



HOCHSCHULE HEILBRONN

Master Electrical Systems Engineering

Masterprojekt

**Entwicklung eines kapazitiven
Bodenfeuchtesensors und Einsatz in einer
automatischen Bewässerungsanlage**

Benedikt Seck

Matrikelnr.: 202060

Bearbeitungszeitraum:

14. Oktober 2022 - 15. Februar 2024

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. M. Alles

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Stand der Technik	2
2.1. Messung des Wasserpotentials	2
2.2. Messung des Wassergehalts	3
2.2.1. Gravimetrische Messung	3
2.2.2. Resistive Messung	3
2.2.3. Dielektrische Messung	4
2.3. Vergleich der Messverfahren	8
3. Konzept- und Schaltungsentwurf	9
3.1. Aufbau und Test eines Sensor-Prototyps	9
3.1.1. Langzeitmessung	10
3.1.2. Effekt des Bodensalzgehaltes	11
3.2. Kapazitiver Bodenfeuchtesensor	14
3.2.1. Bodenfeuchtemessung mit RC-Tiefpass	14
3.2.2. Leitwertmessung anhand Ladespannung eines Kondensators	18
3.2.3. Temperaturmessung	21
3.3. Basisstation	22
4. Realisierung	24
4.1. Kapazitiver Bodenfeuchtesensor	24
4.1.1. PCB-Design in EAGLE	24
4.1.2. Aufbau der Sensorplatine	28
4.1.3. Software	31
4.2. Basisstation	34
4.2.1. Hardware	34
4.2.2. Software	37
4.2.3. MQTT	42

5. Ergebnisse	44
5.1. Untersuchung des Messsignals	44
5.2. Einfluss der Beschichtung mit PU-Lack	44
5.3. Sensorkalibration	45
5.4. Einsatz in einer Bewässerungsanlage	48
6. Fazit	50
A. Technische Daten	54
A.1. Basisstation	54
A.2. Kapazitiver Bodenfeuchtesensor	54
B. Messergebnisse	55
B.1. Oszilloskopbilder des 16MHz-Messsignals	55
B.2. Messergebnisse der Kalibration	58
B.3. Messdaten vom 15.01. bis 30.01	62

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Darstellung der Permittivität des Bodens bei steigendem Wassergehalt [7]	4
2.2.	Vereinfachtes Modell eines FDR-Sensors [1]	5
2.3.	Seitenansicht des Sensors mit elektrischem Feld und Wassermolekülen [3]	5
2.4.	Komplexe Permittivität in Abhängigkeit von der Messfrequenz [8]	6
2.5.	Low-Cost-Bodenfeuchtesensor aus China	7
3.1.	Sensor-Prototyp bestehend aus zwei einlaminierten Kupferfolien	9
3.2.	Gemessene Kapazität des Sensor-Prototyps über einen Zeitraum von 3 Tagen	10
3.3.	Messaufbau mit dem HP 8753C Vektoranalysator	11
3.4.	Einfluss des Leitwerts für den Sensor-Prototyp	12
3.5.	Low-Cost-Sensor angeschlossen am Vektoranalysator	12
3.6.	Messschaltung für die Bodenfeuchtemessung in LTSpice	15
3.7.	Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpass für 10pF und 80pF	16
3.8.	Ausgangsspannungen V_{High} und V_{Low} der Messschaltung	16
3.9.	Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpass ($\varepsilon_r = 1$)	17
3.10.	Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpass ($\varepsilon_r = 80$)	17
3.11.	Messschaltung für die Leitwertmessung in LTSpice	18
3.12.	Simulation der Leitwertmessung für $R=100\Omega$ (grün), $R=1k\Omega$ (blau) und $R=100k\Omega$ (rot)	19
3.13.	Spannungsverlauf am GPIO-Pin für $R=100\Omega$	20
3.14.	Spannungsverlauf am GPIO-Pin für $R=10k\Omega$	20
3.15.	Online-Rechner zur Bestimmung der Steinhart-Hart-Koeffizienten	21
3.16.	Prinzipschaltbild der Basisstation	23
4.1.	Schaltplan des Bodenfeuchtesensors	26
4.2.	Layout des Bodenfeuchtesensors	27
4.3.	Vorder- und Rückseite des Sensors	29
4.4.	Pinkonfiguration STM32L0	31
4.5.	Programmablaufplan STM32	33

4.6. Übertragungsprinzip RS485	34
4.7. Oszilloskopbild der Datenübertragung zwischen Sensor und Basisstation	35
4.8. Basisstation mit Beschreibung der einzelnen Module	36
4.9. Programmablaufplan ESP32	38
4.10. Zeitstrahl der Messungen	40
5.1. Einfluss der Beschichtung mit PU-Lack	45
5.2. Kalibrationsaufbau mit den drei Proben und Basisstation	46
5.3. Gemittelte Messergebnisse der Kalibration	47
5.4. Einsatz in einer automatischen Bewässerungsanlage	49
B.1. 16MHz-Messsignal (Ch1) mit V_{HIGH} (Ch2)	55
B.2. 16MHz-Messsignal (Ch1) mit V_{LOW} (Ch2)	56
B.3. 16MHz-Messsignal für $\varepsilon_r = 80$ (Wasser)	57
B.4. 16MHz-Messsignal für $\varepsilon_r = 1$ (Luft)	57
B.5. Vergleich V_{DIFF} und V_{RES} für Sand	59
B.6. Vergleich V_{DIFF} und V_{RES} für Erde	61
B.7. V_{DIFF} der drei Sensoren vom 15.01. bis zum 30.01.	62
B.8. V_{RES} der drei Sensoren vom 15.01. bis zum 30.01.	63
B.9. Temperaturmessung der drei Sensoren vom 15.01. bis zum 30.01.	64

Tabellenverzeichnis

2.1. Vergleich der Messverfahren	8
3.1. Kennwerte des Sensor-Prototyps	9
3.2. Sensorkapazitäten bei 10MHz für Leitungswasser und Düngerlösung	13
3.3. Sensorkapazitäten bei 33MHz für Leitungswasser und Düngerlösung	13
3.4. Sensorkapazitäten bei 50MHz für Leitungswasser und Düngerlösung	13
4.1. Stückliste des Sensors	30
4.2. Übertragungsrahmen UART/RS485	32
4.3. MQTT Topics	43
B.1. Kalibration für Sand unter Zugabe von Leitungswasser	58
B.2. Kalibration für Sand unter Zugabe von Düngerlösung	58
B.3. Kalibration für Erde unter Zugabe von Leitungswasser	60
B.4. Kalibration für Erde unter Zugabe von Düngerlösung	60

1. Einleitung

Wasser ist zwar eine erneuerbare, aber begrenzte Ressource. Die Landwirtschaft ist der größte Wasserverbraucher der Erde. Es werden schätzungsweise 80% der weltweiten Wasservorräte für die Landwirtschaft verwendet, 70% alleine für die Bodenbewässerung. Von diesen 70% gehen etwa 15% bis 35% verloren[1].

Wird die Bodenfeuchte überwacht, lässt sich die Bewässerung effizienter gestalten. Durch bedarfsgerechte Bewässerung lassen sich nicht nur Kosten und Zeit einsparen, sondern auch der Wasserverbrauch reduzieren.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines kapazitiven Bodenfeuchtesensors mit anschließendem Einsatz in einer automatischen Bewässerungsanlage. Der Bodenfeuchtesensor soll zuverlässig den Wassergehalt im Boden bestimmen können und günstig herzustellen sein.

Die Auswertung der Messdaten soll mit einem ESP32-Mikrocontroller in der Basisstation erfolgen. Die Basisstation steuert, je nach Bodenfeuchte, eine Wassererpumpe an. Die Grenze, ab der die Bewässerung gestartet wird, soll dabei einstellbar sein, um auf den individuellen Wasserbedarf der Pflanzen eingehen zu können.

Das integrierte WiFi-Modul des ESP32 ermöglicht eine drahtlose Übertragung der erfassten Messwerte. Zusätzlich bietet es die Option, Messparameter aus der Ferne anzupassen, wie beispielsweise den Grenzwert, ab dem die Bewässerung erfolgt. Dadurch würde die Flexibilität und Benutzerfreundlichkeit der Bewässerungsanlage erhöht werden.

2. Stand der Technik

Es gibt zahlreiche Methoden, um die Bodenfeuchte zu messen. Generell lassen sich die Messverfahren in zwei Gruppen einteilen[2]:

- Messung des Wasserpotentials
- Messung des Wassergehalts

2.1. Messung des Wasserpotentials

Das Wasserpotential gibt die Verfügbarkeit des Wassers im Boden an, in anderen Worten wie leicht die Pflanze dem Boden das enthaltene Wasser entziehen kann. Je niedriger, desto leichter ist es verfügbar. Das Wasserpotential ist abhängig vom Wassergehalt im Boden und der Bodenbeschaffenheit. Lehmige Erde bindet Wasser stärker als Kies oder Sand, deshalb ist hier das Wasserpotential bei gleichem Wassergehalt höher[3].

Das Wasserpotential kann mit einem Tensiometer bestimmt werden. Es besteht aus einer wassergefüllten, luftdichten, porösen Keramikzelle. Trocknet die Erde um das Tensiometer herum aus, wird aus der Keramikzelle Wasser entzogen, bis ein Gleichgewicht zum umgebenden Bodenwasser erreicht ist. Es entsteht ein Unterdruck, welcher gemessen wird. Die Messung erfolgt unabhängig vom Salzgehalt des Bodens und es gibt weiterhin keine Beeinflussung durch die Bodenbeschaffenheit, Temperatur oder sonstigen Einflussgrößen[4].

Nachteilig ist ein höherer Wartungsaufwand, da gegebenenfalls Wasser nachgefüllt werden muss. Es ist außerdem nicht sicher vor Frost und das tatsächliche Wasserpotential wird nur verzögert wiedergegeben[4], es eignet sich daher nicht für eine kontinuierliche Überwachung der Bodenfeuchte.

2.2. Messung des Wassergehalts

Der Wassergehalt des Bodens lässt sich unter anderem gravimetrisch, resistiv oder dielektrisch bestimmen. Daneben gibt es noch weitere Methoden, wie zum Beispiel die Messung der Strahlungsintensität einer im Boden eingebetteten Neutronenquelle, oder optische Verfahren, die bspw. die Reflexion der Erde messen. Diese sind aber entweder sehr teuer oder befinden sich noch in der Erforschungsphase[2].

Auf die drei erstgenannten Messverfahren wird im folgenden genauer eingegangen.

2.2.1. Gravimetrische Messung

Die gravimetrische Messung ist die genaueste Messmethode zur Bestimmung des Wassergehalts im Boden. Das im Boden enthaltene Wasser wird dabei direkt gewogen, indem das Gewicht der feuchten Bodenprobe und das Gewicht der getrockneten Bodenprobe bestimmt wird[2]. Der Wassergehalt w in % kann anschließend folgendermaßen berechnet werden:

$$w = \frac{M_{trocken} - M_{feucht}}{M_{trocken}} \quad (2.1)$$

Die gravimetrische Messung ist nicht für kontinuierliche Messungen geeignet, da die Bodenprobe nach jeder Bewässerung erneut getrocknet werden müsste.

2.2.2. Resistive Messung

Die resistive Messung wird häufig bei günstigen Sensoren eingesetzt, da sie sehr einfach zu realisieren ist. Es wird der Widerstand des Bodens über zwei Elektroden bestimmt: Je feuchter die Erde, desto niedriger ist der Widerstand. Die Messung ist allerdings ungenau, da der Salzgehalt des Bodens die Messung verfälscht[2]. Zusätzlich ist sie nicht beständig, da sich die positive Elektrode (Anode) durch Elektrolyse mit der Zeit auflöst[5]. Dem kann entgegengewirkt werden, indem man eine Wechselspannung zur Messung verwendet. Das Korrosionsproblem durch Umwelteinflüsse bleibt jedoch bestehen.

2.2.3. Dielektrische Messung

Bei der dielektrischen Messung wird die Bodenfeuchte über die Permittivität des Bodens bestimmt. Trockene Erde besitzt etwa eine Permittivität von 3-5 [6], während die von Wasser etwa 80 beträgt[1]. Dadurch steigt die Permittivität der Erde bei zunehmenden Wassergehalt an, vgl. Abb 2.1.

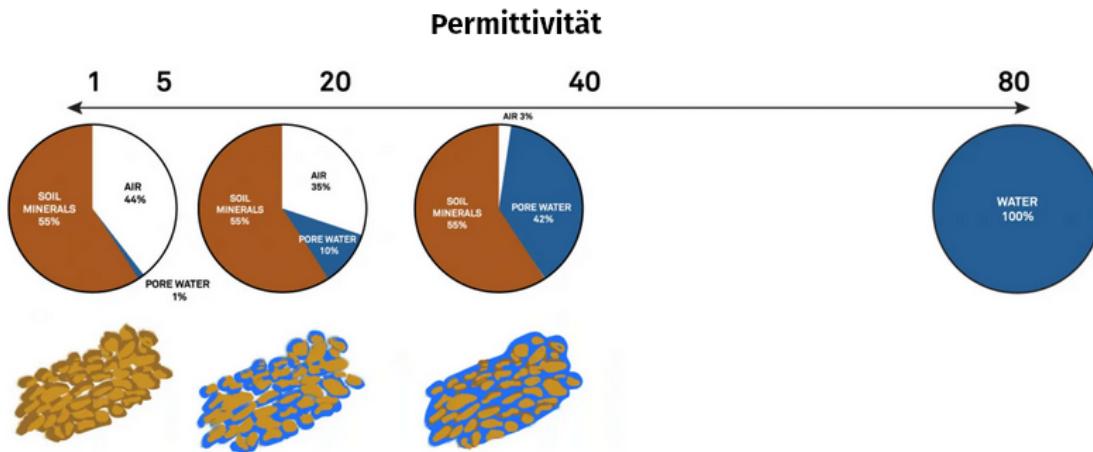


Abbildung 2.1.: Darstellung der Permittivität des Bodens bei steigendem Wassergehalt [7]

Drei Sensortypen messen anhand der Permittivität des Bodens den Wassergehalt: Der TDR-Sensor (Time Domain Reflectometry), der FDR-Sensor (Frequency Domain Reflectometry) und der kapazitive Sensor[1].

TDR-Sensor

Der TDR-Sensor misst die Laufzeit eines Impulses entlang eines im Boden befindlichen Leiters. Die Laufzeit ist abhängig von der Permittivität der Erde, die den Leiter umgibt, und damit von dem Wassergehalt. Die Messgenauigkeit dieses Sensors ist hoch, allerdings ist das Verfahren teuer und die Installation ist aufwendig, da der Hochfrequenzleiter in einen Graben eingebettet werden muss[7].

FDR-Sensor

Der FDR-Sensor ermittelt die Resonanzfrequenz eines Schwingkreises. Zwei Elektroden bilden einen Kondensator, mit dem Boden als Dielektrikum. Der Wassergehalt des Bodens beeinflusst über die Permittivität die Resonanzfrequenz des Schwingkreises, die mit einer HF-Schaltung ausgewertet wird, vgl. Abb 2.2 [1].

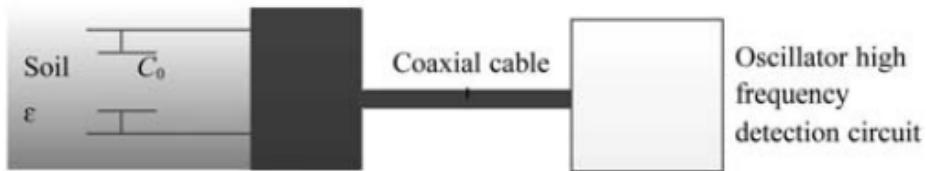


Abbildung 2.2.: Vereinfachtes Modell eines FDR-Sensors [1]

Kapazitiver Bodenfeuchtesensor

Der kapazitive Bodenfeuchtesensor besteht, wie der FDR-Sensor, aus zwei Elektroden, die einen Kondensator bilden. Die umgebende Erde dient dabei wieder als Dielektrikum. In Abb. 2.3 sind die zwei Elektroden des Sensors dargestellt, zusätzlich sind die Feldlinien des elektrischen Felds eingezeichnet sowie die Wassermoleküle, die durch das elektrische Feld polarisiert werden.

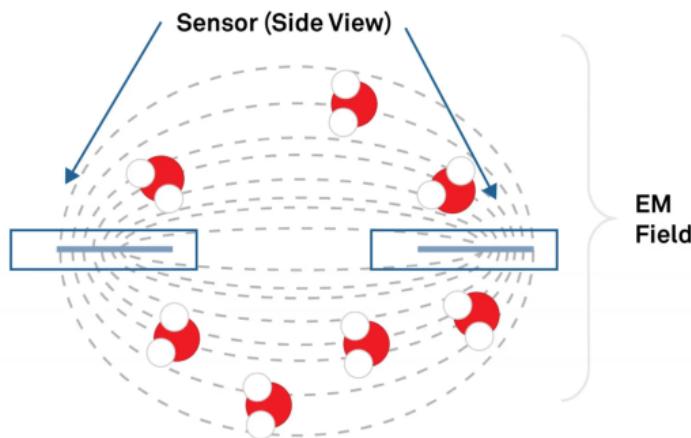


Abbildung 2.3.: Seitenansicht des Sensors mit elektrischem Feld und Wassermolekülen [3]

Die Kapazität des Kondensators ist proportional zur komplexen Permittivität ε_r^* der Erde[8]:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r^* G_0 \quad (2.2)$$

ε_0 steht für die Dielektrizitätskonstante, G_0 beschreibt die Geometrie der Kondensator-elektroden. Für einen Plattenkondensator gilt $G_0 = \frac{A}{d}$, A ist die Plattenfläche und d der Plattenabstand.

Die Permittivität besteht aus einem Realteil ε'_r und einem Imaginärteil ε''_r :

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon'_r - j\varepsilon''_r = \varepsilon'_r - j(\varepsilon''_{relax} + \frac{\sigma_{dc}}{2\pi f \varepsilon_0}) \quad (2.3)$$

Der Realteil beschreibt dabei die Menge an Energie, die von einem externen elektrischen Feld im Material gespeichert werden kann, während der Imaginärteil die dielektrischen Verluste angibt[8]. ε''_{relax} steht für die molekulare Relaxationszeit, also die Zeit, die benötigt wird, um die Dipolmoleküle des Wassers auszurichten.

Der Imaginärteil der Permittivität hängt zusätzlich von der Leitfähigkeit σ_{dc} des Bodens und der Frequenz f des elektrischen Feldes ab. An der Gleichung ist erkennbar, dass die Messung umso stärker durch die Leitfähigkeit verfälscht wird, je niedriger diese Frequenz ist.

In Abb. 2.4 ist die komplexe Permittivität in Abhängigkeit von der Messfrequenz dargestellt. Der Imaginärteil ist für verschiedene Bodenleitwerte aufgezeichnet. Zu erkennen ist, wie die Beeinflussung durch den Leitwert mit zunehmender Frequenz verschwindet.

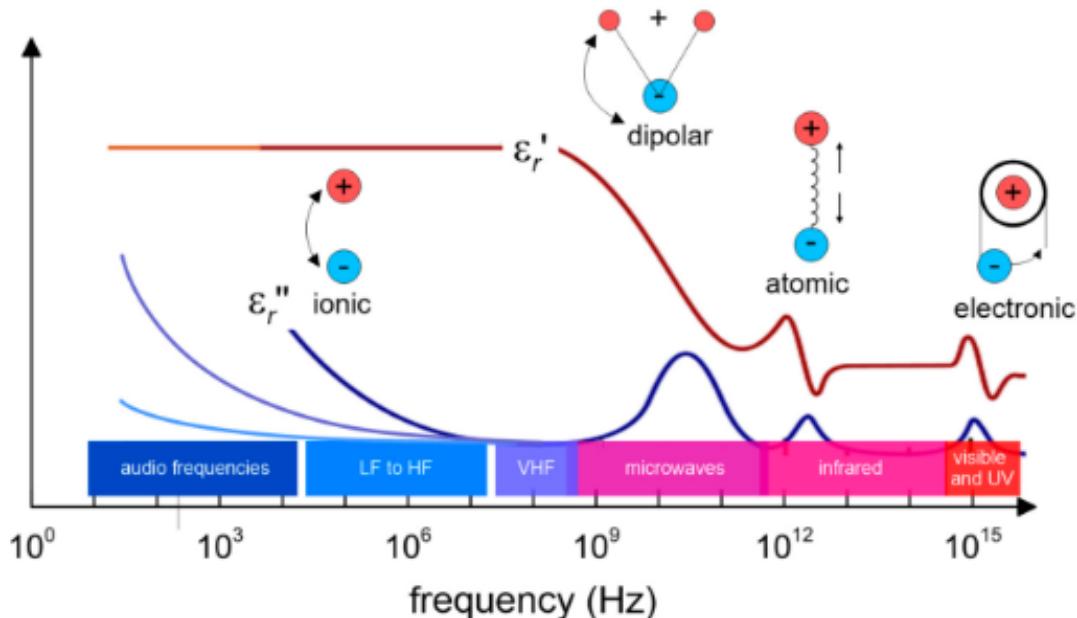


Abbildung 2.4.: Komplexe Permittivität in Abhängigkeit von der Messfrequenz [8]

Die Kapazität der Elektroden kann über verschiedene Verfahren gemessen werden:

- RC-Zeitkonstante: Es wird die Zeit gemessen, die benötigt wird, um den Kondensator auf eine bestimmte Spannung aufzuladen.
- Phasenverschiebung: Es wird die Phasenverschiebung zwischen Eingang und Ausgang des Signals gemessen.
- Frequenzmodulation: Die Kapazitätsänderung beeinflusst die Frequenz eines Schwingkreises. Die Frequenzänderung wird gemessen.
- Amplitudenmodulation: Der Kondensator ist Teil eines RC-Tiefpasses, es wird die Amplitude des Ausgangssignals bei festem Widerstand gemessen. Steigt die Kapazität, steigt die Dämpfung und die Amplitude des Ausgangssignals sinkt.

Die Auswertung der beiden ersten Verfahren erweist sich, zumindest bei den erforderlichen hohen Frequenzen, als schwierig. Die Frequenz- sowie die Amplitudenmodulation sind dahingegen gut geeignet, um den Wassergehalt des Bodens zu bestimmen. Nahezu alle kapazitiven Sensoren basieren auf diesen zwei Verfahren[9]. Die Messung über die Amplitudenmodulation erweist sich als besonders geeignet, da die erforderliche Messschaltung einfach zu realisieren ist.

Ein weit verbreiteter Low-Cost-Sensor aus China misst die Bodenfeuchte beispielsweise über die Dämpfung, die Messfrequenz beträgt etwa 1,5MHz und wird mit einem NE555 Baustein erzeugt[8], vgl. Abb. 2.5. Aufgrund der relativ niedrigen Messfrequenz wird das Messergebnis dieses Sensors jedoch leicht durch den Nährstoffgehalt des Bodens verfälscht, dies wird im nächsten Kapitel mit Messungen belegt.



Abbildung 2.5.: Low-Cost-Bodenfeuchtesensor aus China

2.3. Vergleich der Messverfahren

Messverfahren	Vorteile	Nachteile
Tensiometer	Günstig, keine Beeinflussung durch Bodenbeschaffenheit	Wartungsaufwendig, keine kontinuierliche Messung, nicht frostsicher
Gravimetrisch	Sehr genau, misst direkt den Wassergehalt der Bodenprobe	Nur im Labor einsetzbar, keine kontinuierliche Messung
Resistiv	Günstig und einfach einsetzbar, kontinuierliche Messung	Salzgehalt des Bodens verfälscht Messung, Elektroden korrodieren mit der Zeit
TDR	Sehr genau, keine Kalibration nötig durch hohe Messfrequenz, kontinuierliche Messung	Teuer, hoher Installationsaufwand
FDR	Sehr genau, ggf. Kalibration nötig, kontinuierliche Messung	Teuer, komplexe Messschaltung
Kapazitiv	Relativ günstig, nach Kalibrierung sehr genaue Messung	Nährstoffgehalt beeinflusst Ergebnis je nach Messfrequenz

Tabelle 2.1.: Vergleich der Messverfahren

Von allen genannten Messverfahren ist die TDR, die FDR und die kapazitive Messung am besten für eine kontinuierliche Bodenfeuchteüberwachung geeignet. Die TDR-Messung ist die genaueste, aber auch mit Abstand am teuersten[9]. Ebenso ist der Installationsaufwand hoch, da ein Graben für den Hochfrequenzleiter angelegt werden muss.

Ähnlich verhält es sich mit dem FDR Sensor, die Messung ist sehr genau und der Installationsaufwand ist vergleichbar mit dem kapazitiven Sensor, jedoch ist die Messschaltung komplex und damit mit hohen Kosten verbunden.

Für den geforderten Bodenfeuchtesensor eignet sich deshalb der kapazitive Sensor am ehesten, da er günstig und einfach herzustellen ist und insbesondere der Schaltungsaufwand, bei der Messung über die Amplitudenmodulation, überschaubar ist.

3. Konzept- und Schaltungsentwurf

3.1. Aufbau und Test eines Sensor-Prototyps

Es wurde zunächst ein Sensor-Prototyp mit zwei einlaminierten Kupferfolien entworfen, vgl. Abb. 3.1.



Abbildung 3.1.: Sensor-Prototyp bestehend aus zwei einlaminierten Kupferfolien

In der untenstehenden Tabelle befinden sich die Abmessungen der Kupferfolien sowie die gemessene Kapazität für Luft ($\varepsilon_r = 1$) und die Kapazität, nachdem der Sensor in Wasser eingetaucht wurde ($\varepsilon_r = 80$). Für die Messung wurde ein Agilent 4263B LCR-Meter verwendet. Die Messspannung beträgt 1V, die Messfrequenz jeweils 1kHz und 100kHz.

Abstand der Kupferfolien	2mm
Elektrodenfläche	15mm x 75mm
Kapazität für Luft ($f = 1kHz$)	2,3pF
Kapazität für Wasser ($10^\circ C$, $f = 1kHz$)	230pF
Kapazität für Luft ($f = 100kHz$)	3,9pF
Kapazität für Wasser ($10^\circ C$, $f = 100kHz$)	210pF

Tabelle 3.1.: Kennwerte des Sensor-Prototyps

Die Kapazität nimmt bei steigender Messfrequenz für Luft zu, während sie sinkt, wenn der Sensor in Wasser eingetaucht ist. Die sinkende Kapazität könnte mit der Messmethode des LCR-Meters zusammenhängen: Es misst nicht direkt die Kapazität, sondern die Impedanz zwischen den Anschlussklemmen[10]. Die Induktivität der Verbindungsleitung wirkt sich bei steigender Frequenz stärker aus und verringert die gemessene Kapazität. Für die Permittivität ε_r von Wasser ergibt sich somit eine Spanne von 100 bei 1kHz und etwa 53 bei 100kHz.

3.1.1. Langzeitmessung

Der Sensor wurde in Erde platziert und die Kapazität wurde mit dem LCR-Meter über einen Zeitraum von 3 Tagen überwacht, vgl. Abb. 3.2. Die Kapazität wurde alle 20 Minuten gemessen und in einer Textdatei gespeichert. Die Messfrequenz betrug 1kHz, die Messspannung 1V.

Der Bewässerungszeitpunkt ist gut erkennbar, die Kapazität (und damit die Bodenfeuchte) sinkt stetig, und steigt dann sprunghaft nach der Bewässerung an.

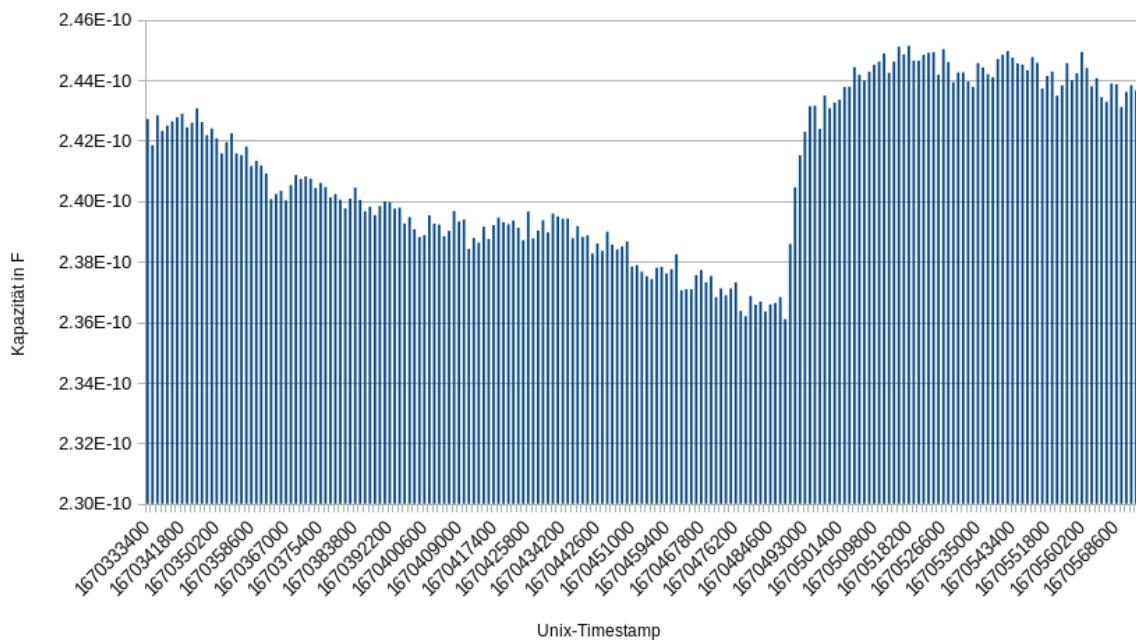


Abbildung 3.2.: Gemessene Kapazität des Sensor-Prototyps über einen Zeitraum von 3 Tagen

3.1.2. Effekt des Bodensalzgehaltes

Anschließend wurde der Einfluss durch den Nährstoffgehalt des Bodens auf die Kapazität für verschiedene Frequenzen untersucht. Dafür wurden drei Messproben vorbereitet mit jeweils 1,5kg getrocknetem Sand. Die erste Probe wurde mit destilliertem Wasser bewässert, die zweite mit Leitungswasser und die dritte mit Düngerlösung (5ml Pflanzendünger auf 500ml Wasser). Es wurde schrittweise 75g Wasser zugeführt, die Bodenfeuchte wurde damit in 5% Schritten erhöht.

Ein HP 8753C Vektoranalysator wurde für die Erzeugung der Messfrequenz und dem Auslesen der Kapazität verwendet, vgl. Abb. 3.3.

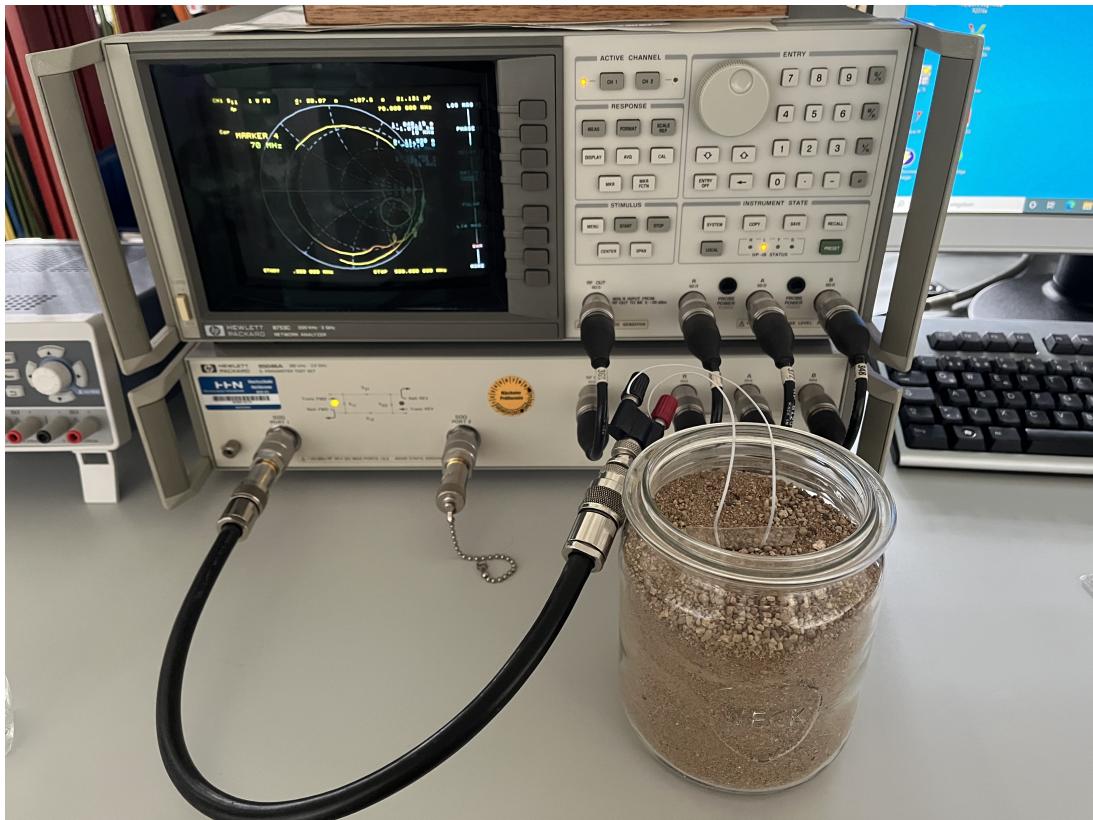


Abbildung 3.3.: Messaufbau mit dem HP 8753C Vektoranalysator

Die Messergebnisse zeigen einen starken Einfluss des Leitwerts: Die Kapazität ist bei der Düngerlösung mehr als doppelt so hoch als bei destilliertem Wasser, vgl. Abb. 3.4. Aufgrund den langen Zuleitungen und der damit verbundenen hohen Induktivität war es nicht möglich, den Einfluss bei höheren Messfrequenzen zu untersuchen. Es wurde deshalb der Low-Cost-Sensor aus Abb. 2.5 modifiziert und mit sehr kurzen Zuleitungen direkt an den Vektoranalysator angeschlossen, vgl. Abb. 3.5.

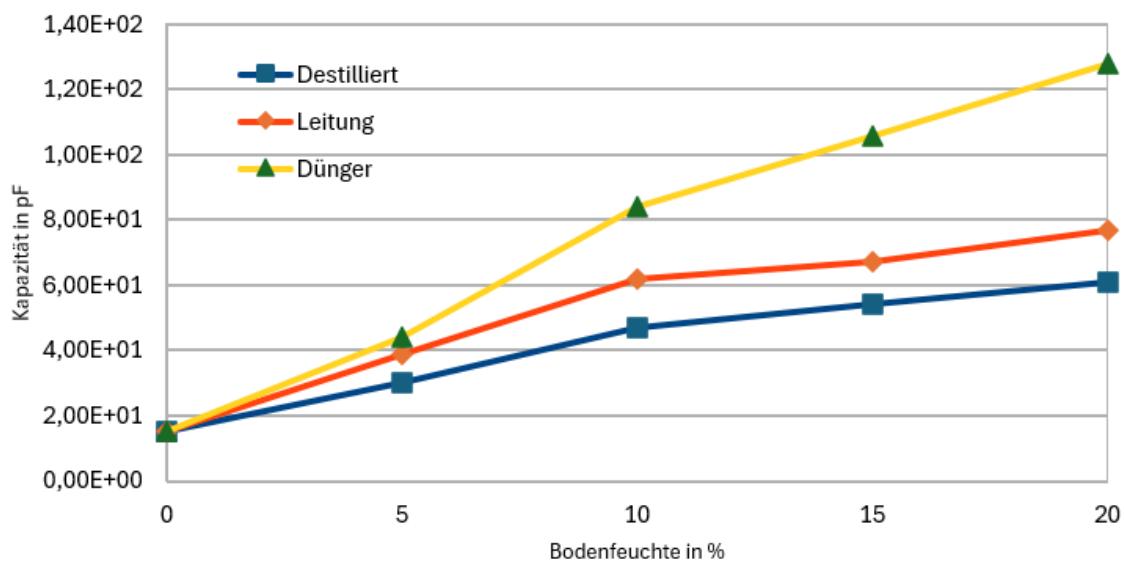


Abbildung 3.4.: Einfluss des Leitwerts für den Sensor-Prototyp



Abbildung 3.5.: Low-Cost-Sensor angeschlossen am Vektoranalysator

In den Tabellen 3.2, 3.3 und 3.4 sind die Messwerte für 10MHz, 33MHz und 50MHz für Leitungswasser und Düngerlösung dargestellt. Wirft man einen Blick auf die relative Differenz in %, erkennt man, dass der Einfluss der Leitfähigkeit bei höherer Frequenz abnimmt. Beträgt die relative Differenz bei 10MHz für 20% Bodenfeuchte noch 242%, sinkt sie bei 50MHz bis auf 158%.

Aus den Messergebnissen ist ersichtlich, dass eine signifikant höhere Messfrequenz erforderlich ist, um den Einfluss des Bodenleitwerts komplett zu eliminieren.

Feuchte in %	Leitung	Dünger	Differenz	Diff. Relativ
0	15,5pF	16,5pF	1pF	106,45%
5	38pF	48,5pF	10,5pF	127,63%
10	46pF	85pF	39pF	184,78%
15	53,5pF	109,6pF	56,1pF	204,86%
20	64pF	155pF	91pF	242,19%

Tabelle 3.2.: Sensorkapazitäten bei 10MHz für Leitungswasser und Düngerlösung

Feuchte in %	Leitung	Dünger	Differenz	Diff. Relativ
0	15,5pF	16,1pF	0,6pF	103,87%
5	29,2pF	31,8pF	2,6pF	108,90%
10	34,7pF	47pF	12,3pF	135,45%
15	41,2pF	58,6pF	17,4pF	142,23%
20	48,8pF	82pF	33,2pF	168,03%

Tabelle 3.3.: Sensorkapazitäten bei 33MHz für Leitungswasser und Düngerlösung

Feuchte in %	Leitung	Dünger	Differenz	Diff. Relativ
0	15,8pF	16,5pF	0,7pF	104,43%
5	29,8pF	31,2pF	1,4pF	104,70%
10	35,7pF	46pF	10,3pF	128,85%
15	43,3pF	58,1pF	14,8pF	134,18%
20	52,5pF	83,4pF	30,9pF	158,86%

Tabelle 3.4.: Sensorkapazitäten bei 50MHz für Leitungswasser und Düngerlösung

3.2. Kapazitiver Bodenfeuchtesensor

Um eine Balance zwischen kostengünstiger Herstellung des Sensors und der Notwendigkeit einer genauen Messung zu finden, wurde beschlossen, sowohl die Kapazität als auch den Leitwert des Bodens gleichzeitig zu messen. Durch diesen Ansatz sollte sich, nach vorheriger Kalibration, der Einfluss des Bodenleitwerts neutralisieren lassen.

Ein Mikrocontroller auf der Sensorplatine soll die Messung steuern und zugleich für die Datenübertragung zur Basisstation zuständig sein. Die Wahl fiel auf einen STM32 Mikrocontroller der L0 Serie, die sich durch niedrigen Energieverbrauch auszeichnet und deshalb oft für Sensoranwendungen eingesetzt wird[11].

Der STM32L0 kann außerdem das interne Taktsignal an einem GPIO bereitstellen, wodurch eine hochfrequente Rechteckspannung für die Bodenfeuchtemessung verfügbar ist[12].

3.2.1. Bodenfeuchtemessung mit RC-Tiefpass

Die Bodenfeuchtemessung erfolgt anhand der Dämpfung eines RC-Tiefpasses, welcher aus den Sensorelektroden und einem festen Widerstand besteht. Der RC-Tiefpass wird mit dem internen Taktsignal des STM32-Mikrocontrollers gespeist, die Permittivität des Bodens beeinflusst die Kapazität des Sensors und damit die Ausgangsspannung.

Um die Empfindlichkeit zu erhöhen, wird der niedrigste und der höchste Wert der Ausgangsspannung gemessen. Dafür wird die Ausgangsspannung des RC-Tiefpasses auf zwei antiparallele Dioden geführt und jeweils ein 1n-Kondensator geladen, vgl. Abb 3.6. Ist die Messung beendet, werden die zwei 1n-Kondensatoren über die $1M\Omega$ Widerstände wieder entladen[13].

Die LTSpice Simulation in Abb. 3.7 zeigt die Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpasses bei einer 16MHz Rechteckspannung. Die Sensorkapazität beträgt im oberen Diagramm 10pF, im unteren Diagramm 80pF. Bei der Wahl der Sensorkapazität wurde sich an den Werten in Tabelle 3.2 orientiert. Zu sehen ist ein deutlicher Unterschied der Amplitude zwischen 10pF und 80pF.

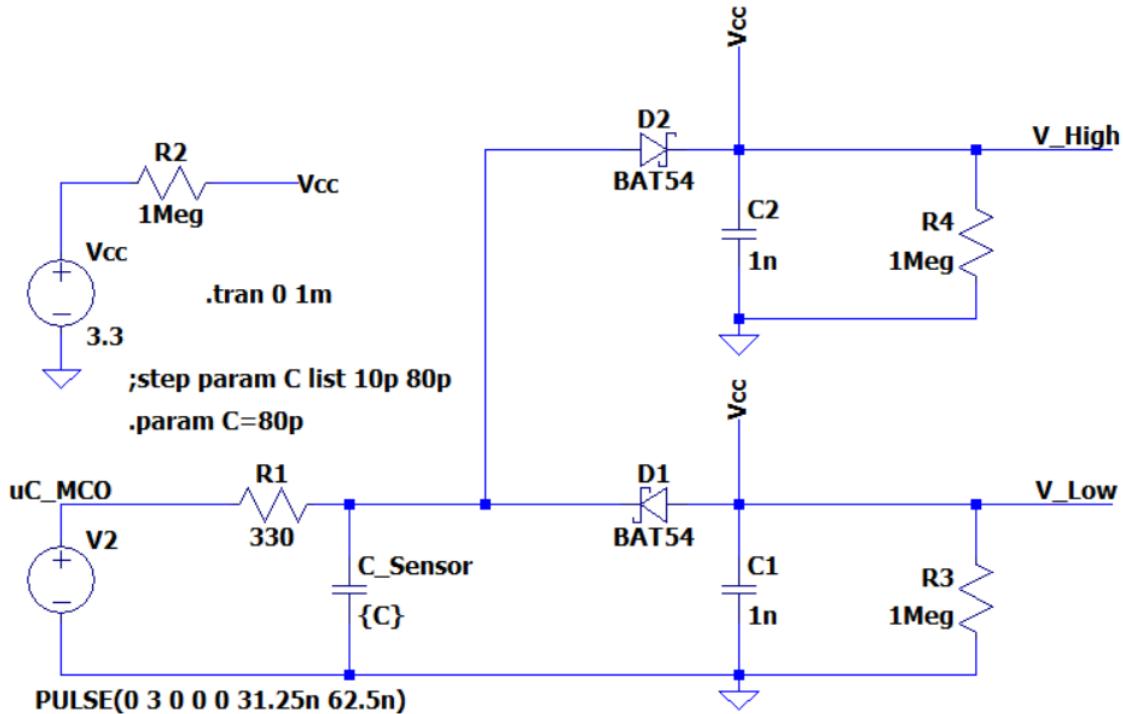


Abbildung 3.6.: Messschaltung für die Bodenfeuchtemessung in LTSpice

In Abb. 3.8 sind außerdem die Ausgangsspannungen V_{HIGH} und V_{LOW} hinter den Dioden dargestellt. Diese Spannungen werden dem Analog- zu Digitalkonverter des STM32 zugeführt.

Um die Funktion und die Empfindlichkeit der Schaltung in der Realität zu untersuchen, wurde die Schaltung auf einem Steckbrett aufgebaut. Als Sensor wurde der Sensor-Prototyp in Abb. 3.1 verwendet. Die Messfrequenz von etwa 6MHz wurde mit einem STM32-Entwicklungsboard erzeugt.

Abb. 3.9 und Abb. 3.10 zeigen die Eingangs- und Ausgangsspannungen des RC-Tiefpasses. Im oberen Bild hing der Sensor frei in der Luft, im unteren wurde er in ein Glas Wasser eingetaucht. Die Spannungen sind sehr störbehaftet, es ist dennoch ein deutlicher Unterschied in der Amplitude zu erkennen. Damit erweist sich die Schaltung als geeignet.

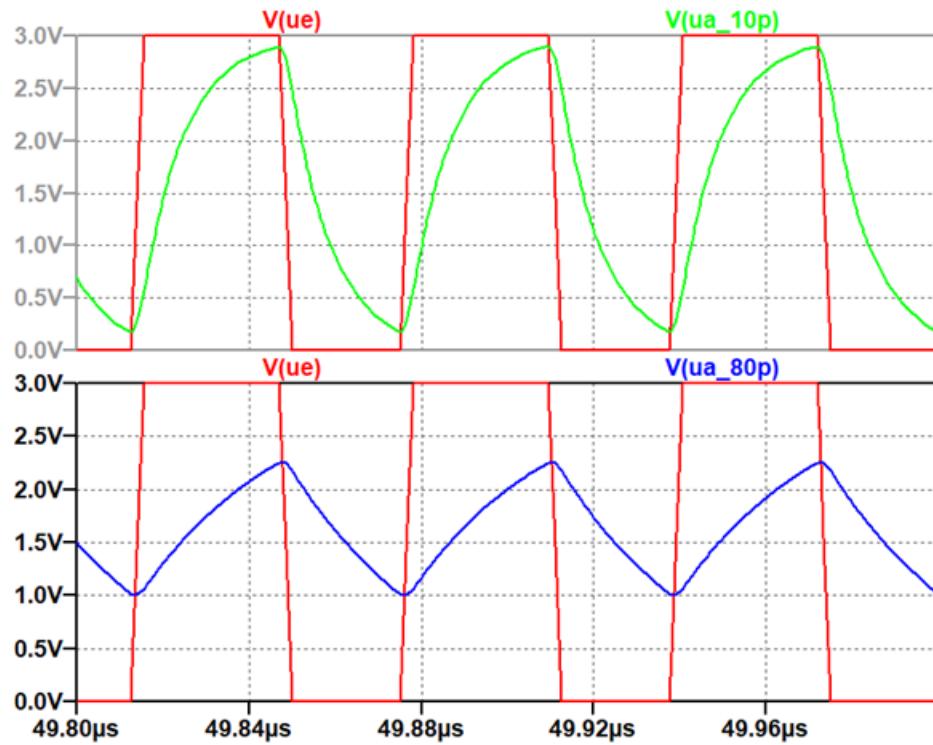


Abbildung 3.7.: Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpass für 10pF und 80pF

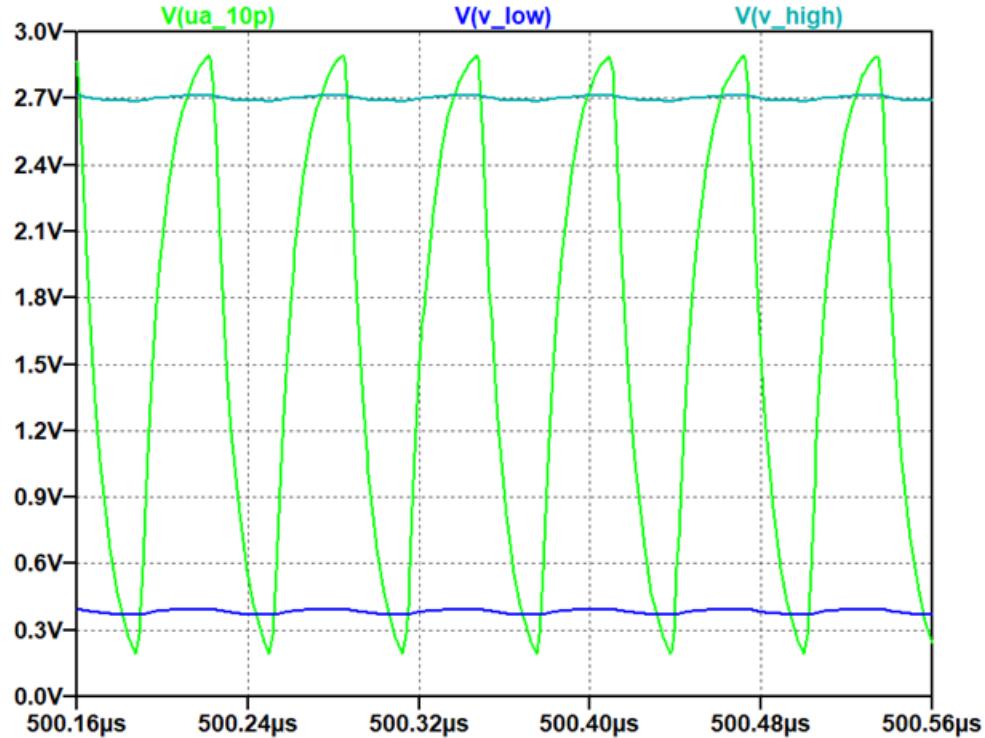
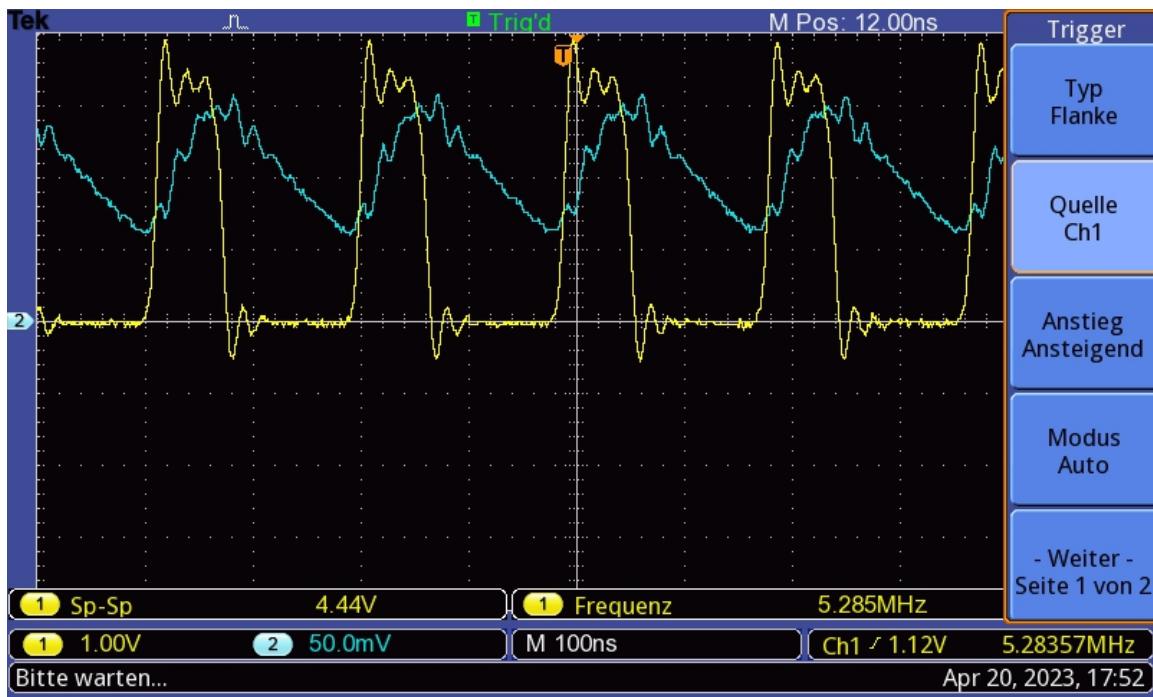
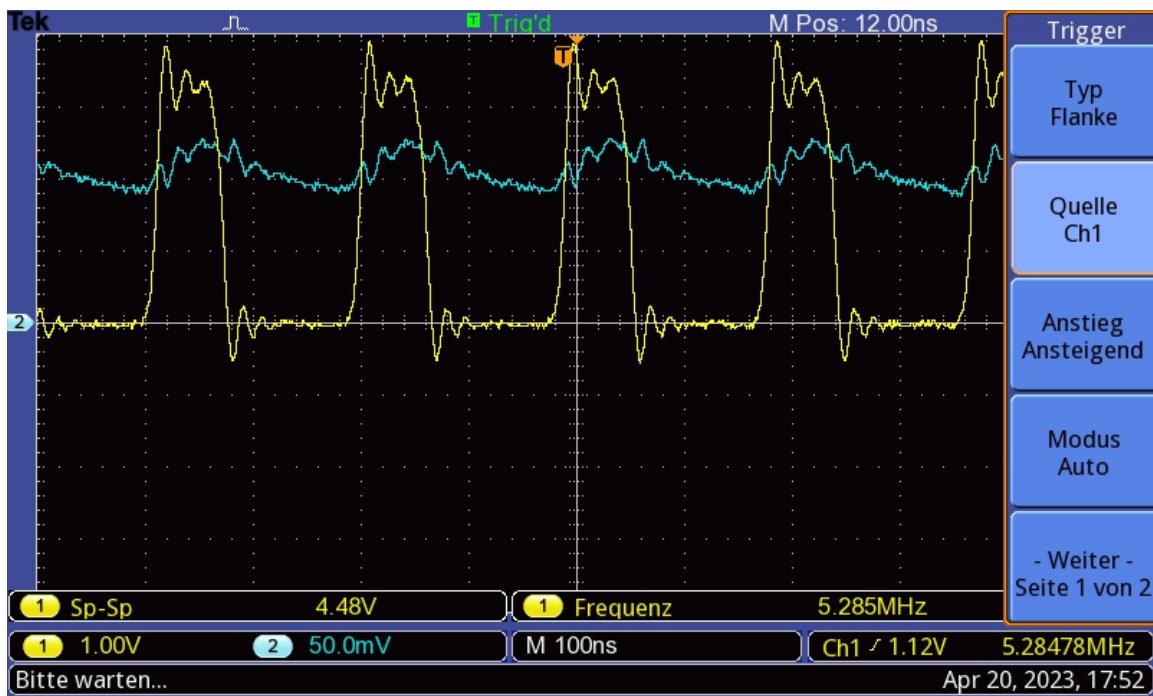


Abbildung 3.8.: Ausgangsspannungen V_{High} und V_{Low} der Messschaltung

Abbildung 3.9.: Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpass ($\varepsilon_r = 1$)Abbildung 3.10.: Eingangs- und Ausgangsspannung des RC-Tiefpass ($\varepsilon_r = 80$)

3.2.2. Leitwertmessung anhand Ladespannung eines Kondensators

Die Leitwertmessung erfolgt über das Aufladen eines Kondensators. Es werden zwei Elektroden (bspw. zwei verzinkte Nägel) in der Erde platziert, anschließend wird der Kondensator über die Elektroden mit einem kurzen Impuls aufgeladen. Die resultierende Ladespannung ist proportional zum Leitwert des Bodens.

Die Messung funktioniert folgendermaßen: (1) Ein GPIO-Pin des STM32 wird auf HIGH gesetzt, der Kondensator wird geladen. (2) Nach einer bestimmten Dauer wird der GPIO-Pin auf den ADC-Modus eingestellt. (3) Die Spannung am GPIO wird gemessen. (4) Der GPIO wird auf LOW gesetzt, um den Kondensator zu entladen.

Die Schaltung besteht aus einem $10\text{k}\Omega$ Widerstand, um den Ladestrom bei Kurzschluss zu begrenzen, gefolgt von einem $2,2\mu\text{F}$ Kondensator und dem Erdwiderstand, vgl. Abb 3.11. Der Serienkondensator blockt zusätzlich den Gleichspannungsanteil der Spannung, somit wird die Korrosion durch Elektrolyse verhindert[14].

Der GPIO-Pin des Mikrocontrollers wurde mit einer CMOS Inverter-Schaltung modelliert[15]. Der $1\text{M}\Omega$ Widerstand soll einen hochohmigen GPIO-Input darstellen, um die ADC-Messung zu modellieren.

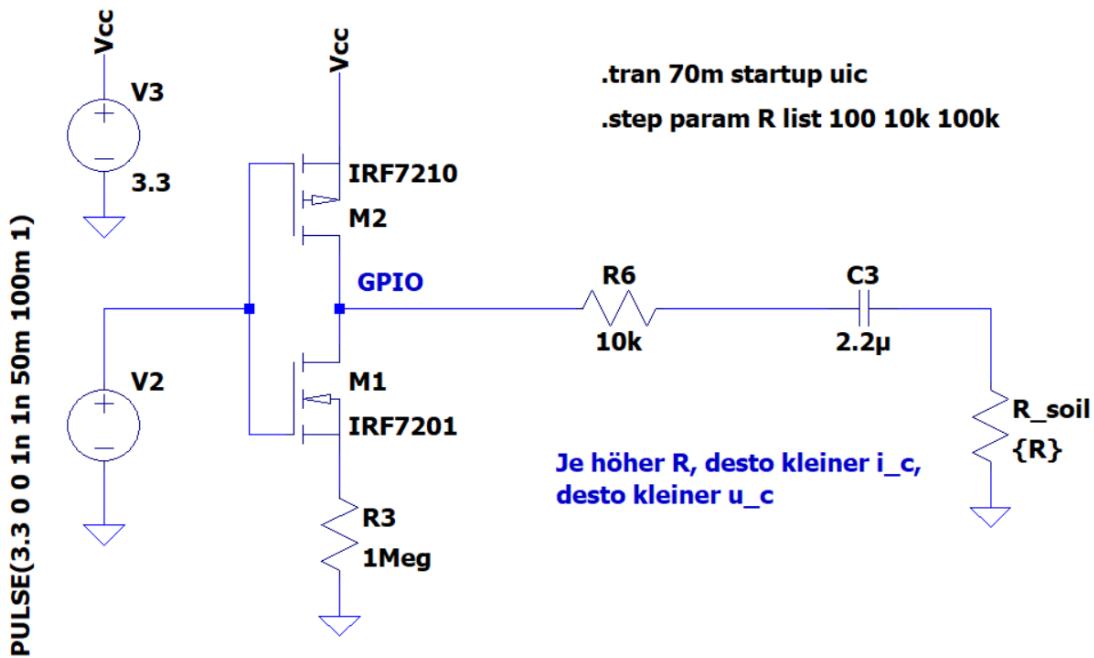


Abbildung 3.11.: Messschaltung für die Leitwertmessung in LTSpice

Um die Impulsdauer auszulegen, muss der ungefähre Bodenwiderstand für verschiedene Feuchtigkeitsgrade bekannt sein. Mit einem LCR-Meter wurde dafür der Widerstand von Erde und Sand bei einer Messfrequenz von 1kHz gemessen. Als Elektroden wurden verzinkte Nägel verwendet. Der Abstand der Elektroden betrug etwa 2cm und sie wurden 4cm tief in das Substrat platziert. Je nach Feuchtigkeitsgrad beträgt der Widerstand wenige hundert Ω , bis zu über $100\text{k}\Omega$ für trockenes Substrat. Als unterste realistische Grenze für den Bodenwiderstand wurde 100Ω festgelegt, als obere Grenze $100\text{k}\Omega$.

Damit lässt sich die optimale Impulsdauer in LTSpice experimentell bestimmen: Die Spannung über dem Kondensator darf bei 100Ω noch nicht die Versorgungsspannung erreicht haben, und muss gleichzeitig bei $100\text{k}\Omega$ hoch genug über 0V sein, um gemessen werden zu können. Dabei hat sich eine Impulsdauer von etwa 50ms als geeignet erwiesen, vgl. Abb. 3.12. Die Spannung beträgt hier bei 100Ω etwa 2.9V, bei $10\text{k}\Omega$ etwa 2V und bei $100\text{k}\Omega$ etwa 0,4V.

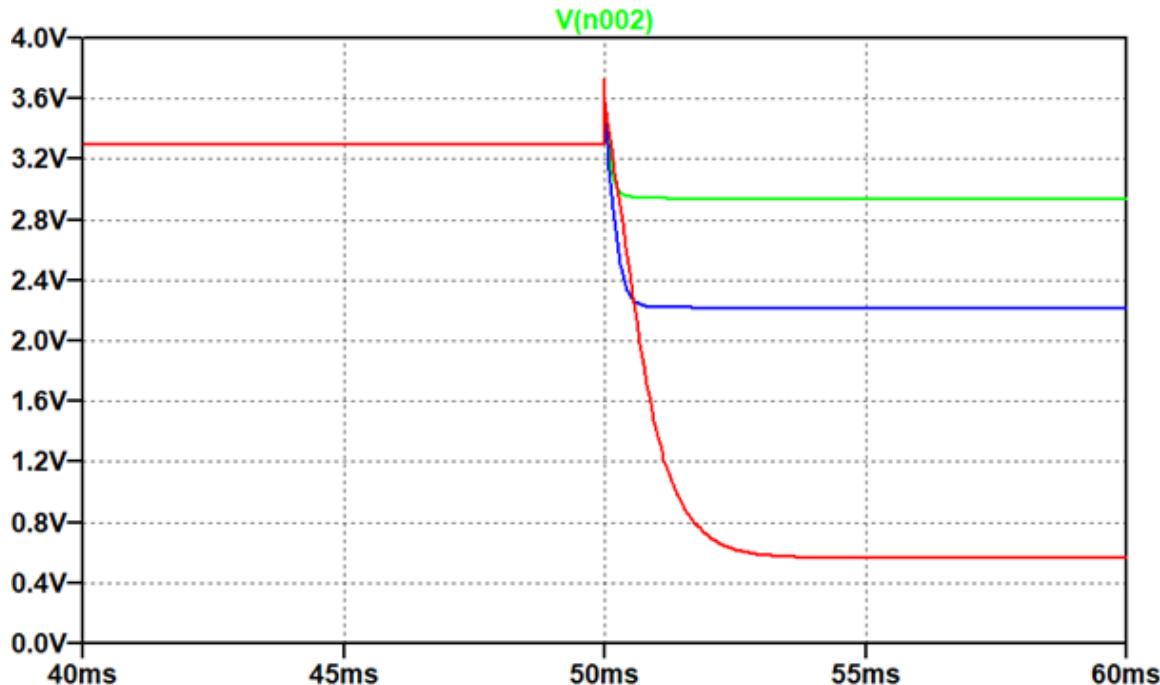
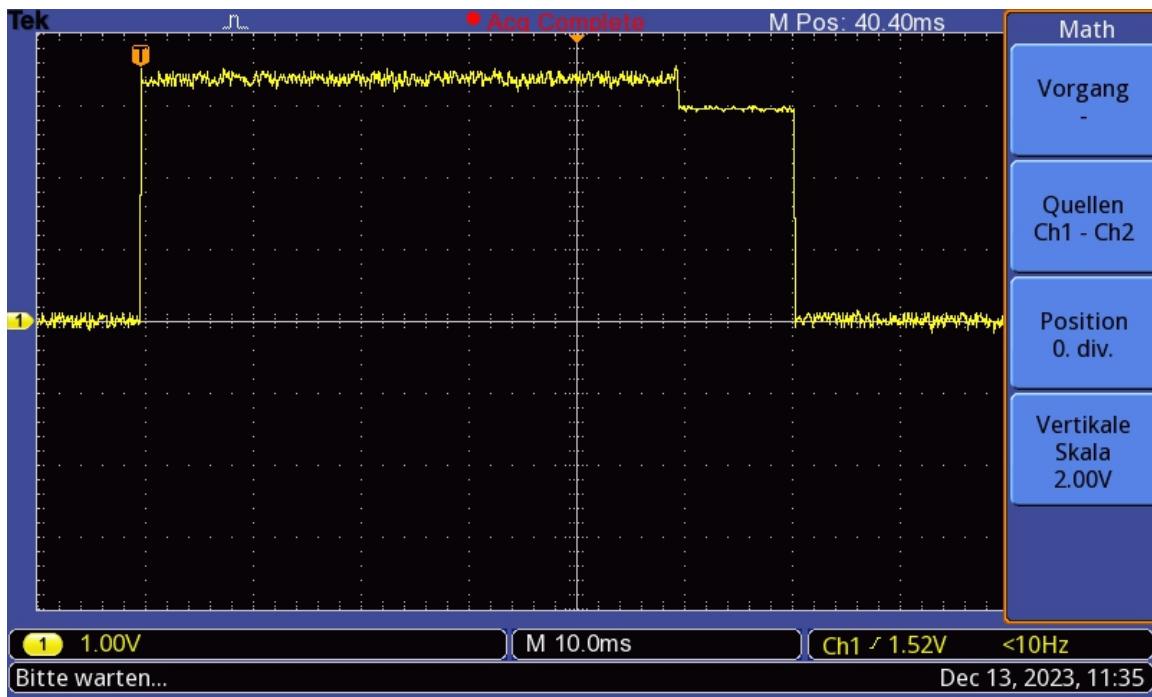
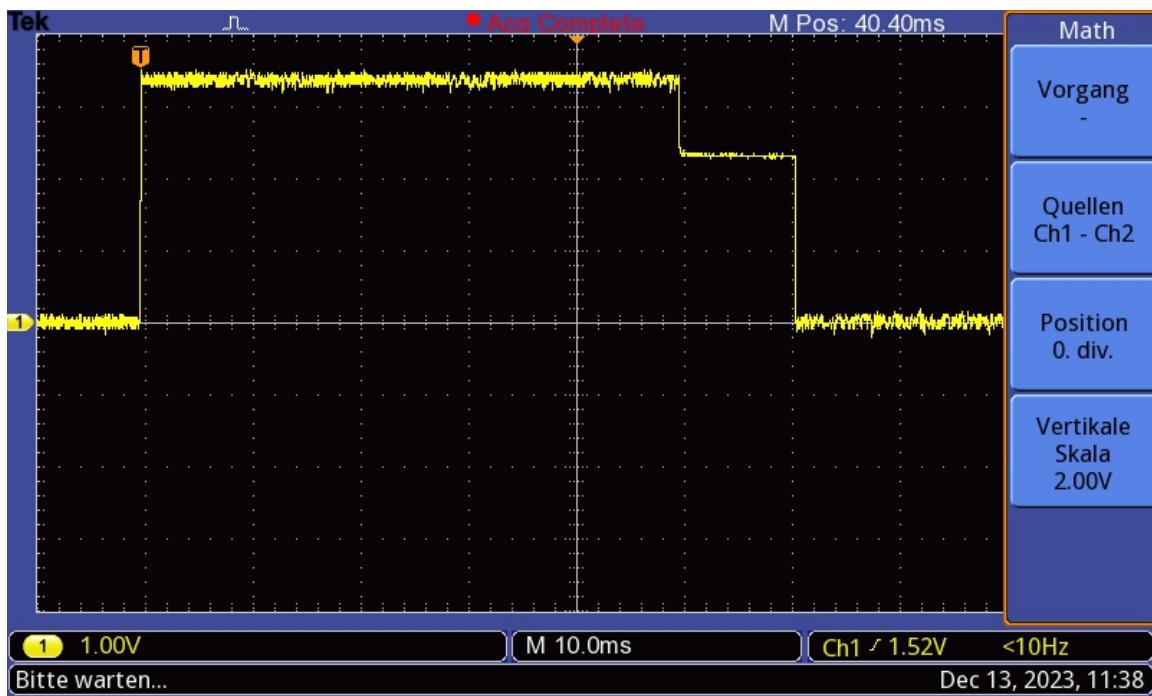


Abbildung 3.12.: Simulation der Leitwertmessung für $R=100\Omega$ (grün), $R=1\text{k}\Omega$ (blau) und $R=100\text{k}\Omega$ (rot)

Die Schaltung wurde auf einem Steckbrett mit einem STM32-Entwicklungsboard aufgebaut, um die Funktion in der Praxis nachzuweisen, vgl. Abb 3.13 und Abb. 3.14. Die Messungen in der Praxis stimmen in etwa mit der Simulation in LTSpice überein. Die resultierende Ladespannung bei dem 100Ω Widerstand beträgt 3V, die für den $10\text{k}\Omega$ Widerstand etwa 2,3V.

Abbildung 3.13.: Spannungsverlauf am GPIO-Pin für $R=100\Omega$ Abbildung 3.14.: Spannungsverlauf am GPIO-Pin für $R=10k\Omega$

3.2.3. Temperaturmessung

Die Temperaturmessung erfolgt mit einem NTC-Widerstand, mit einem Nennwiderstand von $10k$ bei 25°C . Die Messschaltung ist ein Spannungsteiler, bestehend aus einem festen Widerstand $R = 10k\Omega$ und dem NTC. Der Spannungsabfall V_{ntc} über dem NTC wird dabei mit dem STM32 gemessen. Aus dem Spannungsabfall lässt sich der NTC-Widerstand R_{ntc} mit folgender Gleichung bestimmen[16]:

$$R_{ntc} = V_{ntc} \left(\frac{V_{cc} - V_{ntc}}{R} \right)^{-1} = \frac{V_{ntc} \cdot R}{V_{cc} - V_{ntc}} \quad (3.1)$$

Daraus lässt sich die Temperatur anhand der Steinhart-Hart-Gleichung bestimmen[17]:

$$T = (a_0 + a_1 \ln R_{ntc} + a_3 \ln^3 R_{ntc})^{-1} \quad (3.2)$$

Die Temperatur ist in Kelvin angegeben. Die erforderlichen Koeffizienten a_x sind in der Regel auf der Herstellerseite des NTC's zu finden. Als Alternative gibt es Online-Rechner, die die Koeffizienten aus gegebenen Temperatur-Widerstandswerten bestimmen können[18], vgl. Abb. 3.15.

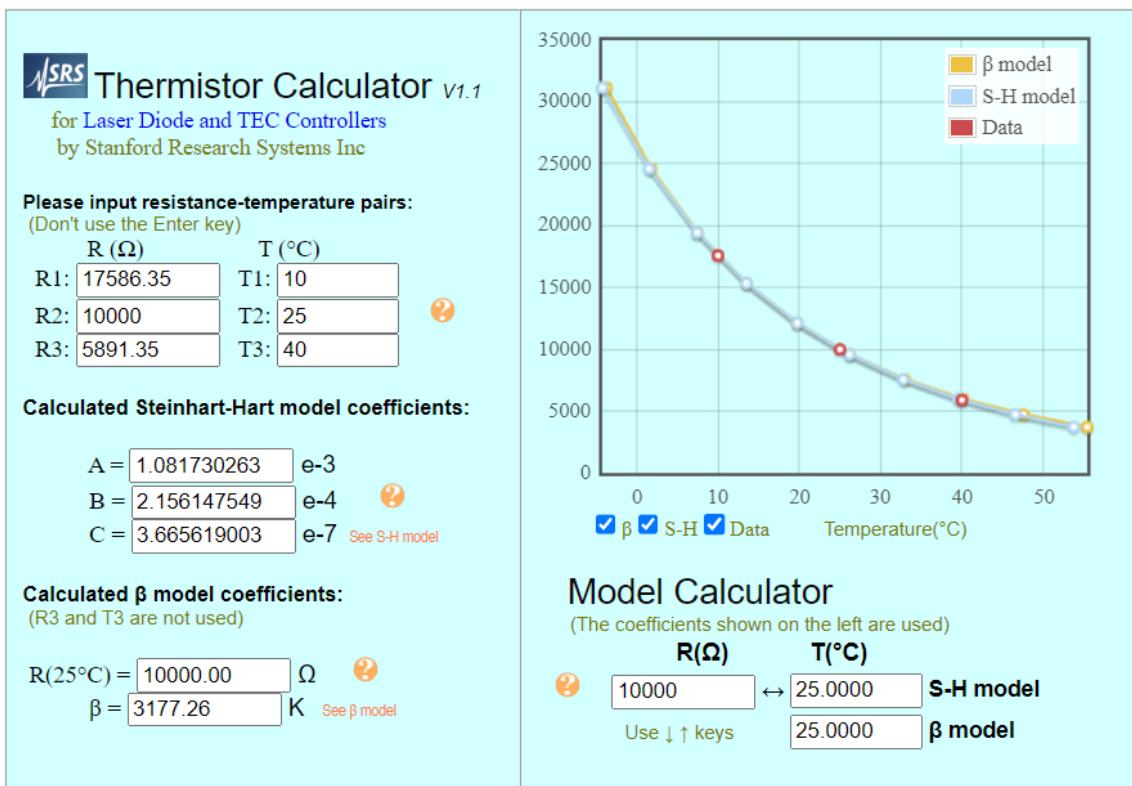


Abbildung 3.15.: Online-Rechner zur Bestimmung der Steinhart-Hart-Koeffizienten

3.3. Basisstation

Die Basisstation soll die Messdaten der Sensoren auswerten und ein Relais zur automatischen Bewässerung ansteuern. Aus Zeitgründen wurde hier auf die Entwicklung einer gesonderten Platine verzichtet, es wird stattdessen auf vorgefertigte Module gesetzt. In Abb. 3.16 ist das Prinzipschaltbild der Basisstation mit den einzelnen Modulen dargestellt.

Die Spannungsversorgung erfolgt über ein 12V Netzteil. Das Spannungsversorgungsmodul der Basisstation gibt 12V, 5V und 3,3V aus. Aufgrund der geringen Belastbarkeit wird zusätzlich ein 12V auf 5V Step-Down-Wandler zur Spannungsversorgung der Sensoren verwendet.

Für die Auswertung der Messdaten wird das ESP32-Devkit-V1 Entwicklungsboard verwendet. Es besitzt einen ESP32-WROOM-32 Mikrocontroller, der WiFi und zusätzlich Bluetooth unterstützt[19]. Das Entwicklungsboard unterstützt noch weitere Schnittstellen, wie zum Beispiel SPI oder UART. Außerdem liefert es zahlreiche GPIO-Pins sowie einen stabilisierten 3,3V Spannungsausgang[20].

Die Kommunikation mit den Sensoren erfolgt über RS485. Dazu wird das Breakout-Modul für den SP3485 RS485-Transceiver von SparkFun verwendet, das mit dem ESP32 über UART kommuniziert[21]. Die Spannungsversorgung für das Breakout-Modul erfolgt über die integrierte 3,3V Spannungsquelle des ESP32-Entwicklungsboards.

Die Messdaten der Sensoren können auf einer SD-Karte gespeichert werden. Damit lässt sich eine weitere Auswertung der Daten realisieren, beispielsweise zur Untersuchung der Bewässerungszeitpunkte oder zur Kontrolle der Bodenfeuchtigkeit über einen längeren Zeitraum. Der Anschluss des SD-Kartenmoduls erfolgt mit der SPI-Schnittstelle des ESP32. Zusätzlich werden die Messdaten über MQTT veröffentlicht. Damit lassen sich die Daten von jedem internetfähigen Gerät einsehen, es wird nur ein MQTT-Broker benötigt.

Über das Relaisboard wird die Spannungsversorgung für die Wasserpumpe geschalten. Es handelt sich hierbei um das Relaisboard 2RelayB von Keyestudio[22]. Auf dem Board befinden sich zwei Relais, es wird aber nur eins benötigt, das zweite ist als Reserve vorgesehen. Die Spannungsversorgung des Boards beträgt 5V, die Ansteuerung erfolgt über einen GPIO Pin des ESP32. Das Signal ist Active-High, die 3,3V GPIO-Spannung des ESP32 ist ausreichend, da die IN-Eingänge auf einen Optokoppler geführt werden.

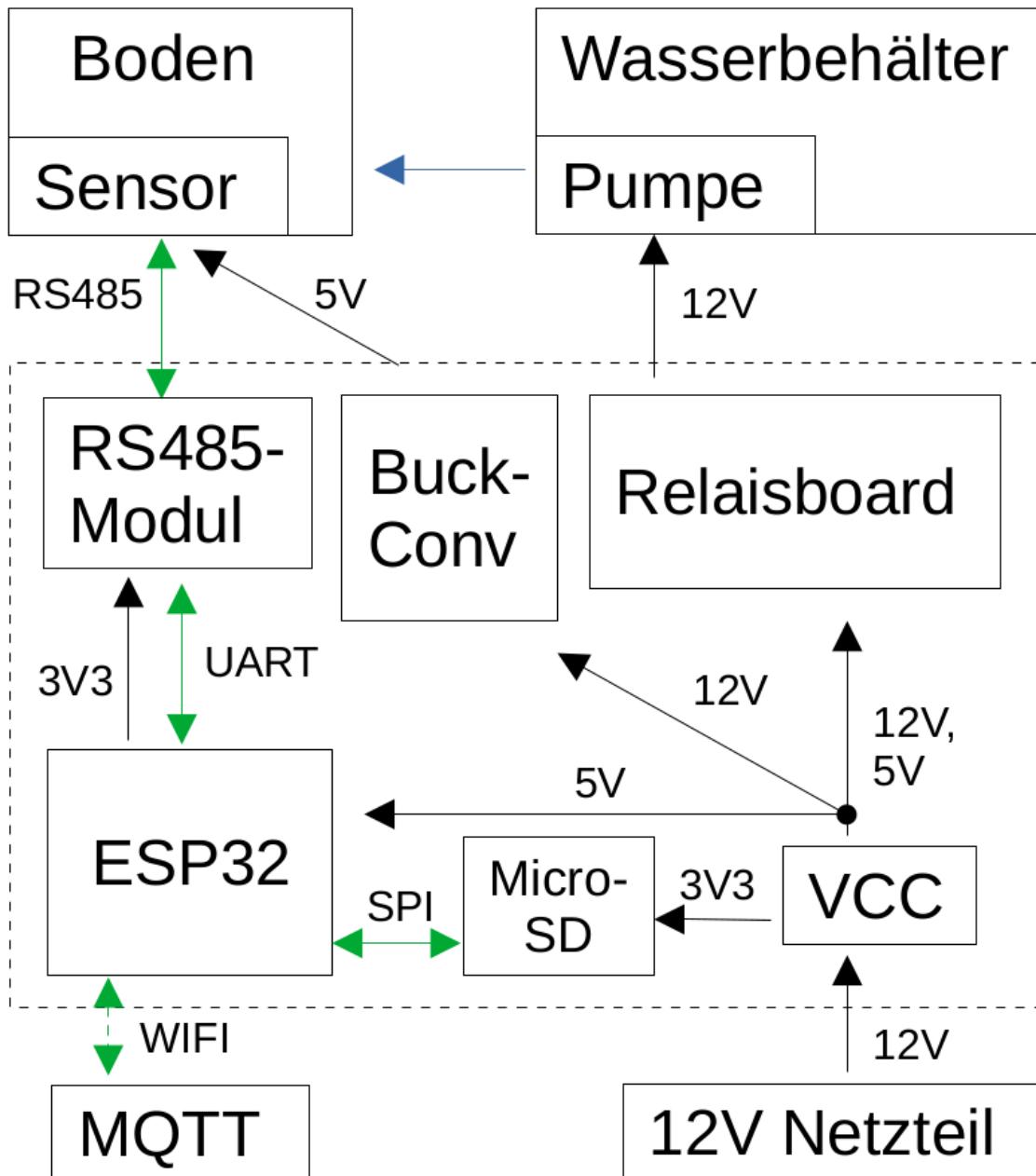


Abbildung 3.16.: Prinzipschaltbild der Basisstation

4. Realisierung

4.1. Kapazitiver Bodenfeuchtesensor

4.1.1. PCB-Design in EAGLE

Schaltung

Die Schaltung wurde, basierend auf den vorhergehenden Schaltungssimulationen in LTSpice, in EAGLE entworfen, vgl. Abb 4.1.

Es stand zunächst eine umfassende Recherche an, um die passenden Bauelemente für die Schaltung zu bestimmen. Als Mikrocontroller wurde, wie schon im vorhergehenden Kapitel erwähnt, ein STM32L010F4 verwendet. Er zeichnet sich besonders durch den niedrigen Energieverbrauch aus, womit auch ein späterer Einsatz in einer batteriebetriebenen Schaltung möglich wäre. Bei der Auslegung der Schaltung wurde sich am Referenzdesign, zu finden in der Application Note 3216 von STM32, orientiert[23]. Dies gilt zwar für die L1 Serie, lässt sich jedoch auch auf die L0 Serie anwenden.

Für die Spannungsversorgung wird ein LDO vom Typ XC6206 verwendet. Die Ausgangsspannung beträgt 3,3V, die maximale Eingangsspannung beträgt 6V, der maximale Ausgangsstrom beträgt 200mA[24]. Der Verpolschutz wird mit einem P-MOSFET realisiert, um den Spannungsabfall zu minimieren. Es wird die parasitäre Diode des MOSFET genutzt: Wird eine Spannung angelegt, fängt zunächst die Diode an zu leiten. Dadurch entsteht am Source-Anschluss eine Spannung, der MOSFET leitet und schließt die Diode kurz. Es fällt nur eine geringe Spannung über dem MOSFET ab, welche proportional zum Widerstand $R_{DS_{ON}}$ ist. Bei verpoltem Anschluss sperrt die Diode, und der MOSFET geht nicht in den leitenden Zustand über[25].

Die RS485-Kommunikation wird mit einem Low-Power RS485-Transceiver vom Typ SP3485 realisiert. Um die Datenleitungen vor elektrostatischer Entladung (ESD) zu schützen, wird ein ESD-Schutz implementiert, der durch einer SM712 TVS-Diode bereitgestellt wird. Die SM721 Diode ist speziell für RS-485 Anwendungen konzipiert[26]. Der Widerstand R_{TERM} ist der 220Ω Abschlusswiderstand. Die Bestückung ist optional und kann ggf. auch extern, am Ende der Übertragungsleitung, angebracht werden.

Layout

Bei der Erstellung des Layouts wurde darauf geachtet, den Sensor so kompakt wie möglich zu gestalten. Die Abmessungen der Sensorplatine betragen 25,39mm in der Breite und 78,41mm in der Länge, vgl. Abb 4.2. Die Leiterbahnbreite beträgt 12mil, der Via-Durchmesser 0,3mm. Es handelt sich um eine zweilagige Platine. Es befinden sich alle Bauteile auf der Oberseite der Platine, um eine möglichst durchgängige Massefläche auf der Rückseite zu ermöglichen. Einzig der Quarzoszillator befindet sich auf der Rückseite, die Bestückung ist jedoch optional und ist nur erforderlich, wenn die Real-Time-Clock benötigt wird[12].

Die Sensorelektroden wurden mit zwei rechteckigen Kupferflächen realisiert, die sich auf der Vorder- und Rückseite der Platine befinden.

Der Anschluss der Spannungsversorgung, der RS485-Datenleitungen sowie der Leitwert-Elektroden erfolgt über die Stifteleiste oben am Sensor. Die Pinbelegung ist folgende (Vorderseite des Sensors, von links nach rechts):

1. Elektrode Leitwert +

2. Elektrode Leitwert -

3. Ground

4. Vcc (5V)

5. RS485 – B

6. RS496 – A

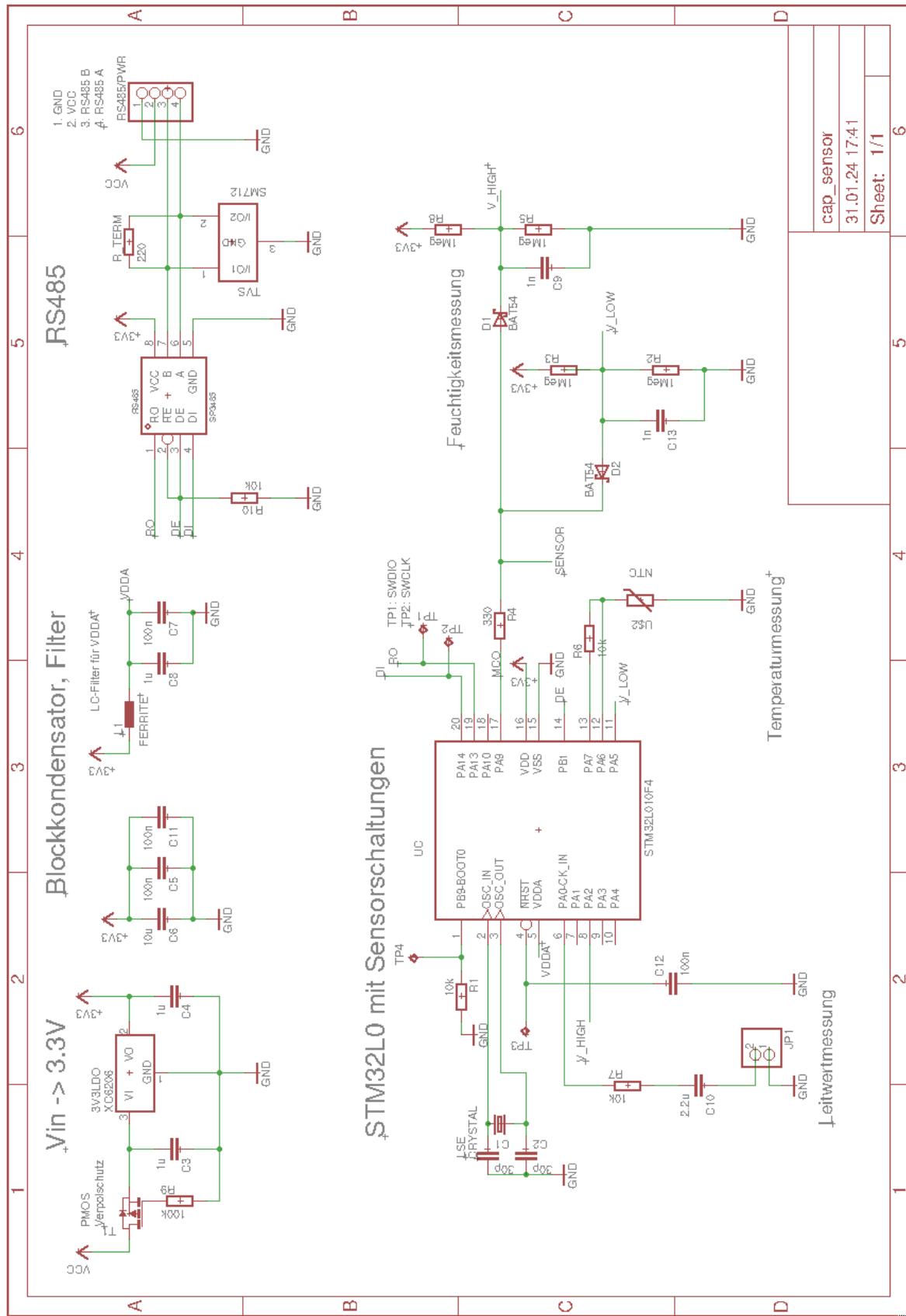


Abbildung 4.1.: Schaltplan des Bodenfeuchtesensors

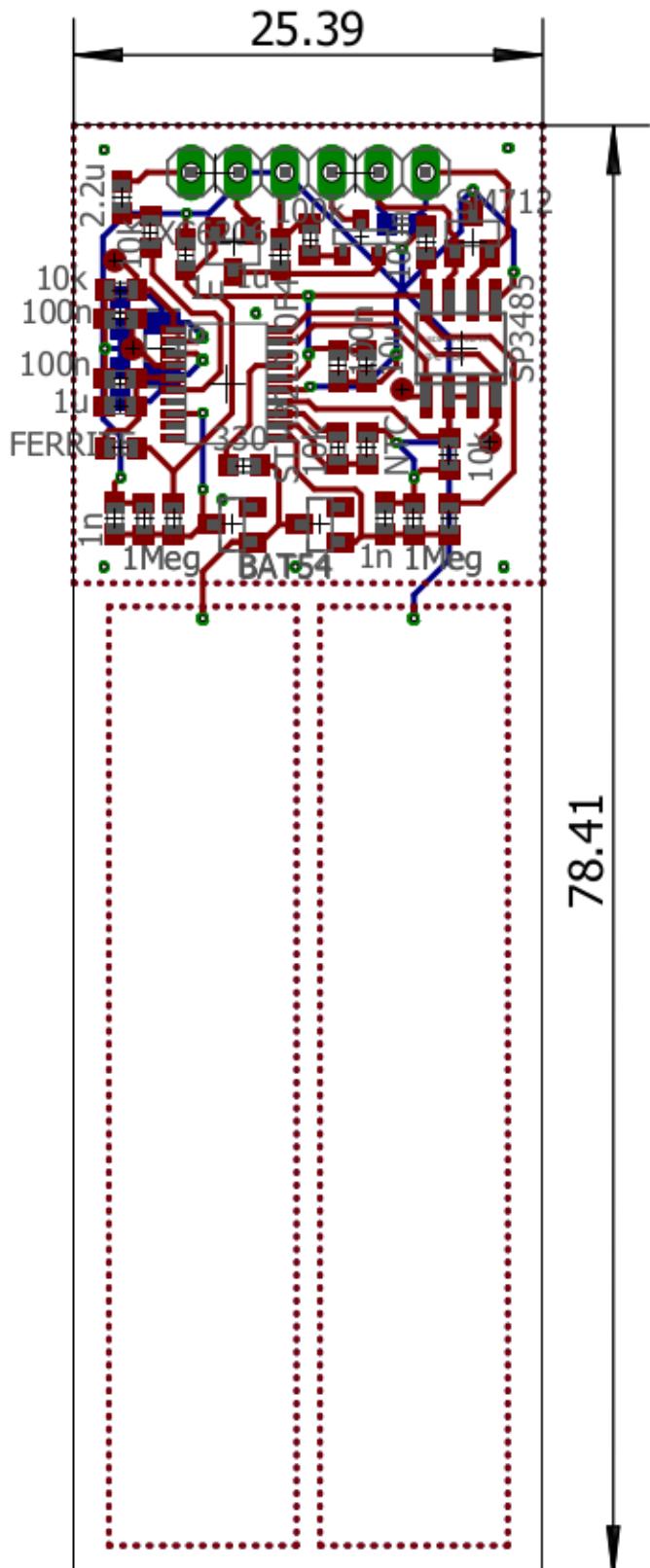


Abbildung 4.2.: Layout des Bodenfeuchtesensors

4.1.2. Aufbau der Sensorplatine

Die Sensorplatten wurden von der Fischer Leiterplatten GmbH gefertigt. Die Herstellungskosten beliefen sich auf etwa 8€ pro Platine. Es wurden insgesamt 5 Platten bestellt.

Bauteilbestückung

Die Sensoren wurde anhand dem Layout und der Stückliste in Tabelle 4.1 bestückt. Die Kosten für die Bauelemente belaufen sich auf etwa 10€ pro Sensor, in Verbindung mit den Herstellungskosten der Leiterplatte ergeben sich Gesamtkosten von etwa 18€.

Beschichtung mit Urethan

Um die Leiterplatte gegen eindringende Feuchtigkeit zu schützen, wurde sie mit mehreren Lagen Polyurethan Lack beschichtet. Nach jeder Beschichtung wurde etwa 24 Stunden gewartet, bevor die nächste Lage aufgetragen wurde.

PU Lack zeichnet sich durch seine flexible, nicht leitende und widerstandsfähige Beschichtung aus und wird hauptsächlich zum Schutz für Elektronik verwendet. Zusätzlich werden durch die Beschichtung eventuelle Kurzschlüsse oder Kriechströme verhindert[27].

Für den Außeneinsatz bietet es sich an, den Elektronik-Teil der Platine zusätzlich mit selbstklebendem Schrumpfschlauch zu isolieren.

In Abb. 4.3 ist die Vorder- und Rückseite des aufgebauten Sensors zu sehen.



Abbildung 4.3.: Vorder- und Rückseite des Sensors

Ref	Qty	Hersteller	Herstellernr.	Beschreibung	Package
C1, C2	2	Kemet	C0603C300M5HACAUTO	MLCC - SMD 50V 30pF X8R	0603
C9, C13	2	Kemet	C0603C102F4GACTU	MLCC - SMD 16V 1000pF 1% C0G	0603
C5, C7, C11, C12	4	Kemet	C0603C104K1RACAUTO	MLCC - SMD 100V 100nF 10% X7R	0603
C3, C4, C8	3	Kemet	C0603X105K4RACAUTO7411	MLCC - SMD 16 Vol 1 uF 10% X7R	0603
C10	1	TDK	CGA3E1X7S1C225K080AE	MLCC - SMD SOFT 16V X7S 10%	0603
C6	1	Kemet	C0603C106M8PAC7411	MLCC - SMD 10V 10uF X5R 20%	0603
R_TERM	1	Vishay	CRCW0603220RFKEC	Thick Film SMD 100mW 1% 220R	0603
R4	1	Vishay	CRCW0603330RFKEC	Thick Film SMD 100mW 1% 330R	0603
R1, R6, R7, R10	4	Bourns	CMP0603AFX-1002ELF	Thick Film SMD 1/4W 1% 10k	0603
R9	1	Panasonic	ERA-3AEB104V	Thick Film SMD 1/10W 0.1% 100k	0603
R2, R3, R5, R8	4	TE Con.	CPF0603B1M0E	Thin Film SMD 62.5mW 0.1% 1M	0603
D1, D2	2	Rectron	BAT54	Schottky Diodes 0.2A 30V	SOT23
Ferrite	1	Würth	74269262601	Ferrite WE-TMSB 0.1Ohms 1.5A	0603
LSE	1	Würth	830009709	XTAL 32.768kHz 7pF 70kOhms	3.2x1.5
TVS	1	Semtech	SM712.TCT	TVS Diodes 400W Asym. 7V,12V	SOT-23
NTC	1	Vishay	NTCS0603E3103HLT	Thermistors NTC 10Kohms 3%	0603
UC	1	STM32	STM32L010F4P6	MCU Cortex-M0+ 32MHz	TSSOP-20
RS485	1	MaxLinear	SP3485EN-L	RS485 IC 3.3V 10000 kbp	SOIC-8
T1	1	Vishay	SI2393DS-T1-GE3	MOSFET 30V P-CHANNEL	SOT-23

Tabelle 4.1.: Stückliste des Sensors

4.1.3. Software

Die Software für den STM32 wurde mit STM32CubeMX geschrieben[28]. Der STM32L0 wurde zunächst über die graphische Benutzeroberfläche konfiguriert, vgl. Abb. 4.4.

PA0, PA2, PA5 und PA6 wurden als ADC-Eingang festgelegt; PA7 als Output-Pin; PA9 wurde als MCO (Microcontroller-Clock-Output) konfiguriert, dieser liefert das 16MHz-Signal für die Feuchtigkeitsmessung; PB1, PA13 und PA14 wurden als LPUART-Pins konfiguriert.

Im Reiter Clock Configuration wurde außerdem als Clock-Source für den MCO-Pin der interne 16 MHz Oszillatior ausgewählt (HSI16).

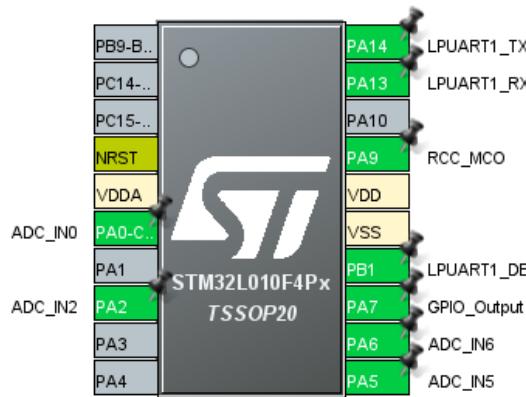


Abbildung 4.4.: Pinkonfiguration STM32L0

Nachdem alle erforderlichen Einstellungen getroffen wurden, generiert STM32CubeMX automatisch den Initialisierungscode des Programms sowie ein Template für die main-Funktion. Darauf aufbauend wurde das Messprogramm entwickelt. Es wurde Wert darauf gelegt, das Programm so ressourcensparend wie möglich auszulegen, jegliche Auswertung der Daten soll der ESP32 in der Basisstation übernehmen, da er über weitaus mehr Ressourcen verfügt.

Das Programm beginnt mit der Initialisierung des Hardware-Abstraction-Layers (HAL), der Takteinstellungen sowie der GPIOs. In der main-Funktion wird in einer while-Schleife kontinuierlich auf eingehende Daten über UART gewartet. Die eingehenden Daten werden anschließend zu einem 32-Byte Integer konvertiert und mit der Sensor-ID verglichen. Gibt es eine Übereinstimmung, wird die `Measure_and_Transmit` Funktion aufgerufen.

In der `Measure_and_Transmit` Funktion werden nacheinander die verschiedenen Messungen durchgeführt, zuerst die Leitwertmessung, danach die Feuchtigkeitsmessung und zuletzt die Temperaturmessung, vgl. Abb. 4.5 für den Programmablaufplan.

Das Auslesen der ADC-Eingänge erfolgt mit der Funktion `Poll_ADC_Channel`. Der zurückgegebene ADC-Wert ist vom Typ `uint32_t` und wird in der Buffer-Variable `TXData[5]` gespeichert. Ist die Messung beendet, wird der Inhalt in `TXData` byteweise an die Basisstation gesendet. Das LSB wird hierbei als erstes übertragen (Little-Endian), vgl. Tabelle 4.2.

Das Flashen des STM32 erfolgt über die SWD-Schnittstelle (Serial-Wire-Debug). Die entsprechenden Datenleitungen sind über die Testpunkte TP1 (SWDIO) und TP2 (SWCLK) erreichbar, vgl. Abb. 4.1.

Falls der RS485-Baustein bereits bestückt ist, muss der Driver-Enable Pin auf HIGH gesetzt werden. Wenn der STM32 mehrmals geflasht wird, muss vor jeder weiteren Programmierung TP4 (BOOT0) auf V_{CC} gelegt werden. Die SWD-Leitungen sind doppelt belegt, nach dem ersten Flashen ist die SWD-Schnittstelle zugunsten der LPUART-Schnittstelle deaktiviert. Liegt am BOOT0-Pin die Versorgungsspannung an, geht der Bootloader davon aus, dass der Flash-Speicher leer ist und bereitet sich auf den Programmiermodus vor[12].

Das STM32-Projekt ist, inkl. Source-Code, auf Github einzusehen[29].

Sensor ID				ADC PA0			
#0 (LSB)	#1	#2	#3 (MSB)	#4 (LSB)	#5	#6	#7 (MSB)
ADC PA2				ADC PA5			
ADC PA6				#12 (LSB)	#13	#14	#15 (MSB)
#8 (LSB)	#9	#10	#11 (MSB)	#16 (LSB)	#17	#18	#19 (MSB)

Tabelle 4.2.: Übertragungsrahmen UART/RS485

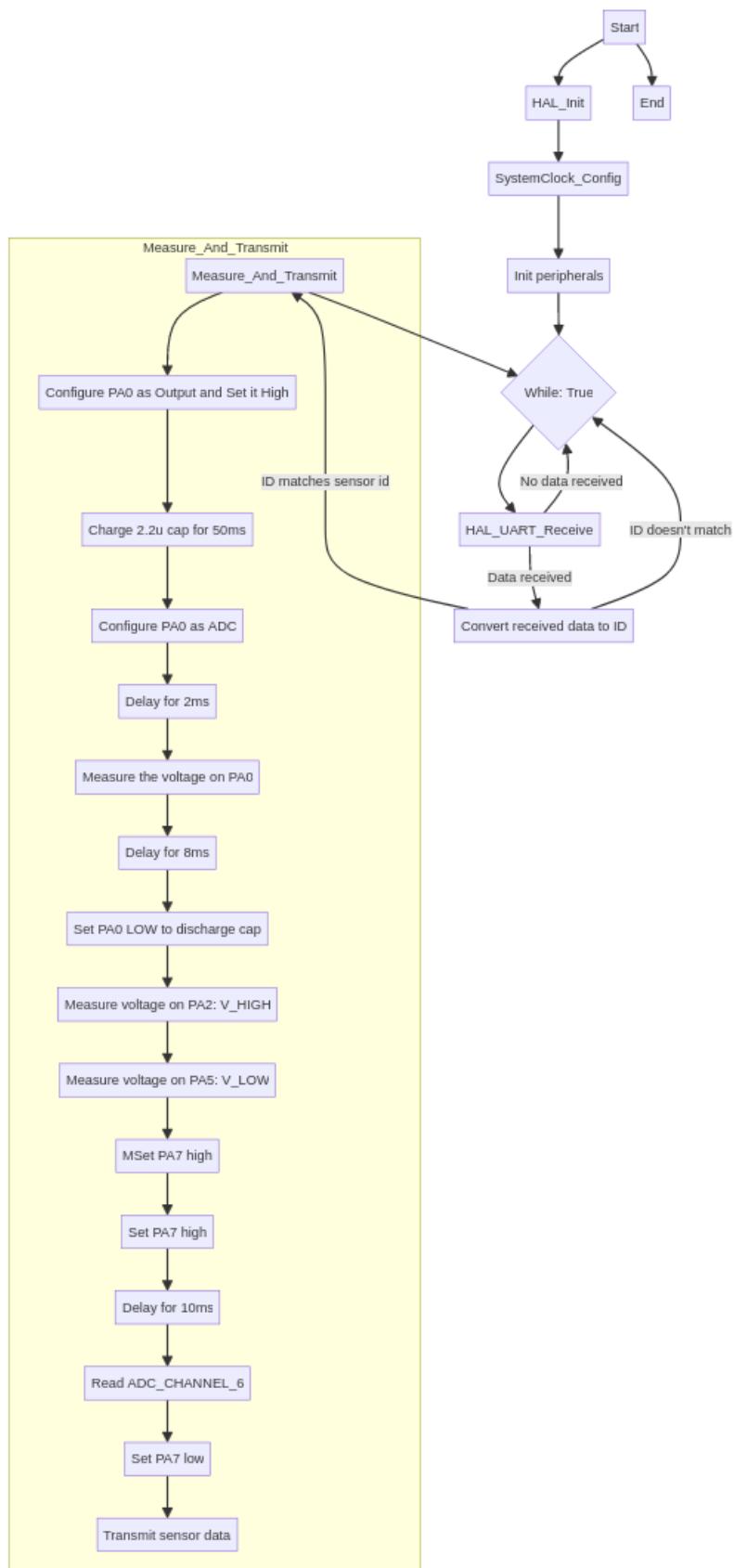


Abbildung 4.5.: Programmablaufplan STM32

4.2. Basisstation

4.2.1. Hardware

Modularer Aufbau

Die Basisstation wurde, basierend auf dem Prinzipschaltbild in Abb. 3.16, aus vorgefertigten Modulen aufgebaut. Als Untergrund wurde eine Platte aus Plexiglas verwendet, worauf die Module aufgeschraubt wurden. In Abb. 4.8 ist die Basisstation, zur Übersichtlichkeit ohne Spannungsversorgungsleitungen, abgebildet.

RS485-Verbindung

Zur Übertragung kann prinzipiell jedes beliebige Kabel verwendet werden, ein Kabel mit Schirmung sowie verdrillten Adern ist jedoch zu bevorzugen, um Störeinflüsse zu minimieren. Die Wahl fiel aus diesem Grund auf ein Ethernet-Kabel (CAT5e). Zusätzlich zu den Datenleitungen wird auch die Spannungsversorgung über das Ethernet-Kabel realisiert. Der Anschluss erfolgt mit verpolungssicheren Steckverbindern. In Abb. 4.6 ist das Prinzip der Übertragung dargestellt, die Sensoren werden in einer Reihenschaltung angeordnet. Bei langen Übertragungsleitungen, oder bei auftretenden Übertragungsfehlern, wird ein 220Ω Abschlusswiderstand empfohlen.

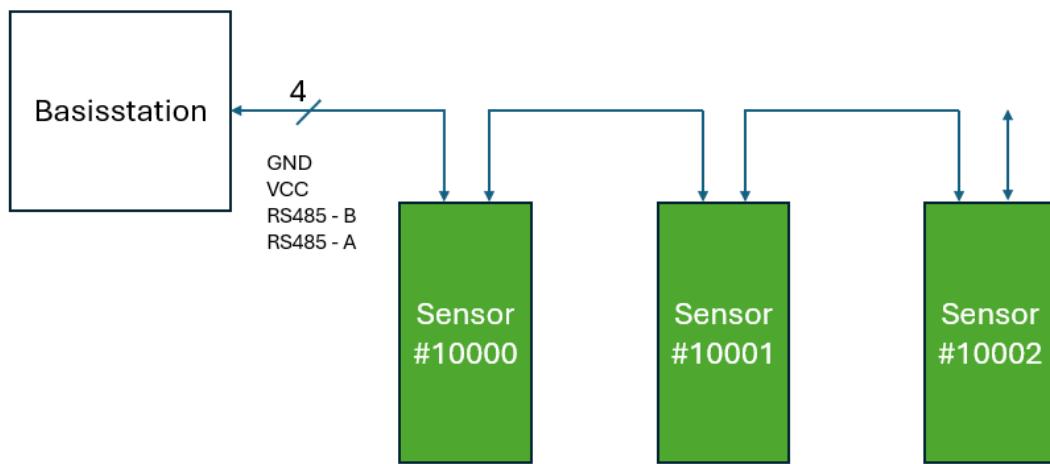


Abbildung 4.6.: Übertragungsprinzip RS485

Die RS485-Übertragung ist folgendermaßen konfiguriert:

```
#define BAUD_RATE 115200

uart_config_t uart_config = {
    .baud_rate = BAUD_RATE,
    .data_bits = UART_DATA_8_BITS,
    .parity = UART_PARITY_DISABLE,
    .stop_bits = UART_STOP_BITS_1,
    .flow_ctrl = UART_HW_FLOWCTRL_DISABLE,
    .rx_flow_ctrl_thresh = 122,
    .source_clk = UART_SCLK_DEFAULT,
};

};
```

Die Übertragungsgeschwindigkeit beträgt 115200 Baud, es gibt 8 Datenbits, kein Paritätsbit und ein Stoppbit. Es handelt sich um eine bidirektionale Halb-Duplex-Übertragung, d.h. die Übertragung erfolgt in beide Richtungen mit zwei Datenleitungen verwendet. Die Datenübertragung erfolgt symmetrisch, deshalb ist sie resistent gegen Gleichtaktstörungen. In Abb. 4.7 ist beispielhaft die Datenübertragung der Messdaten vom Sensor zur Basisstation zu sehen. Ch1 und Ch2 zeigt den Spannungsverlauf auf den Datenleitungen, das Signal in rot ist die Differenzspannung (Ch1 - Ch2).

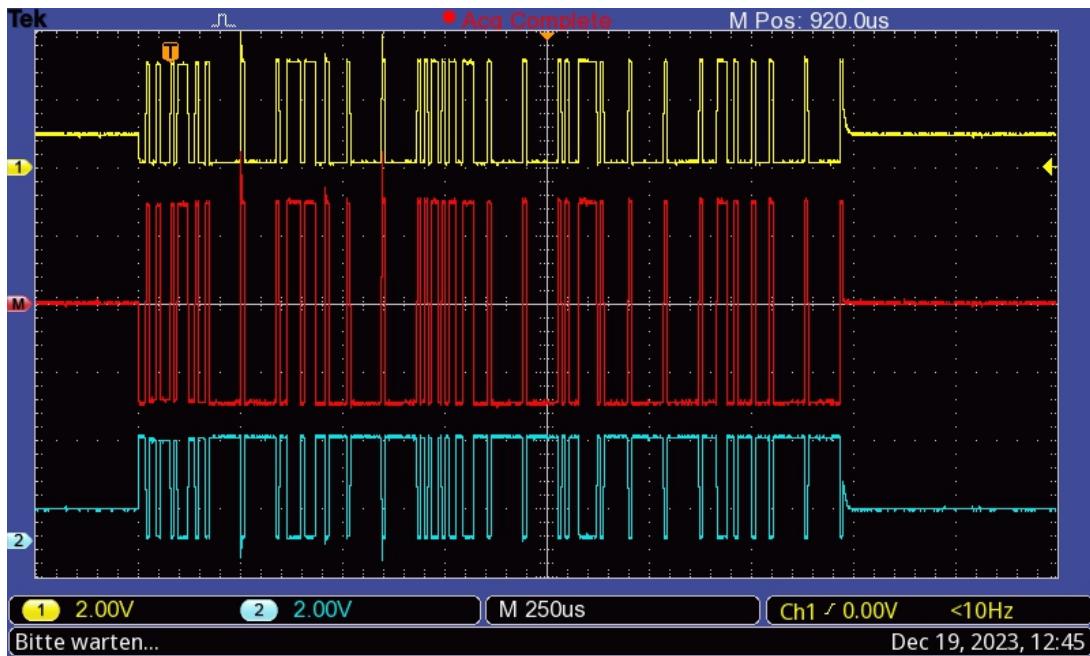


Abbildung 4.7.: Oszilloskopbild der Datenübertragung zwischen Sensor und Basisstation

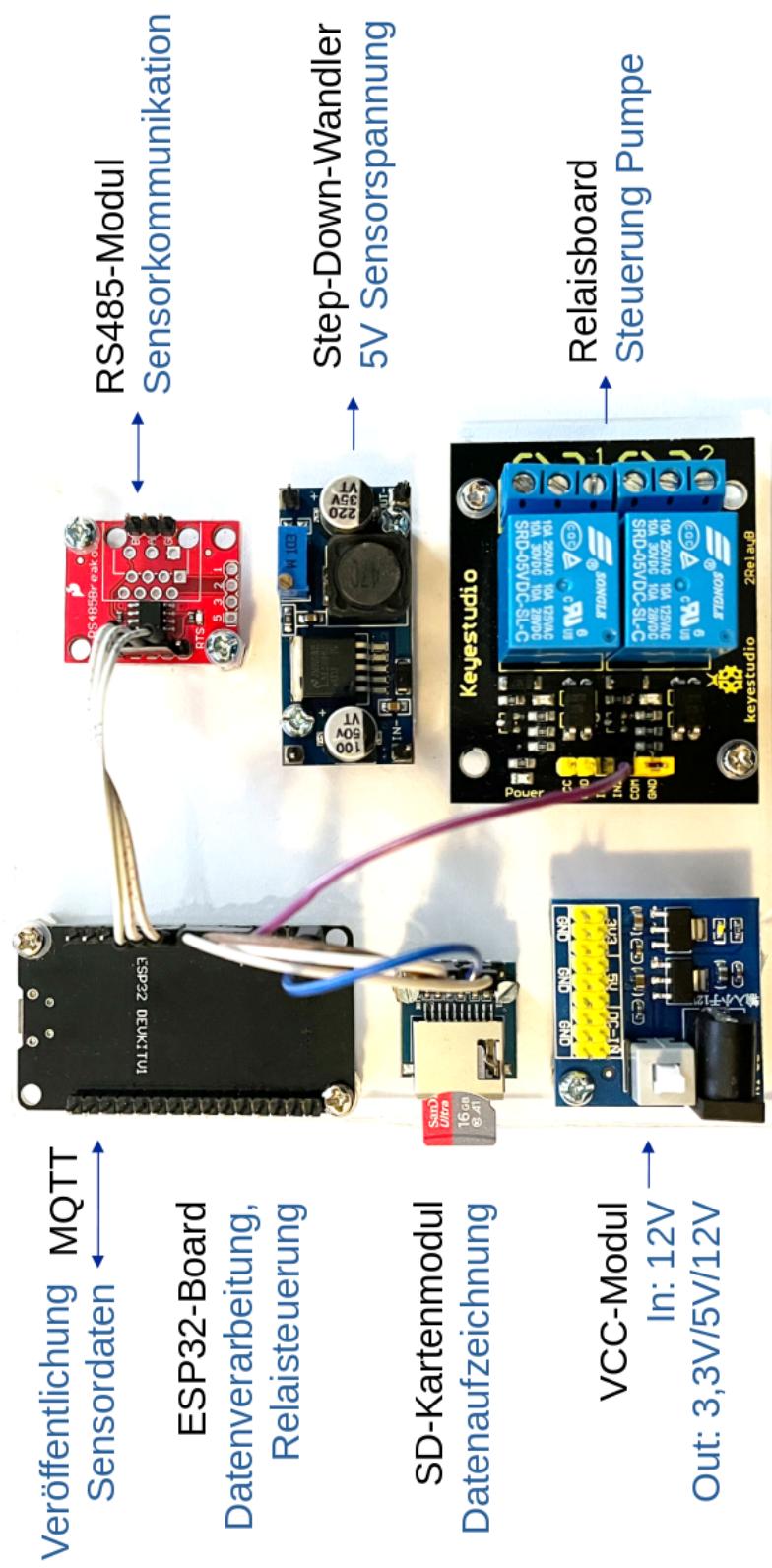


Abbildung 4.8.: Basisstation mit Beschreibung der einzelnen Module

4.2.2. Software

Die Software für den ESP32 wurde mit Hilfe des Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF) in Visual Studio Code entwickelt. Es bietet eine breite Palette von Funktionen, darunter die Codekomplilierung, einfaches Flashen auf den ESP32 sowie leistungsstarkes Debugging über die USB-Schnittstelle. Die Entwicklungsumgebung wird durch eine umfassende Sammlung von Beispielprojekten ergänzt, wie zum Beispiel die Herstellung einer WiFi-Verbindung, oder das Speichern von Daten auf einer SD-Karte[30].

Das Programmiermodell von ESP-IDF basiert auf FreeRTOS und folgt einem taskbasierten Ansatz, der speziell für Embedded-Systeme und IoT-Anwendungen optimiert ist. FreeRTOS ist ein Echtzeitbetriebssystem, das die parallele Ausführung mehrerer Tasks ermöglicht. Es übernimmt dabei die Aufgabenplanung und -ausführung, wodurch mehrere Tasks mit unterschiedlichen Prioritäten erstellt werden können[31].

Es wurden drei Tasks definiert, die nach Programmstart gleichzeitig ausgeführt werden:

- `static void rx_task(void *arg)`: Dieser Task wartet kontinuierlich auf eingehende RS485-Daten. Werden Daten empfangen, erfolgt die Auswertung, und ggf. Speicherung sowie Veröffentlichung über MQTT.
- `static void tx_task(void *arg)`: Es werden intervallweise die Sensor-IDs über die RS485-Schnittstelle gesendet, um neue Messdaten von den Sensoren anzufordern.
- `static void sensordata_task(void* arg)`: Die Messdaten werden auf einen zuvor festgelegten Schwellwert überprüft. Bei Bedarf wird das Relais angesteuert, um die Bewässerung zu starten.

In Abb. 4.9 ist der Programmablaufplan zu sehen. Nach Programmstart werden zuerst die erforderlichen Timer, GPIOs und weitere periphere Anschlüsse, wie z.B. UART für die RS485 Verbindung oder SPI für die Aufzeichnung der Daten auf der SD-Karte initialisiert. Anschließend wird in die einzelnen Tasks übergegangen.

Das ESP-IDF Projekt ist auf Github zu finden[29].

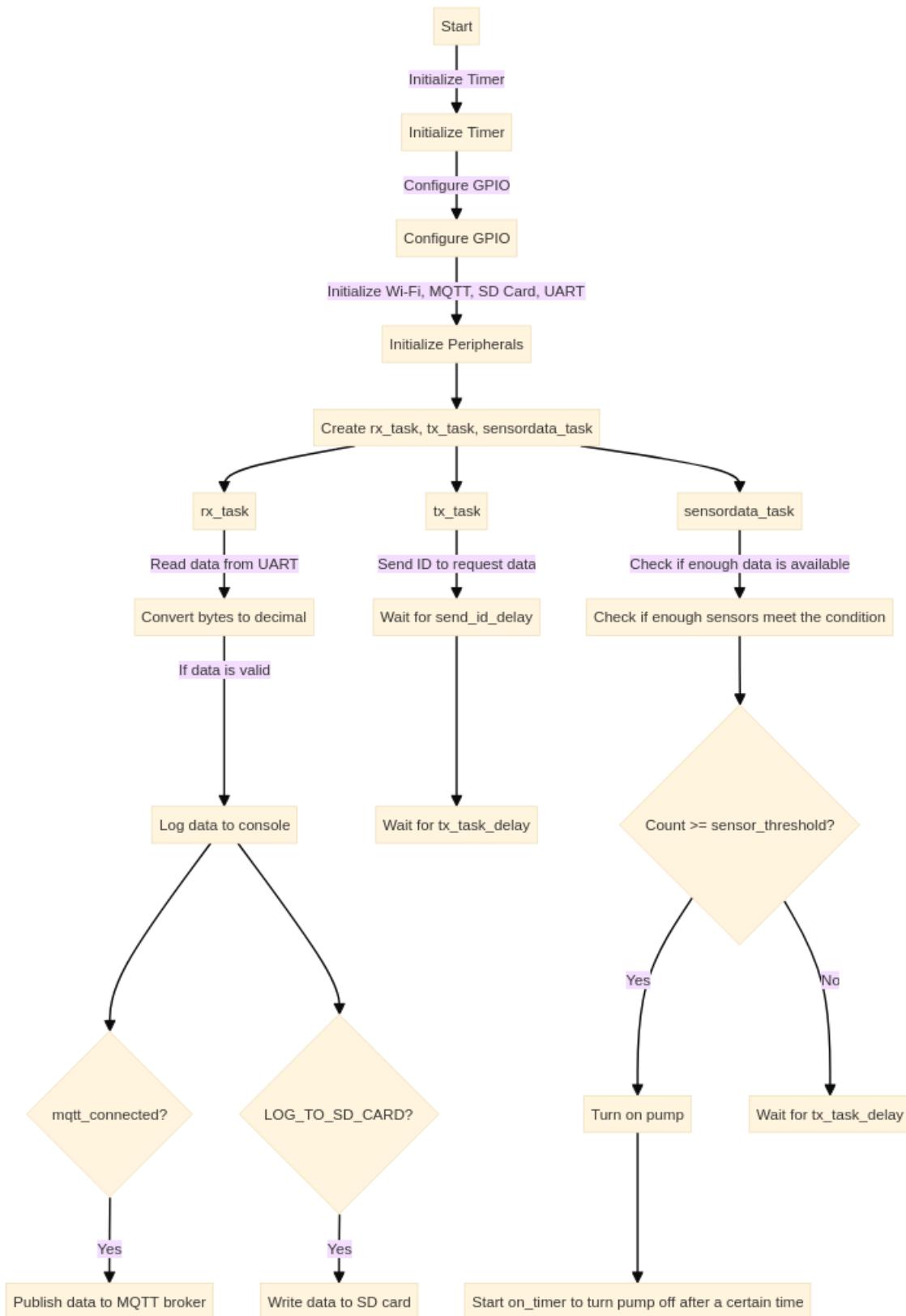


Abbildung 4.9.: Programmablaufplan ESP32

Konfiguration

Bevor das Programm auf den ESP32 geflasht wird, müssen einige Konfigurationsvariablen gesetzt werden.

Um eine WiFi-Verbindung herstellen zu können, müssen folgende `#define` Variablen gesetzt sein:

```
/* WIFI */
#define WIFI_SSID "YOUR_WIFI_SSID"
#define WIFI_PASSWORD "YOUR_WIFI_PASSWORD"
```

Zusätzlich muss die IP-Adresse des MQTT-Host definiert werden:

```
/* MQTT */
#define MQTT_URI "mqtt://IP_ADRESSE"
```

Wenn keine WiFi-Verbindung oder Datenaufzeichnung auf einer SD-Karte gewünscht ist, lassen sich diese Funktionen folgendermaßen deaktivieren:

```
#define LOG_TO_SD_CARD      1 // 1 to log data to SD card, 0 to disable
#define INIT_WIFI            1 // 1 to initialize wifi, 0 to disable
```

Die Messparameter sind im struct `Config` konfiguriert und mit folgenden Standardwerten vorinitialisiert:

```
Config config = {
    .threshold = 2.0,
    .sensor_threshold = 2,
    .sensor_count = 3,
    .pump_on_time = 5 * SECOND_US,
    .send_id_delay = 3000,
    .tx_task_delay = 10 * MINUTE_MS
};
```

`threshold` gibt dabei an, ab welchem Grenzwert die Pumpe angeschaltet wird. Je höher, desto später wird das Relaisboard geschaltet, also desto trockener soll der Boden sein. `sensor_threshold` gibt die Anzahl an Sensoren an, die den vorherigen Grenzwert überschreiten müssen, bevor die Bewässerung beginnt. `sensor_count` gibt die insgesamte Anzahl an angeschlossenen Sensoren an. `pump_on_time` steht für die Bewässerungsdauer und `send_id_delay` sowie `tx_task_delay` steuern das Messintervall.

`send_id_delay` gibt dabei das Zeitintervall zwischen den einzelnen Sensorabfragen und `tx_task_delay` das Zeitintervall zwischen den Messungen im allgemeinen an, siehe dazu Abb. 4.10.

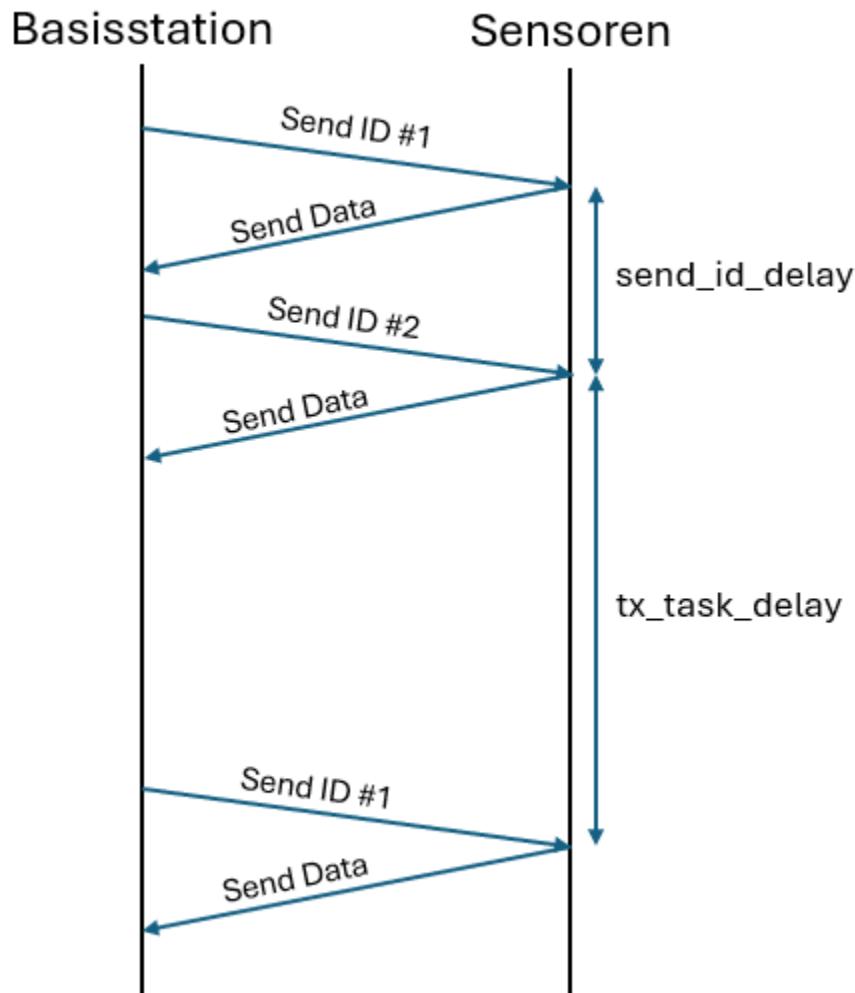


Abbildung 4.10.: Zeitstrahl der Messungen

Datenauswertung

Die empfangenen Bytes werden zunächst auf korrekte Länge überprüft. Die übertragenen Messdaten von den Sensoren haben eine Länge von 20 Bytes, vgl. Tabelle 4.2. Wurden weniger Daten empfangen, handelt es sich um eine fehlerhafte Übertragung. Ist die Länge korrekt, werden die Dezimalwerte aus den empfangenen Bytes in der Funktion `Convert_Bytes_to_Decimal` extrahiert.

Es erfolgt anschließend die Umrechnung der ADC-Werte in die entsprechenden Spannungen, sowie die Konvertierung von der NTC-Spannung in die Temperatur mit der Steinhart-Hart-Gleichung aus Kapitel 3.2.3.

Die Daten werden im struct `SensorData` und im struct-Array `sensorHistories` gespeichert:

```
typedef struct {
    uint32_t ID;           // Sensor-ID
    double resistance_measurement_voltage; // Spannung in V an PA0
    double V_HIGH_voltage; // Spannung in V an PA2
    double V_LOW_voltage; // Spannung in V an PA5
    double temperature;   // Temperatur in °C
} SensorData;

typedef struct {
    SensorData current;
    SensorData previous1;
    SensorData previous2;
} SensorHistory;

SensorHistory sensorHistories[MAX_SENSORS];
```

Anschließend werden die Sensordaten in das json-Format konvertiert und, falls konfiguriert, über MQTT veröffentlicht sowie auf einer SD-Karte in der Datei `DATA.TXT` gespeichert.

Ansteuerung des Relais

Im Task `sensordata_task` werden die letzten drei Messungen, die in `sensorHistories` für jeden Sensor gespeichert sind, analysiert. Aus der Differenzspannung V_{DIFF} von `V_HIGH_voltage` und `V_LOW_voltage` lässt sich die Bodenfeuchte ableiten. Ist V_{DIFF} größer als der Grenzwert, der in `config.threshold` definiert ist, wird das Relaisboard angesteuert, um den Bewässerungsvorgang zu starten.

Die Differenz muss dabei (1) in den letzten drei aufeinander folgenden Messungen über dem Grenzwert sein und (2) von mindestens `config.sensor_threshold` Sensoren erfüllt werden. Ab dem Start der Bewässerung wird ein Timer aktiviert, der das Relais wieder nach einer bestimmten Zeit, definiert in `config.pump_on_time`, ausschaltet.

4.2.3. MQTT

Über das MQTT-Protokoll lassen sich aktuelle Messdaten und Debug-Nachrichten einsehen. Es können außerdem die Messparameter in Echtzeit angepasst werden. Nachrichten werden über sogenannte Topics definiert, siehe Tabelle 4.3, in der sich eine Auflistung aller konfigurierten Topics befindet. Pub steht für Publish, d.h. es werden Daten veröffentlicht, Sub steht für Subscribe, es wird also auf eingehende Daten gewartet.

Um Nachrichten zu Empfangen und zu senden, wird ein MQTT-Broker benötigt. Um einen MQTT-Broker einzurichten kann Open-Source-Software, wie zum Beispiel Eclipse Mosquitto, verwendet werden[32].

Ist der MQTT-Service gestartet, lassen sich die Sensordaten auf dem Hostsystem mit folgendem Terminal-Befehl einsehen:

```
mosquitto_sub -t "/topic/sensor" -h "localhost"
```

Die Debug-Nachrichten lassen sich folgendermaßen einsehen:

```
mosquitto_sub -t "/topic/debug" -h "localhost"
```

Um den Grenzwert einzustellen, muss folgender Befehl ausgeführt werden (hier ist der neue Grenzwert beispielhaft 2.1V):

```
mosquitto_pub -t "/topic/threshold" -h localhost -m "2.1"
```

Der Befehl, um die Pumpe für `pump_on_time` anzuschalten, lautet:

```
mosquitto_pub -t "/topic/pump_on" -h localhost -m ""
```

Die Anschaltdauer der Pumpe lässt sich folgendermaßen anpassen (hier beispielhaft 5s):

```
mosquitto_pub -t "/topic/pump_on_time" -h localhost -m "5000000"
```

Der Befehl, um das Messintervall (hier 600s = 5min) zu ändern, lautet:

```
mosquitto_pub -t "/topic/tx_task_delay" -h localhost -m "600000"
```

Es lassen sich ebenfalls die letzten gemessenen Sensordaten abfragen, hier beispielhaft für den Sensor mit der ID 10000 gezeigt:

```
mosquitto_pub -t "/topic/sensor_data" -h localhost -m "10000"
```

Topic	Type	Beschreibung
/topic/sensor	Pub	Veröffentlichung der Messdaten
/topic/debug	Pub	Debug-Msgs, z.B. Fehlermeldungen
/topic/threshold	Sub	Set config.threshold
/topic/sensor_threshold	Sub	Set config.sensor_threshold
/topic/sensor_count	Sub	Set config.sensor_count
/topic/pump_on_time	Sub	Set config.pump_on_time (in µs)
/topic/send_id_delay	Sub	Set config.send_id_delay (in ms)
/topic/tx_task_delay	Sub	Set config.tx_task_delay (in ms)
/topic/pump_on	Sub	Turn pump on
/topic/sensor_data	Sub	Request sensor data

Tabelle 4.3.: MQTT Topics

5. Ergebnisse

5.1. Untersuchung des Messsignals

In Abb. B.1 bis Abb. B.4 ist das Messsignal, das auf die Sensorelektroden geführt wird, zu sehen. Die Frequenz beträgt etwa 16MHz, die Taktflanken sind aufgrund der Sensorkapazität abgeflacht, das Signal ähnelt somit eher einem Sinus- als einem Rechtecksignal. Im Vergleich zu dem Messsignal auf der Steckbrettschaltung in Abb. 3.9 ist es kaum störbehaftet.

In Abb. B.1 und Abb. B.2 ist das Messsignal (Channel 1 - gelb) und jeweils das Signal V_{HIGH} sowie V_{LOW} (Channel 2 - blau) hinter den Dioden dargestellt.

In den zwei folgenden Abbildungen ist der Ausgangsspannungsbereich der Schwingung dargestellt. Abb. B.3 zeigt das Signal, wenn der Sensor in Wasser eingetaucht ist, und Abb. B.4 wenn der Sensor frei in der Luft hängt. Ist der Sensor in Wasser eingetaucht, beträgt die Spitze-Spitze-Spannung der Schwingung etwa 0,7V. Hängt er frei in der Luft, beträgt die Spannung über 2,5V.

5.2. Einfluss der Beschichtung mit PU-Lack

Um den Einfluss der Beschichtung auf die kapazitive Messung zu untersuchen, wurde vor dem Beschichtungsvorgang und nach jeder weiteren Beschichtung eine Messreihe aufgenommen. Es wurde 250g getrockneter Sand schrittweise mit 12,5ml Wasser bewässert. Insgesamt wurden drei Beschichtungen durchgeführt. In Abb. 5.1 ist die Differenz V_{DIFF} in Abhängigkeit zur Bodenfeuchte dargestellt. Es zeigt sich kein signifikanter Einfluss der Beschichtung auf das Messergebnis.

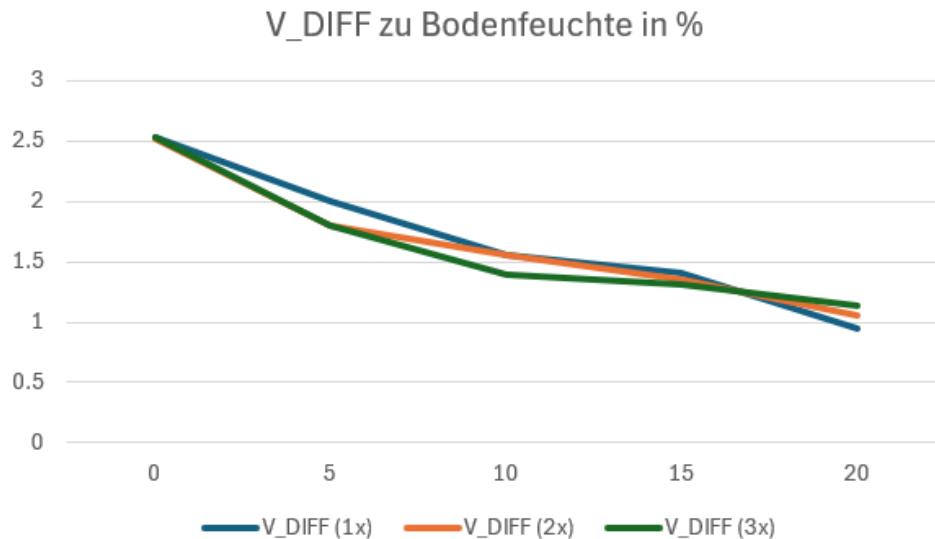


Abbildung 5.1.: Einfluss der Beschichtung mit PU-Lack

5.3. Sensorkalibration

Die Kalibration der Bodenfeuchtesensoren erfolgte unter Verwendung von 200g getrockneter Erde und 400g getrocknetem Sand. Es wurden zwei verschiedene Bewässerungsmethoden angewendet: einmal mit Leitungswasser und einmal mit einer 1%-tigen Düngerlösung (5ml Pflanzendünger auf 500ml Leitungswasser). Es wurde schrittweise 20ml Wasser zugeführt. Die Bodenfeuchte wurde damit in 10%-Schritten für die Erde und in 5%-Schritten für den Sand erhöht. Die Kalibration wurde mit drei Sensoren durchgeführt, vgl. Abb. 5.2, in dem der Kalibrationsaufbau für Sand als Medium dargestellt ist.

Die in Abbildung 5.3 gezeigten Messwerte repräsentieren die Durchschnittswerte der Kalibrationsmessungen für Erde und Sand. Es ist zu erkennen, dass der Nährstoffgehalt des Bodens einen signifikanten Einfluss auf die Messwerte hat, ähnlich wie bei dem Sensor-Prototyp, der in Kapitel 3.1.2 diskutiert wurde. Insbesondere zeigt sich, dass eine höhere Nährstoffkonzentration zu einer erhöhten Empfindlichkeit des Sensors führt.

Der Einfluss des Nährstoffgehaltes ist sowohl bei der kapazitiven als auch bei der Leitwertmessung erkennbar. Eine Korrektur dieses Einflusses erweist sich damit als schwierig, jedoch kann die Leitwertmessung zur Validierung der kapazitiven Messung genutzt werden.

Ein Problem war die ungleiche Wasserverteilung im trockenen Substrat, wodurch die Messwerte zu Beginn größeren Schwankungen ausgesetzt waren. Der Effekt ist bei der

Leitwertmessung stark ausgeprägt, da die Messung hier sehr punktuell erfolgt. Bei der kapazitiven Messung umfasst das elektrische Feld einen größeren Bereich, weshalb die Messwerte hier geringeren Schwankungen unterliegen.

Die ungleiche Verteilung ist bei der Erde aufgrund der größeren Poren stärker ausgeprägt. Bei Sand konnte von Beginn an eine lineare Beziehung zwischen den Messwerten und der Bodenfeuchte festgestellt werden, bei der Erde war dies erst ab einer Bodenfeuchte von etwa 40% der Fall.

Im Anhang B.2 befindet sich ein genauerer Überblick der Messwerte der einzelnen drei Sensoren. Es sind ebenfalls Tabellen mit den Messwerten hinterlegt.

Basierend auf den Daten erweist sich ein Grenzwert von 2V für config.threshold, ab dem der Bewässerungsprozess gestartet wird, als geeignet. Bei diesem Wert beträgt die Bodenfeuchte etwa 10-20% für Erde, und 5% für Sand.

Aufgrund den unterschiedlichen bodenspezifischen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Porengröße und damit die Wasseraufnahmefähigkeit, sollte für jeden Bodentyp eine gesonderte Kalibration erfolgen. An den Messungen ist beispielsweise erkennbar, dass die Erde erst bei einem gravimetrischen Wassergehalt von 80% gesättigt war, während dies bei Sand bereits bei einem Wassergehalt von 25% der Fall war. Durch die höhere Wasseraufnahmefähigkeit der Erde, hat auch der Messwert einen größeren Ausgangsspannungsbereich.

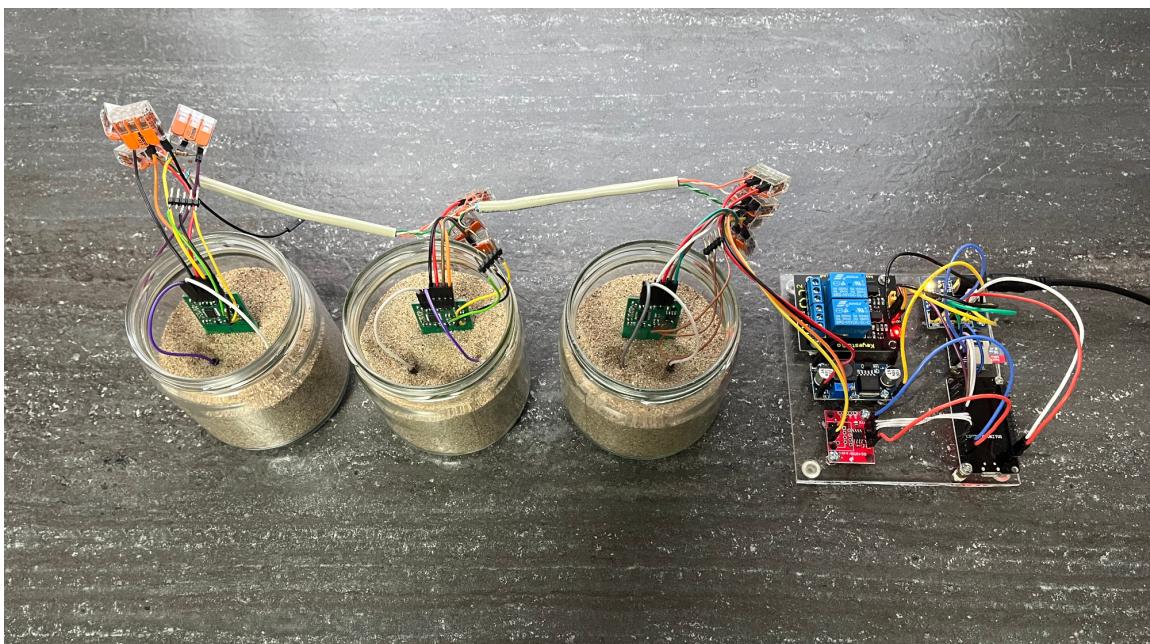
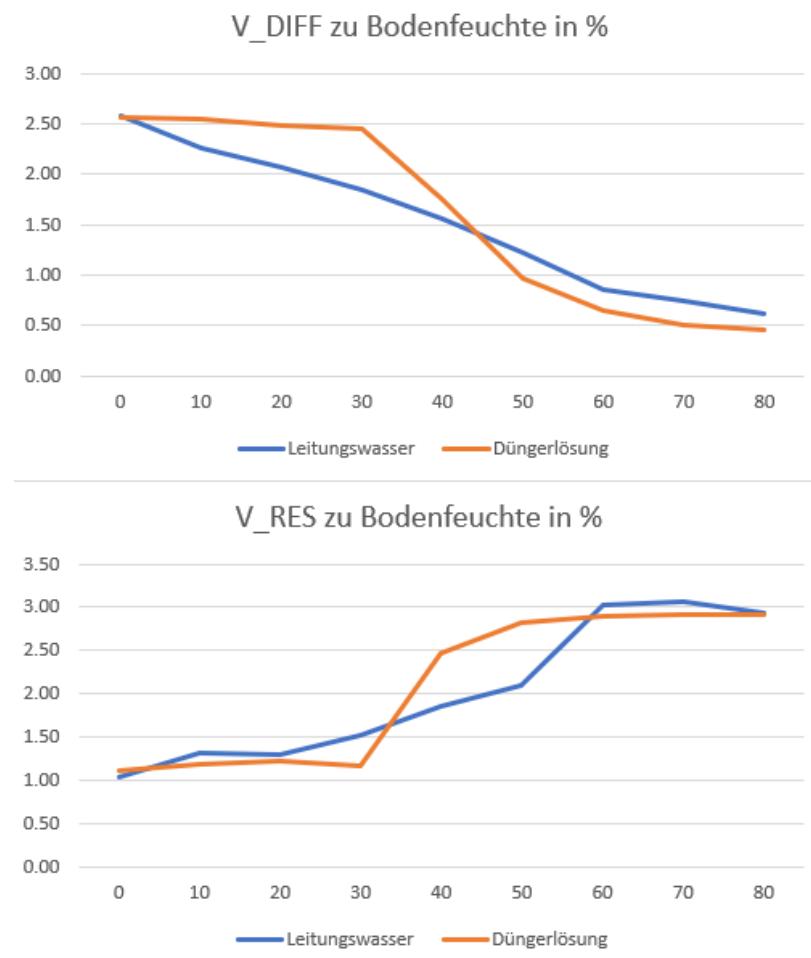
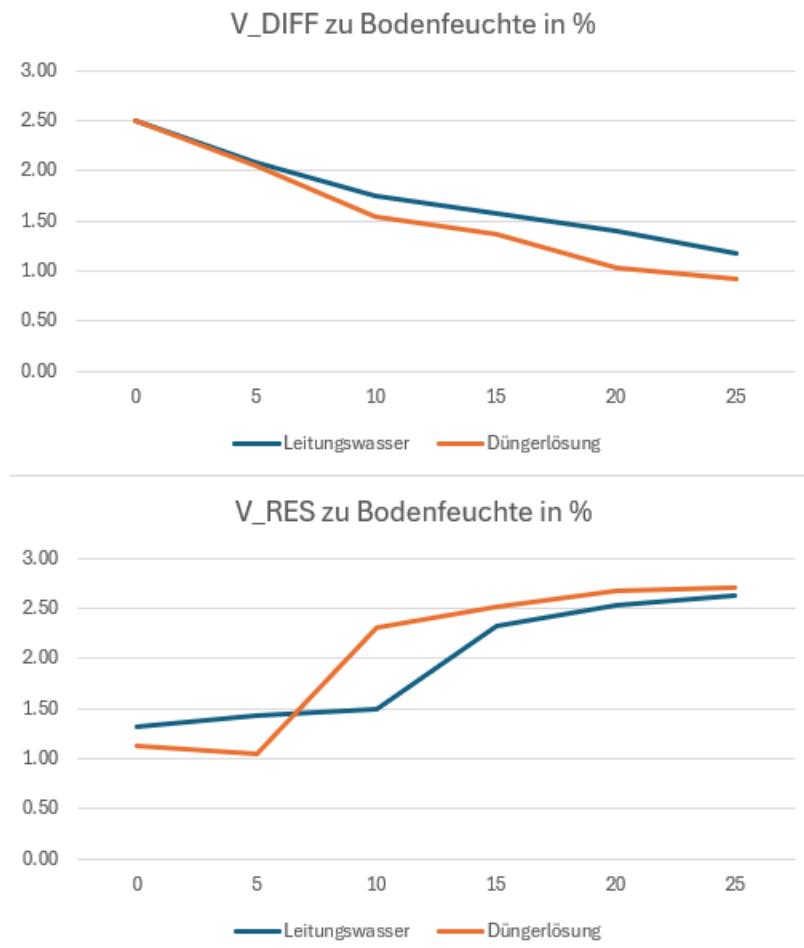


Abbildung 5.2.: Kalibrationsaufbau mit den drei Proben und Basisstation



(a) Kalibration mit Erde



(b) Kalibration mit Sand

Abbildung 5.3.: Gemittelte Messergebnisse der Kalibration

5.4. Einsatz in einer Bewässerungsanlage

Die drei Sensoren, die im vorherigen Schritt für die Kalibration verwendet wurden, wurden in einer automatischen Bewässerungsanlage eingesetzt. Es wurden die vorkonfigurierten Messparamater verwendet:

- `config.threshold = 2.0`, der Grenzwert V_{DIFF} zur Bewässerung ist auf 2V festgelegt
- `config.sensor_threshold = 2`, der Grenzwert muss von mindestens 2 Sensoren überschritten werden
- `config.sensor_count = 3`, die Messung besteht aus drei Sensoren
- `config.pump_on_time = 5 * SECOND_US`, die Bewässerung findet für 5 Sekunden statt
- `config.send_id_delay = 3000`, das Intervall zwischen den einzelnen Sensorabfragen beträgt 3 Sekunden
- `config.tx_task_delay = 10 * MINUTE_MS`, es wird alle 10 Minuten eine Messung durchgeführt

In Abb. 5.4 ist der Aufbau der Bewässerungsanlage dargestellt. Es wird eine 12V-Tauchpumpe in einem Wasserbehälter zur Bewässerung eingesetzt. Der Bewässerungsschlauch wird direkt am Stamm der zu bewässernden Pflanze (hier: Drachenbaum) befestigt.

Die Messwerte der drei Sensoren wurden über den Verlauf von mehreren Wochen aufgezeichnet. Abb. B.7 zeigt den Verlauf der kapazitiven Messung der Bodenfeuchte für Sensor ID 10000 bis 10002. Die Bewässerungszeitpunkte sind sehr gut zu erkennen: Sobald mehr als zwei Sensoren eine Differenzspannung V_{DIFF} über 2V lieferten, wurde die Bewässerung gestartet.

Der ausschlaggebende Sensor war Sensor 10001, sobald er den Grenzwert erreicht hatte, wurde bewässert. Sensor 10000 war am weitesten vom Bewässerungspunkt entfernt und lieferte deshalb fast durchgängig Werte über 2V, während Sensor 10002 dem Bewässe-

rungspunkt am nächsten war und deshalb durchgängig Werte unter 2V ausgab. Es ist auch sehr gut zu erkennen, wie die Messwerte für Sensor 10001 und 10002 sehr schnell auf die Bewässerung reagieren, sie aber für Sensor 10000 relativ träge sind aufgrund der größeren Entfernung zum Bewässerungspunkt.

Abb. B.8 zeigt die Messwerte der Leitwertmessung. Auch hier sind die Bewässerungszeitpunkte zu erkennen, jedoch nicht so deutlich wie bei der kapazitiven Messung. Die Empfindlichkeit ist geringer, außerdem driften die Messwerte leicht nach oben. Die Leitwertmessung ist daher weniger gut geeignet, um die Bodenfeuchte zu bestimmen.

Abb. B.9 zeigt den Temperaturverlauf. Unmittelbar hinter Sensor ID 10000 befand sich eine Heizung, deshalb sind die Temperaturwerte von diesem Sensor, im Vergleich zu den anderen Sensoren, etwa 2°C höher. Zu erkennen ist, wie die Temperatur Nachts abfällt und dann morgens mit dem Anschalten der Heizung wieder zunimmt.

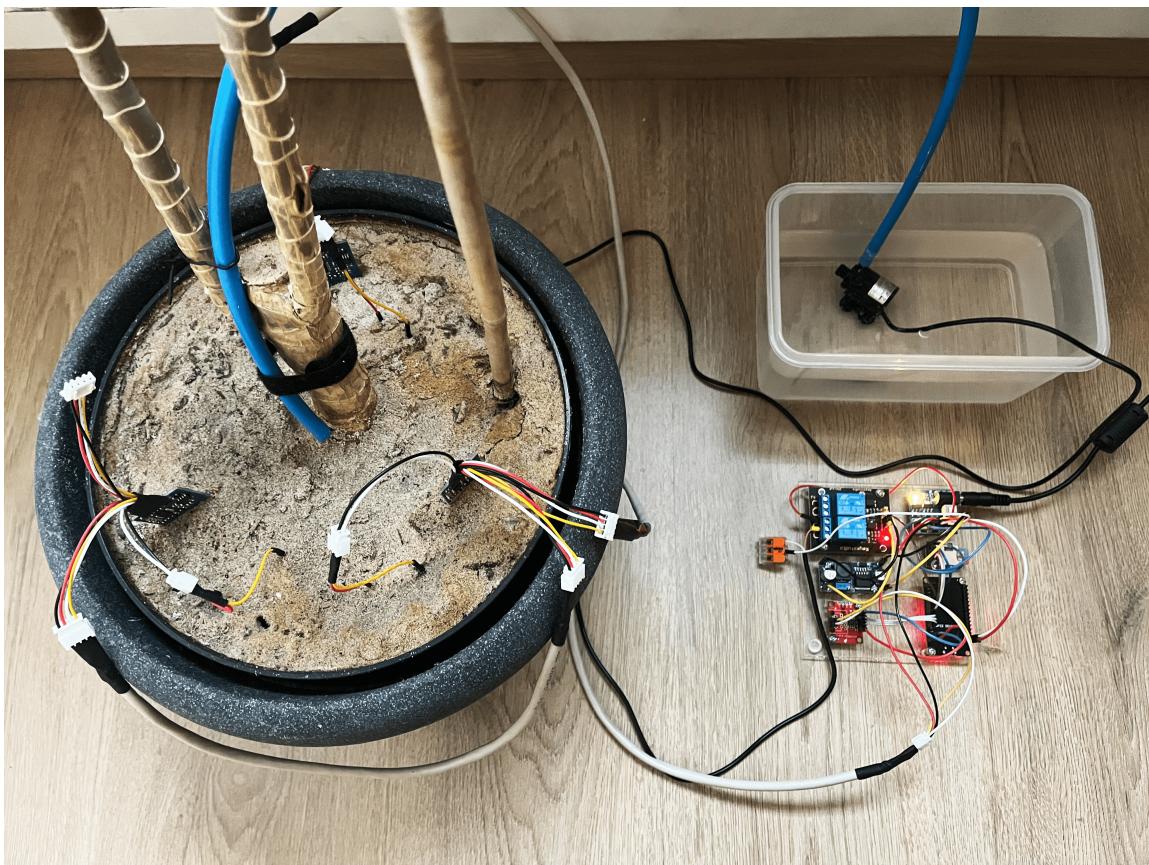


Abbildung 5.4.: Einsatz in einer automatischen Bewässerungsanlage

6. Fazit

In dieser Arbeit wurde die Entwicklung eines kapazitiven Bodenfeuchtesensors mit dazugehöriger Basisstation beschrieben. Es wurde dafür zunächst ein Sensor-Prototyp mit zwei Kupferfolien erstellt, um das kapazitive Messverfahren zu untersuchen. Die Messschaltung wurde in LTSpice simuliert und anschließend mit dem Sensor-Prototyp in der Praxis validiert. Die Sensorplatine wurde in EAGLE erstellt und nach dem Aufbau mit Polyurethan-Lack beschichtet, um sie vor Feuchtigkeit zu schützen. Die Basisstation wurde aus fertigen Modulen zusammengesetzt, die lediglich miteinander verbunden werden mussten.

Der Sensor nutzt einen energiesparenden STM32-Mikrocontroller für die Messdatenerfassung, während die Basisstation, aufgrund der WiFi-Funktionalität, einen ESP32-Mikrocontroller verwendet. Die Softwareentwicklung erfolgte mit STM32CubeMX, beziehungsweise dem Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF).

Der Sensor bestimmt, nach vorheriger Kalibrierung, zuverlässig den Wassergehalt im Boden. Neben der Messung der Bodenfeuchte ist es auch möglich, den Leitwert des Bodens sowie die Temperatur zu messen. In Verbindung mit der Basisstation lässt sich eine automatische Bewässerungsanlage realisieren. Die Messdaten können ggf. auf einer SD-Karte aufgezeichnet werden, sowie in Echtzeit über MQTT eingesehen werden. Zusätzlich lassen sich die Messparameter, wie zum Beispiel der Bewässerungszeitpunkt, über MQTT anpassen.

Es bietet sich an, eine eigene Leiterplatte für die Basisstation zu entwickeln. Dadurch wäre ein kompakterer Aufbau möglich und die externe Verkabelung würde entfallen. Realisiert man die Spannungsversorgung mit einem Solarmodul, wäre ein autarker Einsatz der Bewässerungsanlage möglich. Durch Wahl einer höheren Messfrequenz, zum Beispiel durch Einsatz eines Quarzoszillators, würde der Einfluss des Bodenleitwerts weiter vermindert werden und die Messgenauigkeit somit ansteigen.

Literatur

- [1] Limin Yu u. a. „Review of research progress on soil moisture sensor technology“. In: *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 14.3 (2021), S. 32–42. ISSN: 1934-6344. DOI: 10.25165/j.ijabe.20211404.6404. URL: <http://dx.doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6404>.
- [2] Ayushi Trivedi u. a. „Sensors of Soil Moisture Measurement“. In: Nov. 2023. ISBN: 978-93-58998-90-0.
- [3] <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/education-guides/complete-guide-irrigation-management-using-soil-moisture>. Zugriffsdatum 14.01.2024.
- [4] [https://de.wikipedia.org/wiki/Tensiometer_\(Bodenfeuchte\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Tensiometer_(Bodenfeuchte)). Zugriffsdatum 14.01.2024.
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Galvanotechnik>. Zugriffsdatum 15.01.2024.
- [6] Georgi Todorov Nikolov u. a. „Soil Moisture Measurement with Flexible Sensors“. In: *2020 XXIX International Scientific Conference Electronics (ET)*. IEEE, Sep. 2020. DOI: 10.1109/et50336.2020.9238304. URL: <http://dx.doi.org/10.1109/et50336.2020.9238304>.
- [7] <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/measurement-insights/tdr-fdr-capacitance-compared>. Zugriffsdatum 14.01.2024.
- [8] Pisana Placidi u. a. „Characterization of Low-Cost Capacitive Soil Moisture Sensors for IoT Networks“. In: *Sensors* 20.12 (Juni 2020), S. 3585. ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s20123585. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/s20123585>.
- [9] J. M. Blonquist, S. B. Jones und D. A. Robinson. „Standardizing Characterization of Electromagnetic Water Content Sensors: Part 2. Evaluation of Seven Sensing Systems“. In: *Vadose Zone Journal* 4.4 (Nov. 2005), S. 1059–1069. ISSN: 1539-1663. DOI: 10.2136/vzj2004.0141. URL: <http://dx.doi.org/10.2136/vzj2004.0141>.
- [10] <https://www.keysight.com/us/en/assets/9018-01378/user-manuals/9018-01378.pdf>. Zugriffsdatum 17.01.2024.

- [11] <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l0-series.html>. Zugriffsdatum 22.01.2024.
- [12] https://www.st.com/resource/en/reference_manual/rm0451-ultralowpower-stm32lx0-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf. Zugriffsdatum 22.01.2024.
- [13] <https://github.com/Miceuz/rs485-moist-sensor/tree/master>. Zugriffsdatum 20.01.2024.
- [14] <https://de.wikipedia.org/wiki/Elektrolyse>. Zugriffsdatum 15.01.2024.
- [15] https://www.mikrocontroller.net/articles/Ausgangsstufen_Logik-ICs. Zugriffsdatum 22.01.2024.
- [16] <https://www.allaboutcircuits.com/industry-articles/how-to-obtain-the-temperature-value-from-a-thermistor-measurement>. Zugriffsdatum 25.01.2024.
- [17] <https://de.wikipedia.org/wiki/Steinhart-Hart-Gleichung>. Zugriffsdatum 25.01.2024.
- [18] <https://www.thinksrs.com/downloads/programs/thermcalc/ntccalibrator/ntccalculator.html>. Zugriffsdatum 25.01.2024.
- [19] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Zugriffsdatum 30.01.2024.
- [20] https://github.com/TronixLab/DOIT_ESP32_DevKit-v1_30P. Zugriffsdatum 30.01.2024.
- [21] <https://www.sparkfun.com/products/10124>. Zugriffsdatum 30.01.2024.
- [22] https://wiki.keyestudio.com/Ks0011_keyestudio_5V_Relay_Module. Zugriffsdatum 15.02.2024.
- [23] https://www.st.com/resource/en/application_note/an3216-getting-started-with-stm32l1xxx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf. Zugriffsdatum 31.01.2024.
- [24] <https://product.torexsemi.com/system/files/series/xc6206.pdf>. Zugriffsdatum 30.01.2024.
- [25] <http://chris.cnie.de/elektronik/verpolungsschutz.html>. Zugriffsdatum 30.01.2024.
- [26] https://www.mouser.de/datasheet/2/761/SEMT_S_A0003609968_1-2576005.pdf. Zugriffsdatum 30.01.2024.
- [27] <https://www.ersa-shop.com/daten/74296/TechnischesDatenblattECS2071-Urethan-Clear.pdf>. Zugriffsdatum 02.02.2024.

- [28] <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubemx.html>. Zugriffsdatum 22.01.2024.
- [29] <https://github.com/bseck97/bewaesserungsanlage>. Zugriffsdatum 15.02.2024.
- [30] <https://github.com/espressif/esp-idf>. Zugriffsdatum 05.02.2024.
- [31] <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/system/freertos.html>. Zugriffsdatum 05.02.2024.
- [32] <https://mosquitto.org/>. Zugriffsdatum 10.02.2024.

A. Technische Daten

A.1. Basisstation

- Spannungsversorgung: 12V
- Strombelastbarkeit des Netzteils: min. 0,5A
- Operating temperature: -20°C bis +60°C

A.2. Kapazitiver Bodenfeuchtesensor

- Spannungsversorgung: 5V
- Stromaufnahme: max. 60mA (wenn Datenübertragung aktiv ist)
- Operating temperature: -20°C bis +60°C

B. Messergebnisse

B.1. Oszilloskopbilder des 16MHz-Messsignals

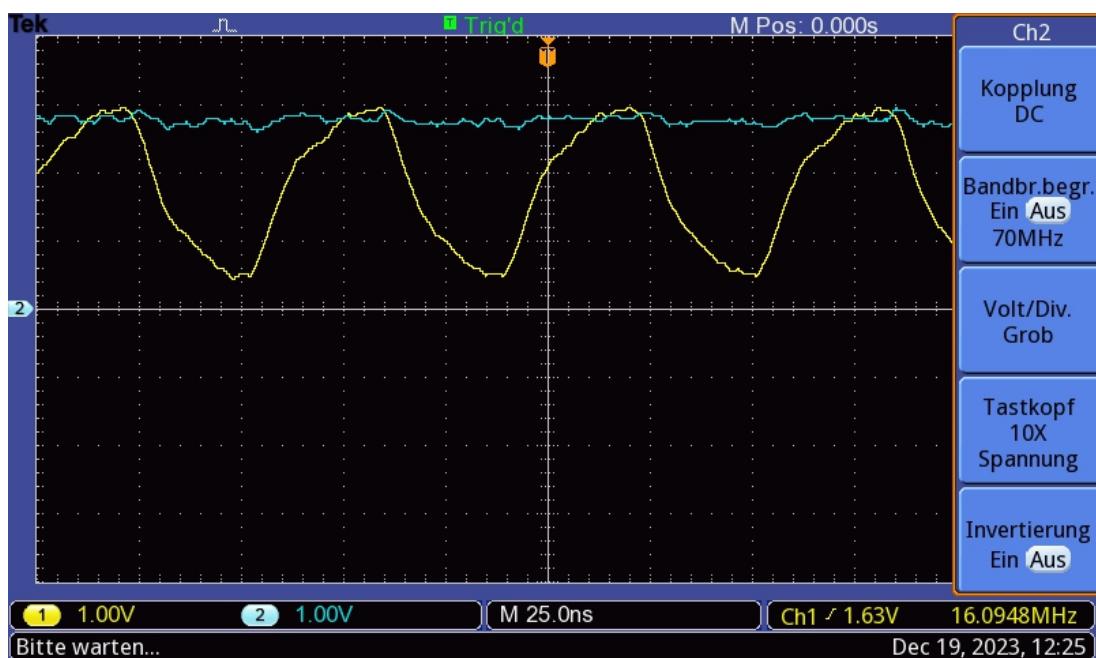


Abbildung B.1.: 16MHz-Messsignal (Ch1) mit V_{HIGH} (Ch2)

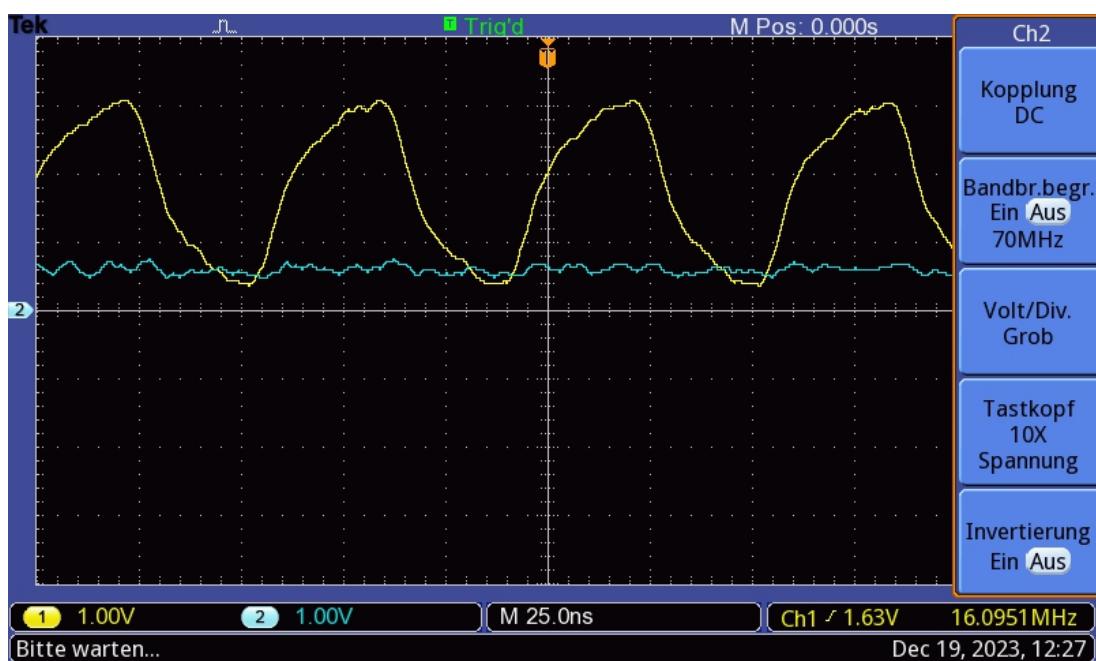
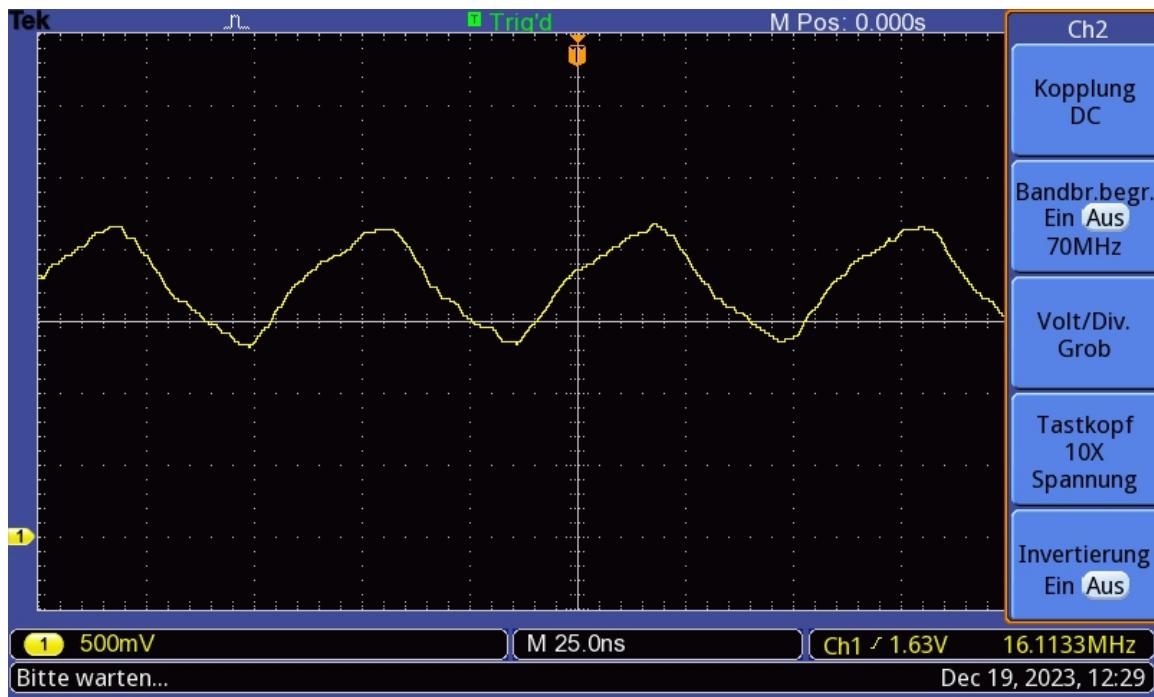
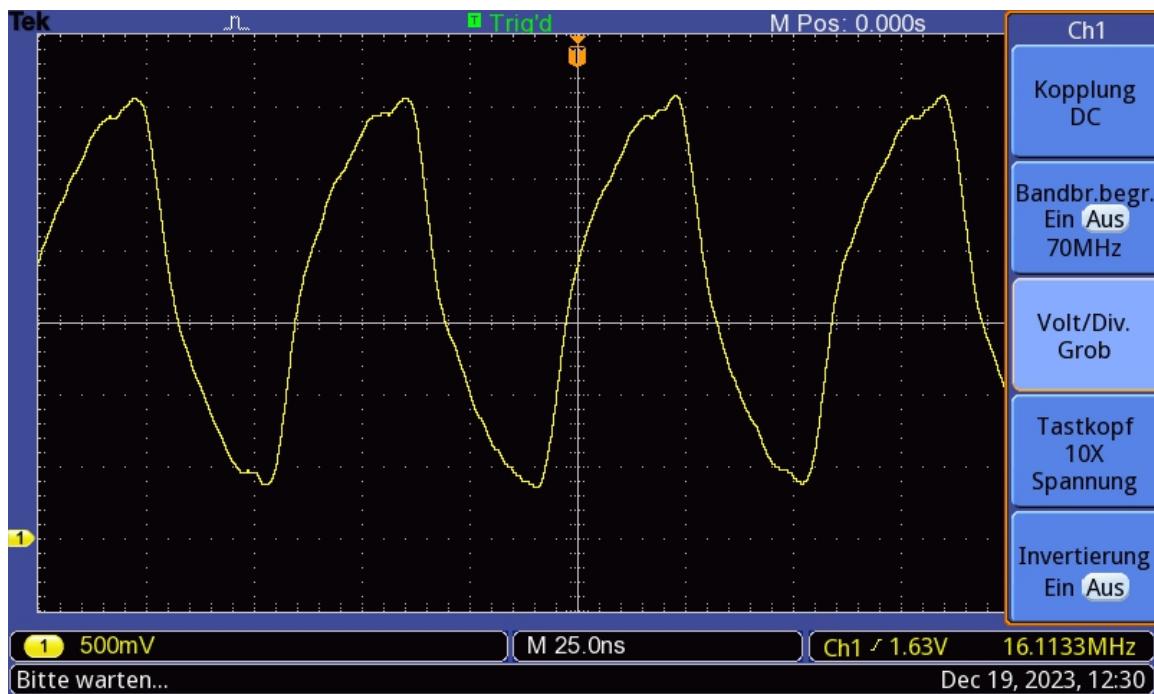


Abbildung B.2.: 16MHz-Messsignal (Ch1) mit V_{LOW} (Ch2)

Abbildung B.3.: 16MHz-Messsignal für $\varepsilon_r = 80$ (Wasser)Abbildung B.4.: 16MHz-Messsignal für $\varepsilon_r = 1$ (Luft)

B.2. Messergebnisse der Kalibration

	Sensor 0				Sensor 1				Sensor 2			
Feuchte in %	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}
0	2,97	0,47	2,50	1,34	2,98	0,47	2,51	1,30	2,95	0,45	2,50	1,32
5	2,8	0,64	2,16	1,12	2,72	0,73	1,99	1,7	2,77	0,68	2,09	1,47
10	2,64	0,83	1,81	1,34	2,56	0,9	1,66	1,58	2,63	0,84	1,79	1,56
15	2,55	0,94	1,61	2,39	2,51	0,97	1,54	2,34	2,53	0,95	1,58	2,24
20	2,44	1,05	1,39	2,62	2,43	1,04	1,39	2,52	2,45	1,04	1,41	2,47
25	2,32	1,18	1,14	2,74	2,32	1,18	1,14	2,59	2,36	1,13	1,23	2,56

Tabelle B.1.: Kalibration für Sand unter Zugabe von Leitungswasser

	Sensor 0				Sensor 1				Sensor 2			
Feuchte in %	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}
0	2,99	0,47	2,52	1,33	2,98	0,47	2,51	1,41	2,95	0,48	2,47	0,65
5	2,74	0,73	2,01	1,02	2,78	0,67	2,11	1,78	2,72	0,70	2,02	0,33
10	2,49	0,99	1,50	2,24	2,56	0,92	1,64	2,43	2,48	1,00	1,48	2,23
15	2,42	1,01	1,41	2,52	2,45	1,01	1,44	2,53	2,37	1,10	1,27	2,47
20	2,28	1,22	1,06	2,70	2,27	1,22	1,05	2,70	2,24	1,25	0,99	2,61
25	2,18	1,33	0,85	2,75	2,16	1,33	0,83	2,73	2,14	1,08	1,06	2,64

Tabelle B.2.: Kalibration für Sand unter Zugabe von Düngerlösung

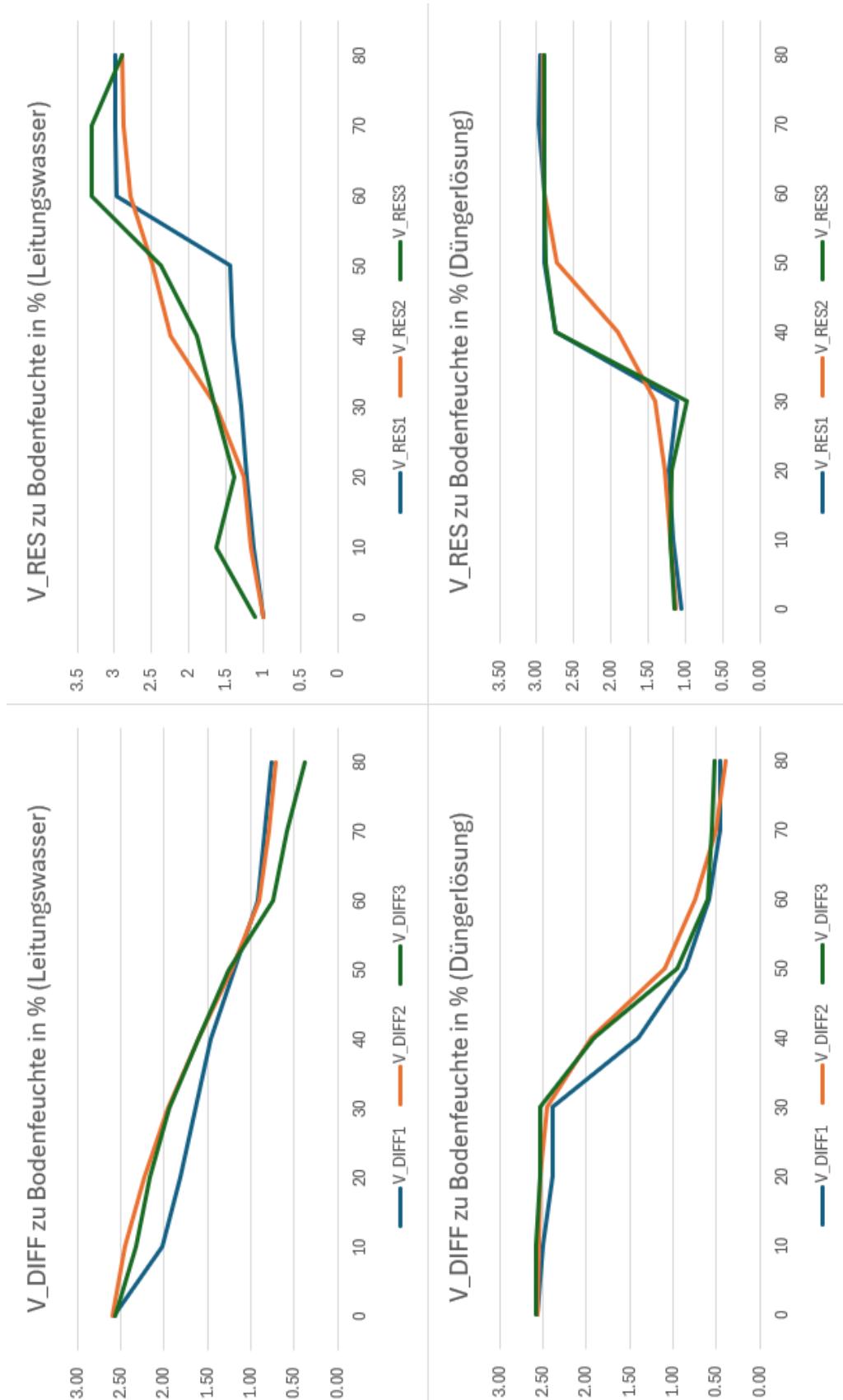
Abbildung B.5.: Vergleich V_{DIFF} und V_{RES} für Sand

	Sensor 0				Sensor 1				Sensor 2			
Feuchte in %	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}
0	3,00	0,42	2,58	1	2,99	0,4	2,59	1	2,99	0,43	2,56	1,11
10	2,74	0,72	2,02	1,13	2,93	0,48	2,45	1,17	2,88	0,55	2,33	1,64
20	2,64	0,82	1,82	1,22	2,81	0,59	2,22	1,27	2,8	0,64	2,16	1,4
30	2,54	0,9	1,64	1,29	2,68	0,72	1,96	1,63	2,69	0,75	1,94	1,65
40	2,47	1,01	1,46	1,41	2,53	0,92	1,61	2,24	2,52	0,92	1,60	1,9
50	2,34	1,15	1,19	1,44	2,35	1,12	1,23	2,49	2,33	1,08	1,25	2,38
60	2,21	1,29	0,92	2,97	2,2	1,29	0,91	2,78	2,11	1,36	0,75	3,3
70	2,15	1,31	0,84	2,99	2,14	1,34	0,80	2,88	2,02	1,44	0,58	3,3
80	2,09	1,32	0,77	2,99	2,1	1,39	0,71	2,9	1,85	1,47	0,38	2,9

Tabelle B.3.: Kalibration für Erde unter Zugabe von Leitungswasser

	Sensor 0				Sensor 1				Sensor 2			
Feuchte in %	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}	V_{HIGH}	V_{LOW}	V_{DIFF}	V_{RES}
0	3,00	0,44	2,56	1,06	2,99	0,42	2,57	1,14	3,00	0,42	2,58	1,15
10	2,96	0,46	2,50	1,16	2,98	0,44	2,54	1,21	3,00	0,42	2,58	1,21
20	2,91	0,52	2,39	1,23	2,98	0,45	2,53	1,28	2,97	0,44	2,53	1,18
30	2,85	0,46	2,39	1,12	2,93	0,48	2,45	1,40	2,98	0,45	2,53	0,98
40	2,38	0,98	1,40	2,74	2,69	0,75	1,94	1,91	2,69	0,78	1,91	2,75
50	2,11	1,25	0,86	2,89	2,29	1,19	1,10	2,72	2,22	1,27	0,95	2,87
60	1,96	1,37	0,59	2,90	2,12	1,37	0,75	2,90	2,00	1,39	0,61	2,89
70	1,95	1,49	0,46	2,97	2,00	1,49	0,51	2,91	1,88	1,32	0,56	2,89
80	1,92	1,46	0,46	2,95	1,95	1,55	0,40	2,92	1,86	1,33	0,53	2,90

Tabelle B.4.: Kalibration für Erde unter Zugabe von Düngerlösung

Abbildung B.6.: Vergleich V_{DIFF} und V_{RES} für Erde

B.3. Messdaten vom 15.01. bis 30.01

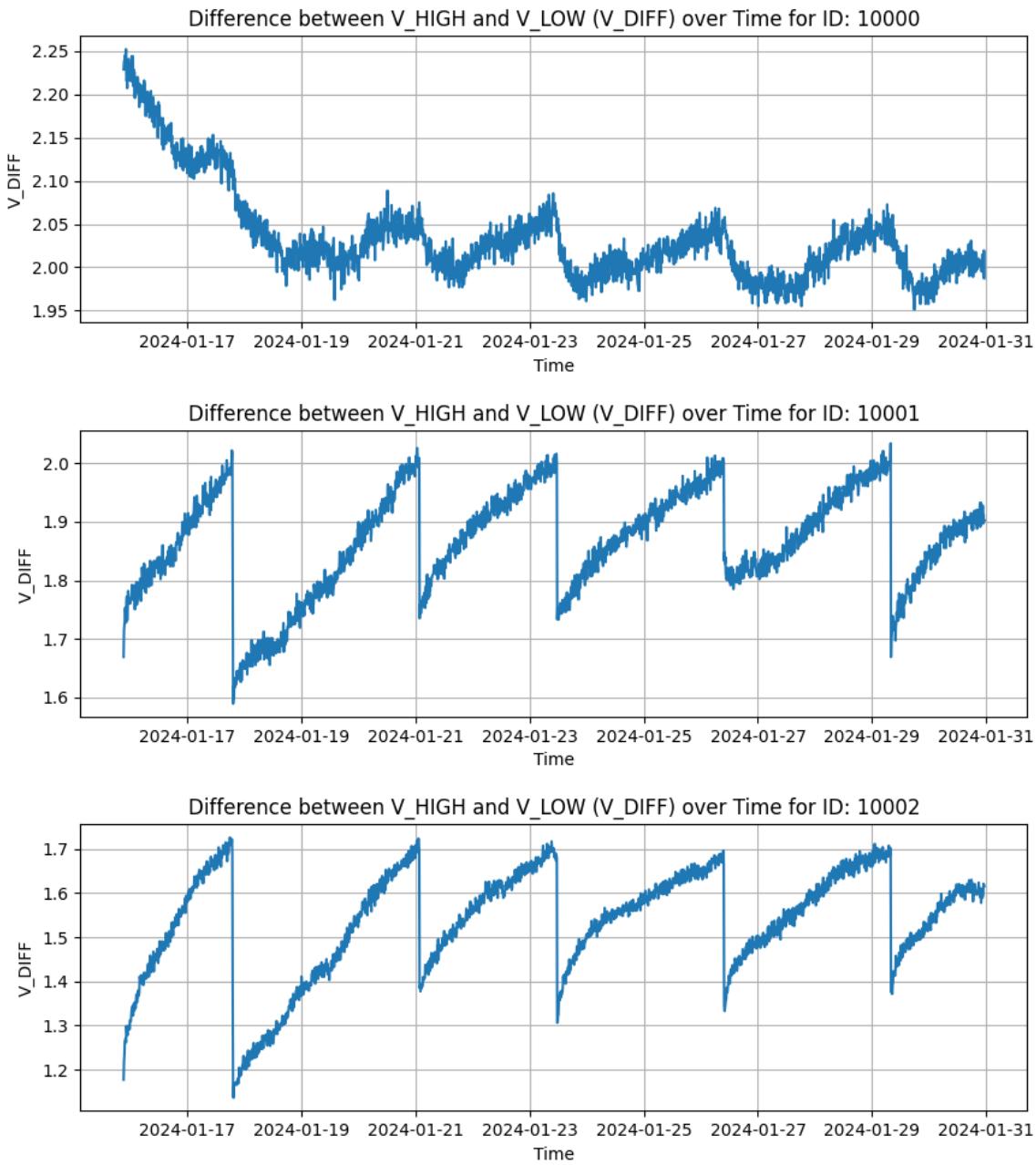


Abbildung B.7.: V_{DIFF} der drei Sensoren vom 15.01. bis zum 30.01.

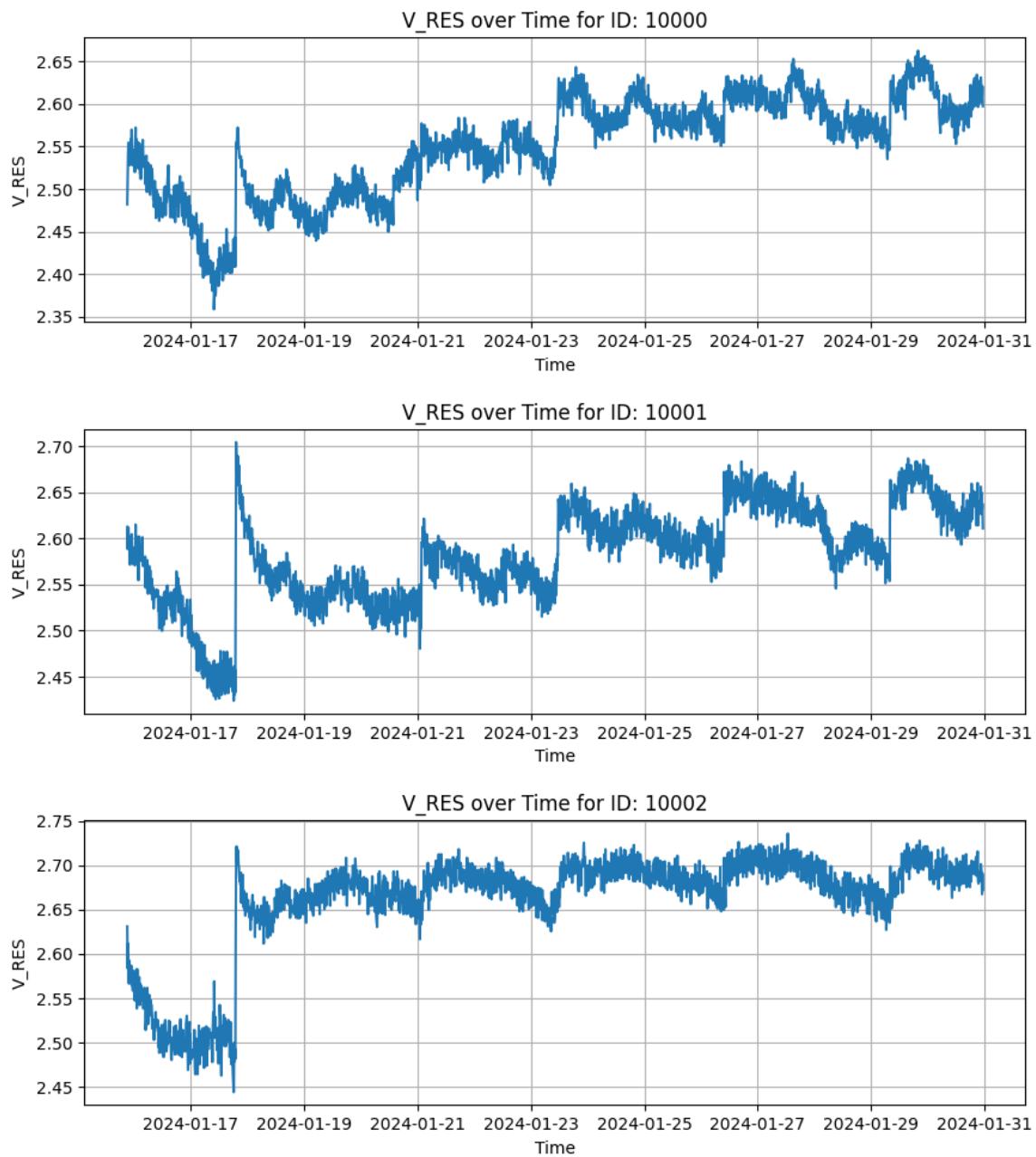


Abbildung B.8.: V_{RES} der drei Sensoren vom 15.01. bis zum 30.01.

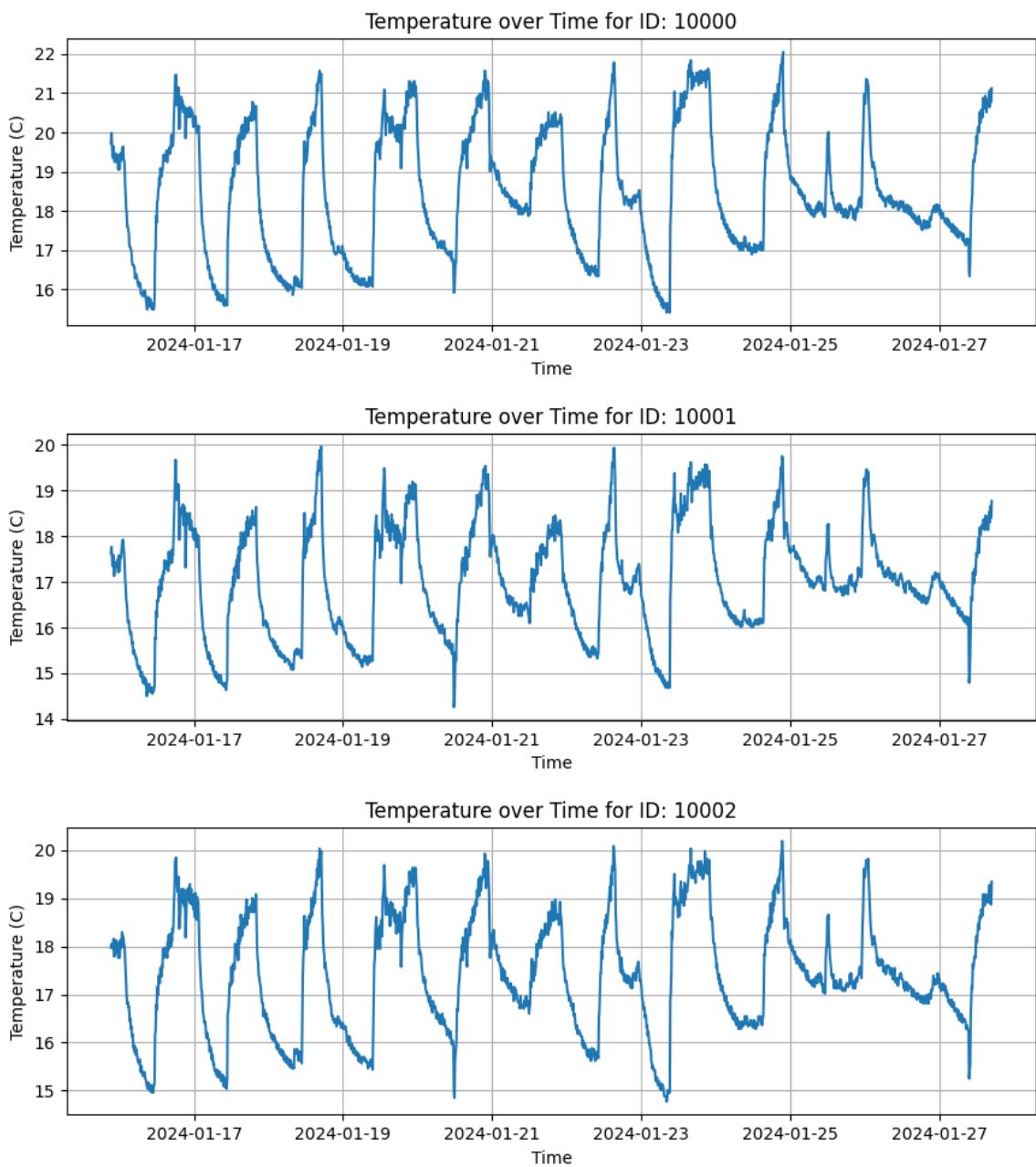


Abbildung B.9.: Temperaturmessung der drei Sensoren vom 15.01. bis zum 30.01.

Eidesstattliche Erklärung

Die vorliegende Arbeit habe ich selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen angefertigt. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Quellen entnommen wurden, sind als solche eindeutig kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht veröffentlicht und noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden.

Benedikt Seck