

Abschlussbericht

AZ 35502/35

Projekttitle:

Produktion, Erprobung und Verbreitung des neuartigen
Bodenfeuchtemesssystems Plantobelly als SmartCity-kompatibler
Sensor im Wurzelraum von Großbäumen im urbanen Raum

Förderzeitraum:

August 2021 bis August 2023

Projektteam:

Bastian Klemke Gründer und Geschäftsführer der Plantobelly UG
Christian Hahn Gründer und Geschäftsführer der Plantobelly UG

Inhaltsverzeichnis

1.1 Hintergrund und Zielsetzung.....	3
1.2 Projektumfang und Arbeitspakete.....	3
1.2.1 Sensor-Design und Entwicklung.....	4
1.2.2 Hardware-Entwicklung.....	4
1.2.3 Web-Plattform-Entwicklung.....	4
1.2.4 Systemintegration und Tests.....	4
1.2.5 Zusammenarbeit mit Stadtverwaltungen und Implementierung.....	4
1.3 Projektziele und erwartete Ergebnisse.....	5
1.3.1 Entwicklung hochpräziser Bodenfeuchtigkeitssensoren.....	5
1.3.2 Gestaltung einer robusten Hardware-Plattform.....	5
1.3.3 Entwicklung einer benutzerfreundlichen Web-Plattform.....	5
1.3.4 Erfolgreiche Systemintegration und Implementierung.....	5
2.1 Methodik zur Entwicklung der Bodenfeuchtigkeitssensoren und Hardware-Plattform	7
2.1.1 Anforderungsanalyse.....	7
2.1.2 Konzeptentwicklung und Prototypenbau.....	7
2.1.3 Validierung der Sensoren.....	7
2.1.4 Integration der Sensoren in die Hardware-Plattform.....	8
2.1.5 Entwicklung der Web-Plattform.....	8
2.1.6 Messmethodik.....	8
2.2: Entwicklung der eigenen Hardware.....	9
2.3: Entwicklung der Web-Plattform.....	11
3.1: Forschungsdesign.....	11
3.2: Datenerhebung.....	12
3.3: Analysemethoden.....	12
3.4: Validierung der Ergebnisse.....	12
4.1: Analyse der Daten.....	13
4.2: Darstellung und Interpretation der Ergebnisse.....	13
4.3: Beantwortung der Forschungsfragen.....	13
5.1: Interpretation der Ergebnisse.....	13
5.2: Implikationen und Bedeutung der Ergebnisse.....	13

1.1 Hintergrund und Zielsetzung

Das Projekt Plantobelly konzentriert sich auf die Entwicklung von Bodenfeuchtigkeitssensoren und einer dazugehörigen Hard- und Software, um die Feuchtigkeitswerte im Wurzelbereich von Straßenbäumen und Stadtbegrünung zu messen. Durch die immer wärmer und vor allem trockener werdenden Sommer erleiden Straßenbäume Trockenstress, spielen aber eine immer wichtigere Rolle für die städtische Umwelt. So bieten Sie zahlreiche Vorteile wie die Filterung der Luft, sie spenden Schatten, kühlen die Umgebung ab und verhindern eine starke Austrocknung des Bodens. Um das Wachstum und die Gesundheit von Straßenbäumen zu gewährleisten, ist eine ausreichende Bodenfeuchtigkeit von entscheidender Bedeutung. Hierbei gilt es die Ressource Wasser optimal einzusetzen.

Es sind verschiedene Methoden zur Messung der Bodenfeuchtigkeit am Markt vorhanden, doch erweisen sich diese teilweise als zeitaufwendig, ungenau oder zu teuer um eine Skalierung der Messungen realisieren zu können. Daher wurde mit dem Projekt "Plantobelly" die Entwicklung eines Sensors angestrebt, der präzise, kostengünstig und einfach zu verwenden ist. Diese Sensoren werden in Kombination mit eigens entwickelter Hardware eingesetzt, um die Feuchtigkeitswerte kontinuierlich und automatisch im Wurzelbereich von Straßenbäumen zu erfassen.

Zusätzlich zur Sensor- und Hardwareentwicklung wurde im Rahmen dieses Projekts eine Web-Plattform erstellt. Diese Plattform dient als zentrales Instrument zur Visualisierung und Analyse der gesammelten Feuchtigkeitsdaten. Stadtverwaltungen, Gartenbauunternehmen und andere interessierte Akteure können über die Plattform auf Echtzeitdaten zugreifen und Entscheidungen treffen, um die Bewässerung von Straßenbäumen zu optimieren und eine nachhaltige Grünflächenverwaltung zu ermöglichen.

Die Hauptziele des Projekts Plantobelly sind:

- Entwicklung hochpräziser Bodenfeuchtigkeitssensoren, die speziell für den Einsatz im Wurzelbereich von Straßenbäumen optimiert sind.
- Konzeption und Umsetzung einer robusten und kostengünstigen Hardwarelösung zur Integration der Sensoren und Datenübertragung.
- Ein System zu entwickeln, welches einfach skalierbar ist.
- Erstellung einer benutzerfreundlichen Web-Plattform zur Visualisierung und Analyse der Feuchtigkeitsdaten in Echtzeit.
- Evaluation der Leistungsfähigkeit des Systems in realen Umgebungen und Zusammenarbeit mit Stadtverwaltungen zur Implementierung und Nutzung der entwickelten Lösung.
- Mit der Realisierung dieser Ziele wird das Projekt "Plantobelly" dazu beitragen, die Bewässerung von Straßenbäumen zu optimieren, Ressourcen effizienter zu nutzen und das Stadtbild durch eine gesunde und gepflegte Baumlandschaft zu verbessern.

1.2 Projektumfang und Arbeitspakete

Der Projektumfang von "Plantobelly" umfasst eine Reihe von Arbeitspaketen, die im Folgenden näher erläutert werden. Diese Arbeitspakete bilden die grundlegenden Schritte und Aktivitäten, die erforderlich sind, um das Projekt erfolgreich abzuschließen.

1.2.1 Sensor-Design und Entwicklung

In diesem Arbeitspaket wird das Sensor-Design für die Bodenfeuchtmessung von Straßenbäumen entwickelt. Es werden verschiedene Technologien und Materialien evaluiert, um einen hochpräzisen und zuverlässigen Sensor zu konstruieren. Die Anforderungen an den Sensor werden definiert, Prototypen werden gebaut und umfangreiche Tests werden durchgeführt, um die Funktionalität und Genauigkeit sicherzustellen.

1.2.2 Hardware-Entwicklung

Die Hardware-Entwicklung fokussiert auf die Gestaltung einer robusten und kostengünstigen Plattform, die die Bodenfeuchtigkeitssensoren integriert und die Datenübertragung ermöglicht. Komponenten sind ausgewählt, Schaltpläne erstellt und ein Prototypen entwickelt. Die Hardware ist so konstruiert, dass sie langlebig, energieeffizient und einfach zu installieren ist.

1.2.3 Web-Plattform-Entwicklung

Die Entwicklung der Web-Plattform umfasst die Erstellung einer benutzerfreundlichen Schnittstelle zur Visualisierung und Analyse der gesammelten Feuchtigkeitsdaten. Hierzu wurden Datenbanken eingerichtet, APIs implementiert und Funktionen entwickelt, um die Daten in Echtzeit darzustellen. Die Plattform hat das Ziel intuitiv bedienbar zu sein und es den Nutzern zu ermöglichen, individuelle Einstellungen vorzunehmen und benutzerdefinierte Berichte zu generieren.

1.2.4 Systemintegration und Tests

In diesem Arbeitspaket werden die entwickelten Sensoren, die Hardware und die Web-Plattform miteinander integriert. Es werden umfassende Tests durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Komponenten reibungslos zusammenarbeiten. Dabei wird die Leistungsfähigkeit des Systems in realen Umgebungen evaluiert und mögliche Optimierungen werden identifiziert.

1.2.5 Zusammenarbeit mit Stadtverwaltungen und Implementierung

Um die Anwendung und Implementierung der entwickelten Lösung in der Praxis zu gewährleisten, wird eng mit Stadtverwaltungen und anderen relevanten Akteuren zusammengearbeitet. Es werden Schulungen und Workshops angeboten, um das System vorzustellen und die Vorteile einer optimierten Bewässerung von Straßenbäumen zu vermitteln. Feedback und Anforderungen der Stakeholder werden berücksichtigt, um eine erfolgreiche Implementierung zu gewährleisten.

Durch die Aufteilung des Projekts in diese Arbeitspakete wird ein strukturierter Ansatz verfolgt, um die Entwicklung der Bodenfeuchtigkeitssensoren, der Hardware und der Web-Plattform effizient voranzutreiben. Der Projektumfang ermöglicht es, die gesteckten Ziele innerhalb des definierten Zeitrahmens zu erreichen und einen nachhaltigen Nutzen für die Pflege und Gesundheit von Straßenbäumen zu schaffen.

1.3 Projektziele und erwartete Ergebnisse

Unser Projekt verfolgt klare Ziele, die im Folgenden dargestellt werden. Diese Ziele sind entscheidend, um den Erfolg des Projekts zu messen und den erwarteten Nutzen für die Zielgruppe zu erzielen.

1.3.1 Entwicklung hochpräziser Bodenfeuchtigkeitssensoren

Ein Hauptziel des Projekts ist die Entwicklung von hochpräzisen Bodenfeuchtigkeitssensoren, die speziell für die Messung der Feuchtigkeit im Wurzelbereich von Straßenbäumen konzipiert sind. Diese Sensoren sollen eine genaue Erfassung der Bodenfeuchtwerte ermöglichen, um eine optimale Bewässerung der Bäume zu gewährleisten und Wasserverschwendung zu reduzieren.

1.3.2 Gestaltung einer robusten Hardware-Plattform

Ein weiteres Ziel ist die Gestaltung einer robusten und langlebigen Hardware-Plattform, die die Bodenfeuchtigkeitssensoren integriert und eine zuverlässige Datenübertragung ermöglicht. Die Hardware soll den Anforderungen des Einsatzes im Freien standhalten, energieeffizient sein und eine einfache Installation ermöglichen.

1.3.3 Entwicklung einer benutzerfreundlichen Web-Plattform

Die Entwicklung einer benutzerfreundlichen Web-Plattform steht ebenfalls im Fokus des Projekts. Diese Plattform soll es den Nutzern ermöglichen, die gesammelten Feuchtigkeitsdaten in Echtzeit zu visualisieren, zu analysieren und benutzerdefinierte Berichte zu generieren. Die Schnittstelle soll intuitiv gestaltet sein und verschiedene Funktionen bieten, um eine effektive Überwachung und Verwaltung der Bewässerung von Straßenbäumen zu ermöglichen.

1.3.4 Erfolgreiche Systemintegration und Implementierung

Ein zentrales Ziel ist die erfolgreiche Integration der entwickelten Sensoren, der Hardware und der Web-Plattform zu einem funktionierenden System. Das integrierte System soll in realen Umgebungen getestet und optimiert werden, um sicherzustellen, dass es zuverlässig und effektiv arbeitet. Die Implementierung des Systems bei Stadtverwaltungen und anderen relevanten Akteuren ist ein weiterer Schwerpunkt, um den nachhaltigen Einsatz der Lösung sicherzustellen.

Erwartete Ziele:

- **Verbesserte Bewässerungspraktiken für Straßenbäume:**
Durch die genaue Messung der Bodenfeuchtigkeit im Wurzelbereich kann die Bewässerung des Stadtgrüns optimiert werden, der Wasserverbrauch reduziert, oder entsprechend effizient gelant werden, so dass das Wachstum und die Gesundheit des Stadtgrüns gefördert wird.
- **Reduzierung von Wasserverschwendung:**

Durch eine präzise Bewässerung wird die Wassergabe optimiert, da nur die erforderliche Menge an Wasser verwendet wird. Dies trägt zur Nachhaltigkeit der Wasserressourcen bei und unterstützt umweltfreundliche Praktiken. Hier ist ein Beispiel aus der Hansestadt Lübeck als Beispiel für eine Bewässerungsstrategie zu nennen. Unser Teststraßenbaum wird von einem Garten- und Landschaftsunternehmen gepflegt, und ist mit 12 Bewässerungsgängen im Jahr beauftragt. In der Graphik ist zu erkennen, dass diesem auch nachgekommen ist, nur sind die Bewässerungen vor dem Vegetationsende verbraucht. Deutlich zu erkennen ist, dass die Feuchtigkeit im August / September abfällt und der Baum in Trockenstress geriet. Durch eine intelligente Bewässerung wäre ein strecken der Gießgänge auf alle 4 Wochen optimal gewesen.

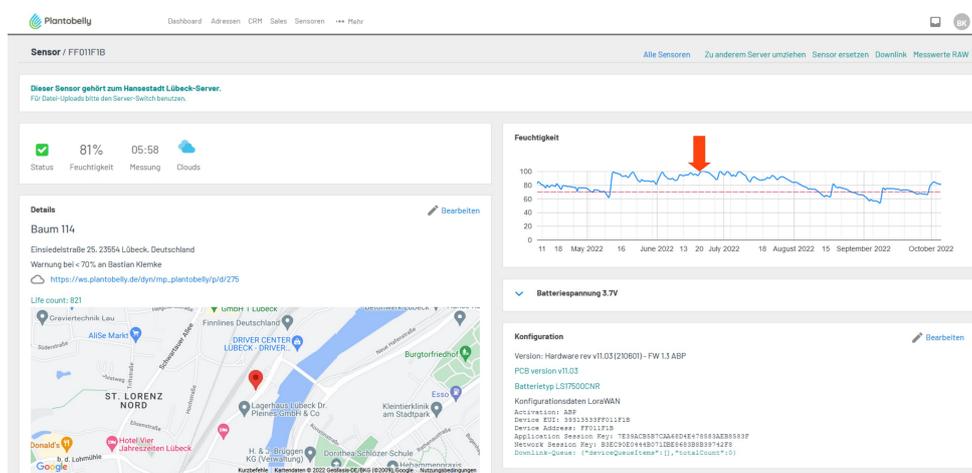


Bild 1 Feuchtigkeitskurve Straßenbaum

- **Effektive Überwachung und Verwaltung:**
Die Web-Plattform ermöglicht eine effektive Überwachung und Verwaltung der Feuchtigkeitsdaten. Dies erleichtert den Verantwortlichen die Entscheidungsfindung und ermöglicht eine rechtzeitige Reaktion auf Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit, siehe auch Bild 1.
- **Langfristige Baumpflege:**
Durch die kontinuierliche Messung und Überwachung der Bodenfeuchtigkeit können potenzielle Probleme frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen ergriffen werden, um die Gesundheit und Langlebigkeit der Straßenbäume zu gewährleisten.

Ein positiver Effekt auf die Umwelt wird sich mit diesem Projekt dadurch einstellen, dass die Effizienz der Bewässerung verbessert, die Umweltbelastung reduziert und das städtische Ökosystem nachhaltig unterstützt wird.

2.1 Methodik zur Entwicklung der Bodenfeuchtigkeitssensoren und Hardware-Plattform

Die Entwicklung der Bodenfeuchtigkeitssensoren und der zugehörigen Hardware-Plattform erfolgt in mehreren Schritten, um sicherzustellen, dass die gesteckten Ziele erreicht werden.

2.1.1 Anforderungsanalyse

Zu Beginn des Entwicklungsprozesses wurden detaillierte Anforderungen an die Bodenfeuchtigkeitssensoren und die Hardware-Plattform definiert. Dies beinhaltete die Festlegung der gewünschten Genauigkeit der Feuchtigkeitsmessung, die Robustheit der Hardware, die Energieeffizienz und die Integration der Sensoren in das Gesamtsystem und dessen einfache Skalierbarkeit. Die Anforderungsanalyse berücksichtigte auch die Benutzerfreundlichkeit der Web-Plattform, um eine intuitive Bedienung und einen Mehrwert für die Nutzer zu gewährleisten.

2.1.2 Konzeptentwicklung und Prototypenbau

Im Fokus der Entwicklung stand die Genauigkeit, Langlebigkeit und die Skalierbarkeit des Sensors. Basierend auf diesen Anforderungen wurden mehrere Konzepte für die Bodenfeuchtigkeitssensoren und die Hardware-Plattform erstellt und es kristallisierte sich die Kapazitive Messmethode als für unsere Anforderungen optimal heraus. Die kapazitive Messmethode, die die elektrische Kapazität des Bodens nutzt und mit steigender Bodenfeuchtigkeit zunimmt zeigt sich als sehr genau, schnell und vor allem leicht zu handhaben. Diese Methode ermöglichte eine präzise Messung der Feuchtigkeit im Wurzelbereich von Straßenbäumen. Dieses Konzept wurde anschließend in dem Prototypen umgesetzt, getestet und um die Machbarkeit und Leistungsfähigkeit des Sensors überprüft. Der Prototypenbau und die anschließenden Feldtestungen erfolgten iterativ, wobei jede Iteration zu Verbesserungen und Optimierungen führte.

2.1.3 Validierung der Sensoren

Die entwickelten Bodenfeuchtigkeitssensoren wurden in verschiedenen Umgebungen und Bodenbedingungen getestet, um ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu validieren. Ferner standen für diesen Test Sensorinstallationen in der Stadt Lübeck, Hamburg und Norderstedt zur Verfügung. Bei diesen Tests wurden die entsprechenden Bepflanzungen besonders beobachtet und dessen Reaktion auf die Bodenfeuchtigkeit dokumentiert. So konnte bei den Linden festgestellt werden, dass diese die Silberschicht der Blätter nach außen drehen, sobald die Bodenfeuchtigkeit unter einen bestimmten Wert gefallen ist. Auch konnte die Bodenfeuchtigkeit des Straßenzugs ermittelt werden und auf diese Weise besonders Trockenheitsgefährdete Bereiche ermittelt werden. Diese Ergebnisse sind in die Entwicklung des Web-Services eingeflossen, sodass kritische Bodenzustände schnell erkannt werden.

2.1.4 Integration der Sensoren in die Hardware-Plattform

Nach erfolgreicher Validierung wurden die Bodenfeuchtigkeitssensoren in die Hardware-Plattform integriert. Leider stellten sich die genutzten Gehäuse als nicht 100% Wasserdicht heraus, und es kam zu Sensorausfällen aufgrund von Feuchtigkeit im Gehäuse. Aus diesem Grund stand die Entscheidung, ob ein Gehäuse selbst entwickelt und produziert wird, oder ob es ein auf die Bedarfe von Plantobelly angepasstes Gehäuse gekauft wird. Aufgrund der hohen Kosten für ein eigenentwickeltes Gehäuse, entschieden wir uns für ein auf Plantobelly angepasstes Standardgehäuse.

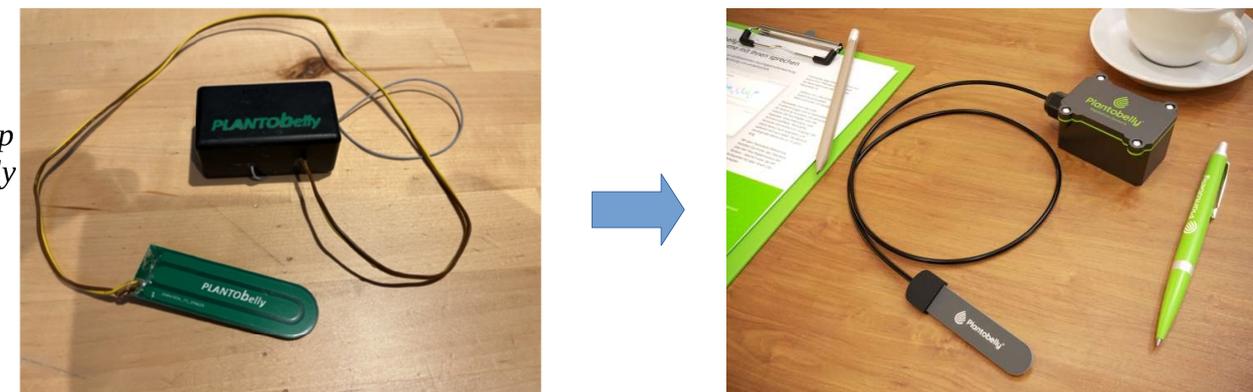


Schaubild
1: Prototyp
Plantobelly

2.1.5 Entwicklung der Web-Plattform

Parallel zur Hardware-Plattform wurde die benutzerfreundliche Web-Plattform entwickelt. Die Entwicklung einer intuitiven Benutzeroberfläche mit leicht verständlichen und umfassenden Informationen lag in Fokus. In der Webplattform werden sämtliche Messwerte gesammelt, mit Wetterdaten angereichert und in Graphiken visualisiert. Die Web-Plattform wurde mit Funktionen zur automatisierten Warnung bei kritischer Feuchtigkeit und zur Integration mit anderen Baumpflegepraktiken ausgestattet, um ein umfassendes Werkzeug für die Baumpflege zu bieten.

2.1.6 Messmethodik

Die Methodik zur Entwicklung der Bodenfeuchtigkeitssensoren und der Hardware-Plattform legte den Grundstein für den erfolgreichen Einsatz des Plantobelly-Systems zur Messung der Feuchtigkeit im Wurzelbereich von Straßenbäumen und zur Verbesserung der Baumpflege. Durch die Verwendung der kapazitiven Messmethode, die die elektrische Kapazität des Bodens nutzt, konnte eine präzise und zuverlässige Messung der Bodenfeuchtigkeit erreicht werden.

Die Messung der Bodenfeuchtigkeit über die elektrische Kapazität basiert auf dem Prinzip, dass die Feuchtigkeit im Boden die elektrische Kapazität beeinflusst. Feuchter Boden enthält eine höhere Menge an gelösten Ionen, die die elektrische Leitfähigkeit erhöhen und somit die Kapazität des Bodens verändern. Dieser Effekt wird genutzt, um Rückschlüsse auf die Bodenfeuchtigkeit zu ziehen.

Im Vergleich zu anderen Messmethoden wie der Saugspannung oder dem elektrischen Widerstand bietet die Messung der Bodenfeuchtigkeit über die elektrische Kapazität mehrere Vorteile:

- **Präzision:** Die kapazitive Messmethode ermöglicht eine präzise und empfindliche Messung der Bodenfeuchtigkeit. Da die Kapazität des Bodens eng mit dem Feuchtigkeitsgehalt korreliert, kann eine genaue Feuchtigkeitsmessung im Wurzelbereich von Straßenbäumen durchgeführt werden.
- **Unabhängigkeit von Bodeneigenschaften:** Im Gegensatz zur Messung der Saugspannung oder des elektrischen Widerstands ist die kapazitive Messmethode weniger anfällig für Unterschiede in der Bodenzusammensetzung. Sie liefert zuverlässige Messergebnisse unabhängig von Bodentypen oder anderen Faktoren, die die elektrische Leitfähigkeit oder den Widerstand beeinflussen könnten.
- **Einfache Installation und Nutzung:** Die Verwendung von kapazitiven Bodenfeuchtigkeitssensoren erfordert keine komplexen Installationsverfahren. Die Sensoren können einfach in den Boden eingeführt werden, um die Messungen durchzuführen. Die Messergebnisse können dann direkt auf der Web-Plattform angezeigt und analysiert werden.



- **Langfristige Stabilität:** Die Messung der Bodenfeuchtigkeit über die elektrische Kapazität bietet eine langfristige Stabilität der Messergebnisse. Die Sensoren sind weniger anfällig für Verschleiß elektrischen Widerstands, bei der sich die Elektroden im Laufe der Zeit abnutzen können. Durch die Verwendung der kapazitiven Messmethode zur Erfassung der Bodenfeuchtigkeit bietet oder Veränderungen im Boden im Vergleich zu anderen Methoden wie der Messung des das "Plantobelly"-Projekt eine zuverlässige und präzise Lösung für die Überwachung der Feuchtigkeit im Wurzelbereich von Straßenbäumen.

2.2: Entwicklung der eigenen Hardware

Bei der Entwicklung der Hardware wurde die Entscheidung zur Eigenentwicklung getroffen. Diese Entscheidung ist aus mehreren Gründen zu Gunsten der „Make“-Entscheidung ausgefallen.

- Verschiedene Test mit Fremdhardware erbrachte unzuverlässige Ergebnisse
- Hohe Abhängigkeit von Dritten
- lange Lieferketten
- Geringe Fertigungstiefe
- Bei Kauf ist keine Wiederverwendung der Bauteile möglich (Wegwerfprodukt)

Hardwareentwicklung:

- **Sensor-Design:** Das Sensor-Design basierte auf der kapazitiven Messmethode zur Erfassung der Bodenfeuchtigkeit. Es wurden spezielle kapazitive Sensoren entwickelt, die in den Boden eingeführt wurden und in der Lage waren, die Änderungen der elektrischen Kapazität zu messen. Durch die Optimierung des Designs konnten präzise und zuverlässige Messergebnisse erzielt werden.
- **Mikrocontroller-Einheit:** Um die Sensordaten zu erfassen, zu verarbeiten und zu übermitteln, wurde eine Mikrocontroller-Einheit in die Hardware integriert. Diese Einheit ermöglichte die Kommunikation mit den Bodenfeuchtigkeitssensoren und die Übertragung der Messdaten an die Web-Plattform. Diese Einheit wurde so entwickelt, dass diese eine besonders hohe Energieeffizienz aufweist um eine möglichst lange Zeit an der Bepflanzung verbleiben zu können.
- **Energieversorgung und Energieeffizienz:** Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung der Hardware war die Optimierung der Energieeffizienz, um eine langfristige und zuverlässige Funktionalität zu gewährleisten. Durch den Einsatz energieeffizienter Komponenten und intelligenter Energiesparmechanismen konnte der Energieverbrauch minimiert werden. Dadurch war es möglich, eine Batterie zu verwenden, die eine Lebensdauer von bis zu 10 Jahren ermöglichte. Dies war besonders wichtig, um den Wartungsaufwand für die Hardware zu reduzieren und eine langfristige Datenerfassung zu gewährleisten.
- **Schutz und Robustheit:** Da die Hardware im Außenbereich eingesetzt wurde, musste sie robust und gegen Umwelteinflüsse geschützt sein. Es wurden geeignete Gehäuse und Schutzmechanismen entwickelt, um die Sensoren und die Elektronik vor Feuchtigkeit, Staub und mechanischer Beanspruchung zu schützen.
- Darüber hinaus wurden im Rahmen der Entwicklung verschiedene Varianten zur Übermittlung der Messdaten untersucht. Dabei wurden zwei Sendungsverfahren besonders betrachtet: LoRaWAN und NarrowBand.
 - **LoRaWAN:** LoRaWAN steht für "Long Range Wide Area Network" und ermöglicht eine drahtlose Kommunikation über große Entfernungen mit

niedrigem Energieverbrauch. Es wurde ein Sensor in der Hardwarevariante entwickelt, der die Messdaten per LoRaWAN an ein Gateway überträgt. Vorteile dieses Verfahrens sind die hohe Reichweite, die Energieeffizienz und die Möglichkeit, große Datenmengen zu übertragen. Jedoch kann die Übertragungsgeschwindigkeit begrenzt sein und die Verfügbarkeit von LoRaWAN - Netzwerken variiert je nach Standort. Nachteil ist ebenfalls die Abhängigkeit von Dritten.

- NarrowBand: NarrowBand bezeichnet eine schmalbandige Funktechnologie, die speziell für die Übertragung von kleinen Datenmengen über große Entfernungen entwickelt wurde. Im Sommer 2022 wurde eine weitere Variante der Hardware entwickelt, die die Messdaten per NarrowBand übermittelt. Vorteile dieses Verfahrens sind die hohe Durchdringungsfähigkeit von Gebäuden und die gute Verfügbarkeit der Netzwerkinfrastruktur. Allerdings ist die Übertragungsgeschwindigkeit geringer als bei LoRaWAN.

Durch die Optimierung der Energieeffizienz und die Wahl des geeigneten Sendungsverfahrens konnte eine effektive und langfristige Datenerfassung ermöglicht werden. Es wurde in Rahmen des Projektes festgestellt, dass ein optimales Sendeintervall bei ca. 6 -12 Stunden liegt. Bei dieser Einstellung werden Messdaten in erforderlicher Dichte erhoben und die Batterie maximal an Leben gehalten.

Die Entwicklung der eigenen Hardware im Plantobelly ermöglicht die präzise Messung der Bodenfeuchtigkeit von Straßenbäumen und liefert wertvolle Daten für die Entscheidungsfindung im Bereich der Baumpflege und Bewässerung.

2.3: Entwicklung der Web-Plattform

Die eigens entwickelte Webplattform ist eine Ergänzung zu dem Plantobelly und soll dem Kunden helfen die empfangenen Daten zu erfassen, zu visualisieren, analysieren und zu verwalten. Die Entwicklung der Web-Plattform umfasste folgende Aspekte:

- **Datenmanagement und Speicherung:** Die erfassten Bodenfeuchtigkeitsdaten wurden in einer Datenbank gespeichert, um eine effiziente und zuverlässige Datenverwaltung zu ermöglichen. Die Datenbankstruktur wurde entsprechend den Anforderungen des Projekts entworfen, um eine optimale Speicherung und Abfrage der Messdaten zu gewährleisten.
- **Visualisierung und Analyse:** Die Web-Plattform ermöglichte die Visualisierung der Bodenfeuchtigkeitsdaten in Form von Diagrammen, Grafiken oder Kartenansichten. Dadurch konnten Benutzer die zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchtigkeit verfolgen und Muster oder Abweichungen erkennen. Zusätzlich wurden Analysetools integriert, um statistische Auswertungen und Trendanalysen durchzuführen.
- **Benutzerfreundlichkeit und Zugriffsrechte:** Die Web-Plattform wurde mit einem benutzerfreundlichen Interface gestaltet, das eine einfache Navigation und Interaktion ermöglichte. Verschiedene Benutzergruppen wie Stadtgärtner, Baumpfleger oder Verwaltungsmitarbeiter erhielten Mandanten bezogene Zugriffsrechte, um auf die Daten zuzugreifen und relevante Informationen für ihre jeweiligen Aufgabenbereiche abzurufen.
- **Alarmfunktionen und Benachrichtigungen:** Um eine effektive Überwachung der Bodenfeuchtigkeit zu gewährleisten, wurden Alarmfunktionen implementiert. Bei Unterschreitung bestimmter Grenzwerte erhielten die Benutzer automatische Benachrichtigungen, um rechtzeitig Maßnahmen ergreifen zu können. Dies trug zur effizienten Bewässerung und Pflege der Straßenbäume bei, da auf die Trockenheit reagiert werden konnte, bevor der Baum in Trockenstress geriet.
- **Die Entwicklung der Web-Plattform ermöglichte eine zentrale Erfassung, Verwaltung und Auswertung der Bodenfeuchtigkeitsdaten von Straßenbäumen.** Durch die Bereitstellung von aussagekräftigen Informationen unterstützte die Plattform die Entscheidungsfindung im Bereich der Baumpflege und Bewässerung, um eine gesunde und nachhaltige Entwicklung der städtischen Grünflächen zu fördern.

Sensor / VertiGIS GmbH / FF037578 Alle Sensoren Tools

✔ **77%** 14:45

Status Feuchtigkeit Messung Clouds

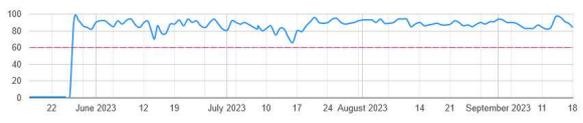
Details Bearbeiten

Strauch 2

An d. Loh 10, 23617 Stockelsdorf, Deutschland
Warnung bei < 60% an Bastian Klemke
#Lühr
https://ws.plantobelly.de/dyn/mp_plantobelly/p/d/877
Life count: 5765
#batch230106



Feuchtigkeit



Konfiguration Bearbeiten

Sendintervall 03:20
Aktivierungs-Code YMAM6XPSXX
Konfigurationsdaten LoRaWAN
Activation: 07AA
Device EUI: 50498249FF037578
Application Key: TE339ACB87C3A6624E478583AEB8553F
App / Join EUI: 706C61E0746F6265

Messwerte Seite 1 / 43

QUELLE	BODENFEUCHTIGKEIT	WETTER	LUFTTEMPERATUR	LUFTFEUCHTE	WOLKEN	REGEN (1H)	TIMESTAMP
Helium	77%		23°C	65%	40%	0mm	18.09.23 14:45
Helium	78%		22°C	66%	0%	0mm	18.09.23 11:24
Helium	84%		18°C	77%	0%	0mm	18.09.23 08:03
Helium	86%		18°C	79%	20%	0mm	18.09.23 04:43
Helium	84%		19°C	76%	20%	0mm	18.09.23 01:23
Helium	83%		21°C	72%	75%	0mm	17.09.23 22:03
Helium	81%		23°C	66%	0%	0mm	17.09.23 18:42
Helium	78%		24°C	56%	20%	0mm	17.09.23 15:21
Helium	72%		22°C	71%	0%	0mm	17.09.23 12:00
Helium	84%		12°C	100%	0%	0mm	17.09.23 08:39
Helium	90%		13°C	92%	40%	0mm	17.09.23 05:19
Helium	89%		15°C	78%	76%	0mm	17.09.23 01:59
Helium	86%		17°C	82%	40%	0mm	16.09.23 22:39
Helium	83%		22°C	55%	0%	0mm	16.09.23 19:19
Helium	80%		25°C	46%	0%	0mm	16.09.23 15:59
Helium	71%		21°C	66%	0%	0mm	16.09.23 12:38
Helium	78%		15°C	82%	0%	0mm	16.09.23 09:16
Helium	91%		13°C	86%	17%	0mm	16.09.23 05:56
Helium	84%		21°C	53%	0%	0mm	15.09.23 16:36

3.1: Forschungsdesign

Das Forschungsdesign für Plantobelly wurde entwickelt, um die Wirksamkeit der entwickelten Bodenfeuchtigkeitssensoren und der Web-Plattform zur Messung und Überwachung der Feuchtigkeit im Wurzelbereich von Straßenbäumen zu untersuchen. Das Design umfasste folgende Aspekte:

- Auswahl der Versuchsstandorte: Es wurden geeignete Standorte ausgewählt, an denen Straßenbäume mit unterschiedlichen Bodenbedingungen vorhanden waren. Dies ermöglichte eine vielfältige Datenerfassung und eine breitere Anwendung der entwickelten Sensoren und der Web-Plattform.
- Festlegung der Versuchsdauer: Die Versuchsdauer wurde entsprechend den Anforderungen des Projekts festgelegt. Es wurde eine ausreichende Zeitspanne gewählt, um genügend Daten zu sammeln und eine aussagekräftige Analyse

durchzuführen. Einige Sensoren sind in der Laufzeit so angelegt, dass der Test dauerhaft läuft. Dieses dient der empirischen Datenerfassung.

- Experimentelle Gruppen: Innerhalb der Versuchsstandorte wurden experimentelle Gruppen gebildet, um verschiedene Bedingungen zu simulieren. Dies umfasste beispielsweise Bäume mit unterschiedlichen Arten von Boden, unterschiedlichen Bewässerungsregimen oder unterschiedlichen Pflanzungsbedingungen. So wurden Standorte mit einem sehr sandigen Boden als auch

3.2: Datenerhebung

Die Datenerhebung erfolgte mithilfe der entwickelten Bodenfeuchtigkeitssensoren und der Web-Plattform. Die Sensoren wurden im Wurzelbereich der Straßenbäume installiert und erfassten kontinuierlich die Bodenfeuchtwerte. Diese Daten wurden über die Web-Plattform gesammelt, übertragen und gespeichert. Zusätzlich wurden relevante Informationen wie Standortdaten, Baumart und Umgebungsbedingungen erfasst, um einen umfassenden Kontext für die Auswertung der Daten bereitzustellen.

3.3: Analysemethoden

Für die Analyse der erhobenen Daten kamen verschiedene Methoden zum Einsatz. Dazu gehörten:

- Deskriptive Statistik: Es wurden grundlegende statistische Kennzahlen wie Mittelwert, Standardabweichung und Histogramme verwendet, um einen Überblick über die Verteilung der Bodenfeuchtwerte zu erhalten.
- Zeitreihenanalyse: Die zeitliche Entwicklung der Bodenfeuchtigkeit wurde analysiert, um saisonale Muster, Trends oder Abweichungen zu identifizieren. Hierbei kamen Methoden wie Glättungstechniken, Trendanalysen und saisonale Dekomposition zum Einsatz.
- Korrelations- und Regressionsanalyse: Es wurde untersucht, ob es Zusammenhänge zwischen der Bodenfeuchtigkeit und anderen Variablen wie Niederschlag, Temperatur oder Bewässerung gibt. Hierbei wurden Korrelationskoeffizienten und Regressionsmodelle verwendet.

3.4: Validierung der Ergebnisse

Um die Zuverlässigkeit und Genauigkeit der Ergebnisse zu validieren, wurden verschiedene Ansätze verfolgt. Dazu gehörten:

- Vergleich mit etablierten Messmethoden: Die erfassten Bodenfeuchtwerte wurden mit Referenzwerten verglichen, die mit etablierten Messmethoden wie Bodenprobenahme und gravimetrischer Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit gewonnen wurden. Dies ermöglichte eine Validierung der entwickelten Sensoren und ihrer Messgenauigkeit.

- Vergleich mit expertenbasierten Einschätzungen: Die Ergebnisse wurden mit Einschätzungen von Fachleuten im Bereich der Baumpflege und Bewässerung abgeglichen. Dies half dabei, die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.
- Die Validierung der Ergebnisse trug zur Gewährleistung der Genauigkeit und Verlässlichkeit der entwickelten Bodenfeuchtigkeitssensoren und der Web-Plattform bei und stärkte das Vertrauen in die erzielten Messergebnisse.

Ergebnisse

4.1: Analyse der Daten

Die erhobenen Daten zur Bodenfeuchtigkeit wurden mit Hilfe der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Analysemethoden analysiert. Für einen Überblick über die Verteilung der Variationen wurden die Daten zunächst deskriptiv analysiert. Anschließend wurden Zeitreihenanalysen durchgeführt, um saisonale Muster, Trends und Abweichungen zu identifizieren. Darüber hinaus wurden Korrelations- und Regressionsanalysen verwendet, um Zusammenhänge zwischen der Bodenfeuchtigkeit und anderen Variablen zu untersuchen.

4.2: Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Datenanalyse wurden in geeigneter Form dargestellt und interpretiert. Hierbei wurden Diagramme, Grafiken und statistische Kennzahlen verwendet, um die Ergebnisse anschaulich zu präsentieren. Es wurden beispielsweise Zeitreihendiagramme erstellt, um die Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit im Laufe der Zeit darzustellen. Des Weiteren wurden Korrelationsmatrizen und Regressionsmodelle genutzt, um die Beziehungen zwischen der Bodenfeuchtigkeit und anderen Faktoren zu visualisieren und zu interpretieren.

4.3: Beantwortung der Forschungsfragen

Die erhobenen Daten und die daraus abgeleiteten Ergebnisse ermöglichten die Beantwortung der im Projekt formulierten Forschungsfragen. Hierbei konzentrierten sich die Fragen auf die Wirksamkeit der entwickelten Bodenfeuchtigkeitssensoren und der Web-Plattform zur Messung und Überwachung der Bodenfeuchtigkeit. Die gewonnenen Ergebnisse lieferten Erkenntnis, dass die entwickelten Sensoren zuverlässige und genaue Messungen liefern. Die Web-Plattform effektiv zur Überwachung und Verwaltung von Bewässerungsmaßnahmen eingesetzt werden kann. Bestätigung wurde ebenfalls die intuitive und einfache Bedienbarkeit des Webservices.

5.1: Interpretation der Ergebnisse

Die finale Auswertung und Interpretation der Daten basierte auf Basis des vorherigen Abschnitts vorgestellten Analysen und deren Darstellung. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die entwickelten Bodenfeuchtigkeitssensoren in der Lage sind, genaue und zuverlässige Messungen im Wurzelbereich von Straßenbäumen durchzuführen. Die Datenanalyse legt nahe, dass die kapazitive Messmethode über die elektrische Kapazität eine effektive Methode zur Bestimmung der Bodenfeuchtigkeit ist. Die Integration der Messdatenübertragung per LoRaWAN und Narrowband ermöglicht eine effiziente und zuverlässige Kommunikation der Daten an die Web-Plattform. Die Ergebnisse geben darüber hinaus die Sicherheit, dass das Plantobelly System sehr leicht skalierbar ist und somit leicht in Städten eingesetzt werden kann um ein Stadtteilmonitoring zu betreiben.

5.2: Implikationen und Bedeutung der Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses Projekts haben wichtige Implikationen und Bedeutung für die Praxis der Straßenbaumbewässerung. Die Fähigkeit, die Bodenfeuchtigkeit präzise zu messen und über die Web-Plattform zu überwachen, ermöglicht eine gezielte und effiziente Bewässerung und den Erhalt des Stadtgrüns. Durch die optimierte Energieeffizienz der Sensoren und die Verwendung einer langanhaltenden Batterie kann die Wartung und Instandhaltung minimiert werden. Dies führt zu einer verbesserten Ressourceneffizienz und Kostenersparnis bei der Bewässerung von Straßenbäumen. Gesundes Stadtgrün führt zu einem gesteigerten Wohlbefinden der Bevölkerung. So federn Stadtbäume heiße Sommertage ab und kühlen die Umgebung. Bei einer ausreichenden Bodenfeuchtigkeit sind die Bäume ebenfalls in der Lage CO₂ zu binden und die Umgebungsluft zu filtern.

Schlussfolgerungen

Insgesamt kann festgestellt werden, dass das Projekt Plantobelly erfolgreich mit der Entwicklung von Bodenfeuchtigkeitssensoren mit eigener Hardware und einer Web-Plattform zur Messung und Überwachung der Feuchtigkeit im Wurzelbereich von Straßenbäumen abgeschlossen wurde.

Die Anwendung der kapazitiven Messmethode über die elektrische Kapazität erwies sich als effektiv und lieferte im Rahmen des Projektes die genauesten Ergebnisse. Die Integration der Messdatenübertragung per LoRaWAN und Narrowband ermöglichte darüber hinaus eine zuverlässige Kommunikation der Daten, wobei sich das Narrowband als deutlich zuverlässiger erwies, da keine Abhängigkeit von Dritten vorherrscht.

Die Optimierung der Energieeffizienz ermöglicht eine langanhaltenden Batterielebensdauer. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben einen Wichtigen Zusammenhang für die Praxis der Straßenbaumbewässerung und tragen zur Ressourceneffizienz und Kostenersparnis bei. Es wird empfohlen, die entwickelte Technologie weiter zu erforschen und in großem Maßstab anzuwenden, um den Beitrag zur nachhaltigen Bewässerung von Straßenbäumen zu maximieren.