



Abschlussdokumentation

# **Projektgruppe**

## **How to grow plants online (fast)**

vorgelegt von

**(Namen der Studierenden aus Datenschutzgründen zur Veröffentlichung entfernt)**

Betreuende:

**Prof. Dr.-Ing. Oliver Theel**

**Prof. Dr. Andreas Winter**

**M. Sc. Florian Schmalriede**

**M. Sc. Marvin Banse**

Carl von Ossietzky Universität Oldenburg  
Fakultät II: Informatik, Wirtschafts- und Rechtswissenschaften

15. Dezember 2023

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Projektziel . . . . .	1
1.3	Lösungsidee . . . . .	2
1.4	Evaluation durch Anwendung der Lösung . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Kampagnen</b>	<b>5</b>
2.1	Planung der Kampagne beim Botanischer Garten . . . . .	5
2.1.1	Ziel und Fragestellung . . . . .	5
2.1.2	Beschreibung des Versuchaufbaus . . . . .	5
2.2	Planung der Kampagne bei Piccoplant . . . . .	5
2.3	Tag der offenen Tür im Botanischen Garten . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Hardware</b>	<b>8</b>
3.1	Experimente zur Auswahl von Bodenfeuchtigkeitssensoren . . . . .	8
3.2	Experiment zur Bestimmung des Nährstoffgehalts im Boden . . . . .	9
3.3	Bestimmung der nötigen Aktorik . . . . .	9
3.4	Platine . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Software</b>	<b>11</b>
4.1	Konzept Aktorik . . . . .	11
4.2	Monitoring . . . . .	14
4.3	Strategiekonzepte . . . . .	15
4.3.1	Bewässerungsstrategie . . . . .	15
4.3.2	Düngestrategie . . . . .	16
4.3.3	Kombinationsstrategie für Bewässerung und Düngung . . . . .	18
<b>5</b>	<b>Evaluation</b>	<b>18</b>
5.1	Ziele des Experiments . . . . .	18
5.2	Ergebnisse der Experimente . . . . .	19
5.2.1	Ergebnisse Piccoplant . . . . .	19
5.2.2	Zwischenergebnisse Botanischer Garten . . . . .	22
5.2.3	Fazit der Experimente . . . . .	24

---

<b>6 Fazit</b>	<b>25</b>
<b>7 Ausblick</b>	<b>26</b>
<b>Abbildungen</b>	<b>26</b>
<b>Literatur</b>	<b>27</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Pflanzen sind eine der Grundlagen menschlichen Wohlstands. Sie liefern Nahrung, Tierfutter, Baustoff, Arzneien und noch vieles mehr. Daher versuchen Menschen seit je her, ihre Wachstumsbedingungen und ihren Ertrag zu verbessern [Zed11]. Die wichtigsten Faktoren dazu sind die Wasser- und Nährstoffversorgung sowie Licht und Temperatur [PLA]. Diese Faktoren beeinflusst der Mensch zum Beispiel durch Be- und Entwässerung, Düngung, Beleuchtung oder künstliche Temperaturregulierung. Zur optimalen Pflanzenpflege entsteht so ein hoher Arbeits- und Ressourceneinsatz an z. T. kostbaren Ressourcen wie Wasser und Energie, und soll daher nicht verschwenderisch geschehen. Um den Ressourceneinsatz zu regeln, ist es notwendig, die Umweltbedingungen der Pflanzen zu überwachen.

Der richtige Ressourceneinsatz wird durch die Klimakrise erschwert und stellt eine große Herausforderung dar. Die Klimakrise sorgt für mehr Wetterextreme mit längerer Trockenheit, Hitze und Starkregenfällen [IPC22]. Bei Trockenheit und Hitze wird Wasser kostbarer. Bei Starkregen kann ein trockener Boden das Wasser nur erschwert aufnehmen [Kuh09]. In Anbetracht der Klimakrise müssen die beschriebenen kostbaren Ressourcen vermehrt eingesetzt werden, um die Pflanzen aufzuziehen und die Wetterextreme auszugleichen. Ein Kernproblem ist, dass der Einsatz von Dünger und Energie mit Treibhausgasemissionen einhergeht und damit die Klimakrise verstärkt wird. Außerdem verursacht übermäßiger Dünger im Boden die Emission des potenten Treibhausgases Lachgas [GCS23, IPC18, Wil13, Ter23].

## 1.2 Projektziel

Das Ziel der Projektgruppe *How to Grow Plants Online (Fast)* ist, den Ressourceneinsatz bei der Aufzucht und Pflege von Pflanzen unter den genannten Herausforderungen durch die Klimakrise bei mindestens gleichbleibender oder besserer Qualität zu optimieren. Dies umfasst beispielsweise die Ertragssteigerung, die bloße Lebenserhaltung, die Maximierung des Wohlergehens der Pflanze, sowie

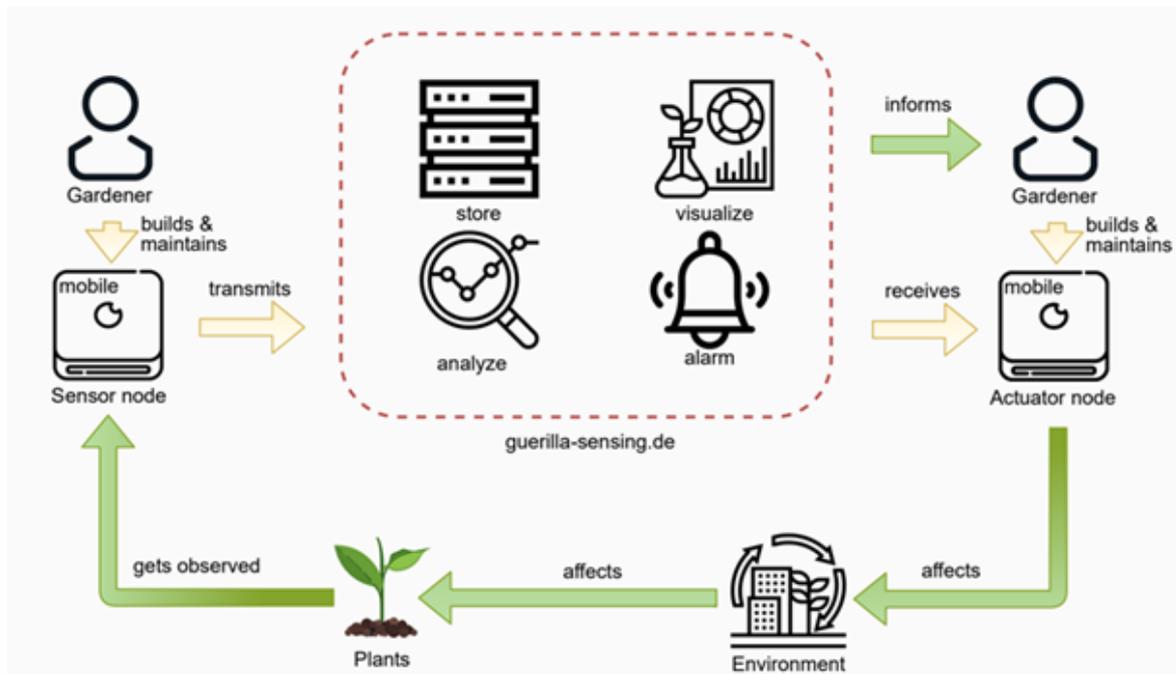


Abbildung 1.1: Erweiterter Regelkreis auf Basis der aktuellen Guerilla-Sensing-Plattform (vgl. [Gue21])

das Aufzeigen und die Steuerung der Ressourcenbedürfnisse für Pflanzenwachstumsphasen. Darüber hinaus aber auch die Reduktion des benötigten Arbeitsaufwandes für die Pflege und Betreuung des Systems gegenüber einem manuellen Ansatz.

Der Projektfokus liegt auf einem automatischen Regelsystem zum optimierten und zielgerichteten Einsatz von Wasser und Dünger. Darüber hinaus soll das entwickelte System eine Grundlage schaffen, welche für weitere Projekte genutzt werden kann, um den Einsatz anderer Ressourcen zu automatisieren.

### 1.3 Lösungsidee

Um den Einsatz kostbarer Ressourcen und Arbeitsaufwände zu verringern, müssen Umweltdaten der Pflanzen erfasst und analysiert werden, um daraus Aktionen ausführen zu können. Dafür kann die Guerilla-Sensing-Plattform genutzt werden, die an der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg entwickelt wurde [Gue21]. Auf der Plattform werden aktuell Möglichkeiten zur Überwachung verschiedener Umweltdaten angeboten, die Plattform selbst ist aber erweiterbar. Die Daten können im Rahmen von Kampagnen gesammelt, aufbereitet und auf einer Webseite für die Öffentlichkeit visualisiert werden. Die beschriebene Plattform bietet eine Grundlage zum Messen und Nutzen von Umweltdaten und kann durch bereitgestellte Schnittstellen für unsere Zwecke erweitert werden.

Um die beschriebenen Herausforderungen bei der Pflanzenpflege zu lösen, liegt es nahe, Guerilla-Sensing um Aktorik und Sensorik zu erweitern. Die Aufzucht und Pflege von Pflanzen kann als Regelkreis angesehen werden: Zunächst wird der Zustand der Pflanze und ihrer Umgebung festgestellt. Mit dieser Information kann entschieden werden, ob die Pflanze zusätzliche Ressourcen bedarf. Daraufhin wird beispielsweise die Bewässerung vorgenommen oder weitere Nährstoffe mittels Dünger zur Verfügung gestellt. Zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt eine erneute Prüfung und der Kreislauf beginnt von vorne. Dieser Kreislauf soll mittels Automatisierung abgebildet werden. Die kontinuierliche Prüfung und Regulierung durch das System soll die Pflanzenpflege optimieren.

In Abbildung 1.1 ist der erweiterte umzusetzende Regelkreis dargestellt. Mit dem Aktorknoten wird die Gärtnerarbeit in Teilbereichen ersetzt, um Arbeitsressourcen einzusparen und dauerhaft eine Pflanzenversorgung herzustellen. Sensorknoten messen die Umweltbedingungen der Pflanze. Im Konzept basieren sowohl Sensorknoten als auch Aktorknoten auf einer Guerilla-Box (GBox). Eine GBox besteht aus einem Mikrocontroller sowie der angebrachten Sensorik und Aktorik und kommuniziert mit dem Server der Guerilla-Sensing-Plattform. Es können mehrere GBoxen zusammen als ein Regelkreis fungieren, dabei können einzelne GBoxen Aktorik (Aktorknoten), Sensorik (Sensorknoten) oder beide Arten von Komponenten enthalten. Auf Basis der Informationen eines Sensorknotens werden auf der Guerilla-Sensing-Plattform Daten ausgewertet und Aktorknoten angesprochen. Guerilla-Sensing ermittelt anschließend beispielsweise auf Grundlage eines Bodenfeuchtigkeitssensors, wann eine Bewässerung für die Pflanze notwendig ist. Daraufhin wird die Umwelt durch das System beeinflusst, indem ein Bewässerungsaktor angesprochen wird und dieser eine Bewässerung durchführt.

Bei der Gestaltung der Sensor- sowie Aktorknoten soll berücksichtigt werden, dass diese mit wenig Aufwand auf- und abgebaut werden können. Außerdem sollen Dritte anhand der Dokumentation weitere Sensor- sowie Aktorknoten hinzufügen und instand halten können, sodass kein zusätzlicher Techniker nötig ist. Bei Bedarf sollen die Gärtner auch Grenzwerte für die Messwerte der Sensoren festlegen, bei deren Überschreitung eine Alarmierung erfolgen soll. So können bestimmte Ereignisse, die der Regelkreis nicht abbilden kann, händisch durchgeführt werden.

## 1.4 Evaluation durch Anwendung der Lösung

Um die Qualität und Funktionsweise der implementierten Erweiterung von Guerilla-Sensing und in Hinblick auf die Projektziele zu bewerten, werden Kampagnen bei zwei Projektpartnern durchgeführt.

### **Botanischer Garten**

Ein Projektpartner ist der Botanische Garten in Oldenburg. Dieser ist eine Einrichtung der Carl von Ossietzky Universität Oldenburg und ein öffentlicher Lehr- und Schaugarten. Das vorhandene Personal verfügt über langjährige Erfahrungen, um die Pflanzen bedarfsgerecht zu versorgen.

Wie in Kapitel Abschnitt 1.1 beschrieben, ist Wasser durch die Wetterveränderungen eine begrenzt-

te Ressource. Die optimale Verwendung des Wassers ist deshalb von großem Interesse. Daher soll das System im Botanischen Garten anhand einer automatischen Bewässerung erprobt werden. Im Fokus steht hierbei eine Vergleichbarkeit der Bewässerung zwischen dem entwickelten System und einer unregelmäßigen Bewässerung durch Gärtner herzustellen. Zudem soll gezeigt werden, ob durch das geregelte System Wasser eingespart werden kann. Als Pflanze wird Grünkohl ausgewählt, da der Wachstumszeitraum in den Projektzeitraum fällt, im Botanische Garten Erfahrung mit dieser Pflanze vorliegt und Grünkohl im Vergleich zu anderen Nutzpflanzen relativ unempfindlich ist. Die Kampagne wird auf einer nicht überdachten Fläche durchgeführt, sodass natürliche Wetterverhältnisse berücksichtigt werden müssen.

### **Piccoplant**

Eine weitere Kampagne wird bei der Piccoplant Mikrovermehrungen GmbH (im folgenden Piccoplant genannt) mit Sitz in Oldenburg durchgeführt. Das Unternehmen beschäftigt sich mit der hochwertigen Vermehrung von Pflanzensetzlingen mittels innovativer Biotechnologieverfahren auf speziell entwickelten Nährböden. Dadurch werden — im Vergleich zur gewöhnlichen Stecklingsaufzucht — ertragreichere und gesündere Pflanzen aufgezogen.

In dieser Kampagne soll geprüft werden, ob das System für betriebliche Einsätze geeignet ist und Pflanzen für den späteren Verkauf optimal aufziehen kann. Der Fokus liegt auf der automatisierten Düngung der Pflanzen. Bei Piccoplant wird Flieder betrachtet, da diese Pflanze in großen Mengen aufgezogen wird und ein einheitliches Wachstum aufweist. Die Düngung soll mittels Flüssigdünger umgesetzt werden, der mit einer automatisierten Bewässerung ausgetragen werden kann. Festdünger muss hingegen dem Substrat beigemischt werden und gibt die Nährstoffe über einen längeren Zeitraum ab. Der Einsatz von Flüssigdünger kann in der Zukunft durch die Zunahme von Wetterextremen und stärkeren Temperaturschwankungen an Relevanz gewinnen, da die Abgabe von Nährstoffen bei Festdünger temperaturabhängig ist. Die Beurteilung der Pflanzen erfolgt neben der entstandenen Biomasse anhand der Verkaufskriterien. Diese sind bei Piccoplant, dass die Fliederpflanzen ca. 60 cm hoch sind, eine schöne buschige Form aufweisen und über mindestens drei Triebe verfügen. Die automatisierte Düngung gilt als erfolgreich, wenn diese Kriterien bei der überwiegenden Anzahl der Pflanzen erfüllt sind und damit ähnliche Ergebnisse wie bei der üblichen Pflege mit Festdünger erreicht wurden. Die Nährstoffmenge des eingesetzten Flüssigdüngers wird mit dem Festdüngeinsatz verglichen.

Das Gesamtprojektziel ist erreicht, wenn der Ressourceneinsatz in beiden Kampagnen zielgerichteter erfolgt und die automatisch versorgten Pflanzen in einem ähnlichen oder besseren Zustand sind.

## 2 Kampagnen

Im Verlaufe des Projektes sollen mehrere Kampagnen durchgeführt werden, um in Anwendungsfällen die Funktionsweise des Systems zu überprüfen. Dazu wurde geplant, Experimente bei den Projektpartnern Piccoplant und dem Botanischen Garten Oldenburg durchzuführen. Eine weitere Kampagne war die Vorführung eines Systemprototyps zum Tag der offenen Tür im Botanischen Garten.

### 2.1 Planung der Kampagne beim Botanischer Garten

#### 2.1.1 Ziel und Fragestellung

Ziel des Experiments ist es, ein Bewässerungssystem für den Aufzug von Grünkohl zu entwickeln. Die Entwicklung von Pflanzen, die mit diesem System ausgestattet sind, soll mindestens so gut sein wie die von Pflanzen, die auf herkömmliche Weise bewässert werden. Dazu muss das System so wenig wie möglich von der Ressource Wasser verbrauchen. Daraus ergibt sich folgende Fragestellung: *„Kann mithilfe einer automatischen und autonomen Bewässerung Grünkohl wassereffizienter angebaut werden als mit einer händischen Bewässerung durch einen Gärtner, ohne die Pflanzenqualität zu beeinträchtigen?“*

#### 2.1.2 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Für den Versuch werden 48 Grünkohlpflanzen mit Guerilla-Sensing beobachtet, von denen 24 von der Projektgruppe und 24 von den Gärtnern des Botanischen Garten überwacht und bewässert werden. Für die Durchführung der Experimente wird der Projektgruppe Platz im Botanischen Garten bereitgestellt, an denen die Grünkohlpflanzen mit Sensorik und Aktorik ausgestattet wachsen können.

Die folgende Abbildung 2.1 zeigt den geplanten Aufbau im Botanischen Garten. Es ist die Vergleichsgruppe auf der linken Seite mit 24 Pflanzen eingezeichnet. Vier von den Pflanzen sind mit SMT-50-Sensoren ausgestattet. Auf der rechten Seite ist die automatisch bewässerte Gruppe eingezeichnet. Diese wird in sechs Untergruppen mit je vier Pflanzen eingeordnet. Jeder Topf ist mit dem Bewässerungssystem über zwei Schläuche verbunden. Außerdem sind pro Untergruppe zwei Pflanzen mit einem SMT-50-Sensor ausgestattet.

### 2.2 Planung der Kampagne bei Piccoplant

#### 2.2.0.1 Ziel und Hypothese

Ziel des Experimentes ist es, ein Dünge- und Bewässerungssystem für die Fliederaufzucht zu entwickeln. Die Entwicklung der mit dem System ausgestatteten Pflanzen soll mindestens ebenso gut sein, wie die von konventionell gewässerten und gedüngten Pflanzen. Dazu soll das System möglichst we-

nig von den Ressourcen Dünger und Wasser verbrauchen. Daraus ergibt sich folgende Fragestellung: *Lässt sich durch eine automatische Bewässerung und Düngung die Fliederpflanze bei gleicher Qualität mit einem geringeren Wasserverbrauch aufziehen?*“

### 2.2.0.2 Beschreibung des Versuchaufbaus

Für den Versuch werden 60 Fliederpflanzen mit Guerilla Sensing beobachtet, von denen 30 von der Projektgruppe und 30 von den Gärtnern von Piccoplant überwacht, bewässert und gedüngt werden. Für die Durchführung der Experimente wird der Projektgruppe Platz bei Piccoplant bereitgestellt, an denen die Fliederpflanzen mit Sensorik und Aktorik ausgestattet gedeihen können.

Die folgende Abbildung 2.2 zeigt den geplanten Aufbau bei Piccoplant. Es ist die Vergleichsgruppe auf der linken Seite mit 24 Pflanzen eingezeichnet. Sechs von den Pflanzen sind mit SMT-50-Sensoren ausgestattet. Auf der rechten Seite ist die automatisch bewässerte Gruppe eingezeichnet. Diese wird in sechs Untergruppen mit je vier Pflanzen eingeordnet. Jeder Topf ist mit dem Bewässerungssystem über zwei Schläuche verbunden. Außerdem ist pro Untergruppe eine Pflanze mit einem SMT-50-Sensor ausgestattet.

## 2.3 Tag der offenen Tür im Botanischen Garten

Am 18.06.2023 fand der Tag der offenen Tür im Botanischen Garten statt. Die Projektgruppe war durch die Gruppenmitglieder vertreten, um das Guerilla-Sensing-System und verbundene Kampagnen sowie Projekte vorzustellen. Die Gruppe hat die Guerilla-Sensing-Plattform, damit bereits durchgeführte Kampagnen und unterstützte Sensorik präsentiert. Zudem wurden auch Ideen und Anwendungsmöglichkeiten für die Verbesserung der Guerilla-Sensing-Plattform vorgestellt.

Das Highlight am Stand der Projektgruppe war der Prototyp des Bewässerungssystems. Es wurden zwei Töpfe mit Erde aufgestellt, einen mit feuchter Erde und einen mit trockener Erde. Es wurde eine Peristaltikpumpe aufgebaut und der Schlauch, der das Wasser aufnimmt, in einen Wasserbehälter gelegt. Der Schlauch, der das Wasser ausstößt, wurde in einen Auffangbehälter gehangen. Der Bodenfeuchtigkeitssensor wurde in den Topf mit der nassen Erde gesteckt und die Pumpe wurde durch das System ausgeschaltet. Die Besucher konnten den Sensor aus dem Topf mit der nassen Erde nehmen und diesen in den Topf mit der trockenen Erde stecken. Damit wurde die Pumpe durch das System angeschaltet und förderte Wasser. Um die Pumpe zu stoppen, konnte der Sensor aus dem Topf mit der trockenen Erde herausgeholt und in den Topf mit der nassen Erde gesteckt werden. Dadurch wurde die Pumpe durch das System wieder ausgeschaltet.

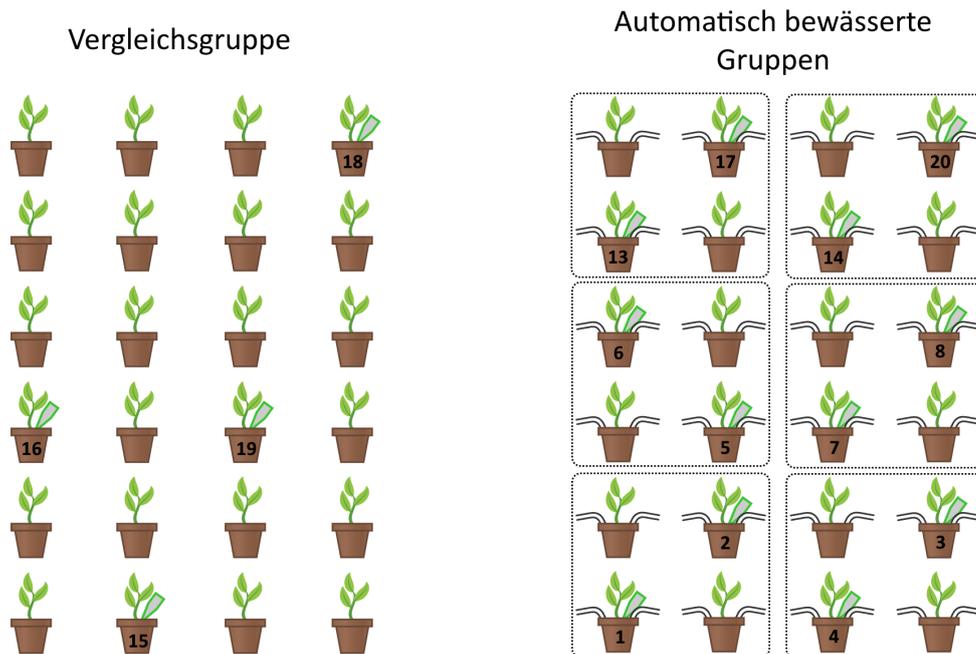


Abbildung 2.1: Der Aufbau des Experimentes beim Botanischen Garten

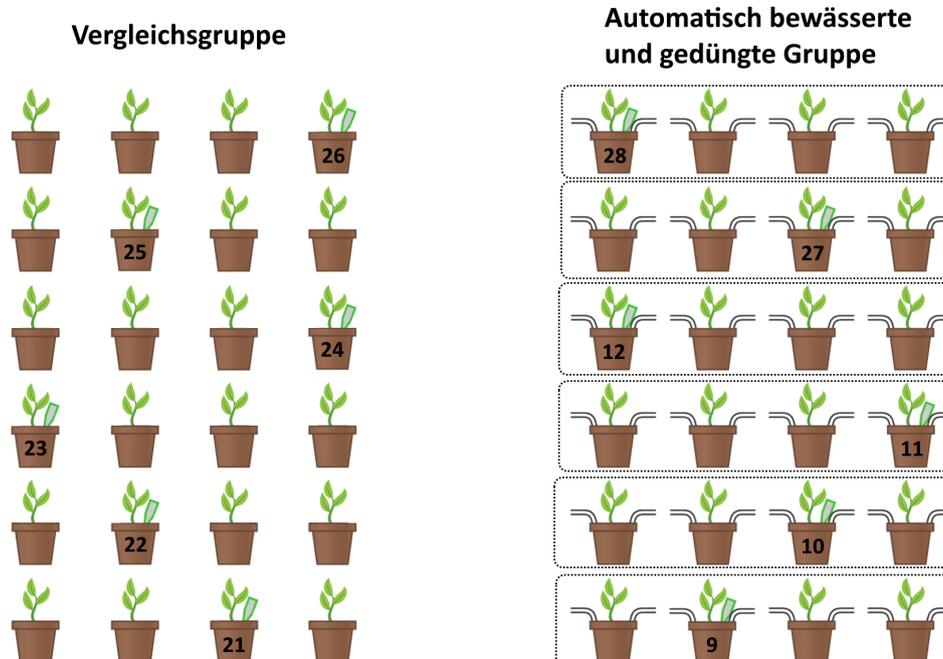


Abbildung 2.2: Der Aufbau des Experimentes bei Piccoplant

## 3 Hardware

Um die Kampagnen durchzuführen, mussten GBoxen mit geeigneter Hardware gebaut werden. Dazu wurden zunächst Experimente durchgeführt, um geeignete Sensoren und Aktoren zu bestimmen. Hierzu wurden sowohl für die benötigten Bodenfeuchtigkeits- und NPK-Sensoren entsprechende Anforderungen gestellt und daraus Experimente zur Überprüfung dieser Anforderungen abgeleitet.

### 3.1 Experimente zur Auswahl von Bodenfeuchtigkeitssensoren

Im Rahmen der Projektgruppe sollen Bodenfeuchtigkeitssensoren eingesetzt werden, um die Menge des im Boden vorhandenen Wassers zu messen. Bei der Auswahl der Sensoren wurde auf die Messgenauigkeit, den Messbereich, die Schnittstelle, die Reaktionsfähigkeit, der Preis, das Substrat, in dem der Sensor eingesetzt werden soll, und eventuelle weitere Features des Sensors geachtet.

Generell ist eine möglichst hohe Genauigkeit der Sensoren gewünscht. Eine höhere Genauigkeit oder zusätzliche Funktionen sind jedoch i. d. R. mit höheren Kosten verbunden, sodass eine Kosten-Nutzen-Abwägung stattfinden muss. Bei einem fixen Budget kann es sinnvoll sein, mehrere günstige Sensoren, statt weniger teurere zu verwenden und so einen größeren Teil des Substrats abzudecken. Für die Experimente wurden die folgenden drei Sensoren als Möglichkeiten herausgearbeitet und evaluiert:

#### SoMoSe

Der SoMoSe-Sensor ist ein Bodenfeuchtesensor mit integriertem Temperatursensor und bietet eine analoge Ausgabe über Spannungswerte und eine digitale I2C-Schnittstelle. Der Sensor ist mit einem Kaufpreis von 15 € im Vergleich zu den anderen Sensoren am günstigsten. (vgl. [BeF23])

#### SMT100

Der SMT100 ist für den vollen Messbereich von 0 bis 100 Prozent Bodenfeuchtigkeit ausgelegt. Außerdem ermöglicht er eine weitgehend bodentypunabhängige Messung mit besonders hoher Auflösung. Genauso wie der SoMoSe verfügt der Sensor über einen zusätzlichen Temperatursensor, welcher sowohl analog als auch digital ausgelesen werden kann. (vgl. [DVS23])

#### SMT50

Der Messbereich des SMT50 geht nur bis 50 Prozent Bodenfeuchtigkeit und der Bodentyp wirkt sich stärker auf die Kalibrierkurve aus. Die Auflösung ist ebenfalls geringer als beim SMT100, reicht jedoch für viele Einsatzzwecke, insbesondere bei der Einstellung von Schwellwerten für die Bewässerungssteuerung problemlos aus. Auch der SMT50 verfügt über einen Temperaturwert, beim SMT50 können aber beide Werte nur analog über die Spannung ausgelesen werden. (vgl. [DVS23, tru])

Es wurden drei Experimente durchgeführt, um die Sensoren zu bewerten. Aufgrund der Experimente musste der SoMoSe ausgeschlossen werden, da die festgestellten Messabweichungen über einen kurzen Zeitraum größer waren, als die langsame Abnahme des Wertes über mehrere Tage. Bei den

SMT50 und SMT100 Sensoren war dies nicht der Fall. Hier nahm die gemessene Bodenfeuchtigkeit ohne störende Fluktuation über längere Zeit ab.

Von den verbleibenden zwei Sensoren hat der SMT100 im Vergleich der Messungen durch Auftreten einer geringeren Anzahl an Messfehlern und konstanteren Messwerten minimal besser abgeschnitten als der SMT50. Der SMT50 ist mit ungefähr 60 € allerdings deutlich günstiger als der SMT100 mit 120 €. Da die Messergebnisse des SMT100 nur geringfügig besser waren, und mit SMT50 knapp doppelt so viele Sensoren eingesetzt werden können, wurde sich für den SMT50 entschieden.

### **3.2 Experiment zur Bestimmung des Nährstoffgehalts im Boden**

Initiales Ziel war es beim Experiment bei Piccoplant den Nährstoffgehalt des Bodens als Regelgröße miteinzubeziehen. Dazu musste ein Sensor für den Nährstoffgehalt (NPK) bestimmt werden. Der einzige erhältliche dedizierte NPK-Sensor war der Neufdayyy Boden-NPK-Sensor [Neu]. Dieser Sensor konnte im Projekt nicht angesteuert werden. Aufgrund der geringen Verfügbarkeit von NPK-Sensoren wurde ein Experiment durchgeführt, um Alternativen in Form von Leitfähigkeits- und pH-Sensoren zu untersuchen.

Das Experiment hat gezeigt, dass keine der ausprobierten Alternativen eine vertrauenswürdige Größe darstellt, um NPK-Werte und -Entwicklungen abzuleiten. Daher wurde zunächst am 02.06.2023 entschieden, keinen dieser Sensoren zu verwenden. Der NPK-Sensor konnte bis dato nicht getestet werden. Um das Projekt bei Piccoplant zu starten, soll zunächst ein virtueller Sensor implementiert werden, welcher anhand von Formeln die Abgabe des Düngers bestimmt und daraus resultierend die NPK-Werte ermittelt.

### **3.3 Bestimmung der nötigen Aktorik**

Neben der notwendigen Sensorik musste auch die notwendige Aktorik bestimmt werden. Die Aktorik muss, Flüssigkeiten (Wasser und Dünger-Wassergemisch) von einem Reservoir durch Schläuche zu den Pflanzen liefern. Dabei muss die geförderte Menge über die Zeit konstant sein, um die geförderte Menge anhand der Dauer nachvollziehen zu können. Als mögliche Pumpen standen Kreiselpumpen und Peristaltikpumpen zur Auswahl. Bei Kreiselpumpen können durchaus inkonstante Fördermengen sowie Nach- bzw. Rückflusseffekte auftreten. Diese Faktoren machen eine Bewässerung unvorhersehbar. Peristaltische Pumpen haben die Eigenschaft, kleine und konstante Portionen an Flüssigkeit zu fördern. Weitere Vorteile einer peristaltischen Pumpe sind, dass sie nicht innerhalb der zu pumpenden Flüssigkeit angebracht werden müssen. Sie funktioniert auch, wenn die Schläuche nicht gefüllt sind. Die überwiegenden Vorteile der Peristaltikpumpen gegenüber den Kreiselpumpen in Bezug auf dieses Projekt waren die Grundlage der Entscheidung eine Peristaltikpumpe zu verwenden. In einem Test stellte sich heraus, dass die peristaltische Flüssigkeitspumpe G528 von Yanmis (siehe [pum]) eine

Beförderungsmenge von 35 bis 200 Gramm pro Minute realisieren können, die ausreichend für das Bewässerungsprojekt ist.

### 3.4 Platine

Zur Durchführung der Experimente mussten die Sensoren und Pumpen an den Mikrocontroller angeschlossen werden. Anstatt dies von Hand zusammenzubauen, wurde sich dafür entschieden, eine Platine zu designen, um Platz zu sparen und Fehler beim händischen Löten zu vermeiden. Nachteil dieser Lösung ist, dass Fehler beim Design der Platine schwerer nachträglich zu beheben sind, als bei einer von Hand gefertigten Schaltung. Im schlimmsten Fall muss sogar die ganze Platine in überarbeiteter Form neu bestellt werden.

Um Internetzugang auch ohne WLAN zu gewährleisten, wurde das ESP-Devboard TTGO-TCALL-SIM800 [TTG] mit integriertem GSM-Modul als Mikrocontroller verwendet. Die Analogsignale der SMT50 Sensoren werden von ADS1115 in das digitale I<sup>2</sup>C Protokoll überführt. Da die ADS1115 nur begrenzt viele I<sup>2</sup>C-Adressen unterstützen, sind die SMT50-Anschlüsse auf acht limitiert. Es hat sich während des Designprozesses ergeben, dass im Botanischen Garten sechs und bei Piccoplant zwölf Pumpen benötigt werden. Daher wurde die Platine so designet, dass mit einer Platine sechs Pumpen angesteuert werden können. Damit die Platine auch noch für andere Einsätze geeignet ist, wurden Anschlüsse für 3,3V, Ground, I<sup>2</sup>C und weitere Pins offengelegt. Die Stromversorgung der Platine erfolgt mit 12V Gleichstrom.

Beim Verlöten der Stecker wurde festgestellt, dass viele Beschriftungen zu eng an den Pins liegen und von den Steckern überdeckt werden. Es hat sich außerdem ergeben, dass das GSM-Modul nicht benötigt wird, da ein GSM-WLAN-Router eingesetzt wird. Am Schwerwiegendsten ist allerdings, dass die Pumpen Drei bis Sechs nicht angesteuert werden konnten, da die zugehörigen MOSFETS an reinen Inputpins angeschlossen wurden. Dieses Problem wurde gelöst, indem ein Devboard mit Jumperkabeln an die korrekten Pins angeschlossen wurde.

Nach einem Test im Einsatz wurde entschieden, eine verbesserte zweite Version der Platine zu entwerfen. Da bei beiden Experimenten GSM-Router mit WLAN zum Einsatz kommen, wird in der zweiten Version der Platine kein GSM-Modul mehr benötigt. Daher wurde anstatt des ESP32-Devboardes ein ESP32-Chip direkt auf der Platine platziert.

Es hat sich gezeigt, dass der Durchsatz der Pumpen geringer ist, wenn zwei Pumpen gleichzeitig arbeiten, als wenn dieselben Pumpen jeweils für einzeln arbeiten. Dieses Problem wurde softwareseitig gelöst, indem verhindert wird, dass zwei Pumpen gleichzeitig arbeiten.

## 4 Software

In den vorherigen Kapiteln wurde bestimmt, welche Sensorik, Aktorik und restliche Hardware benötigt wird, um das geplante Ziel aus Abschnitt 1.2 zu erreichen. In diesem Kapitel wird bestimmt, welche Software zusätzlich zur festgelegten Hardware notwendig ist, damit das System seine geplanten Aufgaben erfüllen kann.

Ein Regelsystem braucht im Wesentlichen drei Faktoren, um zu funktionieren. Als Erstes braucht es Daten, um eine Grundlage zum Treffen von Entscheidungen zu haben. Als Zweites braucht ein Regelsystem Rechenleistung, um die Daten verarbeiten und daraus Folgen ableiten zu können. Als Drittes braucht ein Regelsystem aktive Elemente (wie z. B. Aktoren), um die getroffenen Entscheidungen auszuführen.

Diese Voraussetzungen führen uns zu Guerilla Sensing als Basissystem. Guerilla Sensing ist ein System zur Erfassung, Speicherung, Analyse und Visualisierung von Daten, welche ursprünglich von einer Projektgruppe der Universität Oldenburg entwickelt wurde [BBF<sup>+</sup>21]. Eine genauere Beschreibung von Guerilla Sensing ist in Abschnitt 1.3 zu finden.

Durch Guerilla Sensing ist schon Software zum Erfassen von Daten, Speichern von Daten und Analysieren von Daten vorhanden. Außerdem ist die Plattform erweiterbar, weshalb die aktiven Elemente und potenziell fehlende Erfassungs- oder Analysemöglichkeiten noch nachträglich hinzugefügt werden können. In den folgenden Abschnitten wird näher beschrieben, welche Anpassungen wir am Guerilla Sensing System geplant haben, um unsere Ziele umzusetzen.

### 4.1 Konzept Aktorik

In den vorherigen Projekten, die mit Guerilla Sensing umgesetzt wurden, wurde keine Aktorik eingesetzt. Das System ist somit nur auf Sensorik ausgelegt. Um besser nachzuvollziehen, was die Aktorik und damit zusammenhängend das System alles zusätzlich leisten muss, ist in Abbildung 4.1 ein Regelkreis zu finden. In diesem ist der Ablauf eines Systems, welches mit Aktoren und Sensoren arbeitet, zu finden.

In Abbildung 4.1 wird eine GBox verwendet, die sowohl mit Aktorik und als auch Sensorik (AS) verbunden ist. Von der Sensorik erhält die GBox Messwerte. Die GBox sendet daraufhin die Sensordaten an das Guerilla-Sensing-System. Mit diesen Informationen können die Messwerte einem hinterlegten Standort zugeordnet und in einem zeitlichen Verlauf betrachtet werden. Sobald die Sensordaten von Guerilla Sensing erfasst wurden, wird eine Entscheidung zum Aktorverhalten anhand der Messwerte getroffen. Nach der Entscheidung wird, falls eine Aktorhandlung notwendig ist, ein oder mehrere Aktoraufträge an die GBox gesendet. Ein Aktorauftrag umfasst alle Informationen, die nötig sind, eine GBox anzuweisen, einen Aktor auf eine definierte Art und Weise zu schalten. Ein Auftrag enthält eine Auftragsnummer, die ID des Aktors und weitere Informationen, wie die Schaltdauer,

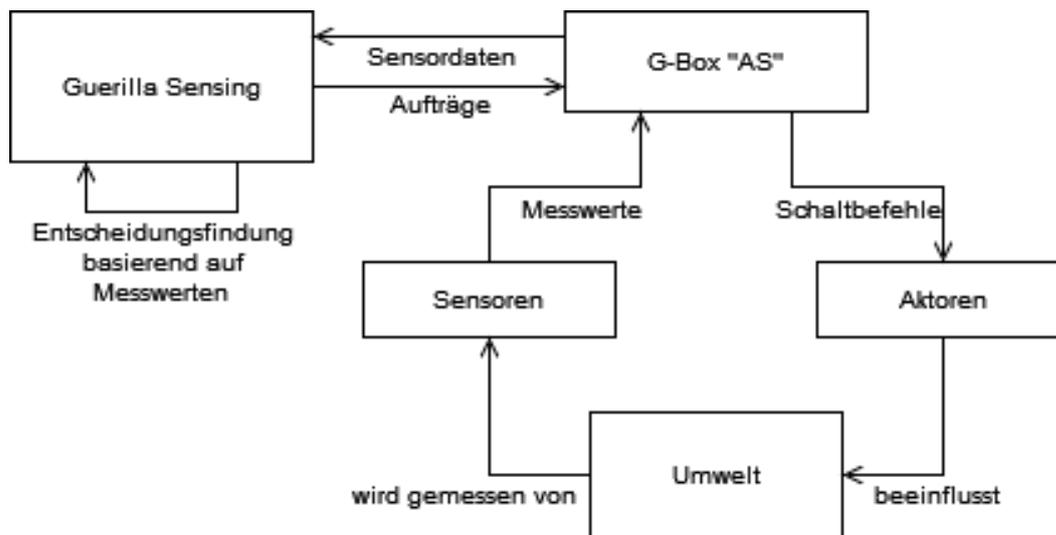


Abbildung 4.1: Regelkreis einer GBox mit Aktorik und Sensorik (AS)

Anzahl an Durchführungen, den Zielzustand eines Aktors (z. B. geöffnet/geschlossen) oder komplexere Anweisungen wie „aktiviere den Aktor bis Messwert x erreicht ist“. Bei diesen komplexeren Bedingungen prüft die Sensorik auf der GBox direkt das Ergebnis der Aktorhandlung. Damit kann ein Aktor solange ausgeführt werden, bis der Messwert eines Sensors einen definierten Grenzwert erreicht. Diese Funktion kann sich ebenfalls in Szenarien als nützlich erweisen, wenn die Reaktion auf eine Veränderung der Messwerte zeitkritisch ist und eine Aktorausführung unmittelbar erfolgen sollte.

Die Informationen werden auf der GBox interpretiert und ein Schaltbefehl an den Aktor gesendet. Ein Schaltbefehl ist die konkrete Information oder elektrischer Strom, der den Aktor betätigt. Die Aktion des Aktors beeinflusst die Umwelt. Beispielsweise könnte bei einer Pumpensteuerung, der elektrische Strom für die gewünschte Schaltdauer aktiviert werden und somit Wasser der Umwelt zugeführt werden. Diese Veränderung wird wiederum von den Sensoren gemessen, womit ein geschlossener Regelkreis vorliegt.

Das Konzept sollte die Flexibilität aufweisen, eine Vielzahl an Anwendungsfällen realisieren zu können. Dabei wurde auch eine örtliche Verteilung von Sensorik und Aktorik berücksichtigt. Zum Beispiel soll eine Messung auf großer verteilter Fläche erfolgen, aber die Aktorik muss aufgrund der Gegebenheiten zentral geschaltet werden. Die Möglichkeit verschiedene GBoxen mit verschiedenen Funktionen zu haben, ist der erste Grund, weshalb wir uns für die Entscheidungsfindung auf Guerilla Sensing Ebene anstatt auf GBox Ebene entschieden haben. Dabei sollte es möglich sein, die Messwerte mehrerer Sensoren bei einer Aktorentscheidung zu berücksichtigen.

Sind die GBoxen räumlich weit verteilt, wäre es notwendig, dass Kommunikationswege zwischen den beteiligten GBoxen geschaffen und aufrechterhalten werden. Dieses Vorgehen ist netzwerktech-

nisch mit erheblichem Aufwand verbunden und erhöht den Bedarf an technischen Kenntnissen des GBox-Betreibers. Nach diesem Konzept muss lediglich ein Up- und Downlink zu jeder GBox bestehen.

Eine Entscheidungsfindung auf Guerilla Sensing vereinfacht die Erweiterbarkeit und Wartung. Denn bei einer Änderung der Entscheidungslogik wird diese sofort auf alle aktuellen Systeme übertragen. Würde die Entscheidung auf GBox Ebene getroffen werden, müsste jede GBox, die aktuell läuft, bei einer Änderung einzeln neu aufgespielt werden. Alternativ müsste die Möglichkeit geschaffen werden, Programmänderungen an der GBox aus der Ferne vorzunehmen. Die Projektgruppe hat sich gegen dieses Verfahren entschieden, da für die Umsetzung eine Übertragung größerer Datenpakete notwendig wäre. Dies würde die Auswahl einsetzbarer Übertragungstechnologien, darunter die Verwendung von LoRa, einschränken.

Um nachzuvollziehen, was in den einzelnen Systemen passiert, werden die Aktorentscheidungen sowie der Status der Aktoraufträge protokolliert. Diese Informationen werden für den Betreuer auf der Webseite grafisch aufbereitet.

Für die Entscheidungsfindung auf der Serverseite muss neben der Kommunikationsverbindung von der GBox zum Server auch ein Downlink vom Server zur GBox möglich sein. Über diesen Downlink werden die Aktoraufträge übertragen. Dabei können je nach Art der Anbindung unterschiedliche Verzögerungen auftreten, die u. a. mit der gewählten Übertragungstechnik zusammenhängen. Um eine GBox mit Aktorik an das Guerilla-Sensing-System anzubinden, können nur Übertragungstechnologien eingesetzt werden, die einen Downlink ermöglichen. Drei mögliche Technologien sind W-LAN, Mobilfunk und LoRa, welche aufgrund ihrer unterschiedlichen Funktionsweisen eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle ermöglichen.

Für eine Entscheidungsfindung sind vier Schritte notwendig, um Seiteneffekte und Abhängigkeiten konzeptionell zu berücksichtigen.

1. Vorbedingungsprüfung
2. Zusammenführung und Aufbereitung von Messwerten
3. Ausführungsentscheidung
4. Bestimmung der Intensität

Im Schritt der Vorbedingungsprüfung wird ermittelt, ob alle Vorbedingungen für eine Ansteuerung der Aktorik erfüllt sind. So kann nach der Bewässerung von Pflanzen eine weitere Aktorentscheidung blockiert werden, um die Totzeit, also die Zeit bis die erfolgte Bewässerung von einem Sensor gemessen wird, zu überbrücken. Im nächsten Schritt werden die für eine Entscheidung benötigten Messwerte abgerufen und aufbereitet. So lässt sich eine Bewässerung einrichten, die nur stattfindet, wenn mehrere Sensoren, die sich nebeneinander befinden, einen Mangel anzeigen. Verschiedene Messwerte wie Luftfeuchtigkeit und CO<sup>2</sup>-Gehalt können ausgewertet werden, um ein Fenster zu öffnen und zu schließen. Im dritten Schritt werden die Messwerte miteinander verrechnet und gegen einen Wer-

tebereich geprüft, um zu entscheiden, ob ein Aktor aktiviert wird oder nicht. Im letzten Schritt wird auf Basis des Ergebnisses die Intensität der Aktoraktivierung bestimmt. Sollte ein System entwickelt werden, bei dem Regenprognosen mit in die Entscheidung für eine Bewässerung einfließen, so würde eine höhere Regenprognose im Regelfall zu einer geringeren Bewässerungsmenge führen als eine niedrigere Regenprognose.

Die obigen Schritte für eine Entscheidungsfindung in einem konkreten Anwendungsfall werden als Strategie bezeichnet. Eine Strategie besteht dabei aus den zwei Teilen Strategie-Template und Strategie-Instanz, die im Folgenden definiert werden:

**Definition 1 (Strategie-Template)** *Ein Strategie-Template beschreibt im GS-Kontext eine parametrisierbare Folge von Anweisungen, die eine Steuerung oder Regelung für eine Kategorie von Anwendungsfällen unter Verwendung von Sensorwerten und Aktoren realisiert.*

**Definition 2 (Strategie-Instanz)** *Eine Strategie-Instanz ist ein mit Parameterwerten instanziiertes Strategie-Template, um eine Steuerung bzw. Regelung für einen konkret vorliegenden Anwendungsfall umzusetzen.*

## 4.2 Monitoring

Mit der neuen Aktorik kommen weitere, mögliche Fehlergrößen in das System. So kann es zusätzlich zu fehlerhaften Messwerten nun auch Kommunikationsprobleme oder Probleme bei der Ausführung der Aktorik geben. Dies kann bei Regelkreissystemen, wie z. B. der Bewässerung von Pflanzen, nach kurzer Zeit zu fatalen Folgen führen, wenn z.B. die Regelung ausfällt. Im Fall der Bewässerung von Pflanzen wären als Folgen Ernteausfall bis hin zum kompletten Absterben der Pflanzen möglich. Daher ist es wichtig, dass Fehler frühzeitig erkannt werden können, um Folgeschäden zu vermeiden.

Das System soll stark konfigurierbar sein, um verschiedene Fehlerfälle abzudecken und auf verschiedene Projekte anwendbar zu sein. Im Folgenden sind zu überwachende Fehlerfälle und nötige Anforderungen aufgelistet:

### Zu überwachende Fehlerfälle

- Keine Sensorwerte
- Unerwartete Sensorwerte
- Keine Rückmeldungen auf Aktorikaufträge
- Fehlermeldungen als Antworten auf Aktorikaufträge
- Keine versendeten Aktorikaufträge

### Neue Anforderungen

- Alle Einstellungen pro Monitor bzw. konfigurierter Überwachung
- Viele Nachrichten in kurzer Zeit sollen nicht auftreten

- Kein Verlust von Informationen durch Spamverhinderungen
- Zeitnahe Erkennung
- Geringer Einfluss auf die Performance des Gesamtsystems

### 4.3 Strategiekonzepte

Guerilla Sensing hat schon einige Analysemöglichkeiten implementiert, wie die Einrechnung von Luftfeuchtwerten in Feinstaubwerte, um die Feinstaubwerte noch genauer zu bestimmen. Allerdings gibt es noch keine Analysemöglichkeiten zum Bestimmen von Aktorentscheidungen, da noch keine Aktoren im System umgesetzt wurden. Die Integration der Aktoren und wo die Entscheidungsfindung innerhalb des Systems durchgeführt werden soll, ist in Abschnitt 4.1 zu finden. In diesem Kapitel werden die Funktionsweisen der einzelnen Strategien genauer erläutert.

Um die in Kapitel 1.4 beschriebenen Experimente durchzuführen, werden Strategien benötigt, um zu entscheiden, wann bewässert (Bewässerungsstrategie Unterabschnitt 4.3.1) und wann gedüngt werden muss (Düngestrategie Unterabschnitt 4.3.2). Eine Kombination dieser beiden Strategien ist erforderlich, da mit Flüssigdünger gearbeitet wird und somit bei jedem Durchlauf einer Düngung Wasser an die Pflanzen kommt. Die Kombinationsstrategie (Unterabschnitt 4.3.3) berücksichtigt diesen Faktor und benutzt die Entscheidungslogik der anderen beiden Strategien.

#### 4.3.1 Bewässerungsstrategie

Schon in frühen Phasen des Projektes wurde festgestellt, dass Bodenfeuchtigkeitssensoren je nach Dichte des Bodens, Abstand zu Wurzeln und Abstand zum Rand des Topfes sehr unterschiedliche Werte liefern. Deshalb wird eine Kalibrierung pro Sensor für den jeweiligen Topf benötigt. Dazu wird ein Topf mit installiertem Sensor in einen Feuchtigkeitszustand gebracht, der optimal für die Pflanzen ist und der dann vom Sensor gemessene Wert festgehalten. Die Bewässerungsstrategie setzt auf diesem Wert auf und nimmt diesen als Ausgangspunkt. In Tabelle 4.1 sind Beispielwerte zu sehen. Die Strategie läuft wie folgt ab:

1. Sollwert wird pro Sensor festgelegt und in der Datenbank hinterlegt
2. Auslösebedingung festlegen, also wie viel Abweichung in Prozent möglich sein soll, bevor gegossen wird
3. Mittelwertbildung über die Messwerte eines Sensors über eine benutzerdefinierte Zeitspanne, in diesem Beispiel beträgt diese 10 Minuten.
4. Relative Abweichung des Messwertes zum Sollwert wird bestimmt. In diesem Fall hat Sensor A eine Abweichung von 40 % und Sensor B eine Abweichung von 60 %.
5. Mittelwertbildung über die relativen Abweichungen aller Sensoren, da alle Sensoren einer Strategie zusammen über die Aufträge entscheiden.

6. Relative Abweichung mit Auslösebedingung vergleichen, in diesem Fall wurde die Bedingung erreicht, deshalb weiter zum nächsten Schritt, ansonsten wird hier entschieden, dass kein Gießen notwendig ist.
7. Bewässerungsauftrag mit benutzerdefinierter Menge erstellen und absenden.

Bei der Entwicklung der Strategie wurde entschieden, dass die Bewässerungsmenge vom Nutzer eingestellt und nicht von der Strategie berechnet wird. Das liegt daran, dass die Bodenfeuchtwerte u. a. mit der Dichte des Bodens zusammenhängen und somit die Messwerte bei Messungen in verschiedenen Töpfen unterschiedlich hoch ausfallen. Auf dieser Grundlage ist eine Berechnung der Bewässerungsmenge schwierig zu realisieren. Mit einer kleinen festgelegten Menge wird der Wert immer nah am eingestellten Sollwert gehalten. Falls diese Menge nicht ausreicht, entscheidet die Strategie beim nächsten Durchlauf, dass erneut bewässert wird. Außerdem können unterschiedliche Pflanzen eine unterschiedliche Menge an Wasser benötigen, sodass der Nutzer diese Menge speziell auf seine Pflanze anpassen kann.

*Tabelle 4.1: Beispiel einer Bewässerungsstrategie*

	<b>Sensor A</b>	<b>Sensor B</b>
Sollwert	25	25
Messwert gemittelt auf 10 Minuten	15	10
Absolute Abweichung	10	15
Relative Abweichung	40%	60%
Mittelwert	$(40\%+60\%) / 2 = 50\%$	
Auslösebedingung	$\geq 50\%$	

Eine Abweichung in Prozent als Grundlage zu nehmen, wurde entschieden, da ein Sensor mit einem höheren Sollwert, wenn er trocken wird, schneller bei den absoluten Zahlen abnimmt und ein Sensor mit einem niedrigeren Sollwert langsamer. Durch die prozentuale Abweichung wird dies abgefangen.

### 4.3.2 Düngestrategie

Aufgrund der Ergebnisse des NPK-Experiments (siehe Abschnitt 3.2) musste zur Entscheidungsfindung der Düngung eine alternative Möglichkeit ohne Sensorik gefunden werden. In Gesprächen mit dem Projektpartner Piccoplant wurde klar, dass eine Düngung mit Flüssigdünger, die ähnlich gut wie eine Düngung mit festem Dünger ist, schon ein Erfolg wäre. Denn bei fester Dünger hat einige Nachteile, wie z. B. dass es zu Lachgasemissionen kommen kann, falls noch Dünger im Boden nach einer Pflanzenernte übrig bleibt [Umw22].

Deshalb wird eine Strategie entwickelt, mit der die Abgabe eines festen Düngers mit einem Flüssigdünger simulieren wird. Dazu muss die Abgabe eines festen Düngers nachvollzogen werden. In Abbildung 4.2 wird die Abgabe verschiedener festes Dünger bei 21 °C dargestellt. Auf der x-Achse befindet sich die Zeit in Monaten und auf der y-Achse die Abgabe in Prozent. Der Dünger mit einer Laufzeit von 3 bis 4 Monaten hat z. B. bei 4 Monaten knapp 98 % seiner Nährwerte an den Boden abgegeben.

Um diese Kurve beschreiben zu können und da jeder fester Dünger je nach Laufzeit andere Verläufe hat, soll die Düngestrategie so aufgebaut werden, dass eine Formel angegeben werden kann, die diesen Verlauf beschreibt. Das hat zusätzlich den Vorteil, dass auch andere Verläufe für die Düngung genutzt werden können, bei der z. B. in den frühen Phasen viel Dünger zugegeben wird und dann ein kompletter Stopp erfolgt. Diesen Verlauf kann mit einem festen Dünger nicht abgebildet werden, da dieser kontinuierlich die Nährstoffe abgibt.

Weiterhin muss parametrisiert werden, wann die Strategie aktiv werden soll. Denn für verschiedene Pflanzen und Anwendungsfälle kann eine z. B. wöchentliche oder z. B. eine tägliche Aktivierung sinnvoll sein.

**NUTRIENT RELEASE OVER TIME AT 70°F**

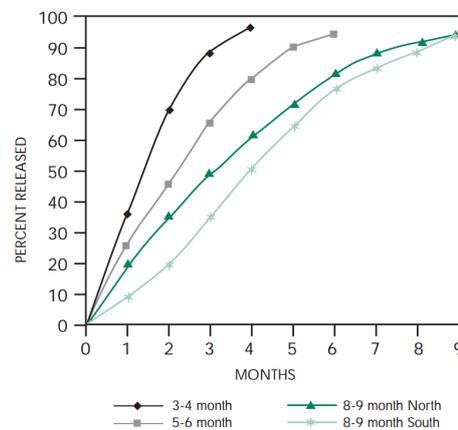


Abbildung 4.2: Zeitliche Abgabe verschiedener Feststoffdünger (vgl. [Sco23])

Initial muss für die Strategie die Formel und die Gesamtdüngemenge angegeben werden. Die Formel muss beim Einsetzen von  $x$  (der Zeit) eine Prozentzahl ergeben. Danach würde der Ablauf der Entscheidungsfindung bei z. B. einer wöchentlichen Strategieausführung wie folgt funktionieren:

1. Prüfen, ob der Düngezeitpunkt (welcher vom Nutzer einstellbar ist) erreicht wurde, ansonsten wird die Strategie abgebrochen

2. Ermittlung der aktuellen Woche seit Beginn der Düngung
3. Berechnung der Solldüngermenge zu diesem Zeitpunkt durch Einsetzen der aktuellen Woche in die Formel
4. Berechnung der bereits ausgebrachten Düngermenge durch Einsetzen der letzten Woche
5. Berechnung der auszubringenden Düngermenge durch Subtraktion der Solldüngermenge und der bereits ausgebrachten Düngermenge
6. Auszubringende Düngermenge von Prozent zu Flüssigkeitsmenge umrechnen, indem die Gesamtdüngermenge mit der errechneten Prozentzahl multipliziert wird
7. Düngungsauftrag mit der errechneten Flüssigkeitsmenge erstellen und an entsprechenden Aktor versenden

### 4.3.3 Kombinationsstrategie für Bewässerung und Düngung

Wie schon in Abschnitt 4.3 erwähnt, muss für die Kombination aus Bewässerungs- und Düngestrategie eine eigene Strategie erstellt werden. Denn die Düngestrategie bringt auch Flüssigkeit an die Pflanze, weshalb bei einer Nutzung von beiden Strategien bedacht werden muss, dass die Pflanze nicht zu viel Wasser bekommt.

Die Kombinationsstrategie muss initial eingestellt werden, mit einem Zeitwert, wie lange die Bewässerung blockiert werden soll, vor der Ausführung der Düngestrategie. So kann gewährleistet werden, dass bei einer Düngung die Pflanze nie zu viel bewässert werden kann. Die Kombinationsstrategie funktioniert wie folgt:

1. Prüft, ob Düngung kurz bevor steht, abhängig vom eingestellten Wert des Users
  - Wenn ja, wird die Bewässerungsstrategie nicht aufgerufen
  - Wenn nein, wird die Bewässerungsstrategie aufgerufen
2. Düngestrategie wird aufgerufen

## 5 Evaluation

Dieses Kapitel beinhaltet die Evaluation des Projektes und bildet damit den Abschluss. Diese Evaluation ist von zentraler Bedeutung, da sie es ermöglicht, objektive Einblicke in die Wirksamkeit des entwickelten Systems zu erhalten.

### 5.1 Ziele des Experiments

In Kapitel 1.4 wurde die Planung der Kampagnen bei den beiden Projektpartnern vorgestellt. Während der Umsetzungsphase des Projektes kam es zu Herausforderungen und Verzögerungen. Die Verzögerungen führten insgesamt dazu, dass es nicht möglich war, das Experiment wie geplant über eine

gesamte Wachstumsperiode durchzuführen. Zudem konnte keine Aussage über die Biomasse oder den Vergleich des Wasserverbrauchs hergestellt werden, da der Testzeitraum zu klein wurde. Aus den aufgezeigten Gründen wurde das Experiment neu geplant.

Das Ziel bei beiden Experimenten auf der biologischen Seite war zu beweisen, dass die durch das System bewässerte Pflanzen bei einer mindestens gleichbleibenden Qualität im Vergleich zur Vergleichsgruppe bleiben. Insgesamt sollte die Pflanzenvitalität zwischen Start- und Endzeitpunkt sowie zur Vergleichsgruppe verglichen werden. Auf der technischen Seite konnte alles wie geplant evaluiert werden. Es sollte die Server-Entscheidungsfindung, die neuen Hardwareboxen mit der Aktorik sowie der neue Kommunikationsweg von Server zur Hardware getestet werden.

## 5.2 Ergebnisse der Experimente

Der neue geplante Experimentverlauf erstreckt sich im Botanischen Garten vom 21.09. bis 31.10.2023. Das Experiment bei Piccoplant lief vom 21.09. bis zum 04.10.2023. Während des Experimentzeitraums wurden die Ergebnisse konsequent überwacht, um Umwelt- oder Systemeffekte zu identifizieren. Auf Grundlage der Prüfung vor Ort wurden auch die Zielgrenzwerte geringfügig angepasst.

Im Botanischen Garten wurde eine Bewässerungsstrategie definiert. Bei Piccoplant wurde eine Kombi-Strategie aus Bewässerung und Düngung aufgesetzt. Die Bewässerung erfolgt in diesem Ansatz mit einer festgelegten Menge von 150 Millilitern pro Durchgang. Diese präzise Dosierung gewährleistet eine gleichmäßige Verteilung der benötigten Flüssigkeit, ohne die Pflanzen zu überfluten oder auszutrocknen.

Die Berechnung des Düngedarfs erfolgt auf Grundlage einer spezifischen Formel, die die Bedürfnisse der Pflanzen in Bezug auf Nährstoffe berücksichtigt. Ein weiteres Element der Strategien ist die regelmäßige Überprüfung, ob die vordefinierten Bedingungen für die Bewässerung und Düngung erfüllt sind. Dies erfolgt in Abständen von 20 Minuten, um sicherzustellen, dass die Pflanzen stets die benötigte Pflege erhalten und die Strategie diese dynamisch an die sich ändernden Bedingungen anpasst.

### 5.2.1 Ergebnisse Piccoplant

Das Experiment bei Piccoplant wurde in einer Halle durchgeführt, wodurch es keine externen Umwelteinflüsse gab, die Einfluss auf die Datenerhebung gehabt hätten. Abbildung 5.1 zeigt die Resultate zwischen dem 24. und 28. September 2023. Die unteren drei Linien in der Grafik repräsentieren Töpfe, die durch das automatisierte Bewässerungssystem versorgt wurden. Die beiden oberen Linien hingegen wurden manuell durch erfahrene Gärtner bewässert.

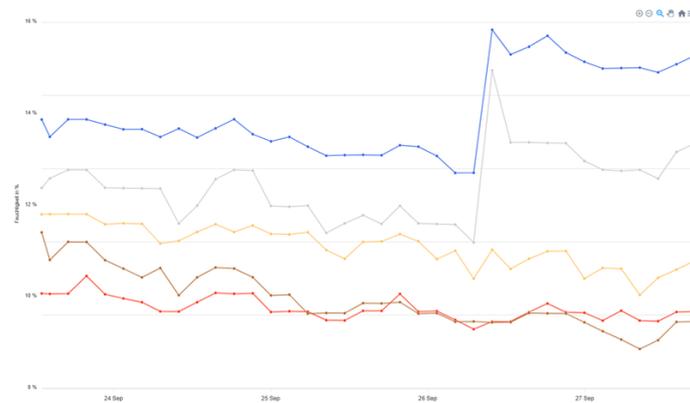


Abbildung 5.1: Ergebnisse des Experiments bei Piccoplant

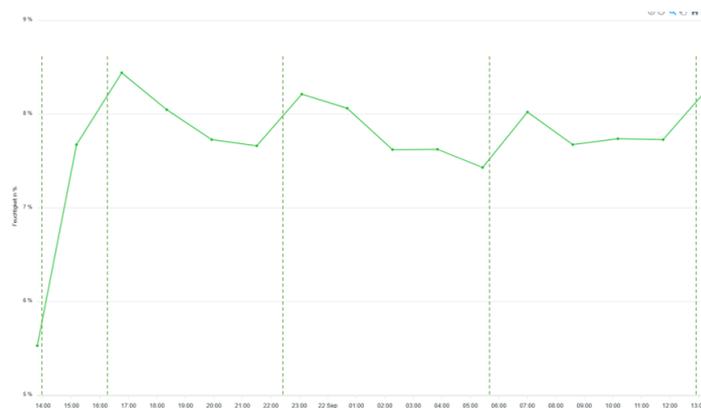


Abbildung 5.2: Ergebnisse von Aktorausführungen bei Piccoplant

Die Untersuchung der manuell bewässerten Fliederpflanzen offenbart, dass es eine Bewässerungsaktivität am 26. September 2023 gab, wie durch den markanten Spitzenwert im Bodenfeuchtigkeitsverlauf deutlich wird. In der Folge nimmt die Bodenfeuchtigkeit rapide wieder ab. Hingegen ist bei den automatisch bewässerten Pflanzen ein konstanter Verlauf zu beobachten, der den vordefinierten Zielwert aufrechterhält. Dieser Zielwert wurde für die unteren beiden Linien auf 10 % festgelegt und wird in Abbildung 5.2 für einen spezifischen Flieder illustriert. Die Aktivierung der Bewässerungsstrategie erfolgte am 21. September 2023. Zu Beginn wurden einige manuelle Ansteuerungen durchgeführt, welche den anfänglichen Anstieg in der Bodenfeuchtigkeit erklären.

Abbildung 5.3 bietet Einblicke in die Zustände der Fliederpflanzen in der Vergleichsgruppe, sowohl vor Beginn als auch nach Abschluss des Experiments. Die Einschätzung der Pflanzenzustände basier-

te auf äußeren, objektiv zu ermittelnden Vitalitätskriterien. Da die Pflanzen bereits am Ende ihrer Wachstumsperiode angelangt waren, zeigten sie während des gesamten Experimentzeitraums keine signifikanten Wachstumsfortschritte. Die Fliederpflanzen präsentierten sich buschig mit mehreren gut entwickelten Trieben. Die Farbgebung der Blätter wurde vor und nach Abschluss des Experiments als gesund und unverändert eingestuft.



*Abbildung 5.3: Pflanzenzustände der Vergleichsgruppe bei Piccoplant*



*Abbildung 5.4: Pflanzenzustände der automatisch bewässerten und gedüngten Pflanzen bei Piccoplant*

Abbildung 5.4 präsentiert die Zustände der automatisch bewässerten Pflanzen, sowohl vor dem Experiment als auch nach dessen Abschluss. Ähnlich wie in der Kontrollgruppe waren auch in dieser Gruppe keine signifikanten Fortschritte im Pflanzenwachstum zu verzeichnen. Die Farbgebung und Qualität der Fliederpflanzen zeigten im Vorher-Nachher-Vergleich mit der Vergleichsgruppe aber minimale Unterschiede.

## 5.2.2 Zwischenergebnisse Botanischer Garten

Das Experiment im Botanischen Garten wurde in einer Drahthalle durchgeführt, die konstruktiv so ausgelegt ist, dass sie natürliche Einflüsse wie Wind und Regen zulässt. Die Reaktionen der Versuchspflanzen auf diese äußeren Umweltfaktoren lassen sich in den erhobenen Datensätzen widerspiegeln. In Abbildung 5.5 werden die Ergebnisse für den Botanischen Garten während des Zeitraums vom 23. bis 25. September 2023 veranschaulicht. Die rote Kurve repräsentiert die Feuchtigkeitsverhältnisse in einem manuell bewässerten Grünkohltopf, während die blaue Kurve die Feuchtigkeitswerte eines Grünkohltopfes darstellt, der automatisch über das Versorgungssystem bewässert wurde.



Abbildung 5.5: Ergebnisse des Experiments im Botanischen Garten

Die rote Linie in Abbildung 5.5 veranschaulicht eine manuelle Bewässerungsaktivität durch einen Gärtner am 24. September 2023. Hierbei ist eine rasche Steigerung der Bodenfeuchtigkeit zu erkennen, die daraufhin schnell wieder abnimmt. Im Gegensatz dazu verfolgt das automatisierte Bewässerungssystem das Ziel einer Bodenfeuchtigkeit von 18 %. Die konkreten Resultate einzelner Bewässerungsausführungen werden in Abbildung 5.6 dargelegt. Dieser Ausführungsverlauf wurde durch eine Neukalibrierung des Zielwerts ausgelöst, wodurch ein neuer Bodenfeuchtigkeitswert von 8 % angestrebt wird.

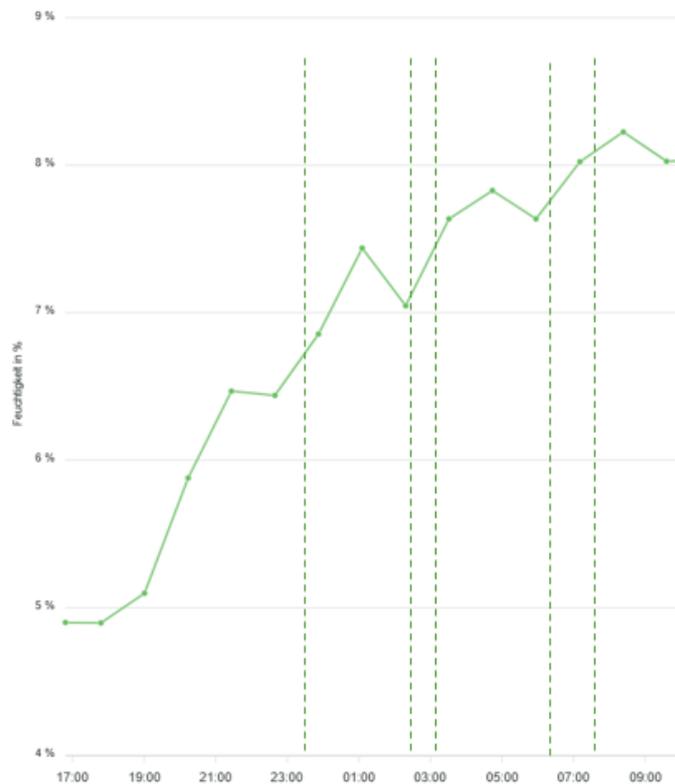


Abbildung 5.6: Ergebnisse von Aktorausführungen im Botanischen Garten

Abbildung 5.7 präsentiert die Zustände der Pflanzen in der Vergleichsgruppe vor dem Beginn und nach dem Abschluss des Experiments. Die Beurteilung des Zustands des Grünkohls erfolgte auf Grundlage zu erfassender Indikatoren, die die Vitalität der Pflanze widerspiegeln. Da der Grünkohl bereits am Ende seiner Wachstumsphase angelangt war, zeigte er keine signifikante Zunahme in seiner Größe. Sowohl die Farbgebung als auch die allgemeine Qualität der Blätter der Vergleichsgruppe waren vor Beginn und nach Abschluss des Experiments nahezu unverändert. Die in Abbildung 5.7 dargestellten Zustände des automatisch bewässerten Grünkohls, sowohl vor Beginn als auch nach Abschluss des Experiments, zeugen von einer vergleichsweise geringen Zuwachsrate im Vergleich zur Vergleichsgruppe. Die Farbgebung und Qualität der Grünkohlblätter zeigten im Vorher-Nachher-Vergleich mit der Vergleichsgruppe nur minimale Unterschiede.



Abbildung 5.7: Pflanzenzustände der Vergleichsgruppe im Botanischen Garten



Abbildung 5.8: Pflanzenzustände der automatisch bewässerten und gedüngten Pflanzen im Botanischen Garten

### 5.2.3 Fazit der Experimente

Die Evaluation der Kombi-Strategie bei Piccoplant und der Bewässerungsstrategie im Botanischen Garten hat zu einer Vielzahl von Erkenntnissen geführt, die sich in verschiedenen Aspekten der Implementierung und Funktionalität des Systems manifestieren. Die Kernkomponenten unserer Bewässerungsstrategie, nämlich die Server-Entscheidungsfindung, die Hardwareboxen und die Kommunikation zwischen Server und Hardware, funktionieren wie geplant. Die Integration und Zusammenarbeit dieser Elemente sind effizient und zuverlässig, was eine stabile Ansteuerung der Aktorik ermöglicht.

Ein Hauptziel des Experiments bestand darin, die Qualität und den Zustand der Pflanzen zu erhalten oder sogar zu verbessern. Die Evaluation bestätigt, dass das System in der Lage ist, eine gleichblei-

bende Qualität der Pflanzen zu gewährleisten. Die Pflanzen zeigen Zustände vergleichbar mit der manuellen Bewässerung. Die Verfügbarkeit und Verständlichkeit der Daten bei beiden Experimenten kann als positiv bewertet, insbesondere aufgrund der Möglichkeiten zur Visualisierung. Aufgrund weniger Umwelteinflüsse sind die Daten bei Piccoplant einfacher zu interpretieren.

Die Langzeitauswirkungen der Düngung müssen noch weiter untersucht werden, um sicherzustellen, dass das System langfristig die Nährstoffversorgung der Pflanzen aufrechterhalten kann. Zur Bewässerung zeigt die Evaluation insgesamt, dass das System in dem Anwendungsfall erfolgreich eingesetzt werden kann.

## 6 Fazit

Das Ziel dieses Projektes war es vor allem ein funktionierendes Regelsystem zu entwickeln, was Pflanzen mit Dünger und Wasser automatisch versorgt. Wie in Abschnitt 5.1 erkennbar wird, wurde ein solches Regelsystem umgesetzt und erfolgreich für die Experimente genutzt.

Darüber hinaus wurde Guerilla Sensing als Basis genutzt und um diverse neue Funktionen erweitert. Der dabei größte Punkt in der Erweiterung ist die neue Funktion der Aktorik. Für diese wurde ein Großteil des bestehenden Systems angepasst. Die erweiterte Version von Guerilla Sensing ist jetzt in der Lage Aktoren an GBoxen anzuschließen und zu nutzen. Zudem wurden GBoxen um die Funktion erweitert, Nachrichten zu empfangen und zu verarbeiten, damit Aktoren Aufträge erhalten und nutzen können.

Der GPlattform ist es nun möglich mittels Strategien Entscheidungen zur Bewässerung und Düngung zu treffen, Aufträge für Aktoren zu erstellen und zu versenden. Außerdem wurde eine Architektur entworfen und implementiert, mit welcher neue Strategien für andere Anwendungsfälle einfach in das System integriert werden können.

Für die Aktorik-Funktionalität wurde der Konfigurator von Guerilla Sensing angepasst, um GBoxen mit Aktoren über die Webseite einzustellen und sich die Software generieren zu lassen. Zusätzlich wurde der Konfigurator um die neue Funktion erweitert, dass GBox Konfigurationen auch nach dem initialen Erstellungsprozess angepasst werden können.

Es wurde ein Konfigurator für Strategien auf der Webseite hinzugefügt, um es Nutzern zu ermöglichen Strategien für Düngung und Bewässerung für die eigenen Umstände einzustellen. Zukünftige weitere Strategien können hier ebenfalls angeboten werden.

Zum Umsetzen der geplanten Kampagnen aus Kapitel 1.4 wurden außerdem die GBoxen um die Funktion erweitert, mehrere Pluggables desselben Typen zuzulassen. Auch wurden die GBoxen mit neuen Treibern ausgestattet, nämlich für den SMT50 und die Peristaltikpumpe.

Für die Kampagnen wurde Hardware entwickelt, die unter anderem nun auf der Webseite zur Verfügung steht. Dort kann ein Platinen-Schaltplan gefunden werden, der von Interessierten heruntergeladen und bestellt werden kann, mit welchem dann eigene Aufbauten mit Bodenfeuchtigkeitssensoren und Pumpen umgesetzt werden können. Auch die Vorlagen für das Design der wasserdichten Boxen und ihrem Inhalt steht dort zur Verfügung.

Schließlich wurde ein Monitoring implementiert, mit dem jeder Nutzer über die Webseite Bedingungen einstellen kann, wenn er über eigene Projekte informiert werden will. So können Hardware oder andere Fehler vermieden bzw. schnell identifiziert und behoben werden.

## 7 Ausblick

Mit den im Rahmen dieser Projektgruppe realisierten Erweiterungen des Guerilla-Sensing-Systems können nun neue Projekte und Experimente umgesetzt werden. Dabei könnte z. B. das System über eine volle Wachstumsperiode einer Pflanze betrieben werden, um biologische Erkenntnisse und Unterschiede zwischen einer automatisierten und einer händischen Pflege zu ermitteln.

Auch Experimente zur Düngung können durchgeführt werden. Durch die gewählte Methode der Düngungsstrategie über Funktionen wäre es möglich, Pflanzen ganz gezielt Nährstoffe zukommen zu lassen. Im Gegensatz zu Feststoffdünger, der kontinuierlich seine Nährstoffe abgibt, könnten Pausen festgelegt werden, wenn Pflanzen in bestimmten Wachstumsphasen keine oder wenig Nährstoffe benötigen.

Weiterhin ist mit dem System die Grundlage geschaffen worden, vollständig neue Anwendungsfälle umzusetzen. Beispielsweise kann Guerilla Sensing in Zukunft auch benutzt werden, um verschiedene Smart-Home Funktionalitäten umzusetzen. Eine Heizungssteuerung mittels Temperaturwerten oder auch das Fenster automatisch unter Berücksichtigung der Luftqualität zu öffnen bzw. zu schließen, sind denkbare Anwendungsmöglichkeiten. Das hat im Gegensatz zu üblichen Smart-Home Möglichkeiten den Vorteil, dass auch dezentrale Informationen genutzt werden können. Beispielsweise könnte die eigene Fenstersteuerung so eingestellt werden, dass das Fenster sich schließt, wenn von einer GBox, die etwas entfernt positioniert ist, schlechte Feinstaubwerte gemessen werden. So könnte im besten Fall verhindert werden, dass diese sich auf die Luftqualität im eigenen Haus auswirken.

Mit der Erweiterung des Guerilla-Sensing-Systems wurde eine Plattform geschaffen, mit der unter Einsatz von Sensorik und Aktorik eine Automatisierung in einem vorliegenden Anwendungsfall realisiert werden kann. Dabei ist die Verwendung der Plattform nicht auf die Domäne der Pflanzenaufzucht und -pflege beschränkt.

---

## Abbildungen

1.1	Erweiterter Regelkreis auf Basis der aktuellen Guerilla-Sensing-Plattform . . . . .	2
2.1	Der Aufbau des Experimentes beim Botanischen Garten . . . . .	7
2.2	Der Aufbau des Experimentes bei Piccoplant . . . . .	7
4.1	Regelkreis einer GBox mit Aktorik und Sensorik (AS) . . . . .	12
4.2	Zeitliche Abgabe verschiedener Feststoffdünger . . . . .	17
5.1	Ergebnisse des Experiments bei Piccoplant . . . . .	20
5.2	Ergebnisse von Aktorausführungen bei Piccoplant . . . . .	20
5.3	Pflanzenzustände der Vergleichsgruppe bei Piccoplant . . . . .	21
5.4	Pflanzenzustände der automatisch bewässerten und gedüngten Pflanzen bei Piccoplant	21
5.5	Ergebnisse des Experiments im Botanischen Garten . . . . .	22
5.6	Ergebnisse von Aktorausführungen im Botanischen Garten . . . . .	23
5.7	Pflanzenzustände der Vergleichsgruppe im Botanischen Garten . . . . .	24
5.8	Pflanzenzustände der automatisch bewässerten und gedüngten Pflanzen im Botani- schen Garten . . . . .	24

## Literatur

- [BBF<sup>+</sup>21] BLANK, C. ; BRANDT, F. ; FORTMANN, Ge. ; HAASE, M. ; HOLT, P. ; HOLTZ, N. ; KEMPF, D. ; KÜPKER, E. ; LANG, K. ; SÄFKEN, P. ; THIEN, P.: Dokumentation zur Projektgruppe Guerilla Sensing Oldenburg and Beyond, 2021
- [BeF23] BEFLE: *BeFle SoMoSe v2.2*. <https://github.com/BeFle/SoMoSe/blob/main/README.md>, 2023. – Zuletzt aufgerufen am 17.10.2023
- [DVS23] DVS BODENFEUCHTE SENSOREN: *Sensorauswahl*. <https://dvs-bodenfeuchte-sensoren.de/pages/sensorauswahl>, 2023. – Zuletzt aufgerufen am 20.04.2023
- [GCS23] GAO, Yunhu ; CABRERA SERRENHO, André: *Greenhouse gas emissions from nitrogen fertilizers could be reduced by up to one-fifth of current levels by 2050 with combined interventions*. <https://www.nature.com/articles/s43016-023-00698-w.epdf>, 2023. – Zuletzt aufgerufen am 12.03.2023
- [Gue21] GUERILLA SENSING: *Guerilla Sensing*. <https://www.guerilla-sensing.de/>, 2021. – Zuletzt aufgerufen am 06.12.2022
- [IPC18] In: IPCC: *Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, 2018, S. 1–24
- [IPC22] In: IPCC: *Summary for Policymakers*. Cambridge University Press, 2022, S. 1–24
- [Kuh09] KUHNERT, Matthias: *Quantifizierung von Oberflächenabfluss und Erosion auf Böden mit hydrophoben Eigenschaften*, Universität Potsdam, doctoralthesis, 2009
- [Neu] NEUFDAYYY: *Neufdayyy Boden-NPK-Sensor*. [https://www.amazon.de/NEUFDAY-Boden-NPK-Sensor-hochpr%C3%A4ziser-Boden-N%C3%A4hrstoff-intelligenter-D%C3%BCngemittel-Detektor-Pr%C3%BCfvorrichtung-Meter-NPK-Sensor/dp/B0836WTN59/ref=sr\\_1\\_1?\\_\\_mk\\_de\\_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2YBW3N8XCFUIV&keywords=neufdayyy+NPK&qid=1697533351&sprefix=neufdayyy+npk%2Caps%2C146&sr=8-1,](https://www.amazon.de/NEUFDAY-Boden-NPK-Sensor-hochpr%C3%A4ziser-Boden-N%C3%A4hrstoff-intelligenter-D%C3%BCngemittel-Detektor-Pr%C3%BCfvorrichtung-Meter-NPK-Sensor/dp/B0836WTN59/ref=sr_1_1?__mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crid=2YBW3N8XCFUIV&keywords=neufdayyy+NPK&qid=1697533351&sprefix=neufdayyy+npk%2Caps%2C146&sr=8-1,) . – Zuletzt aufgerufen am 17.10.2023
- [PLA] PLANTURA MAGAZIN: *Wichtige Wachstumsfaktoren für Pflanzen*. [https://www.plantura.garden/gruenes-leben/wissen/wachstumsfaktoren-fuer-pflanzen,](https://www.plantura.garden/gruenes-leben/wissen/wachstumsfaktoren-fuer-pflanzen) . – Zuletzt aufgerufen am 18.02.2023
- [pum] *Peristaltische Flüssigkeitspumpe G528 DC12V Mini Dosierpumpe 0-23 ml/min 0-65 ml/min 0-150 ml/min Peristaltikpumpe für Bio-Technik im Labor (Typ C)*.

- 
- [https://www.amazon.de/Yanmis-Schlauchpumpe-Qualit%C3%A4t-Labor-Bioengineering-32x23mm/dp/B07XLMK4R2/ref=sr\\_1\\_5](https://www.amazon.de/Yanmis-Schlauchpumpe-Qualit%C3%A4t-Labor-Bioengineering-32x23mm/dp/B07XLMK4R2/ref=sr_1_5), . – Zuletzt aufgerufen am 17.10.2023
- [Sco23] SCOTTS: *Osmocote Plus Controlled Release Fertilizer*. [https://greenhouse.hosted.uark.edu/Unit08/images/H5124\\_spec.pdf](https://greenhouse.hosted.uark.edu/Unit08/images/H5124_spec.pdf), 2023. – Zuletzt aufgerufen am 11.10.2023
- [Ter23] TERTILT, Mathias: *So eine große wirkung hat so Wenig CO2*. <https://www.quarks.de/umwelt/klimawandel/so-eine-grosse-wirkung-hat-so-wenig-co2/>. Version: Feb 2023
- [tru] TRUEBNER: *SMT50 Bodenfeuchtesensor*. [https://www.truebner.de/assets/download/SMT50\\_Flyer\\_DE.pdf](https://www.truebner.de/assets/download/SMT50_Flyer_DE.pdf), . – Zuletzt aufgerufen am 16.10.2023
- [TTG] LILYGO® *TTGO T-Call V1.4 ESP32 Wireless Module SIM Antenna SIM Card SIM800L Module*. <https://eckstein-shop.de/LILYGOC2AETTGOT-CallV14ESP32WirelessModuleSIMAntennaSIMCardSIM800LModule>, . – Zuletzt aufgerufen am 18.10.2023
- [Umw22] UMWELTBUNDESAMT: *Düngemittel*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/landwirtschaft/umweltbelastungen-der-landwirtschaft/duengemittel#gefahren-fur-die-umwelt>, 2022. – Zuletzt aufgerufen am 11.10.2023
- [Wil13] WILKE, Sibylle: *Energiebedingte Emissionen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energiebedingte-emissionen>. Version: Aug 2013
- [Zed11] ZEDER, Melinda A.: The Origins of Agriculture in the Near East. In: *Current Anthropology* 52 (2011), Nr. S4, S221-S235. <http://dx.doi.org/10.1086/659307>. – DOI 10.1086/659307