

# **Beleg im Modul Embedded Systems II**

## **“HydroIntellix”**

### **intelligente Bewässerung mit kapazitären Sensoren und LoRa**

Lam Quang Anh, Nguyen (70360)

Eckstein, Emanuel (85117)

Prof. Dr.-Ing. Andreas Pretschner

Abgabe. 31.03.2024

# 1. Idee und Grundlagen

Ein grundlegendes Problem des 21. Jahrhunderts sind die immer knapper werdenden Mengen an Grundwasser, welche die Sicherheit bezüglich Trinkwasser, Nahrung und vieler technologischer Prozesse bedrohen. Das im Rahmen dieses Beleg realisierte Projekt trägt dazu bei, den Wasserverbrauch in Haus- und Kleingärten durch eine dynamische Steuerung zu senken. Zum einen werden bei der Umsetzung dieses Projekts aufliegende oder unterirdische Tropfschläuche verwendet, die die Verdunstung von Gießwasser um bis zu 70 Prozent verringern[1]. Zum anderen werden Gärten in verschiedene Zonen eingeteilt und jede Zone wird gemäß ihrem individuellen Wasserverbrauch bewässert.

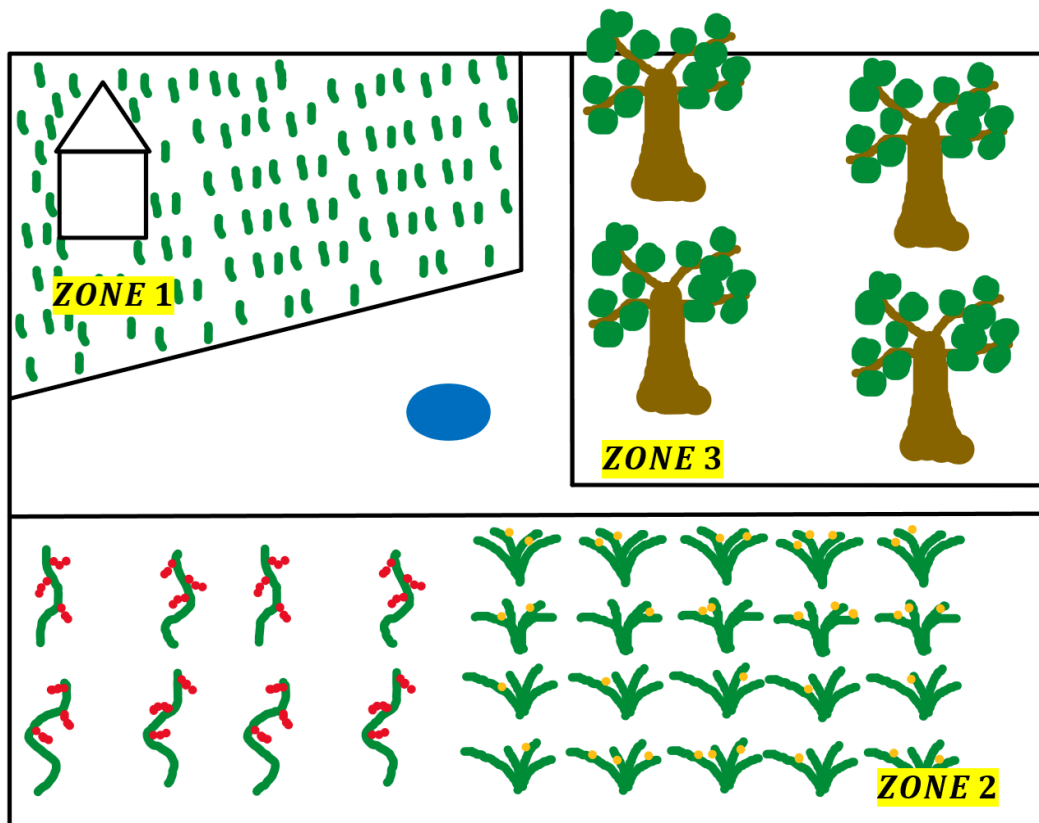


Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Gartenzonen: Zone 1: Rasenfläche (3-4 Liter/Tag pro Quadratmeter), Zone 2: Gemüseanbaufläche (4-10 Liter/Tag pro Quadratmeter), Zone 3 (Obst)-Baumfläche (1-2 Liter/Tag pro Quadratmeter)[2]

Das Projekt vereint die Messung der Bodenfeuchtigkeit sowie die Bewässerung in einem Gerät (HydroIntellix) pro Zone. Im Vergleich zu marktüblichen Bewässerungssystemen, die meistens zu einer festen Uhrzeit am Tag den gesamten Garten wässern, kann so auf die unterschiedlichen Wasserverbrauch je nach Zone sowie auf Hitze- und Regenperioden eingegangen werden.

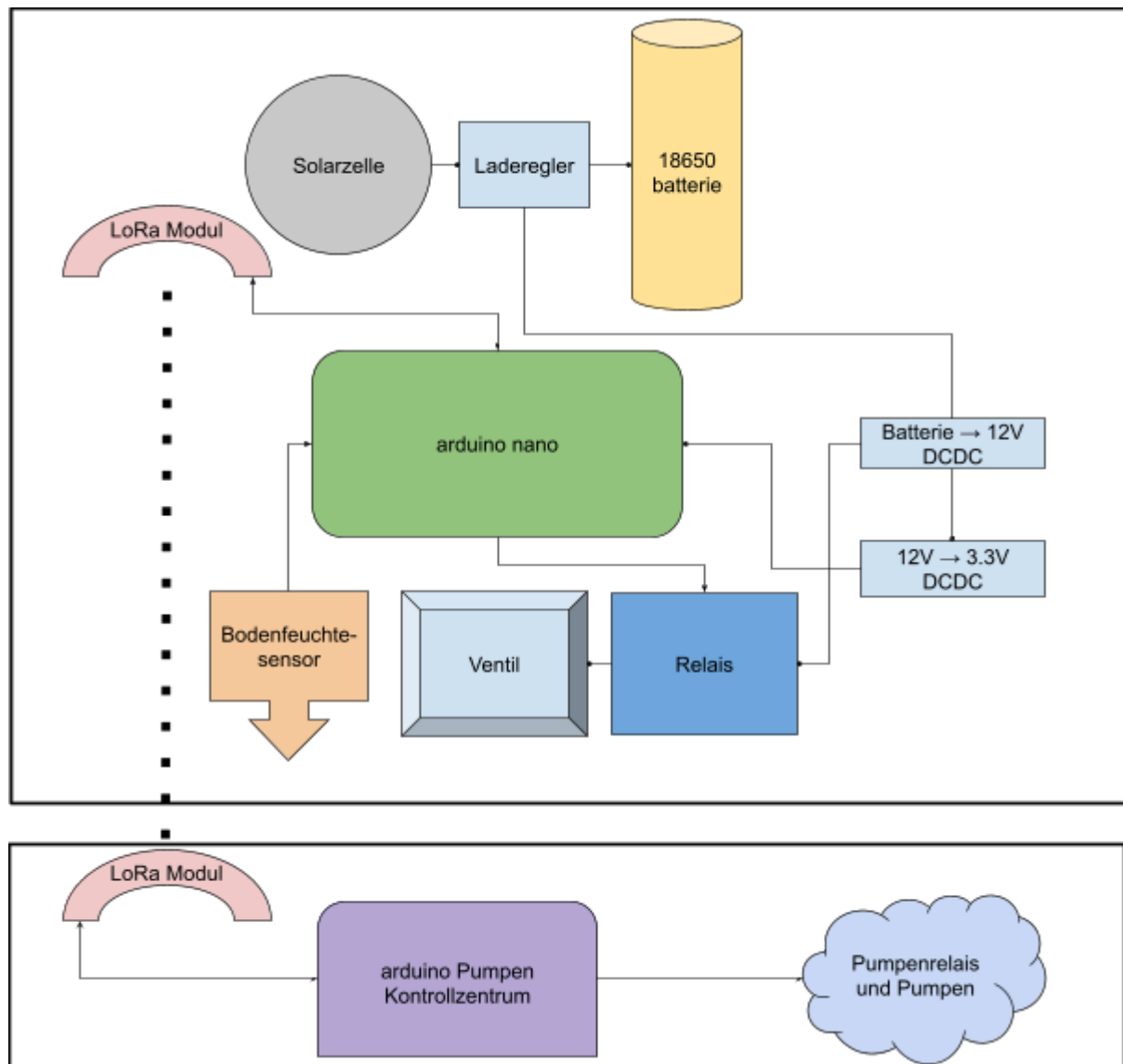


Abbildung 2: Darstellung der Funktionsweise des HydroIntellix in Verbindung mit einem Pumpen-Kontrollzentrum.

Kurzbeschreibung des Funktionsablaufes auf Grundlage von Abbildung 2:

Sobald die Bodenfeuchtigkeit unter einen festgelegten Wert fällt, beginnt ein Bewässerungszyklus.

- Das Ventil des Sensors, der den kritischen Wert unterschreitet, öffnet sich.
- Über LoRa wird dem Pumpen-Kontrollzentrum mitgeteilt, dass die Zone X "trocken" ist und die Pumpe zur Bewässerung gestartet werden soll.
- Im HydroIntellix der Zone X und im Pumpen-Kontrollzentrum wird jetzt ein Timer für die Bewässerung von 46 Minuten beziehungsweise 45 Minuten gestartet.
- Die leicht längere Zeit des Timers des HydroIntellix stellt einen Schutzmechanismus dar, damit sich nicht das letzte Ventil schließt, wenn noch der hohe Wasserdruck der Pumpe anliegt.
- Der Timer am Pumpen-Kontrollzentrum wird jedes Mal neu gestartet, wenn eine Zone über LoRa das Einschalten der Pumpen verlangt, somit wird sichergestellt, dass bei zeitlicher Überlagerung von Bewässerungsanforderungen der Zonen eine Bewässerung erfolgt
- Ist der Timer des HydroIntellix in Zone X abgelaufen, schließt sich das Ventil wieder und es wird erneut gemessen
- Alle Messungen werden über LoRa an das Pumpen-Kontrollzentrum nach Zone zugeordnet weitergegeben und dort auf einer SD-Karte aufgezeichnet. So können Hardwareausfälle, Sensorfehler und Ähnliches gefunden werden.

## **2. Konstruktion und Methoden**

Die Konstruktion des HydroIntellix teilt sich in drei Schritte auf. Der erste Schritt ist die Stromversorgung, der zweite Schritt die Funkverbindung über das LoRa Protokoll und der dritte Schritt stellt die Implementierung des Sensors dar. Im Folgenden soll das "warum" begründet werden, das "wie" findet sich in der Konstruktionsanleitung.

### 2.1 Strom und Spannungsversorgung.

i) Solarstrom

Aus den Komponenten, dargestellt in Abbildung 2, wurde ein Energiebedarf von über 0,38 Watt pro Stunde gemessen. Dieser Wert wurde auf 12 Watt pro Tag hochgerechnet. Daraus resultiert ein jährlicher Energiebedarf von circa 4.380 Watt. Dieser steht in den betreffenden Breitengraden etwa 2.000 Sonnenstunden pro Jahr gegenüber. Die Ladeeffizienz des Ladereglers ist laut Herstellerangaben im Datenblatt 94%. Messungen ergaben jedoch eine geschätzte Ladeeffizienz von 80%. Daraus ergibt sich, dass mindestens eine Solarzelle mit 3 Watt Leistung erforderlich ist, um den jährlichen Energiebedarf zu decken. Um sicherzustellen, dass ausreichend Energie zur Verfügung steht, wurde eine Solarzelle mit einer Leistung von bis zu 5 Watt ausgewählt. Die implementierte Ventil- und Akkutechnologie ist für die Wintertemperaturen in Mitteldeutschland nicht geeignet, und da die Anzahl der Sonnenstunden im Sommer fünfmal so hoch ist wie im Winter, resultiert für die meist frostfreie Saison vom 1. April bis zum 31. Oktober folgende Rechnung:

$$\begin{array}{llll} \text{Verbrauch/Tag} & * & \text{Saisontage} & * & \text{Abschätzungsmultiplikator(1)} \\ 12W & * & 213 & * & 1.5 & = & 3834W \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{Sonnenstunden(01.04 bis 31.10)} & * & \text{Solarzellengewinn} & * & \text{Abschätzungsmultiplikator(2)} \\ 1.229 & * & 5W & * & 0.7 & = & 4301W \end{array}$$

Somit ist auch mit großzügig gewählten Abschätzungsmultiplikatoren der Verbrauch geringer als der Gewinn. Sollte es dennoch zu einer Unterversorgung kommen durch technische Defekte oder mehrtägige Gewitter, kann das aus den in der Kurzbeschreibung erwähnten aufgezeichneten Messungen nachvollzogen werden.

## ii) Spannungsversorgung

Im HydroIntellix sind verschiedene Komponenten verbaut, die unterschiedliche Anforderungen an die zur Verfügung gestellte Spannung haben.

Beschreibung	Spannungsbereich
Mikrocontroller Board	5V
Langstrecken - Transceiver	1.8 - 3.7V (3.3V)
Antenne 433Mhz	
DC-DC-Step-Down	nach 3.3V
DC-DC-Step-Up	nach 12V
Relais	3V
Kapazitätssensor	3.3 - 5V
Laderegler	4.35 - 6V (5V)
Batteriehalterung	
18650 Akku	3.7V
Motorisierter Kugelhahn	9 - 24V
NPN-Transistor	
Widerstand (1k $\Omega$ )	
Widerstand (2 $\Omega$ )	
Diode	
Solarzelle	5V

*Abbildung 3: Ausschnitt aus der Hardwareliste*

Die Wahl der Komponenten sorgt dafür, dass auf der Platine hauptsächlich mit 2 Spannungen die Versorgung derer erfolgt.

Jede Spannungsumwandlung hat nur eine gewisse Energieeffizienz, somit gilt es die Zahl derer zu reduzieren. Derzeit gibt es keine servogesteuerten ½" Ventile mit IP65, die mit einer Spannung von 3.3V betrieben werden und auch keine kapazitären Bodensensoren und LoRa-Module, die mit einer Spannung  $\geq 9V$  funktionieren. Die gemessene Verlustleistung der Bauteile Laderegler + Batterie  $\rightarrow 12V + 12V \rightarrow 3.3V$  summiert sich im Normalbetrieb zu 0.08 Wattstunden. Der Verlustleistung steht eine Leistung von 0.27 Wattstunden im Normalbetrieb gegenüber und eine Leistung von 0.5 Wattstunden während der Bewässerung. Der kurzzeitig höhere Energiebedarf zum Öffnen und Schließen des Ventils ist vernachlässigbar.

## 2.2 Technische Besonderheiten beim Platinenentwurf

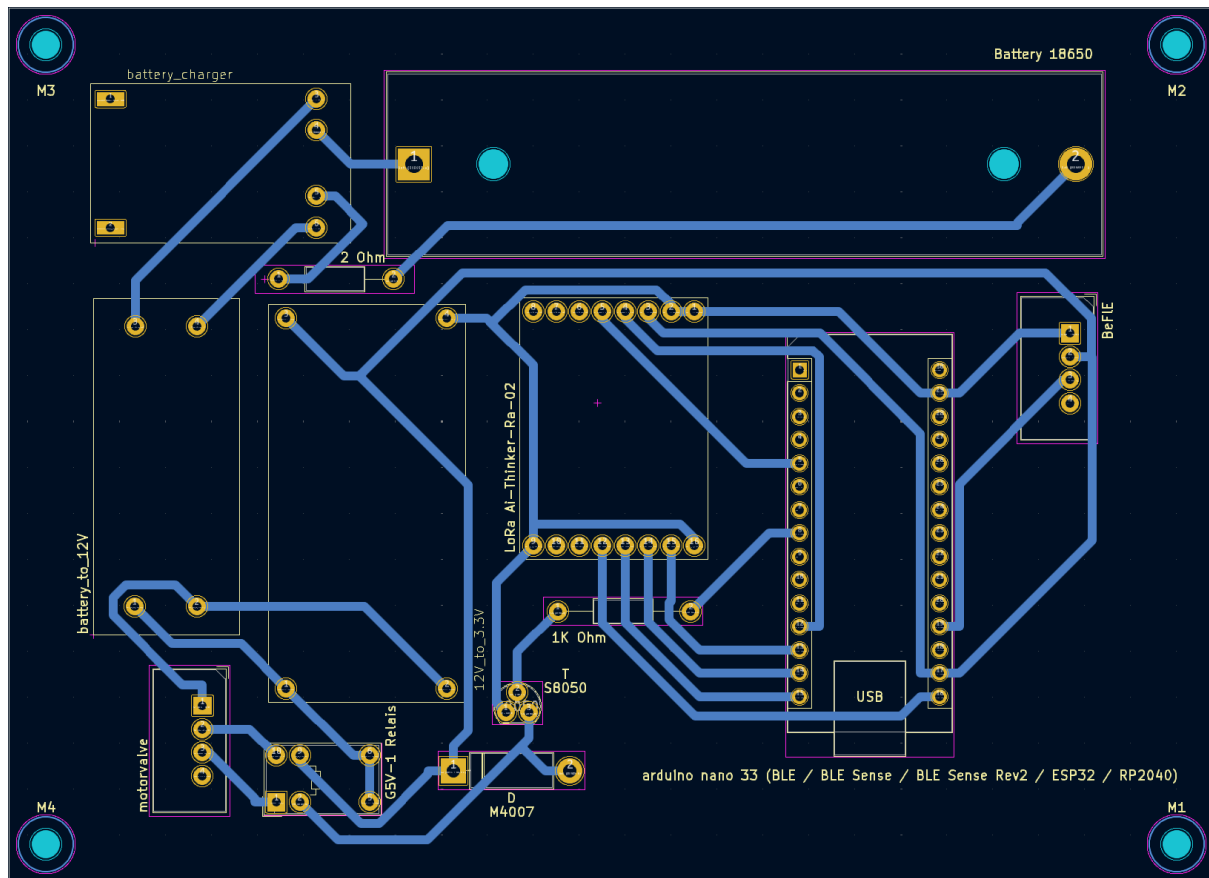


Abbildung 4a): Die Rückseite der Platine im Leiterplatten Editor.

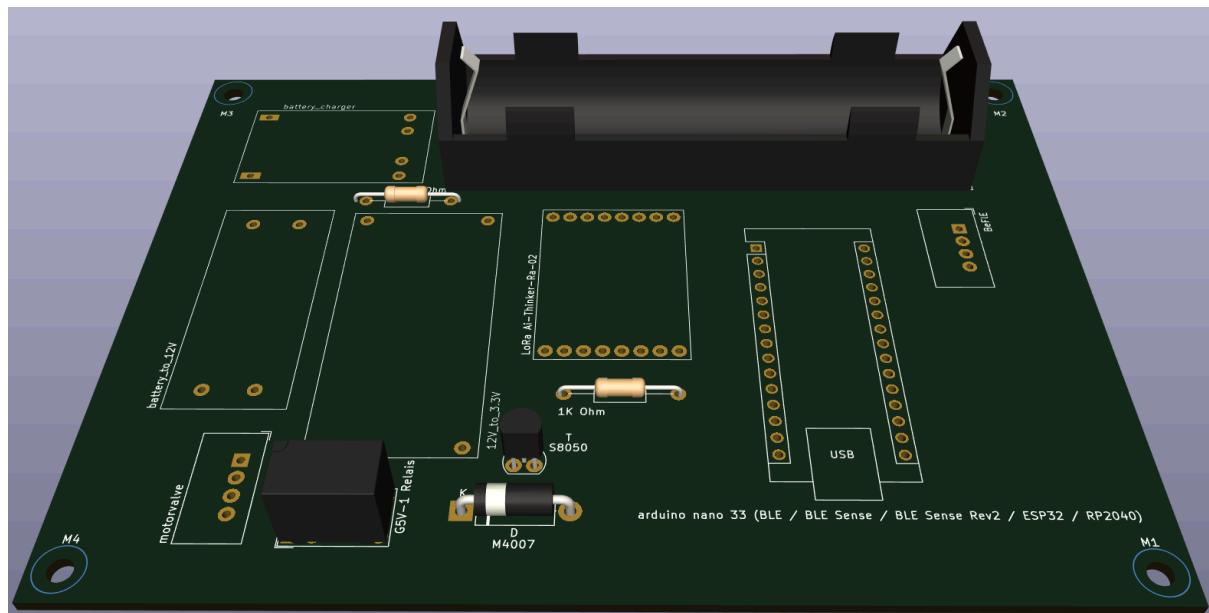


Abbildung 4b) : Die Vorderseite der Platine in der 3D-Ansicht

Gefertigt wurde die Leiterplatte in der HTWK. Es handelt sich um ein einlagiges Design, das heißt, dass nur auf einer Seite der Platine Leiterbahnen geätzt sind. Auf der anderen Seite werden die Komponenten durch Stecklöcher mit den Leiterbahnen verbunden. Die Breite von einem Millimeter für jede Leiterbahn erleichtert das Lötten und ist nach IPC-2221 für die Ströme, die im HydroIntellix benötigt werden, weit unterhalb der kleinsten Kategorie von 10° Kelvin[4]. Die geringe Größe des Verlusts trägt zu einem niedrigen Energieverbrauch bei.

Die Herstellervorgaben für einen einzelnen digitalen Pin liegen bei dem hier verbauten originalen Nano 33 BLE Sense Rev2 und auch bei vielen anderen bei maximal 40 mA[5]. Um das Omron G5V-1 Relais, welches das Ventil steuert, zu öffnen, ergibt sich bei einer Spannung von 3.3 V und einem internen Spulenwiderstand des Relais von  $\sim 60 \Omega$  ein Strom von 55 mA. Erforderlich ist also eine Transistorschaltung, womit sich folgende Kaskadierung ergibt.

*nano PIN D5  $\rightarrow$  Transistor  $\rightarrow$  Relais  $\rightarrow$  Servoventil*

Der Verstärkungsfaktor  $h_{BF}$  beträgt  $\sim 100$ [6], wodurch am digitalen Pin der Strom von  $(I_B = I_C / h_{FE}) \sim 0.55 \text{ mA}$  benötigt wird.

Ein  $1 \text{ k}\Omega$  Widerstand zwischen dem Pin D5 und der Basis des Transistor verhindert außerdem als weitere Schutzmaßnahme, dass ein Strom  $\geq 5 \text{ mA}$  fließt. Auch die M4007 Diode ist Teil der Relaisschaltung. Sie schützt vor Spannungsspitzen, die durch die Relaisspule induziert werden.

Ein wichtiger Bestandteil der Platine ist auch der 18650 Akku mit einer Nennspannung von 3.7V und 3000mAh. Dieser kann den HydroIntellix für maximal 2 Tage komplett ohne Solarenergie versorgen.

Abschließend ist auch die Entscheidung für ein servogesteuertes Ventil basierend auf der Energieeffizienz wichtig. Marktübliche Magnetventile einer solchen Größe sind meist deutlich günstiger, werden aber durch ein Magnetfeld offen oder geschlossen gehalten. Der Energieverbrauch eines solchen Ventil ist aber deutlich höher als der eines servogesteuerten Ventils, gerade bei längeren Bewässerungszeiten, da der Motor das Ventil innerhalb von Sekunden öffnet und schließt und dieser Zustand mechanisch gehalten wird.

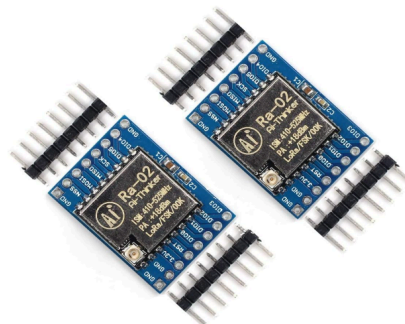


## 2.3 Funkverbindung über LoRa

Es wird die von Semtech entwickelte LoRa-Technologie verwendet, die extrem stromsparende und weitreichende Datenübertragung ermöglicht.

Eine besondere Herausforderung, insbesondere in der landwirtschaftlichen Umgebung, besteht darin, dass die Datenübertragung zwischen Sensoren und dem Zentrum aufgrund von Entfernungen und Umwelteinflüssen oft auf Instabilitäten stößt. LoRa ist eine ausgezeichnete Wahl, um diesem Problem entgegenzuwirken. LoRa zeichnet sich durch eine integrierte energiesparende Technologie und eine hohe Reichweite aus, was sich als deutlicher Vorteil bei der drahtlosen Bewässerung zeigt.

Ein weiterer Grund, um LoRa zu verwenden, ist die Möglichkeit der unidirektionalen Kommunikation zwischen Sender und Empfänger. Die Sender sind hierbei die HydroIntellix in ihrer jeweiligen Zone, und der Empfänger ist das Pumpen-Kontrollzentrum. Die im Rahmen des Belegs durchgeführten Messergebnisse zeigen, dass das LoRa-Modul in seiner Funktion als Empfänger 80% der Energieaufnahme eines Nanos beansprucht. Neben einer geringeren Störanfälligkeit, besserer Skalierbarkeit und einfacherer Implementierung spricht alles für die unidirektionale Kommunikation.



*Abbildung 5: Das verwendete LoRa-Modul*

Das verwendete LoRa-Modul ist das "LoRa RA-02 AI-Thinker", es arbeitet im ISM-Band bei 410-525 MHz. Diese Frequenz ist in der EU für nicht exklusive, lizenzfreie Kurzstreckenkommunikationssysteme zulässig. Nach verschiedenen Tests hat sich ergeben, dass die Module über Strecken von über 500m miteinander kommunizieren können.

Das Funktionsprinzip von LoRa basiert auf der Chirp Spread Spectrum Modulationstechnik (eine Technik, die chirp-Impulse verwendet, um Informationen zu codieren). Das Chirp Spread Spectrum ist eine Datenübertragungsmethode, bei der die Frequenz des Funksignals im Laufe der Zeit nach einem "chirp"-Muster variiert, das heißt, die Frequenz steigt oder fällt gleichmäßig. Dies erzeugt ein breiteres Frequenzspektrum als das ursprüngliche Signal. Zuerst wird das Signal der Originaldaten mit einer höheren Frequenz verstärkt, dann in einer Sequenz von Chirp-Signalen codiert und schließlich von der Antenne gesendet. Diese Technik ermöglicht es, Daten auf verschiedenen Frequenzen gleichzeitig zu übertragen. Dies trägt zur Verbesserung der Störfestigkeit und zur Reduzierung des Signalrauschens bei, was die Kommunikationsleistung verbessert und Energie spart. Darüber hinaus überträgt LoRa in der Regel Daten in Paketform, das heißt, es verbraucht nur Energie beim Senden oder Empfangen von Daten, was den Energieverbrauch im Vergleich zur kontinuierlichen Datenübertragung reduziert. Dank dieser Technik können Signale mit geringer Leistung über weite Strecken übertragen werden und stellen so die ideale Kommunikationsmöglichkeit für den HydroIntellix dar.

Darüber hinaus stellt die Integration von LoRa mit anderen Komponenten im System, wie Sensoren und Mikrocontrollern, auch technische Herausforderungen dar. Dazu gehören Fragen zur Nennspannung (3,3V) und Kompatibilität, die Synchronisierung von Daten zwischen verschiedenen Geräten sowie das Management des Kommunikationsprotokolls, um die Effizienz und Zuverlässigkeit des Systems zu gewährleisten. Die LoRa Bibliothek von sanddeepmystery[7] stellt aber eine sehr gute Implementierung von LoRa bei der Programmierung des Nanos dar.

Eine stabile und zuverlässige Verbindung zwischen Sender und Empfänger ermöglicht eine effektive kontinuierliche Übertragung von Steuerungsanweisungen und Bodenfeuchtigkeitsdaten. Mit einem Betriebstemperaturbereich von -40 bis 85°C kann das Gerät unter den Außentemperaturbedingungen am Implementierungsstandort problemlos betrieben werden.

## 2.4 Sensor

Der Sensor, der im HydroIntellix verbaut wird, ist der open-source "SoMoSe v2.2" von Befle[8]. Der "SoMoSe v2.2" ist ein kapazitiver Bodenfeuchtigkeitssensor. Er verfügt über eine analoge und eine I2C Schnittstelle und ist in der Lage, den Feuchtigkeitsgehalt des Bodens genau zu messen und somit eine präzise und effiziente Steuerung des Bewässerungsprozesses zu ermöglichen.



*Abbildung 6: Der SoMoSe v2.2 von Befle*

Ein Problem von rein resistiven Bodenfeuchtigkeitssensoren ist, dass sie anfällig für Korrosion sind. Da diese Sensoren durch das Messen des elektrischen Widerstands zwischen zwei Elektroden im Boden arbeiten, müssen sie direkten Kontakt mit dem Boden haben. Feuchte Erde, insbesondere wenn sie mineral- oder salzhaltig ist, kann durch Elektrolyse zu einer schnellen Korrosion der Elektroden führen. Dies kann die Lebensdauer des Sensors erheblich verkürzen und die Genauigkeit der Feuchtigkeitsmessungen über die Zeit verschlechtern.

Da der HydroIntellix die ganze Saison über im Boden bleiben soll, eignet sich der SoMoSe hervorragend, da kein direkter Kontakt zwischen Sensor und Boden besteht, sondern die Messung lediglich über die Dielektrizitätszahl  $\epsilon_R$  der Umgebung beeinflusst wird.

Darüber hinaus ist der Sensor vollständig mit einer robusten Schutzschicht überzogen, die ihn vor Feuchtigkeit und Verschmutzung schützt und so zur Langlebigkeit beiträgt.

Der Sensor ist über die analoge Schnittstelle mit dem Nano an PIN A0 verbunden. An diesem wird eine Spannung abgegriffen und vom A/D-Wandler des Nano in einen 10 bit-Wert abhängig von der Eingangsspannung umgewandelt. Dieser Wert ist proportional zur gemessenen Feuchtigkeit, von 0 V = 0% bis  $U_{in} = 100\%$ . Die analoge Schnittstelle wurde gewählt, da die I2C-Schnittstelle jede Sekunde eine Messung macht und den gemittelten Wert alle 30 Sekunden dann übermittelt. Beim HydroIntellix reichen Messungen alle 10 Minuten, da sich die relative Bodenfeuchtigkeit nur langsam ändert. Auch ist beim analogen Anschluss der Energieaufwand geringer, da keine digitale Kommunikation erfolgt[8].

### 3. Simulation und Test

#### 3.1 Sensorkalibrierung

Wichtig ist dennoch immer eine Kalibrierung des Sensors, um den Grenzwert, ab dem der Boden bewässert werden soll, zu bestimmen. Es werden 3 Medien (Sand, lehmige Erde und lehmfreie Erde) bei verschiedenen Medium-zu-Wasserverhältnissen untersucht.

<b>10-bit Sensorwert</b>	<i>Medium</i>	Sand	lehmige Erde	lehmfreie Erde
<i>Verhältnis</i>				
0		1 - 5	25 - 27	25 - 28
10:1		23 - 28	47 - 50	70 - 72
5:1		484 - 494	243 - 252	91 - 96
2.5:1		524 - 538	482 - 495	239 - 252

Aus den Werten der Tabelle ergibt sich, dass diese sich je nach Bodenbeschaffenheit stark unterscheiden. Als Grenzwert für einen zu trockenen Boden wird 200 angenommen.

Nach erfolgreicher Installation arbeitet der Sensor zuverlässig und liefert verlässliche Werte. Mit einer Betriebstemperatur von -20 bis 60°C kann der Sensor problemlos die ganze Saison über betrieben werden.

## 3.2 Testcode

Mit dem entworfenen Testcode für den HydroIntellix lassen sich in kurzer Zeit alle Funktionalitäten überprüfen. In den Kommentarten wird darauf eingegangen, welche Aufgaben der Testcode prüft:

```
//benötigte Bibliotheken
#include <SPI.h>
#include <LoRa.h>

// Analoger Pin A0 für den Sensor
int sensorPin = A0;

// PIN 5 für das öffnen und schließen des Ventils
int VENT = 5;

void setup() {
    Serial.begin(1200);
    digitalWrite(VENT, LOW);
    pinMode(VENT, OUTPUT);

    //hiermit kann über den Seriellen Monitor der Arduino IDE
    //ein Problem mit dem LoRa-Modul festgestellt werden
    Serial.println("LoRa Sender");
    if (!LoRa.begin(433E6)) {
        Serial.println("Starting LoRa failed!");
    }
}

void loop() {
    int potValue = analogRead(sensorPin); // Liest den Wert des Sensors
    // Zeigt den Wert des Sensors auf dem seriellen Monitor an
    Serial.println(potValue);
    // Definierter Grenzwert
    int threshold = 200;

    //SX muss je nach Zone angepasst werden
    String message = "S1" + String(potValue);
    // jedes Messergebnis wird an das Pumpen-Kontrollzentrum gesendet
    // und dort aufgezeichnet
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print(message);
    LoRa.endPacket();
}
```

```

// Wenn der Wert über dem Schwellenwert liegt wird
if (potValue > threshold) {
    digitalWrite(VENT, HIGH); // öffnet das Ventil
    // 5 Sekunden Verzögerung, damit sich das Ventil vollständig
    // öffnen kann
    delay(5 * 1000);

    // Sendet Signale an das Pumpen-Kontrollzentrum, um die Pumpe zu
    // starten. SX anpassen
    LoRa.beginPacket();
    LoRa.print("S1ON");
    LoRa.endPacket();

    delay(5 * 1000); // Für 5 Sekunden statt 46 Minuten warten

    digitalWrite(VENT, LOW); // VENT am Sender ausschalten

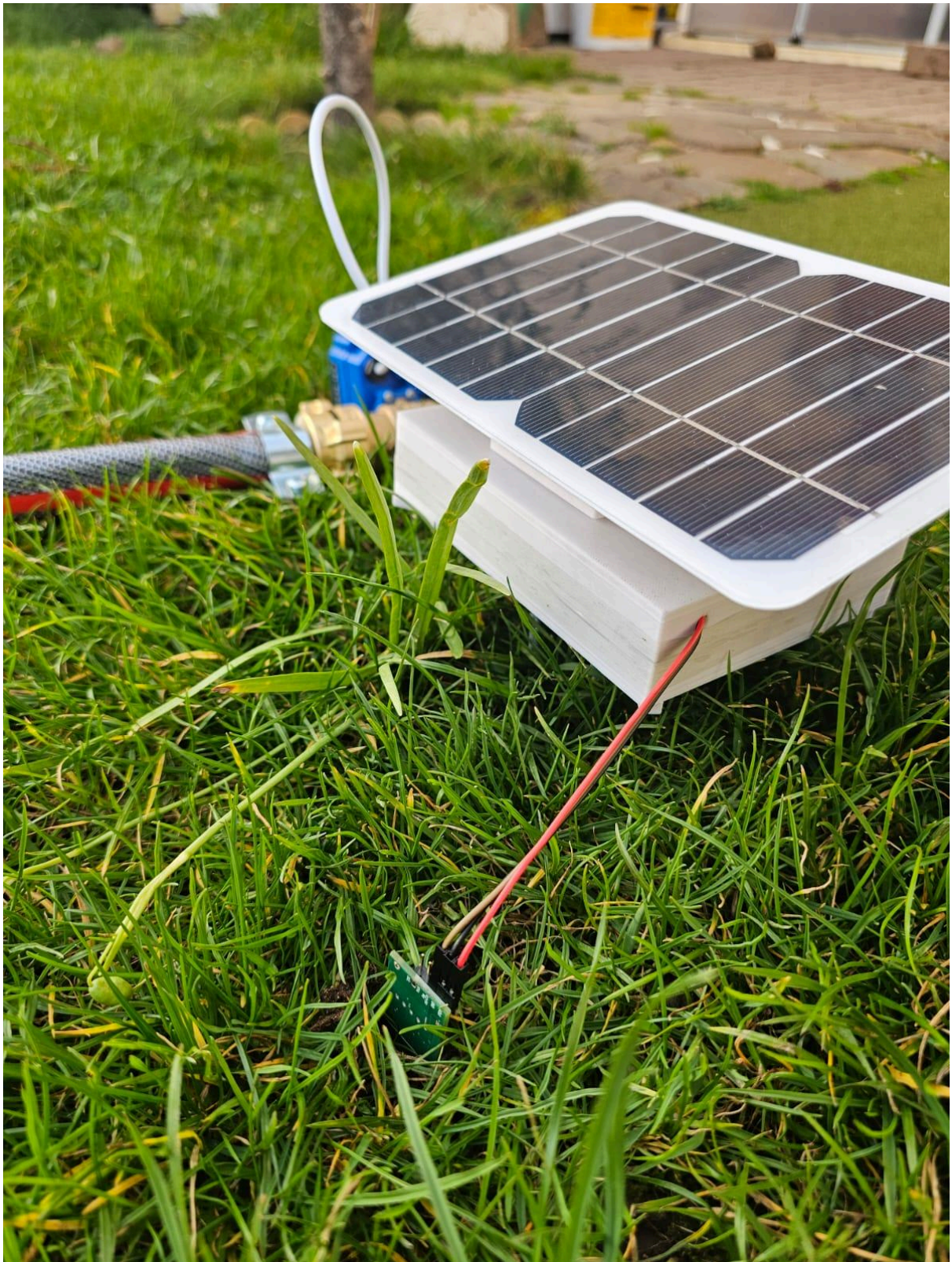
    delay(1000); //Puffer
}
// Warte eine Sekunde statt 10 Minuten vor der
// nächsten Messung
delay(1000);
}

```

### 3.3 Schutz gegen Wasser

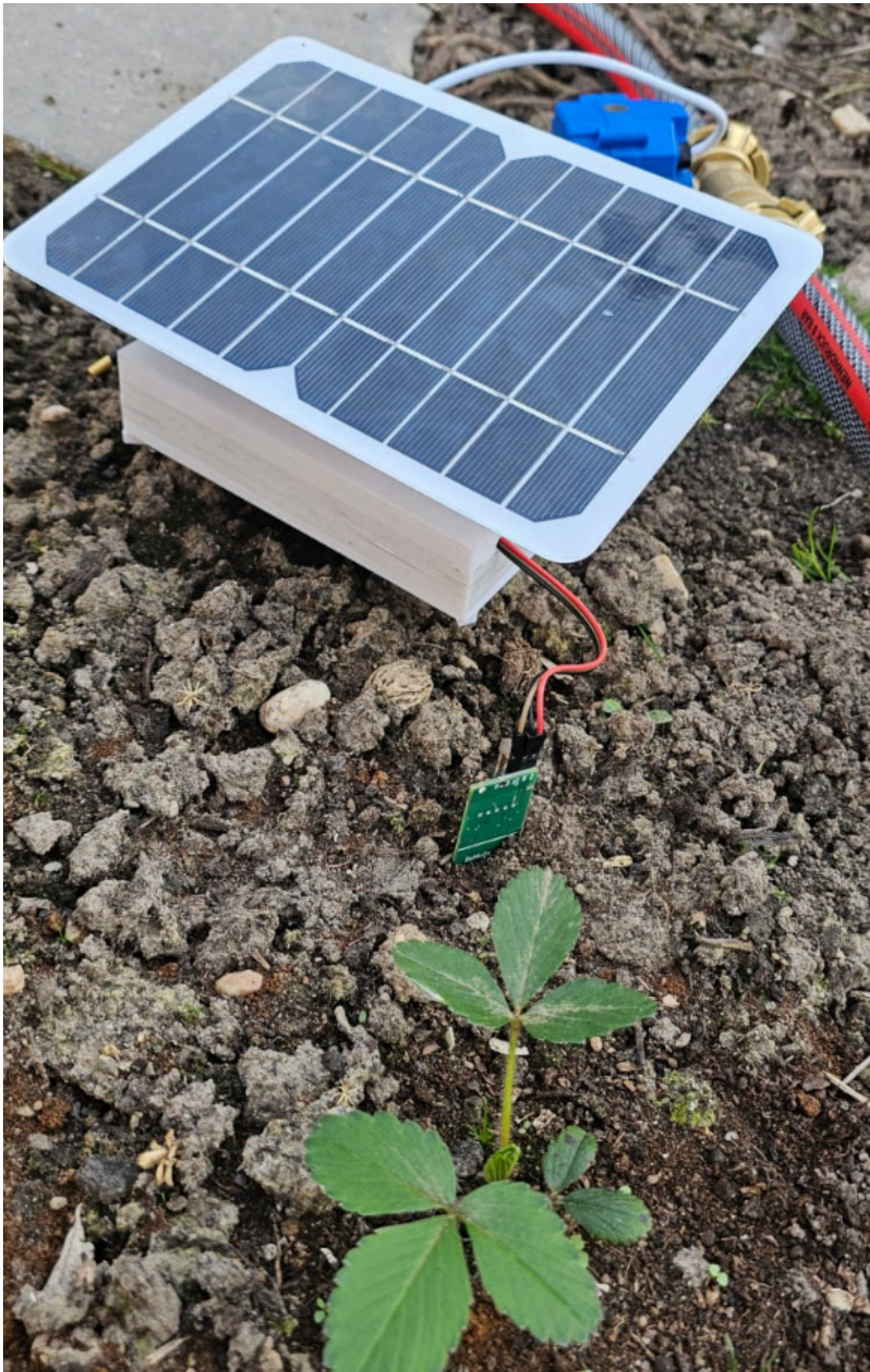
Um die elektronischen Komponenten des HydroIntellix zu schützen, wird die Leiterplatte in ein 3D gedrucktes Gehäuse eingefasst. Um eine höhere Witterungsbeständigkeit zu ermöglichen, kann die Hülle vor dem Zusammenbau noch mit einem wetterbeständigen Kunstharz überzogen werden. Die nach außen abschüssigen Löcher für die Peripherie (Antenne, Sensorkabel, Solarzellenkabel und Motorkabel) sollten ebenfalls noch mit Kunstharz abgedichtet werden. Das Leiterplattengehäuse kann zusätzlich bei der finalen Installation mit zwei Kabelbindern verschlossen werden. In der Konstruktion dient die Solarzelle zusätzlich wie ein Dach für alles unterhalb und weist Sonne und Regen schräg ab. Die in den Boden gesteckten verzinkten Gewindestangen sorgen als Dreibein für einen sehr sicheren Halt im Boden, wobei das Servoventil eine eigene Befestigung im Boden hat, weil es bei während des Öffnen und Schließen zu einem starken Druckstoß kommen kann, der bei einer zentralen Befestigung zu Beschädigungen führt.





*Abbildung 7: Der HydroIntellix auf einer Rasenfläche*





*Abbildung 8: Der HydroIntellix im Erdbeerbeet*

## 4. Ausblick

Nach erfolgreicher Entwicklung des HydroIntellix folgt die Umsetzung des Pumpen-Kontrollzentrums im Github-repo. Das Pumpen-Kontrollzentrum hat zusammen mit den Pumpen Zugriff auf eine dauerhafte Stromversorgung. Es zeichnet die Messungen der verschiedenen Zonen auf, steuert die Pumpen und muss Wind und Wetter trotzen müssen.

Wichtig ist außerdem die individuelle Planung von Gartenzonen sowie entsprechende Schläuchen zur Bewässerung. Die Ventile der HydroIntellix in ihrer jeweiligen Zone sind auf der einen Seite durch einen normalen Gartenschlauch mit der Pumpe verbunden. Auf der anderen Seite des Ventils geht dann die Verzweigung von Tropfschläuchen ab, um die Zone zu bewässern.

## 5. Quellen

Quelle 1:

[Tropfschlauch, Perlschlauch und Sprühschlauch Wassernixe \(rehau.com\)](https://www.rehau.com/de/produkte/versorgungsleitungen/tropfschlauch-perlschlauch-spruehschlauch/wassernixe)

Quelle 2:

<https://www.gartentyp.com/garten-wiki/bewaesserung-im-garten-wie-viel-wasser-brauchen-meine-pflanzen/>

Quelle 3:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/5578/umfrage/durchschnittliche-monatliche-sonnenscheindauer-in-deutschland/>

Quelle 4:

<https://www.dischereit.de/strombelastbarkeit-von-leiterbahnen/>

Quelle 5:

<https://docs.arduino.cc/hardware/nano-33-ble-sense-rev2/>

Quelle 6:

[https://components101.com/sites/default/files/component\\_datasheet/S9013-Transistor-Datasheet.PDF](https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/S9013-Transistor-Datasheet.PDF)

Quelle 7: <https://github.com/sandeepmistry/arduino-LoRa>

Quelle 8: <https://github.com/BeFIE/SoMoSe>