

SolemSense

Die smarte Bodensonde

Ein Projekt des MST Design Lab 2 und Cosima
von Nicolas Brugger, Uwe Benkarth und
Maren Kirste



Gisela und Erwin Sick
Stiftung



FAULHABER



Inhaltsverzeichnis

1. Das Team	3
2. Die Idee	4
3. Hintergrundwissen	4
Funktionen der Bodensonde	4
Energieberechnung	6
Spezifikationen des Systems	8
Auswahl der Komponenten	11
Temperatursensor	11
Lichtstärkesensor	12
Bodenfeuchtigkeitssensor	12
Mikrocontroller	13
Datentransfer/LoRaWan	14
4. Umsetzung	14
Herstellung der PCBs	14
Konstruktion der Bodensonde	15
Konstruktion Basisstation	16
6. Assemblierung	17
7. Programmierung	18
8. Testen des Systems	18
9. Finanzen	22
10. Marketing	23
Marktanalyse	23
Analyse des Zielmarktes	23
Wettbewerbsanalyse	24
11. Zusammenfassung und Fazit	25
12. Ausblick	25
12. Literaturverzeichnis	26

1. Das Team

Das Team besteht aus drei Studenten des Imtek der Universität Freiburg. Diese haben sich im Sommersemester 2023 zusammengefunden, um einen Masterkurs des sogenannten MST Design Lab 2 zu belegen. Später wurde sich dazu entschieden, bei Cosima teilzunehmen. Alle drei Studenten studieren Mikrosystemtechnik, jedoch mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Das oben beschriebene Team ist in Abbildung 1 zu sehen. Nicolas Brugger studiert im dritten Mastersemester Mikrosystemtechnik mit Vertiefung Photonic. Uwe Benkarth studiert im dritten Mastersemester Mikrosystemtechnik mit Vertiefung, Schaltungen und Systeme. Maren Kirste studiert im dritten Mastersemester Mikrosystemtechnik mit Vertiefung Biomedizinische Technik. Nicolas Brugger übernahm den Teilbereich der Programmierung und Uwe Bankarth entwarf und fertigte Prototypen. Die öffentliche Arbeit und die Fertigung der PCBs übernahm Maren Kirste. Weitere Aufgaben wie PCB-Design und Energieberechnungen wurden unter allen aufgeteilt.



Abbildung 1: Links: Nicolas Brugger, Mittig: Uwe Benkarth, Rechts: Maren Kirste.

2. Die Idee

Gärten und Stadtparks sind wesentlich für den Klimaschutz, die Artenvielfalt und die Naherholung [1,2]. Pflanzenschäden aufgrund von falschem Standort und Pflege sind ein zentrales Problem, das häufig in diesen Arealen anzutreffen ist. Weltweit gibt es ca. 300.000 Pflanzenarten [3], jede mit unterschiedlichen Bedürfnissen bezüglich Wasser, Temperatur und Licht. Unser Sensorsystem löst dieses Problem, indem es Bodenfeuchtigkeit, Bodentemperatur und Licht misst. Die energieautarke Bodensonde wird mit einem Erdbohrer im Erdreich platziert und benötigt keine Kabelverlegung oder Batteriewechsel. Die Daten werden per LoRaWAN an eine Basisstation, welche die Daten darstellt, übertragen. Dadurch kann man zusätzliche Apps oder Webseiten vermeiden.

Durch bedarfsgerechtes Gießen kann Wasser gespart werden und zudem das Risiko von Pflanzenschäden minimiert werden. Das System könnte auch in Stadtgärten helfen, den Bewässerungsaufwand zu reduzieren, da kritische Bodenfeuchtigkeit abrufbar ist. Eine Kopplung mit automatischen Gießanlagen ist möglich. Auch in der Landwirtschaft könnte die Garten-Sonde Anwendung finden.

3. Hintergrundwissen

Funktionen der Bodensonde

Die Energieerzeugung des Systems erfolgt über eine Solarzelle. Das Energiemanagement hingegen regelt die Energieversorgung der einzelnen Komponenten. Nicht benötigte Energie wird in einem Akku gespeichert, wodurch das System auch bei bedecktem Himmel ausreichend mit Energie versorgt werden kann. Den Lade- und Entladevorgang des Akkus steuert das Lademanagement. Hierdurch wird ein Überladen bzw. eine Tiefentladung des Akkus verhindert. Die Messdaten der Sensoren werden über eine I²C-Schnittstelle an das Modul für die Informationsverarbeitung übermittelt. Dieses leitet die Daten an das LoRa-Modul weiter, welches wiederum die Daten an einen LoRaWAN-Empfänger sendet. Dieser überträgt die Informationen an unsere Empfangseinheit, welche die Messgrößen auf einem Display anschaulich darstellt. Übermittelt werden neben den Messwerten der Sensoren auch die Uhrzeit der Messung, sowie der Akkustand. Um den Leistungsverbrauch zu minimieren, werden die Sensoren und die Datenübertragung nicht permanent betrieben. Einmal in der Stunde werden die Sensoren eingeschaltet und Daten gesendet. Durch eine Echtzeituhr (RTC) wird die Zeit der Messung erfasst und eine Clock regelt die Taktfrequenz des Datentransfers. Das Funktionsdiagramm des Systems ist in Abbildung 2 zu sehen.

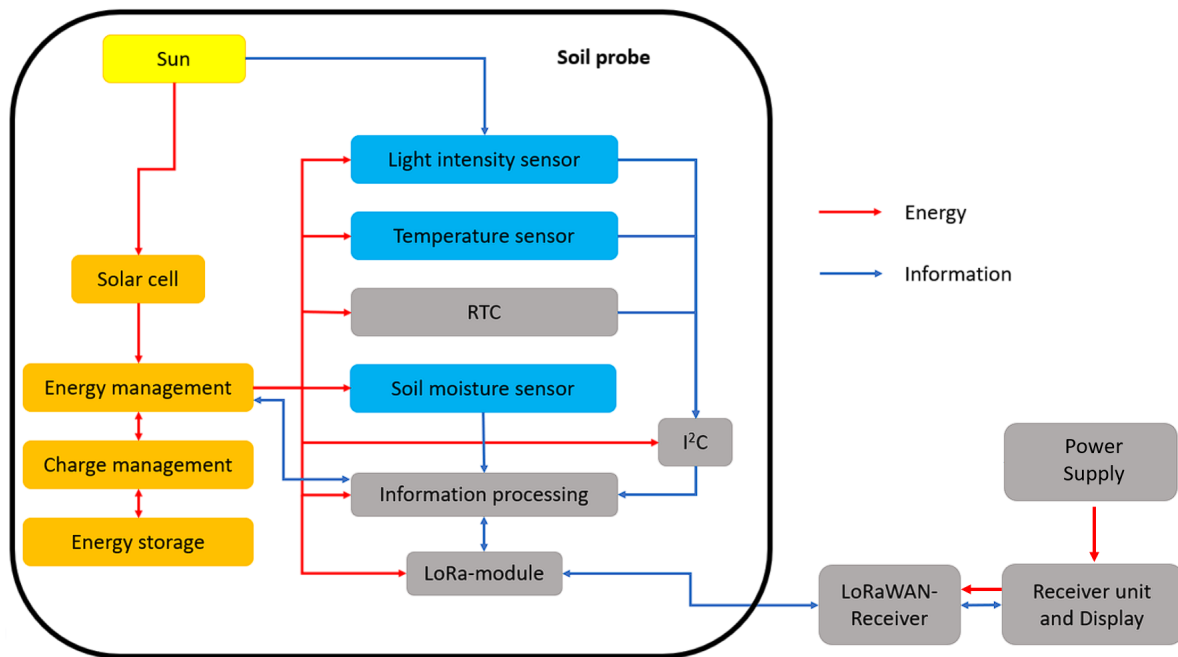


Abbildung 2: Funktionsdiagramm des Systems mit den Komponenten des Systems und des Informations- bzw. Energieverlaufs. Der schwarz eingekreiste Bereich stellt das System der Bodensonde dar, mit der Energiequelle in gelb, der für die Energieversorgung zuständigen Komponenten in orange, die Sensoren in blau und die für die Datenverarbeitung bzw. Datenübermittlung zuständigen Komponenten in grau. Außerhalb der Bodensonde sind die Empfänger dargestellt.

Energieberechnung

Um Aussagen über den Langzeiteinsatz des Sensorsystems treffen zu können und das Design zu optimieren, wurde zum einen die benötigte gemittelte Leistung und zum anderen die zu erwartende Leistung, die durch das Solarpanel bereitgestellt wird, abgeschätzt. Die über den Tag benötigte gemittelte Leistung ist der gewichtete Durchschnitt, aus der gemittelten Leistung, während dessen das Sensorsystem aktiv ist und zum anderen die Leistung während der Ruhezeit.

Da die Sonde, wie später dargestellt, deutlich weniger Energie benötigt als sie erzeugt, konnte die Übermittlung der Daten von ursprünglich zweimal pro Tag auf alle 10 min erhöht werden. D.h. nach jeder 10 minütigen Messung werden die Daten übertragen. Die benötigte Leistung der Komponenten wurde mithilfe der Tabelle 1 berechnet. Aufgrund der Vorschriften in Europa ist lediglich eine maximale Leistung des Transmitters von $P_{tx} = 16$ dBm erlaubt. Dies sollte genügen, da dies einer Sendeleistung für eine Strecke von 2 bis 3 km in urbanen und in ländlichen Gebieten einer Distanz von ca. 20 km entsprechen sollte [4]

Die durch das Solarpanel erzeugte elektrische Leistung und die dann durch den Spannungswandler *BQ25504* umgewandelte Leistung wurde mit Hilfe der Effizienz des Wandlers, dem Modell eines Photoelements und der Solaren Einstrahlung des *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM* der Europäischen Kommission berechnet [5]. Der Stromverbrauch des Systems beträgt theoretisch im aktiven Zustand $I_{act} = 54,84$ mA und im inaktiven Zustand $I_{sleep} = 8,63$ μ A.

Da gerade die untere der beiden Grafiken in Abbildung 3 ein scheinbar nicht physikalisches, stufenförmiges Verhalten aufweist, wird dies im Folgenden etwas näher erläutert. Die verwendeten Daten der EU sind lediglich stündliche Daten der solaren Einstrahlung, dies führt dazu, dass es zu einem Sprung kommt zwischen einer geringen morgendlichen bzw. abendlichen Einstrahlung und keiner Einstrahlung davor bzw. danach. Beispielsweise ist es in den Wintermonaten nur kurz hell, bzw. es fällt etwas Strahlung auf das Solarpanel. Aufgrund des geringen Verbrauchs reicht diese geringe Leistung trotzdem aus, um die Bodensonde zu betreiben. Ab dem 5. Februar sind allerdings bis kurz nach 18:00 die Daten für die solare Einstrahlung ungleich null. Diese eintreffende Leistung reicht dann wieder aus, um den Bodensonde zu betreiben. D.h. es kommt bei einer Stunde Verschiebung des Sonnenaufgangs bzw. Sonnenuntergangs zu einer Verschiebung der benötigten Energie aus der Batterie, um genau eine Stunde. In der Realität wird dieser Verlauf natürlich kontinuierlich sein.

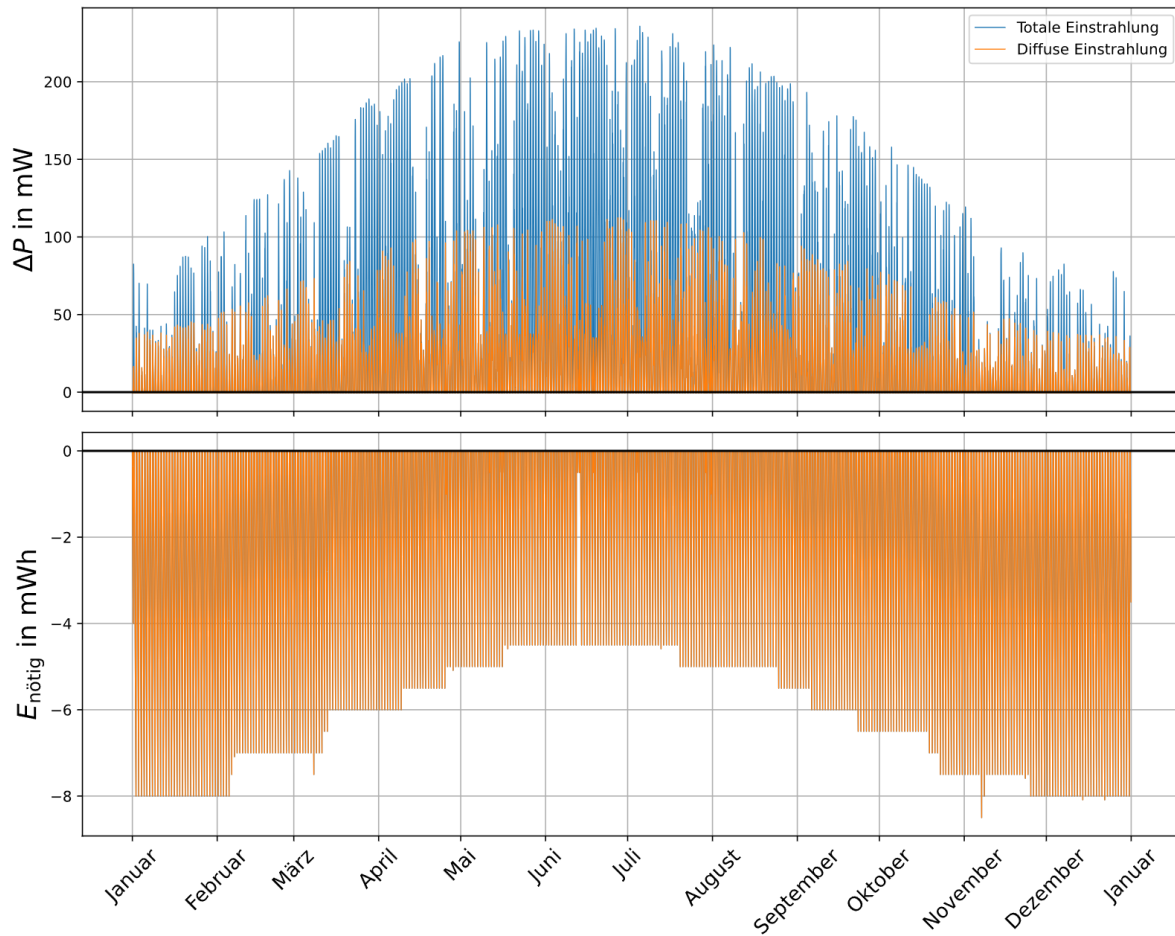


Abbildung 3: In der oberen Grafik ist der zeitliche Verlauf der resultierenden Leistung, aus zu erwartender verfügbarer Leistung abzüglich der durch das Sensormodul benötigten gemittelten Leistung, dargestellt. Es werden dabei zwei Fälle der Einstrahlung unterschieden, zum einen die totale Einstrahlung, d.h. die Summe der direkten und diffusen Einstrahlung und zum anderen lediglich nur die diffuse Einstrahlung. In der unteren Grafik ist die benötigte integrierte Leistung, d.h. die benötigte Energie, die durch den Akkumulator bereitgestellt werden muss, dargestellt.

Spezifikationen des Systems

Die technischen Anforderungen der Komponenten unseres Systems sind im Folgenden spezifiziert:

1. Gehäuse und Dorn

Geometrie

- Form zylindrisch
- Abmessungen
- nutzbare Einstichtiefe des Dorn 200 ± 5 mm
- Einbaubereich des ersten Temperatursensors 30 ± 1 mm hinter Einstechspitze
- zweiter Temperatursensor im Einbaubereich 90 ± 1 mm hinter Einstechspitze
- dritter Temperatursensor im Einbaubereich 120 ± 1 mm hinter Einstechspitze

Gebrauch

- berührbare Gehäuseoberflächen
- Dichtigkeit und Feuchteinfluss
- Witterungsbeständig
- Mechanische Stabilität
 - i. Biegefestigkeit: mind. 60 MPa gemäß ISO 178
 - ii. Bruchdehnung: mind. 2 % gemäß ISO 527

2. Temperatursensor

- Messbereich: -20 ± 1 °C bis 50 ± 1 °C
- Messgenauigkeit und Auflösung: min. $\pm 0,5$ °C
- Maximaler Leistungsverbrauch: 5 mW

3. Lichtstärkesensor

- Messbereich: 0,01 lux bis 83 klux
- Lichtspektrum: 400 ± 10 – 700 ± 10 nm
- Messgenauigkeit und Auflösung: mind. $\pm 0,01$ lux
- Maximale Ansprechzeit t_{90} : 10 s ± 1 s
- Prüfverfahren: gemäß CIE 70

- Maximaler Leistungsverbrauch: 20 mW
- Schutz vor Feuchtigkeit und Witterung (Vorschlag: PMMA-Abdeckung)
 - i. transparent gemäß ASTM D 1003
 - ii. Witterungsbeständig nach ISO 4892-3:2016 mit mind. 2500 Stunden Laborwitterungszyklus
 - iii. UV-beständig nach DIN EN ISO 4628-1
 - iv. Dichtigkeit und Feuchteinfluss: Schutzart IP 54

4. Bodenfeuchtigkeitssensor

- Messbereich: $20 \pm 2 - 80 \pm 2$ % bei volumetrischer Messung
- Messgenauigkeit und Auflösung: mind. $\pm 0,5$ %
- maximale Ansprechzeit t_{90} : $10 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$
- Maximaler Leistungsverbrauch: 50 mW
- Mechanische Stabilität für Einstechen in Boden:
 - i. Biegefestigkeit: mind. 60 MPa gemäß ISO 178
 - ii. Bruchdehnung: mind. 2 % gemäß ISO 527
- korrosionsbeständig nach ISO 7441:2015

5. Solarzelle

- Geometrische Abmessungen: $70 \times 50 \text{ mm}^2$
- Die Leistung muss ausreichen, um das System bei einer Beleuchtungsstärke von 19.000 lx (bewölkter Sommertag) betreiben zu können, sowie den Energiespeicher zu laden.
- Ausgangsspannungsbereich: Passend für die Anforderungen des Power-Management-Systems
- witterungsbeständig nach ISO 4892-3 mit mind. 2500 Stunden Laborwitterungszyklus

6. Energiemanagement

- Energiespeicher
 - i. maximales Außenvolumen: $60 \text{ mm} \times 40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (L x B x H)
 - ii. Speicherform: Li-Ionen Akku

iii. Speichervolumen: ausreichend, um System mehr als drei Stunden ohne Sonnenenergie betreiben zu können

- Energiemanagement

i. Versorgen der Komponenten mit der benötigten Stromstärke

ii. Verhindern des Überladens oder Tiefenentladens des Akkus

iii. Maximaler Leistungsverbrauch:

7. Elektronik

- Versorgungsspannung: $3,7\text{ V} \pm 10\text{ mV}$

- Signalart zur Impedanzmessung: Wechselstrom

- Signalart Ausgangsspannung zum Moteino: $\text{max. } 3,7\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$

8. Datenverarbeitung

Auswertung der Sensoren

- Physical-Computing Plattform

- Arduino kompatibel

- Maximaler Leistungsverbrauch:

Datentransfer

- System: LoRaWAN

- Bidirektionale Verbindung

- Reichweite: mind. 2,4 km

- Uplink:

min. 12 Byte pro Informationspaket

min. 1 Informationspaket pro Stunde

- Downlink

min. 8 Byte pro Informationspaket

min. 4 Informationspakete pro Tag

Sender

- Maximaler Leistungsverbrauch: 200 mW

Empfänger

- Physical-Computing Plattform

- Maximaler Leistungsverbrauch

- Display zum Anzeigen der Daten

9. Allgemein

- Betriebstemperaturbereich: -40 °C bis 85 °C ±1 °C
- Lagertemperaturbereich: -40 °C bis 85 °C ± 1 °C
- Zulässige Feuchte und Druck in Betrieb und Lagerung: gemäß 3 atm
- CE-Zertifizierung

Auswahl der Komponenten

Bei der Auswahl der benötigten Komponenten war das Hauptkriterium ein geringer Leistungsverbrauch. Basierend auf den festgelegten Vorgaben haben wir uns für folgende Komponenten entschieden (siehe Tabelle 2):

Tabelle 2: Verwendete Sensoren und deren Messbereich und Genauigkeit.

Messgröße	Verwendeter Sensor	Messbereich	Genauigkeit
Temperatur	TMP116AIDRVR [6]	-55 °C - 125 °C	± 0,2 °C (-10 °C - 85 °C)
Lichtstärke	OPT3001 [7]	0,01 lux - 83 klux	± 0,2 %
Bodenfeuchtigkeit	Soilwatch10 [8]	0 % - 50 %	± 3 %

Temperatursensor

Als sensitives Element verwendet der TMP116AIDRVR eine Diode. Er ist damit genauer als ein RTD (Resistance Temperature Detector) der Klasse A. Zudem ist er vergleichsweise einfach zu betreiben, da er keine Kalibrierung und keinen externen Schaltkreis benötigt. Außerdem verbraucht er weniger als ein Fünftel der Leistung eines Pt100 RTDs und es kann eine I²C-Schnittstelle verwendet werden [6].

Lichtstärkesensor

Der OPT3001 misst die Intensität von Licht im sichtbaren Bereich und filtert Licht im Infrarotbereich heraus. In Abbildung 4 ist erkennbar, dass die spektrale Antwort des Sensors vergleichbar mit dem menschlichen Auge ist. Dieser Frequenzbereich ist auch für das Wachstum von Pflanzen von Bedeutung und somit ideal für die Bodensonde. Außerdem ist der Sensor kompatibel mit einer I²C-Schnittstelle [7].

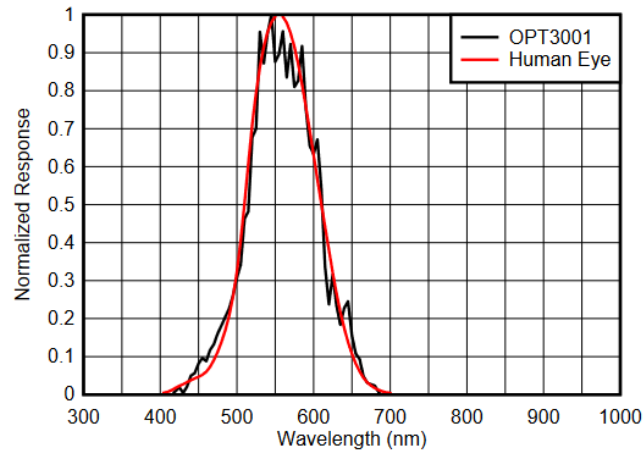


Abbildung 4: Spektrale Antwort des OPT3001 im Vergleich zum menschlichen Auge [7].

Bodenfeuchtigkeitssensor

Da keiner der getesteten Sensoren unsere Spezifikationen erfüllt, haben wir uns zur Messung der Bodenfeuchtigkeit für den Soilwatch10 entschieden. Der Soilwatch10 misst kapazitiv die Bodenfeuchtigkeit. Abhängig vom Wassergehalt des Bodens ändert sich die dielektrische Permittivität. Die Dielektrizitätskonstante von Erde ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Diese setzt sich aus den Dielektrizitätskonstanten für Erdpartikel, Wasser und Luft zusammen. Somit ist das Verhältnis von Wasser zu Luft im Boden entscheidend. Ebenso haben andere Faktoren wie Temperatur, Salzgehalt, Porosität und Tongehalt des Bodens einen Einfluss auf die Dielektrizitätskonstante. Die Dielektrizitätskonstante von Luft, Erdmineralien und organischer Masse ist deutlich geringer als die Dielektrizitätskonstante von Wasser. Deshalb hängt eine Änderung der gemessenen Kapazität des Sensors hauptsächlich vom Wassergehalt des Bodens ab [9]. Dennoch ist es wichtig, für eine genauere Messung, den Sensor für den verwendeten Bodentyp zu kalibrieren. Das Sensorelement ist korrosionsbeständig, da es keine freiliegenden Elektroden gibt. Zudem ist der Sensor kostengünstig, genau und zuverlässig. Ebenso ist er für einen großen Temperaturbereich von -20 °C bis 80 °C geeignet und hat einen geringen Leistungsverbrauch [8].

Mikrocontroller

"Wireless Sensornetzwerke" finden in verschiedenen Anwendungen wie industrieller Automatisierung, Umweltmonitoring, Smart-Home Anwendungen und Consumer-Elektronik Verwendung. Die Entwicklung eigener Sensorknoten erfordert jedoch erhebliche Zeit und Erfahrung, da passende Komponenten ausgewählt und ein entsprechendes PCB (Printed Circuit Board) sowie eine Energieversorgung entworfen werden müssen. Die resultierenden Plattformen sind spezifisch für eine Anwendung konzipiert und nicht allgemein verfügbar. Dies stellt insbesondere für Hobbyisten und Start-ups mit begrenzter Erfahrung eine Herausforderung dar. Daher greifen diese Zielgruppen oft auf etablierte, eingebettete Systeme wie die Arduino-Microcontroller-Plattform zurück. Arduino bietet den Vorteil der weitverbreiteten Nutzung, Benutzerfreundlichkeit, relative Kosteneffizienz sowie eine umfangreiche Auswahl an Hardware-Komponenten und Software-Bibliotheken. Dies macht Arduino besonders attraktiv für Anfänger.

Jedoch weisen Arduinos einen hohen Energieverbrauch auf. In Abbildung 7 ist der Leistungsverbrauch von Arduino Uno, Micro und Nano bei unterschiedlichen Betriebsspannungen sowie im aktiven und Sleep-Modus dargestellt [29]. Selbst im Sleep-Modus benötigt der Arduino vergleichsweise viel Leistung. Ein Arduino Uno verbraucht bei einer Spannungsversorgung von $U_{DD} = 5\text{ V}$ im Sleep-Modus $P_{\text{sleep}} = 144\text{ mW}$. Dies ist auf mehrere Gründe zurückzuführen, wie die nicht vollständig deaktivierbare serielle USB-Schnittstelle und integrierte Komponenten, die Energie verbrauchen, auch wenn sie nicht benötigt werden. Zudem weisen die linearen Spannungsregulatoren des Boards eine geringe Energieeffizienz auf.

Im Vergleich dazu hat der Moteino einen deutlich niedrigeren Leistungsverbrauch von $P_{\text{min}} = 6,5\text{ }\mu\text{W}$ und ist kompatibel mit Arduino-Anwendungen. Auch die Programmierung des Moteino erfolgt analog zum Arduino. Daher stellt der Moteino eine einfache und sinnvolle Alternative für energiekritische Systeme dar.

Datentransfer/LoRaWan

Das LoRaWan-Netzwerk ist sternförmig aufgebaut. Dabei definiert der zentrale Netzwerkserver spezifische IDs für die jeweiligen Endgeräte, wodurch verschiedene Sensoren, Aktoren und Endgeräte unterschieden werden können. Die Reichweite im Außengelände von LoRaWan beträgt etwa $s = 6$ km. Bei günstigen atmosphärischen Bedingungen und wenig Hindernissen zwischen Sender und Empfänger erhöht sich die Reichweite.

Die Verwendung von LoRaWAN bietet viele Vorteile. Zum einen können für die Datenübertragung nicht-lizenzierte Frequenzbänder verwendet werden, dies erspart Kosten. Außerdem ist die LoRaWAN-Software open-source. Somit gibt es viele Hersteller, die individuelle Lösungen für Netzwerkkomponenten anbieten, welche mit denen anderer Hersteller kompatibel sind. Zusätzlich benötigen LoRaWAN-Geräte weniger als $I = 50$ mA bei der Übertragung eines Signals und können danach in den Sleep-Modus gesetzt werden. Dies macht die Technologie besonders geeignet für Low-Power-Anwendungen.

4. Umsetzung

Herstellung der PCBs

Die benötigten PCBs wurden durch Fotolithografie mit nachfolgenden nasschemischen Ätzen hergestellt. Hierfür wurde als Maske das PCB-Design mit einem Tintenstrahldrucker auf transparentem Papier gedruckt. Es wurden PCBs mit einer 35 mm dicken Kupferschicht auf beiden Seiten der Firma Bungard verwendet. Diese wurden mit einer Maske beidseitig für 20 s mit UV-Licht belichtet. Hierzu wurde das IseI-Vakuum-UV-Belichtungsgerät 2 der Firma IseI-Automation verwendet. Anschließend folgte das Entwickeln mit NaOH in einer Konzentration von 16 g/l und das Ätzen in Natriumpersulfat. Zum Entfernen des Resists wurde NaOH in einer Konzentration von 32 g/l verwendet. Zum Schluss wurden die PCBs mit Zinn (Glanzzinn EXTRA von BestChem) beschichtet, damit die Leiterbahnen nicht oxidieren und besser lötbar sind.

Die Bauteile selbst werden von Hand auf die Platine gelötet, wenn sie groß genug sind oder Zweipole sind. Bei Bauteilen wie Integrierte Schaltungen mit mehreren Lötstellen wie bei dem Sensoren *TMP116*, *OPT3001* oder dem Lademanagement *BQ25504* werden die Bauteile mit einem Reflow-Lötprozess bei 165 °C in einem Lötoven gelötet.

Konstruktion der Bodensonde

Das Gehäuse der Bodensonde besteht aus zwei Komponenten. Zum einen aus zwei Kunststoffrohren, die im Sanitärbereich Anwendung finden und zum anderen aus 3D-gedruckten PLA-Teilen, um die verschiedenen Komponenten zu verbinden und zu verändern. Der Dorn besteht aus einem 22 cm langen Rohr für eine Spüle. Dieses Rohr besitzt eine Mindestdurchmesser von 32 mm und an einem Ende ein Gewinde, an dem eine Dichtungsmutter ist, welche angeschraubt werden kann. Damit die Temperatursensoren in den Dorn integriert werden können, wurde ein 2 cm breites und 16 cm langes Rechteck entlang des Dornes ausgeschnitten. Der Soil Watch Sensor ist am unteren Ende angebracht und ist in einer eigens 3D gedruckten Fassung montiert.

Das Gehäuse für den Moteino, der RTC und das Lademanagement besteht aus einer Überschiebmuffe mit einer Länge von 11 cm und einem Innendurchmesser von 5 cm. Damit diese an den Dorn angebunden werden kann, wurde ein Verbindungsstück designt, welches in die Doppelmuffe passt. Zusätzlich kann die Dichtungsmutter des Dornes dort durch eine Qutschpassung hineingedrückt werden. Durch die beiden Passungen und die Dichtungsringe erhält man so eine dichte Verbindung. Das Verbindungsstück ist in Abbildung 9 zu sehen.

Um die Solarzelle und den OPT3001 in das Gehäuse zu integrieren, musste ein weiteres Bauteil entworfen werden. Da die Solarzelle in einem 20° Winkel zur Oberseite der Sonde stehen soll, wurde das Kopfteil des Gehäuses aus zwei Teilen gefertigt. Die in Fusion zusammengebaute Sonde als gerendertes Bild ist in Abbildung 5 zu sehen.

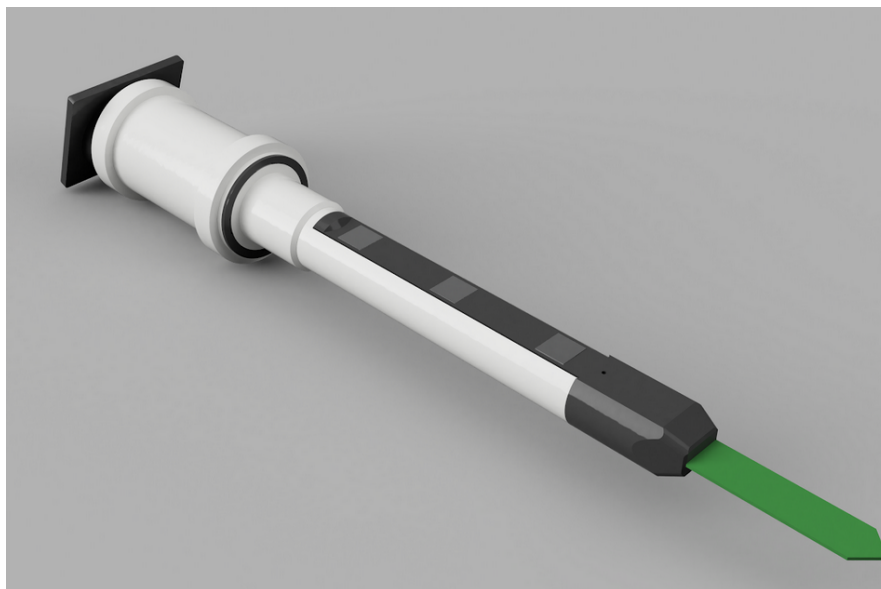


Abbildung 5: Gerendertes Bild der gesamten Bodensonde.

Konstruktion Basisstation

Die Basisstation besteht aus einem Moteino mit Lora Modul, der die Daten empfängt und diese dann über eine serielle Schnittstelle weiterleitet. In dem Widget werden die Messwerte der einzelnen Sensoren im rechten Drittel des Bildschirms dargestellt. Auf dem restlichen Bildschirm werden der Wassergehalt und die Lichtverhältnisse bildlich dargestellt. Die Basisstation an sich besteht aus einer Kombination aus 3D-gedruckten Teilen und Holzleisten.

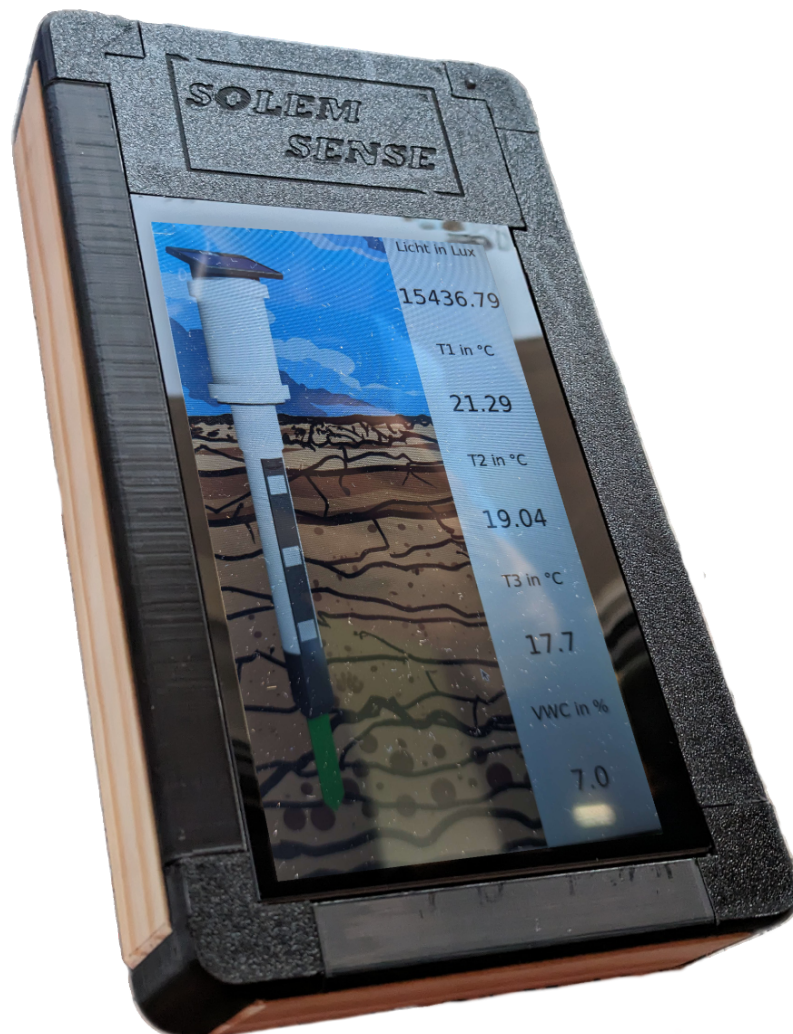


Abbildung 6: Basisstation für das SolemSense System mit dem entsprechenden Widget zur Datendarstellung.

6. Assemblierung

Die TMP-Halterung wird durch das Einpressen der Aluprofile montiert. Die TMP116 Sensoren werden mit Wärmeleitpaste eingesetzt und mit den Kontakten verbunden. Jeder TMP116 erhält fest verlötete Jumperkabel zur Verbindung. Die Soilwatch10 wird eingelegt und an die TMP-Halterung angeschraubt. Diese Halterung wird in den Dorn geschoben und mit einer M2 Schraube befestigt. Die OPT3001 Platine und die übrigen Sensoren erhalten ebenfalls festgelötete Jumperkabel für die I²C-Schnittstelle. Das gleiche Verfahren wird für die restlichen Platinen angewendet. Die verbleibende Sonde wird durch die Dichtungen der Doppelmuffe und die Presspassung des Verbindungsstückes zwischen Dorn und Gehäuse gesteckt. Für zusätzliche Wasserdichtigkeit kann der Dorn mit Silikon oder Epoxi versiegelt werden. Die 3D gedruckten Komponenten können mit einem Lack versiegelt werden. Die fertig montierte Sonde ist in Abbildung 6 zu sehen.



Abbildung 7: Finaler Aufbau des SoleSense Systems, mit Halterung der Antenn

7. Programmierung

Für die Ansteuerung des Moteinos wurde die Bibliothek von LowPowerLab verwendet und für unseren spezifischen Anwendungsbereich angepasst. Die generelle Funktionsweise umfasst das Auslesen der Sensordaten sowie das Senden dieser gewonnenen Messdaten Mittels des LoRaWan Moduls an die Basisstation und danach das Abschalten der Sensoren und des Moteinos in den Sleep Modus. Anschließend wird das ganze System mit einer Realtime-Clock aufgeweckt.

8. Testen des Systems

Mit dem Joulescope JLS110 wurde der zeitliche Energieverbrauch des Systems gemessen, dabei stellte sich heraus, dass der Energieverbrauch höher als in der Theorie angenommen ist. Der Strom- und Leistungsverbrauch des Systems ist in Abbildung 8 dargestellt. Daraus geht hervor, dass das System im Durchschnitt bei einer Sendung alle 10 min $I_{\text{sleep}} = 0,97 \text{ mA}$ verbraucht und der maximale Strom beim Senden bei ca. $I_{\text{tx}} = 150 \text{ mA}$ beträgt. Somit verbraucht das System im Durchschnitt $P_{\text{avg}} = 3,8 \text{ mW}$. Der zeitliche Verlauf des Weckens des Arduino und des Hochfahrens und des Sendens der Daten und darauffolgend das sukzessive Abschalten der Sensoren und des Moteinos ist in Abbildung 9 dargestellt. Es wird wieder ersichtlich, dass der maximale Strom beim Senden der Daten bei $I_{\text{tx}} = 150 \text{ mA}$ liegt und damit gleichzeitig die maximale Leistung bei $P_{\text{max}} = 550 \text{ mW}$ beträgt. Dies scheint für ein energieautarkes System erst einmal viel, jedoch ist dies nur die Peakleistung, die das System abrufe. Die Solarzelle ist in der Lage den Akku zu laden, somit ist die Bereitstellung der Leistung gewährleistet. Zudem ist eine interessante Beobachtung, dass die Spannung beim Einschalten und beim Senden der Daten sinkt. Dieser Effekt lässt sich durch die Verwendung des Lademanagements erklären. Wichtig ist dabei, dass die Versorgungsspannung nicht unter $U_{\text{DD}} = 3,6 \text{ V}$ fällt, was jedoch gegeben ist.

Des Weiteren wurde zusätzlich eine Messung des Frequenzspektrums gemacht, das Ergebnis ist in Abbildung 10 zu sehen. Die Sendung der Daten erfolgt periodisch im Eingestellten Frequenzraum. Das System befindet sich somit in einer legal nutzbaren Frequenz.

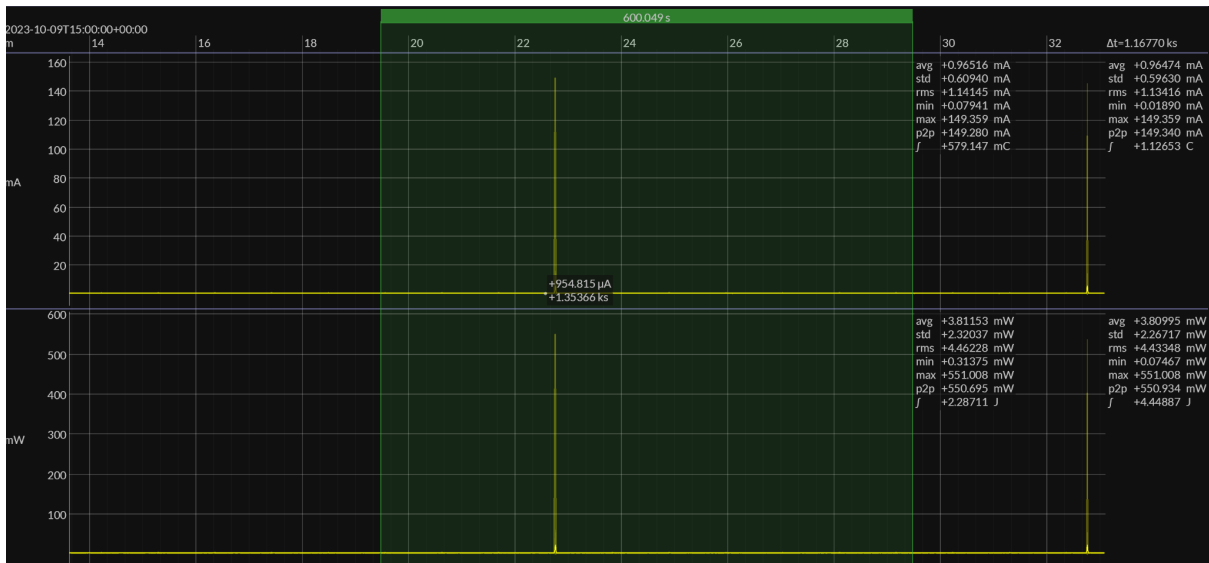


Abbildung 8: Stromverbrauch des SolemSense Prototypen bei einer Erhebung und Sendung der Daten alle 10 min.

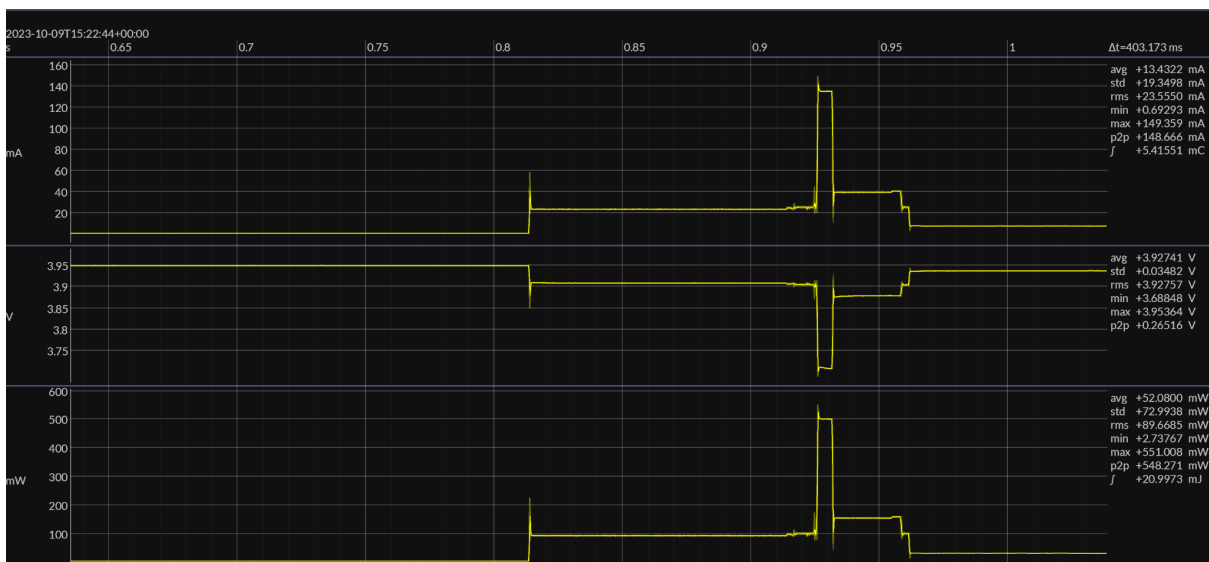


Abbildung 9: Oben: Stromverbrauch, Mittig: Spannungsabfall und Unten: Leistungsverbrauch des SolemSense Prototypen im aktiven Zustand.

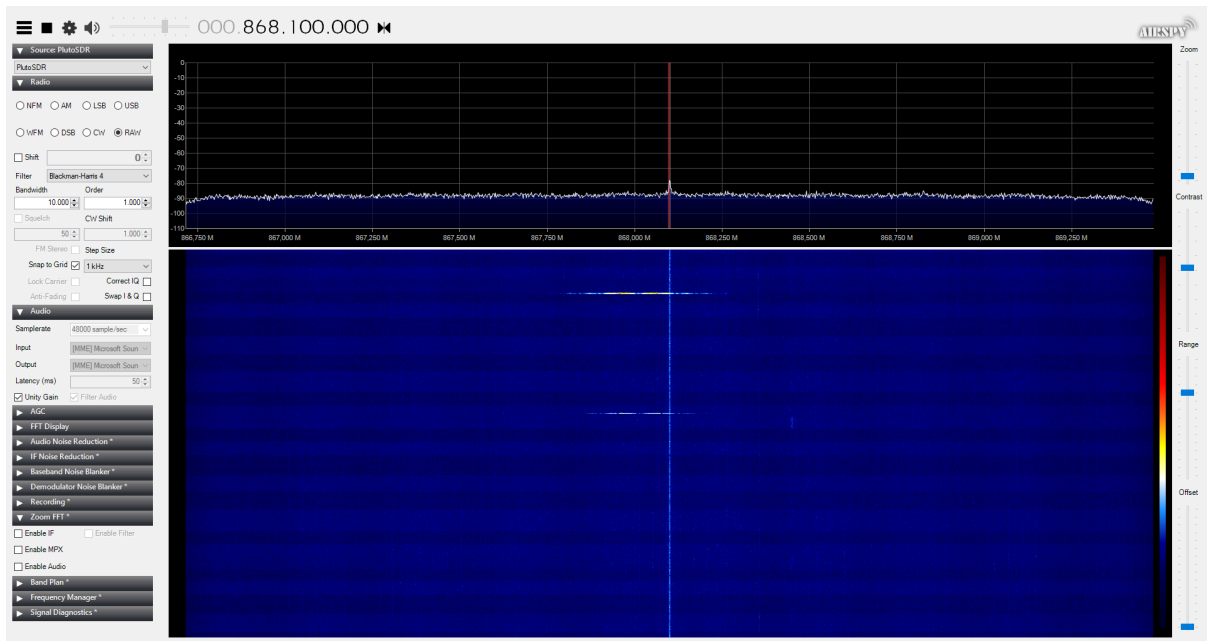


Abbildung 10: Messung des Frequenzspektrums des SolemSense Systems mit dem *ADLAM-PLUTO* von Analog Devices.

Mit der ermittelten durchschnittlichen Leistung ist die Simulation für das Laden und Entladen des Akkus angepasst worden. Als durchschnittlicher Leistungsverbrauch sind die gemessenen $P_{\text{avg}} = 3,8 \text{ mW}$ angenommen worden. Die daraus folgende Leistung, die der Akku bereitstellen muss, mit Lade- und Entladezyklus ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Sonnenstunden des Standortes Freiburgs sind repräsentativ für die Berechnung der Leistungsbilanz genommen worden. Durch die neu berechnete Energie zeigt sich, dass auch mit der gemessenen Leistung kein Problem für unsere Sonde entsteht. so entlädt sie sich maximal um eine Energie von $E_{\text{loss}} = 95 \text{ mWh}$ im Dezember. Dies kann der Akku allerdings gut auffangen, wodurch genügend Energie für das System bereit steht. Die Batterie alleine kann das System für ungefähr $\Delta t = 400 \text{ h}$ versorgen, ohne dass sie geladen werden muss.

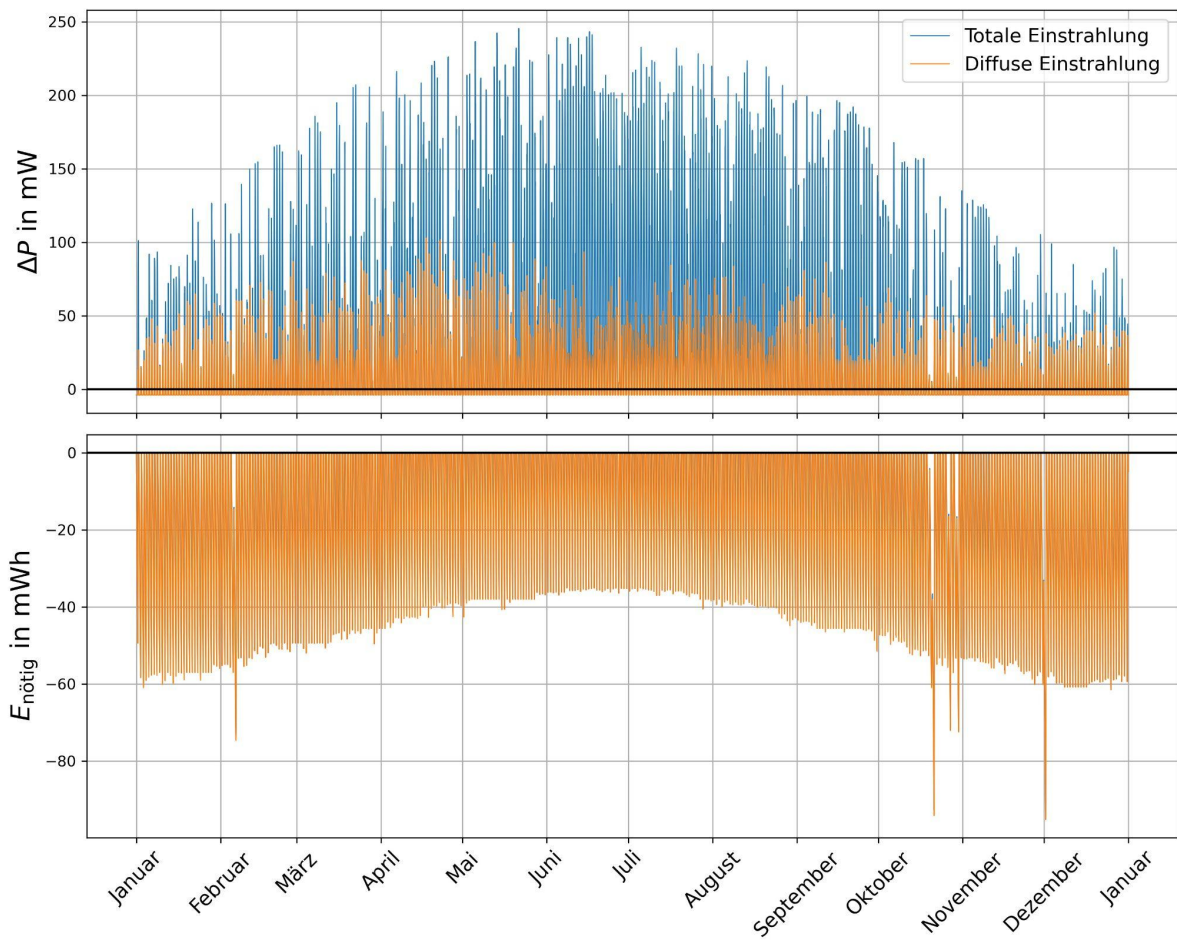


Abbildung 11: Zeitlicher Verlauf der resultierenden Leistung, aus zu erwartender verfügbarer Leistung abzüglich der durch das Sensormodul benötigten gemittelten Leistung, dargestellt. In der unteren Grafik ist die benötigte integrierte Leistung, d.h. die benötigte Energie, die durch den Akkumulator bereitgestellt werden muss, dargestellt.

9. Finanzen

Die Kosten des Systems sind in Tabelle 3 gelistet. Die Kosten für einen funktionierenden Prototypen belaufen sich demnach auf ca. 240 Euro. Dabei sind ein Node und ein Gateway schon enthalten. Bei einer Großabnahme sinkt der Preis etwas.

Tabelle 3: Material und Komponentenkosten des SolemSense Systems.

Bauteil	Quelle	Stückzahl	Preis	Großstückzahpreis
Moteino	Erworben	2	27,60	18
TMP 116	Erworben	3	2,36	1,15
Opt3001	Erworben	1	3,14	1,45
Soilwatch10	Erworben	1	25,69	19,27
DS3231 Modul	Erworben	1	2,99	1,81
BQ 25504	Erworben	1	4,7	2,48
Sondenmaterial	Erworben	1	6,35	2
Antennenkabel	Erworben	2	3,19	1,36
Antenne	Erworben	2	2,49	2,49
Antennen Konnektor	Erworben	2	0,77	0,77
Solarzelle	Erworben	1	1,67	1,67
Akku	Erworben	1	3,99	3,99
Raspberry Pi 3b	Privat	1	38,99	38,99
Bildschirm	Erworben	1	42,49	42,49
Widerstände	Uni		3	3
PCBs	Uni	6	5	5
Gesamtpreis			238,19	195,84

10. Marketing

Im Bereich Marketing stehen wir in Kontakt mit der Badischen Zeitung sowie der Pressestelle der Universität Freiburg.

Marktanalyse

Das Produkt Solemsense wird mit den bisherigen Systemen des Marktes verglichen und abgegrenzt. Der Zielmarkt wird definiert und der Kundenkreis wird hiervon abgeleitet. Darüber hinaus werden relevante Mitbewerber heraus gesucht und die Besonderheiten des Systems hervorgehoben.

Analyse des Zielmarktes

Der anvisierte Markt umfasst insbesondere die Zielgruppe von Verbrauchern. Es ist davon auszugehen, dass diese den Großteil potentieller Käufer ausmachen werden. Das SolemSense System würde zunächst online vertrieben werden und könnte später auch in Technik Märkten vertreiben werden.

Heimgärtner

Der Heimgärtner, der beispielsweise eine kostbare oder sehr wasserverbrauchende Pflanze besitzt und sich fragt, ob er diese genügend gießt oder ob der Pflanzenstandort der richtige ist. Dabei könnte das System mit einer automatischen Bewässerungsanlage verbunden werden und so z.B. eine Tröpfchenbewässerung gestartet werden. Heimgärtner haben oft weniger Platz und sind eher bereit etwas mehr für die einzelne Pflanze zu investieren, gleichzeitig haben sie oft etwas weniger Know how und falsches Gießen kann zu Schädlichen und Krankheiten führen.

Schrebergarten Inhaber

Schrebergarten-Inhaber wohnen in der Regel nicht direkt neben ihrem Garten, mit dem SolemSense System kann von zu Hause aus und in Echtzeit der Zustand einer exemplarischen Pflanze oder eines Ortes in dem Garten überwacht werden (Vorausgesetzt sie befinden sich in der o.g. Reichweite des Systems). Somit muss nicht unnötig gefahren und gegossen werden.

Landwirtschaft

Infolge des Klimawandels werden immer mehr Felder künstlich bewässert. Mit der Automatisierung der Bewässerungsanlage und der Verwendung des SolemSense Systems kann Zeit eingespart werden und es wird zu einer Maximierung des Ertrages gewährleistet werden. Gleichzeitig kann so Wasser eingespart werden. Plus Schädlings- oder Pilzbefall kann durch die optimale Wassermenge reduziert werden.

Öffentliche Einrichtung

Städtische Gärtnereien müssen in den Sommermonaten immer mehr Bäume gießen. Dabei kann ein smarterer Sensor an einem besonders betroffenen Baum platziert werden und in Kombination mit einer Mappingsoftware der optimale Fahrweg bestimmt werden. Folglich kann so Wasser und CO₂ eingespart werden. Und gleichzeitig so eine geringe Arbeitsbelastung für den Arbeitnehmer erreicht werden. Wie oben erwähnt kann eine Stadt mit relativ geringen Anschaffungskosten und dem Aufbau eines Solchen Netzwerkes

Gärtnereien

Gärtnereien können in ihren Gewächshäusern mehrere Sonden anbringen und diese mittels eines Gateways auslesen. Dabei kann auch hier ein Überwässern oder eine zu hohe Temperatur in dem Gewächshaus mit der SolemSense Sonde überwacht werden bzw frühzeitig reagiert werden.

Hobbybastler

Das System ist mit gängiger Software beispielbar und kann im Heimgebrauch auch als Kit verkauft werden. Menschen, die gerne basteln und keine Massenware haben möchten, können ihr System selbst anpassen und erweitern. Darüber hinaus benötigt das System keinen Zugang zum privaten Heimnetzwerk und ist für Sicherheit bedachte Menschen geeignet. Datendiebstahl ist in der heutigen Zeit ein großes Problem, die gesendeten Daten sind für Angreifer eher uninteressant, jedoch verschlüsselt. Wenn eine Synchronisation der Daten mittels des Gateways in das Heimnetzwerk passieren soll, so ist dies möglich, erfordert aber keinen Account von SolemSense. Der Kern des Kundenkreises setzt sich vermutlich aus den oben genannten Personenkreisen zusammen. Die Verknappung des Wassers infolge des Klimawandels trifft uns alle. Daher ist es wichtig, mit Ressourcen in jedem Bereich achtsam umzugehen. Auch wäre es wünschenswert, wenn durch das System das Problembewusstsein geschärft werden würde.

Wettbewerbsanalyse

Im Vergleich zu Produkten wie Royal Gardineer [10], Gardena Smart [11] und Edyn Garden [12] hat unser System eine größere Reichweite. Einzigartig ist die Verwendung des Moteino, einem Arduino-ähnlichen Mikrocontroller, für ein Low-Power-System. Die Programmierung ist ähnlich einfach wie beim Arduino, aber energieeffizienter, was es auch für kritische Anwendungen geeignet macht. Zusätzlich besitzt das SolemSense System eine Basisstation, wie in Abbildung 6 zu sehen ist, welche die Messwerte grafisch anzeigen kann. Dies ist im Gegensatz zu den drei Konkurrenzprodukten ein Novum. Zumal diese nur die Bodenfeuchtigkeit messen. Zudem liefert das System von Royal Gardineer nur die Werte ohne graphische Oberfläche. Das System von Gardena besitzt eine deutlich geringe

Reichweite und liefert weniger Messwerte als das SolemSense System. Hinzu kommt, dass es eine deutlich reduzierte Reichweite und eine relativ hohe Anschaffungskosten als System von bis zu 289,99 Euro. Und benötigt die Integration in das Heimnetzwerk sowie die Verwendung einer App. Somit gibt man viel mehr Daten preis als die man durch so ein Messsystem gewinnt. Das Edyn Garden System ist nicht über die Kickstarter Phase hinausgekommen, hätte aber ähnliche Messungen durchführen können. Ein weiterer Pluspunkt des SolemSense Systems ist die verhältnismäßig hohe Mess- und Sendefrequenz von $f = 16,7$ MHz, wodurch eine hohe zeitliche Auflösung für ein Bodenmesssystem erreicht wird. Darüber hinaus ist der Preis in diesem Produktsegment konkurrenzfähig für eine Messstation und eine Empfangsstation. Ab dem Kauf einer Empfangsstation können bis zu 100 Messstationen durch diese ausgelesen werden. Zudem könnte das System mit der Nichtverwendung einer App oder des heimischen WLANs punkten.

11. Zusammenfassung und Fazit

Das SolemSense System bietet eine einfach zu handhabende Lösung für Temperatur- und Feuchtigkeitsüberwachung im Boden sowie Lichtintensität. Dies zeichnet sich durch die Funkverbindung über LoRaWAN und die mit inbegriffene Basisstation aus. Durch die Soilwatch10 ist der Feuchtigkeitssensor korrosionsbeständig und wartungsfrei. Durch die Verwendung des Moteinos ist die Sonde des SolemSense Systems energieautark und zusätzlich für Hobby-Entwickler eine interessante Plattform für die weitere Entwicklung des Systems. Dadurch kann sich um SolemSense eine Gemeinschaft entwickeln, die das Produkt weiter vorantreibt. Durch die verhältnismäßig hohe Datenrate können auch weit entfernte Gärten oder Felder genau beobachtet werden. Durch die drei Temperatursensoren kann nicht nur die Bodentemperatur in einer Tiefe gemessen werden, sondern ein Temperaturgradient berechnet werden. Dies ermöglicht es, im Winter genauer zu sagen, welche Pflanzen vor Frost geschützt werden müssen und wie weit der Frost vordringt.

12. Ausblick

Da bislang nur ein Prototyp konstruiert wurde, muss dieser noch abgedichtet werden. Dies wird über eine Kombination aus Epoxidharz und Lack für die 3D-gedruckten Komponenten erreicht. Sobald dies geschehen ist, werden Langzeitmessungen durchgeführt, die einige Tage bis Wochen beinhalten. Dabei wird untersucht, wie sich das System unter Witterungseinflüssen behaupten kann.

Die Soilwatch10 kann zwar den volumetrischen Wassergehalt im Boden messen, allerdings ist die momentane Kalibrierung nicht für jeden Bodentyp geeignet. Ziel wäre es, verschiedene Kalibrierungskurven auf der Basisstation zur Verfügung zu stellen. Dadurch können die Messdaten in der Messstation ausgewertet werden und der Nutzer kann sein SolemSense an seine Boden auslegen.

Zusätzlich soll das System zukünftig auch in das LoRaWAN Netz integriert werden.

12. Literaturverzeichnis

- [1] Klima-Warnsignale, Universität Hamburg, online verfügbar unter :
https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/staedte/warnsignal_klima-die_staedte-kapitel-6_5.pdf, zuletzt besucht 20.08.2023
- [2] Stadtklimatologische Bedeutung kleiner Parkanlagen, Benjamin Bongardt, Dezember 2005
<https://core.ac.uk/download/pdf/33799722.pdf>, zuletzt besucht 19.08.2023
- [3] Pflanzenforschung.de, Bundesministerium für Bildung und Forschung,
<https://www.pflanzenforschung.de/de/journal/journalbeitrag/inventur-zwei-drittel-weniger-pflanzenarten-weltweit-al-981/>, zuletzt besucht 19.08.2023
- [4] LoRa, online verfügbar unter <https://lorareadthedocs.io/en/latest/#data-rate>, zuletzt besucht 13.08.2023
- [5] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM, European Commission, online verfügbar unter
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#MR, zuletzt besucht 2.08.2023
- [6] TMP116 Datenblatt, Texas Instruments, online verfügbar unter
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tmp116.pdf?ts=1693390085000&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fde-de%252FTMP116, zuletzt besucht 13.08.2023
- [7] OPT3001 Datenblatt, Texas Instruments, online verfügbar unter
https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt3001.pdf?ts=1693384869390&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOPT3001, zuletzt besucht 20.07.2023
- [8] Pino-Tech, Soilwatch10, online verfügbar unter : <https://pino-tech.eu/soilwatch10/>, zuletzt besucht 20.07.2023
- [9] Roop Pahuja, Development of semi-automatic recalibration system and curve-fit models for smart soil moisture sensor, Measurement, Volume 203, 2022, 111907
- [10] Royal Gardineer, Gardena, online verfügbar unter:
<http://www.royal-gardineer.de/Bluetooth-Dongle-fuer-Pflanzen-ZX-2807-919.shtml>, zuletzt besucht 13.07.2023
- [11] Gardena, online verfügbar unter:
<https://www.gardena.com/de/produkte/bewasserung/bewässerungssteuerung/smart-sensor/967044801/>
zuletzt besucht 18.07.2023
- [12] Welcome to the connected garden, Edyn, online verfügbar unter:
<https://www.kickstarter.com/projects/edyn/edyn-welcome-to-the-connected-garden?lang=de>, zuletzt besucht 13.08.2023