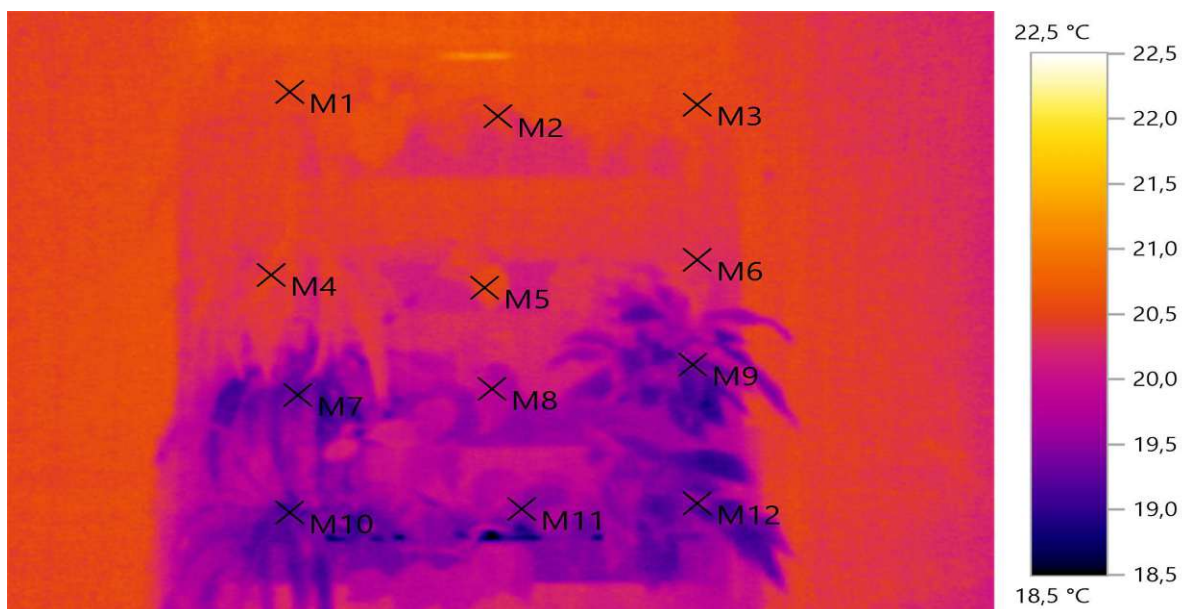


Abb. A.21: Aufnahme von Blättertemperatur mit der Wärmebildkamera am 03.11.2022 um 13 Uhr (eigenes Foto)

Literaturverzeichnis

- [1] A. Ahmed, A. Ibrahim und S. Hussein. „Detection of Palm Tree Pests Using Thermal Imaging: A Review“. In: 801 (2018). DOI: 10.1007/978-3-030-02357-7_12.
- [2] U.-P. D. C. Atzberger, D. M. Gräf, D. D. M. Immitzer MSc, M. Kampen MSc, D. P. Minixhofer, U.-P. D. D. R. Stangl, D. S. Lederbauer, D. V. Enzi, T. Formanek DI Susanne Matic Bsc, D. E. Gruchmann-Bernau, M. T. Heitzlhofer, D. J. Kisser, D. L. Lorenz, M. D. V. Reinberg, A. Wahringer und S. Watzke. *Drohnen und Robotik für effizientes Monitoring und Pflegemanagement von Gebäudebegrünungen*. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), 2020. 86 S.
- [3] M. A. Awad, A. A. Abdullah, T. Y. Bayoumi, K. Abd-Elsalam und A. E. Hassanien. „Early Detection of Powdery Mildew Disease in Wheat (*Triticum aestivum* L.) Using Thermal Imaging Technique“. In: 323 (2015), S. 755–765. DOI: 10.1007/978-3-319-11310-4_66.
- [4] Biomaster. *Photosynthesis – Mechanism, History, Importance*. 2022. URL: <https://biologyt each.com/photosynthesis/> (Zugriff am 29.05.2023).
- [5] Blumenschwend. *Einblatt*. 2018. URL: <https://shop.blumenschwend.ch/zimmerp flanzen/bluehende-pflanzen/einblatt> (Zugriff am 17.11.2022).
- [6] D. d.o.o. *Was ist Datenerfassung?* 2020. URL: <https://dewesoft.com/de/daq/was-ist-datenerfassung#:~:text=Datenerfassung%20ist%20der%20Prozess%20der,ihrer%20Anzeige%2C%20Speicherung%20und%20Analyse.> (Zugriff am 30.01.2023).
- [7] B. O. R. K. Dipl.-Päd. Erich Hnilica. *Grafische Darstellung von Daten*. 2020. URL: <https://www.mathe-lexikon.at/statistik/einfuehrung/grafische-darstellung.html> (Zugriff am 30.01.2023).
- [8] EXOTENGARTEN-KNOWHOW. *Pflanzenphysiologie*. 2022. URL: <https://www.exoteng aertner.de/pflanzenphysiologie/> (Zugriff am 20.03.2023).
- [9] T. Flir. *Emissionsgrad und Reflektierte Temperatur*. 2017. URL: https://flir-de.cu sthelp.com/app/answers/detail/a_id/1609/~emissionsgrad-und-reflektierte-temperatur (Zugriff am 02.02.2023).
- [10] A. Galieni, N. D’Ascenzo, F. Stagnari, G. Pagnani, Q. Xie und M. Pisante. „Past and future of plant stress detection: An overview from remote sensing to positron emission tomography“. In: *Frontiers in Plant Science* 11 (2021), S. 22. DOI: 10.3389/fpls.2020.609155.

- [11] Gesal. *Grünlilie*. 2018. URL: <https://www.gesal.ch/de/ratgeber/pflanzen/zimmerpflanzen/gruenlilie> (Zugriff am 17. 11. 2022).
- [12] O. Glück. *Standardfehler*. 2018. URL: <https://welt-der-bwl.de/Standardfehler> (Zugriff am 14. 02. 2023).
- [13] A. GmbH. *Gartenlexikon.de*. 2014. URL: <https://www.gartenlexikon.de/> (Zugriff am 10. 04. 2022).
- [14] P. D. GmbH. *Universal Pflanzvlies*. 2022. URL: <https://www.pflanzwerk.de/universal-pflanzvlies-120cm-x-200cm> (Zugriff am 20. 08. 2022).
- [15] T. GmbH. *PC Analyse-Software – testo IRSofT*. 2022. URL: <https://www.testo.com/de-AT/produkte/thermography-irsoft> (Zugriff am 03. 10. 2022).
- [16] T. GmbH. *testo 890 - Wärmebildkamera*. 2022. URL: <https://www.testo.com/de-AT/unternehmen/company-legal-imprint> (Zugriff am 03. 10. 2022).
- [17] R. C. Gonzalez und R. E. Woods. *Digital Image Processing*. 4. London: Pearson Education, 2018. ISBN: 10: 1-292-22304-9.
- [18] M. Gräf, M. Immitzer, P. Hietz und R. Stangl. „Water-Stressed Plants Do Not Cool: Leaf Surface Temperature of Living Wall Plants under Drought Stress“. In: (2021). DOI: 10.3390/su13073910.
- [19] S. Gutiérrez, M. P. Diago, J. Fernández-Novales und J. Tardaguila. „Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning“. In: (2018). DOI: 10.1371/journal.pone.0192037.
- [20] A. Hassan, C. Qibing, L. Yinggao, J. Tao, G. Li, M. Jiang, L. Nian, L. Bing-Yang und L. Shiliang. „Do plants affect brainwaves? Effect of indoor plants in work environment on mental stress“. In: (2020). DOI: 10.17660/ejHS.2020/85.4.9.
- [21] J. Hollands. *Begrünte Wände für gesunde Schulen*. 2019. URL: https://www.naturimgarten.at/files/content/4.%20GARTENWISSEN/Nachlese/2019%20Fachtagung%20Gartenp%C3%A4dagogik/Vortrag_Begr%C3%BCnte%20W%C3%A4nde%20f%C3%BCr%20gesunde%20Schulen_Hollands.pdf (Zugriff am 13. 04. 2023).
- [22] L. (Hou, W. Gao, F. van der Bom, Z. (Weng, C. L. Doolette, A. Maksimenko, D. Hausermann, Y. Zheng, C. Tang, E. Lombi und P. M. Kopittke. „Use of X-ray tomography for examining root architecture in soils“. In: *Geoderma* 405 (2022), S. 13. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115405.
- [23] D. M. Jesussek. *Streuungsmaße*. 2021. URL: <https://datatab.de/tutorial/standardabweichung-varianz-spannweite> (Zugriff am 14. 02. 2023).
- [24] J. W. Kadereit, C. Körner, B. Kost und U. Sonnewald. *Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*. 37., Auflage. Berlin: Springer Spektrum, 2014. ISBN: 978-3-642-54434-7.

- [25] A. Korjenic, D. Tudiwer, J. Hollands, H. Fischer, M. Mitterböck, T. Gonaus, T. Salonen, A. Blaha, U. Pitha, O. Weiss, G. Frühwirt, B. Knoll, B. Hofleitner, A. Renkin, R. Dopheide, T. Fischer und B. Kainz. „Grundlagen zu Grünpflege Wartung von Vertikalbegrünungen an Schulen“. In: *Grüne Zukunft Schulen* (2020).
- [26] C. J. Larimer, E. H. Denis, J. D. Suter und J. J. Moran. „Optical coherence tomography imaging of plant root growth in soil“. In: 59 (8) (2020), S. 2474–2481. DOI: 10.1364/AO.384674.
- [27] D. grünr Lexikon Hortipendium. *Einfluss der Düngung auf die Umwelt*. 2013. URL: https://hortipendium.de/Einfluss_der_D%C3%BCngung_auf_die_Umwelt (Zugriff am 29.01.2023).
- [28] M. Linda Regber. *Statistische Auswertung: Anleitung*. 2023. URL: https://lindaregber.com/statistische_auswertung/ (Zugriff am 30.01.2023).
- [29] J. S. D. LLC. *Der t-Test*. 2022. URL: https://www.jmp.com/de_de/statistics-knowledge-portal/t-test.html (Zugriff am 14.02.2023).
- [30] A. Matese, R. Baraldi, A. Berton, S. Cesaraccio C. and Di Gennaro, P. Duce, O. Facini, M. Mameli, A. Piga und A. Zaldei. „Combination of proximal and remote sensing methods for mapping water stress conditions of grapevine“. In: 1197 (2018), S. 69–76. DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1197.9.
- [31] M. Nieuwenhuis, T. Postmes, C. Knight und S. Haslam. „The Relative Benefits of Green Versus Lean Office Space: Three Field Experiments“. In: (2014). DOI: 10.1037/xap0000024.
- [32] Picturethis. *Kletterphilodendron*. 2018. URL: https://www.picturethisai.com/de/wiki/Philodendron_scandens__Micans_.html (Zugriff am 17.11.2022).
- [33] M. Pineda, M. Barón und M.-L. Pérez-Bueno. „Thermal Imaging for Plant Stress Detection and Phenotyping“. In: *Remote Sensing* 13 (2020), S. 21. DOI: 10.3390/rs13010068.
- [34] L. Rojek, K. Hehl, M. Möller Matthias Richter und M. Bischoff-Schaefer. „Strategie für die Entwicklung eines photogrammetrischen Überwachungssystems für eine ressourcenschonende und automatisierte Bewässerung von Nutzpflanzenbeständen im Freiland- und im geschützten Anbau (PLANTSSENS)“. In: 5 (2019), S. 87–99. DOI: 10.14627/537669008..
- [35] M. Roopaei und P. Rad. „Cloud of Things in Smart Agriculture: Intelligent Irrigation Monitoring by Thermal Imaging“. In: 4 (1) (2017), S. 10–15. DOI: 10.1109/MCC.2017.5.
- [36] V. Sapozhnikova, V. Kamenskii und R. Kuranov. „Visualization of Plant Tissues by Optical Coherence Tomography“. In: *Russian Journal of Plant Physiology* 50 (2) (2003), S. 282–286.
- [37] E. Schellenberger. „Optische Bildgebung: Anwendungen“. In: *Zeitschrift für Medizinische Physik* 15 (2005), S. 187–191.
- [38] Schlauer-wohnen.com. *Das beste Bewässerungssystem für Zimmerpflanzen*. 2022. URL: <https://schlauer-wohnen.com/das-beste-bewaesserungssystem-fuer-zimmerpflanzen/> (Zugriff am 09.12.2022).

- [39] M. Stoll und H. G. Jones. „THERMAL IMAGING AS A VIABLE TOOL FOR MONITORING PLANT STRESS“. In: (2007). DOI: 10.20870/oeno-one.2007.41.2.851.
- [40] S. R. Tracy, K. Daly, C. Sturrock, N. Crout, S. J. Mooney und T. Roose. „Three-dimensional quantification of soil hydraulic properties using X-ray Computed Tomography and image-based modeling“. In: 51(2) (2015). DOI: 10.1002/2014WR016020.
- [41] D. Vidal und R. Pitarma. „Infrared Thermography Applied to Tree Health Assessment: A Review“. In: 9 (7) (2019). DOI: 10.3390/agriculture9070156.
- [42] D. Vidal und R. Pitarma. „Infrared Thermography Applied to Tree Health-Assessment: A Review“. In: *Agriculture* 9 (2019), S. 15. DOI: 10.3390/agriculture9070156.
- [43] G. H. S. Vieira und R. S. Ferrarezi. „Use of Thermal Imaging to Assess Water Status in Citrus Plants in Greenhouses“. In: (2021). DOI: 10.3390/horticulturae7080249.
- [44] L. Weber. „Einfluss von vertikaler Innenwand-Begrünung auf das Raumklima und Behaglichkeit in Schulen“. Diplomarbeit. Wien: TU Wien, 2019.
- [45] T. Wien. *Erdbaulabor*. 2000. URL: <https://www.igb.tuwien.ac.at/institut/erdbaulabor/>.
- [46] Wikipedia. *Bilderzeugung*. 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Bilderzeugung> (Zugriff am 22. 03. 2023).
- [47] Wikipedia. *Hydrokultur*. 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hydrokultur> (Zugriff am 12. 12. 2022).
- [48] Wikipedia. *Philodendren*. 2022. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Philodendren> (Zugriff am 17. 02. 2023).
- [49] S. Zia, W. Spreer, J. Müller, K. Spohrer, W. Du und H. Xiongkui. „A STEP TOWARDS PRECISION IRRIGATION: PLANT WATER STATUS DETECTION WITH INFRARED THERMOGRAPHY“. In: (2010). DOI: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj6v9yco7SBAXWd8LsIH4KCZoQFnoECA4QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.ispag.org%2Fproceedings%2F%3Faction%3Ddownload%26item%3D105&usg=AOvVaw20OqwOmnBtIHN9eLc1sDsU&opi=89978449>.
- [50] I. Zluwa. „Innenraumbegrünung – Untersuchung der Eignung unterschiedlicher Substratvarianten für die Innenraumbegrünung anhand eines Vegetationsmonitorings ausgewählter Indikatorpflanzen und spezifischer Laboruntersuchungen“. Diplomarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur, 2013.