

Bachelor-Thesis

Entwicklung eines drahtlosen energieautarken
Sensor-Netzwerks für die Anwendung im
Smart-Gardening-Bereich

Sebastian Möhringer

Studiengang:	Elektrische Energietechnik / Physik
Korrektor:	Prof. Dr.-Ing. Elke Mackensen
Zweitkorrektor:	Prof. Dr.-Ing. Tobias Felhauer
Bearbeitungszeitraum:	1.09.2017 – 28.02.2018
Eingereicht am:	28. Februar 2018

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass die vorliegende Bachelor-Thesis von mir selbstständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich oder dem Gedanken nach aus Veröffentlichungen, unveröffentlichten Unterlagen und Gesprächen entnommen worden sind, als solche an den entsprechenden Stellen innerhalb der Arbeit durch Zitate kenntlich gemacht habe, wobei in den Zitaten jeweils der Umfang der entnommenen Originalzitate kenntlich gemacht wurde. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Versicherung rechtliche Folgen haben wird.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Diese Abschlussarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Sensor-Netzwerks für die Anwendung im Smart-Gardening-Bereich. Dabei geht es im Wesentlichen darum, durch Messung verschiedener Parameter den aktuellen Status der Pflanzen im Garten bewerten zu können. So soll dem Anwender des Systems die Gartenarbeit erleichtert werden.

Zunächst wurden verschiedene Smart-Gardening-Systeme bezüglich Messparametern, Kommunikation und Energieversorgung untersucht. Anhand dieser Ergebnisse wurden Anforderungen an ein eigenes System gestellt. Dieses eigene System verwendet eine an der Hochschule Offenburg entwickelte, energieautarke und drahtlose Sensor-Netzwerk-Plattform. Für das Sensor-Netzwerk wurde ein Konzept entwickelt, indem mehrere Topologien und Zugriffsverfahren untersucht wurden. Ausgewählt wurde schließlich die Verwendung einer Stern-Topologie und die Umsetzung eines Kommunikationsprotokolls auf Grundlage eines zeitbasierten Zugriffsverfahrens. Die erforderliche Basisstation wurde konzipiert und auf Basis eines *Raspberry Pi 3* realisiert. Das Kommunikationsprotokoll wurde in die Software von Basisstation und Sensorgeräten integriert. Die Sensor-Plattform wurde um einen kapazitiven Sensor für die Messung der Bodenfeuchte erweitert. Dieser Sensor wurde mit Gartenerde getestet und vermessen. Auf Grundlage der Ergebnisse wurde ein Modell für die Berechnung des Wassergehalts der Erde erstellt. Zuletzt wurde das Sensor-Netzwerk getestet.

Das Sensor-Netzwerk kann einige Dutzend Sensorgeräte verknüpfen. Die Sensorgeräte werden im Garten platziert und sind durch Verwendung von Energy-Harvesting energieautark. Sie senden die gesammelten Messwerte mehrmals täglich an die Basisstation, welche die Messwerte empfängt und abspeichert. Eine Android-App kann via Bluetooth auf die Daten zugreifen und sie dem Anwender anzeigen. Die Funktionalität des Systems wurde im Test nachgewiesen. Das System wird in einer erweiterten Form bei der Landesgartenschau 2018 in Lahr zum Einsatz kommen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung und Ziele	3
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Smart Gardening	4
2.1.1	Gardena Smart System	4
2.1.2	Parrot Flower Power	6
2.1.3	Edyn	6
2.1.4	Vergleich der vorgestellten Systeme	7
2.2	Sensor-Netzwerk-Plattform	10
2.2.1	Energieversorgung	11
2.2.2	Sensorplatine	13
2.3	Bodenfeuchtemessung	17
2.3.1	Grundlagen	17
2.3.2	Messmethoden	20
2.3.3	Auswahl des Sensors	25
2.3.4	Giesomat-Sensor	27
2.3.5	Kalibrierung	30
3	Netzwerk	34
3.1	Anforderungen	34
3.2	Topologie	35
3.2.1	Mesh-Netzwerk	35
3.2.2	Stern-Netzwerk	37
3.2.3	Auswahl der Topologie	39
3.3	Kommunikation	40
3.3.1	Zugriffsverfahren	40
3.3.2	Protokoll	43

3.4	Basisstation	46
3.4.1	Konzept	46
3.4.2	Hardware	46
3.4.3	Software	48
4	Android-App	53
4.1	Anforderungen	53
4.2	Konzept	53
4.3	Design	54
4.4	Programmierung	54
4.4.1	Kommunikation	55
4.4.2	Datenanzeige	56
4.5	Erweiterungen	56
5	Test und Bewertung	58
5.1	Aufbau und Durchführung	58
5.2	Ergebnisse	58
5.3	Bewertung	59
6	Zusammenfassung und Ausblick	60
6.1	Zusammenfassung	60
6.2	Ausblick	61
6.2.1	Änderungen	61
6.2.2	Anwendung	62
	Literaturverzeichnis	63
	Anhang	69
A	Testergebnisse	69
A.1	Sensorgerät 1	69
A.2	Sensorgerät 2	70
A.3	Basisstation	70
A.4	Diagramme	72

Abbildungsverzeichnis

1	Netzwerktopologie Gardena Smart System	5
2	Netzwerktopologie Parrot Flower-Power Sensor	6
3	edyn-System	7
4	Konzept der Energieversorgung	11
5	Blockschaltbild des Energieversorgungsmoduls	12
6	Schnittstelle des Ernergieversorgungsmoduls	12
7	Energieversorgungsmodul mit Kondensator und Batterie	13
8	Konzept der Sensormodul-Hardware	14
9	Zustandsdiagramm des SPIRIT1-Chips	15
10	Sensorplatine der Sensor-Netzwerk-Plattform	16
11	Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser	18
12	Wasserspannungskurven verschiedener Böden	19
13	Arduino Grove Feuchtigkeitssensor	21
14	Plattenkondensator	22
15	Feld im Plattenkondensator	22
16	Isolator mit Polarisationsladungen	23
17	Tensiometer im Querschnitt	24
18	Wasserspannungskurve von Sand und Schlick-Lehm	26
19	Vorderseite des Giesomat-Sensors	27
20	Rückseite des Giesomat-Sensors	27
21	Schaltplan des Giesomat-Sensors: Linearregler	28
22	Schaltplan des Giesomat-Sensors: Auswertungsschaltung	28
23	Bodenproben mit abgestuftem Wassergehalt	31
24	Messung der Bodenfeuchte mit einem Giesomat-Sensor	31
25	Diagramm der Frequenzmessung	32
26	Symbolbild: Sensorgerät	35
27	Mesh-Netzwerk mit 4 Teilnehmern, vollvermascht	36
28	Hidden Terminal Problem	37
29	Stern-Netzwerk mit 4 Teilnehmern und Basisstation	38
30	Prinzip des TDMA-Verfahrens	41

31	Prinzip des FDMA-Verfahrens	41
32	Aloha-Verfahren, unsynchronisiert	42
33	Sequenzdiagramm der Anmeldephase	44
34	Sequenzdiagramm der Betriebsphase	45
35	Raspberry Pi 3 Model B	48
36	Flussdiagramm der Basisstation-Software	50
37	Übertragene Datenpakete	51
38	CSV-Datei mit den Messwerten eines Sensorgeräts	51
39	Sensor-Netzwerk in der Übersicht	52
40	Design der App	55
41	Sensor-Übersicht mit Sensor-Auswahl und Diagrammen	57
42	Grundriss des Raumes B101 mit Standorten der Geräte	59
A.1	Temperatur-Diagramm von Sensorgerät 1	73
A.2	Luftdruck-Diagramm von Sensorgerät 1	74
A.3	Luftfeuchtigkeits-Diagramm von Sensorgerät 1	75
A.4	Temperatur-Diagramm von Sensorgerät 2	76
A.5	Luftdruck-Diagramm von Sensorgerät 2	77
A.6	Luftfeuchtigkeits-Diagramm von Sensorgerät 2	78
A.7	Bodenfeuchte-Diagramm von Sensorgerät 2	79

Tabellenverzeichnis

1	Smart-Gardening-Systeme im Vergleich	8
2	Aufbau des Telegrammrahmens	15
3	Aufbau der Nutzdaten	15
4	Umrechnungstabelle für Bodenfeuchtegrade	19
5	Auswirkungen verschiedener nutzbarer Feldkapazitäten	20
6	Relative Permittivität einiger Stoffe	23
7	Messmethoden für Bodenfeuchte im Vergleich	25
8	Frequenz- und Strommessung Giesomat-Sensor	29
9	Versuchsergebnisse der Kalibrierung	32
10	Vorteile und Nachteile der Topologien für das Sensor-Netzwerk	39
11	Stromaufnahme verschiedener Raspberry-Pi-Modelle	47
A.1	Einstellungen der Funkmodule	70

Abkürzungsverzeichnis

AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Programming Interface
BLE	Bluetooth Low Energy
CDMA	Code Division Multiple Access
CSMA	Carrier Sense Multiple Access
CSV	Comma-Separated Values
DIP	Dual In-Line Package
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FK	Feldkapazität
FRAM	Ferroelectric Random Access Memory
FTP	File Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment
ISM	Industrial, Scientific, Medical
OBEX	Object Exchange
PWP	Permanenter Welkepunkt
RTC	Real-Time Clock
SDK	Software Development Kit
SDMA	Space Division Multiple Access
SPI	Serial Peripheral Interface
SSH	Secure Shell
TDMA	Time Division Multiple Access
TOT	Totwasser
WLAN	Wireless Local Area Network

Formelzeichen

V_{CC}	Spannung der Energieversorgung
V_{Bat}	Spannung der Batterie
ϵ_0	Elektrische Feldkonstante
ϵ_r	Relative Permittivität
pF	Logarithmus der Bodenwasserspannung
ω	Gravimetrischer Wassergehalt
ω_{rel}	Relativer gravimetrischer Wassergehalt
d	Abstand der Kondensatorplatten
b	Dicke des Leiters im Feld
f_M	Mittelwert der Frequenz

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

„Der Garten ist der letzte Luxus unserer Tage, denn er fordert das, was in unserer Gesellschaft am kostbarsten ist: Zeit, Zuwendung und Raum“

- Dieter Kienast (1945–1998), Schweizer Landschaftsarchitekt[1]

Ein Garten ist für uns Menschen etwas ganz Besonderes. Hier kann man entspannen, sich beschäftigen und mit der Natur verbunden sein. Gerade im heutigen technologiegeprägten Informationszeitalter stellt der Garten eine willkommene Abwechslung zum stressigen Arbeitsleben dar. Die Bedeutung des Gartens hat sich im Laufe der Zeit verändert. Früher waren Gärten oft groß und weitläufig, es wurde Ackerbau betrieben und Obstbäume gepflanzt. Mittlerweile ist kaum noch jemand auf eigens angebaute Nahrung angewiesen. Dadurch haben sich auch die Gärten verändert: hier geht es jetzt mehr um Freizeit und Erholung. Wer im Garten arbeitet, tut das nicht weil er es muss, sondern weil er Gefallen daran findet, seine eigene kleine Welt aufzubauen.

Hier kommt es oft zum Konflikt, denn ein Garten muss gepflegt werden, benötigt Zeit und Aufmerksamkeit. Viele Menschen haben davon nicht genug, wollen aber trotzdem die Vorzüge eines Gartens genießen. Das Zitat von Dieter Kienast verdeutlicht diesen Zusammenhang: ein Garten wird mehr und mehr zum „Luxus“, denn er benötigt Zeit, Zuwendung und Raum – und die wenigsten Menschen können heutzutage allen drei Anforderungen gerecht werden. Die Gartenpflege wird dadurch immer mehr zur Belastung.

Diesem Problem kann mit aktueller Technologie Abhilfe geschaffen werden. Obgleich die Gartenarbeit selbst nicht übernommen werden kann, ist es möglich und erstrebenswert, dem Gartenbesteller eine Hilfestellung für die Pflege des Gartens bereitzustellen. Ein Ansatz wäre dabei etwa die sensorische Überwachung der Pflanzen im Garten.

Seit einigen Jahren gibt es in der Unterhaltungselektronik den Trend der „Smart Devices“. Immer mehr Geräte sind mit dem Internet verbunden und werden so mit einer Vielzahl an Funktionen erweitert, zumeist um dem Anwender von Nutzen zu sein. Diese Funktionen werden oft durch das Sammeln personalisierter Daten im großen Stil realisiert, wie es zum Beispiel die virtuellen Assistenten diverser Technologiekonzerne schon tun. In diesen Daten kann ein Programm Muster erkennen und somit Bedürfnisse eines Anwenders vorhersagen, um ihn so zu unterstützen. Dieses Prinzip lässt sich auch auf die Gartenarbeit übertragen, indem Teile des Gartens dauerhaft überwacht werden.

Ein wesentlicher Teil der Gartenarbeit beschäftigt sich mit der Erhaltung der Pflanzen, hauptsächlich durch manuelles Gießen und Düngen. Hier könnte nun ein „Smartes“ System eingesetzt werden, das die Pflanzen überwacht und verschiedene Parameter misst. Denkbar wären hier etwa die Messung der Bodenfeuchte und der Sonneneinstrahlung. Das System bewertet diese Messwerte und schließt so auf den aktuellen Zustand der überwachten Pflanze. Anschließend kann es den Anwender benachrichtigen und darüber informieren, welche Aktionen erforderlich sind. Alternativ ist auch eine Verwendung von Aktoren denkbar, mit denen das System zum Beispiel eine Pflanze automatisch bewässern kann. Zusätzlich kann auch eine Messung allgemeiner Umgebungsparameter erfolgen. So kann beispielsweise die Eignung eines Standorts einer Pflanze oder die aktuelle Wetterlage und zukünftige Entwicklung bewertet werden. Relevante Parameter sind hier etwa Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Bodenfeuchte.

Die Entwicklung eines solchen Systems ist das Ziel dieser Bachelorarbeit. Das System wird in mehreren Aspekten auf die Anwendung im Garten ausgelegt. Einige vergleichbare Systeme sind schon kommerziell verfügbar, vernachlässigen allerdings meistens zwei für die Gartenarbeit sehr interessante Themen: **Energieautarkie** und **Vernetzung**.

Der Anwender des Systems, der wenig Zeit zur Verfügung hat und sich seine Gartenarbeit erleichtern möchte, soll auch mit dem System an sich möglichst wenig Aufwand haben. Dazu gehört beispielsweise der Wechsel von Batterien, der bei manchen Systemen notwendig ist. Durch ein energiesparendes Design und Gewinnung von Energie aus der Umgebung können die Sensorgeräte energieautark funktionieren. Nach der Einrichtung des Geräts muss sich der Anwender nicht mehr um sie kümmern. Um den Zustand des Gartens möglichst genau erfassen zu können, sollten an möglichst vielen unterschiedlichen Orten Sensorgeräte verteilt werden. Durch die Vernetzung der Geräte können die Daten gesammelt und bewertet werden.

Ausgangspunkt für das System ist eine an der Hochschule Offenburg entwickelte, drahtlose und energieautarke Sensor-Netzwerk-Plattform [2] [3]. Wie genau mit dieser Plattform das Sensor-Netzwerk für die Gartenanwendung entwickelt wird, ist Thema dieser Bachelorarbeit.

1.2 Aufgabenstellung und Ziele

Nachfolgend die Aufgabenstellung aus der Ausschreibung der Bachelorarbeit:

- Erweiterung der bestehenden drahtlosen Sensorknoten um eine bidirektionale Kommunikation und Sensorik zur Erfassung von speziellen Parametern zur Überwachung von Pflanzen
- Erstellung eines Konzeptes für eine Topologie eines drahtlosen Sensornetzwerks unter energetischen Betrachtungen
- Aufbau eines beispielhaften Sensornetzwerkes, das energieautark Sensordaten erfasst und überträgt
- Messtechnische Auswertung des Sensornetzwerks
- Entwicklung einer App für Windows oder Android zur Demonstration der Funktionalität des Sensornetzwerkes
- Eventuell Überarbeitung der Hardware für die Sensorknoten bzw. das Sensornetzwerk

Das Ziel dieser Arbeit ist schlussendlich aus der vorhandenen Sensor-Netzwerk-Plattform ein Sensor-Netzwerk für den Einsatz im Garten zu entwickeln. Dieses Netzwerk soll automatisch Messwerte erfassen und speichern, um sie einem Anwender zur Verfügung stellen zu können. Der Anwender kann diese Informationen dann zur besseren Pflege des Gartens nutzen.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 „Stand der Technik“ wird die aktuelle Technik in den Bereichen Bodenfeuchtemessung und Smart Gardening erläutert und die verwendete Sensor-Netzwerk-Plattform wird vorgestellt.

Kapitel 3 „Netzwerk“ befasst sich mit der Vernetzung der Sensorgeräte. Es werden unterschiedliche Topologien untersucht und bewertet. Eine Topologie wird ausgewählt und deren Umsetzung beschrieben.

Kapitel 4 „Android-App“ beschreibt die Programmierung einer Android-App zur Darstellung der Daten des Sensor-Netzwerks.

In Kapitel 5 „Test und Bewertung“ wird das System aufgebaut und getestet.

Kapitel 6 „Zusammenfassung und Ausblick“ fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf die Anwendung des Systems.

Kapitel 2

Stand der Technik

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der für das Sensor-Netzwerk verwendeten Technik.

2.1 Smart Gardening

Die Idee, ein Sensor-Netzwerk im Garten anzuwenden, ist nicht neu. Seit einigen Jahren gibt es kommerziell erhältliche Systeme, die eine Überwachung von Pflanzen im Garten ermöglichen. Die verfügbaren Systeme können grundsätzlich in zwei Gruppen aufgeteilt werden: Systeme mit mehreren drahtlos verbundenen Geräten und Systeme mit einzelnen Geräten. Systeme aus der ersten Gruppe enthalten immer eine Art Basisstation, die mit allen anderen Geräten kommuniziert und Daten auswertet. Anhand dieser Daten wird dann ein Aktor gesteuert – zum Beispiel das Ventil eines Wasseranschlusses, mit dem die Bewässerung einer Pflanze gesteuert werden kann. Die Geräte der zweiten Gruppe messen diverse Parameter und speichern diese intern ab, bis mit dem Smartphone darauf zugegriffen wird. Sie dienen der reinen Datensammlung und können keine Aktoren steuern.

In Abschnitt 2.1.1 wird ein System der Firma *Gardena* vorgestellt, das zur ersten Gruppe gehört. In den Abschnitten 2.1.2 und 2.1.3 werden Systeme der zweiten Gruppe von den Firmen *Parrot* und *Edyn* vorgestellt.

2.1.1 Gardena Smart System

Das *Gardena Smart System* ist das erste kommerziell verfügbare Smart-Gardening-System. Ein vollständiges System besteht aus folgenden Geräten:

- Gateway
- Sensorgeräte
- verschiedene Aktoren

In Abbildung 1 ist die Netzwerktopologie des Gardena Smart Systems dargestellt. Das Gateway ist mit dem Internet verbunden und kommuniziert mit den Gardena-Servern, die Daten-Backup und Datenauswertung bereitstellen. Die Smartphone-App, mit der das System überwacht und gesteuert werden kann, erhält die Daten über das Internet von den Gardena-Servern.

Die Sensorgeräte messen Lichtstärke, Bodenfeuchte und Temperatur und können den Messintervall intelligent anpassen, um ihre Lebensdauer zu verlängern. Von diesen Geräten können bis zu 25 in einem Netzwerk verwendet werden. Zu den Aktoren gehören eine Bewässerungssteuerung, eine Steckdosensteuerung und ein Mähroboter. Diese Peripherie-Geräte kommunizieren alle per Kurzstreckenfunk im sogenannten ISM-Band (Industrial, Scientific, Medical) bei 868 MHz. Dabei kann mit einer Sendeleistung von bis zu 25 mW eine Reichweite von ungefähr 100 m erzielt werden. Die Energie wird von AA-Batterien bereitgestellt, mit denen die Geräte bis zu 6 Monate betrieben werden können. Der Mähroboter verfügt über einen leistungsstärkeren Lithium-Ionen-Akku.

Die Bewässerungssteuerung ermöglicht durch Stellen des internen Ventils die automatische Bewässerung mittels angeschlossener Wasserleitungen. Mit der Steckdosensteuerung können zusätzliche Verbraucher ein- und ausgeschaltet werden.

Das System kann in verschiedenen Konfigurationen erworben werden. Das nachträgliche Hinzufügen weiterer Geräte ist problemlos möglich. [4] [5]



Abbildung 1: Netzwerktopologie Gardena Smart System [6]

2.1.2 Parrot Flower Power

Der *Parrot Flower Power* ist ein kompaktes Sensorgerät zur Anwendung bei Topfpflanzen. Die Energieversorgung wird von einer AAA-Batterie bereitgestellt, mit der das Gerät eine Lebensdauer von bis zu 6 Monaten erreichen kann.

Die gemessenen Parameter sind Lichtstärke, Bodenfeuchte, Temperatur und Nährstoffgehalt. Die Messwerte werden alle 15 Minuten erfasst und können bis zu 80 Tage lang gespeichert werden. Das Gerät kommuniziert über Bluetooth Low Energy (BLE) mit dem Smartphone und erzielt dabei eine Reichweite von bis zu 10 Metern. Eine Smartphone-App zeigt die Daten an und bewertet den Zustand der Pflanze.

Maximal 256 Geräte können mit dem Smartphone verbunden werden, kommunizieren allerdings nicht untereinander. Der Hersteller bietet auf seinen Servern Cloud-Dienste zur Datenauswertung an. Abbildung 2 zeigt den Parrot Flower-Power Sensor und die Kommunikation mit Smartphone und Server. [7]



Abbildung 2: Netzwerktopologie Parrot Flower-Power Sensor [8]

2.1.3 Edyn

Das Edyn-System weist einige Besonderheiten auf. Die Sensorgeräte verfügen über eine Solarzelle und einen Lithium-Akku, der das System ohne Sonne bis zu 60 Tage betreiben kann. Es ist somit das einzige System, das Energie aus der Umgebung gewinnt und keinen Batteriewechsel benötigt.

Gemessen werden Lichtstärke, Luftfeuchte, Bodenfeuchte, Temperatur und Nährstoffgehalt. Die Messfrequenz beträgt 20 Minuten. Kommunikation erfolgt über eine WLAN (Wireless Local Area Network) 802.11 b/g/n-Verbindung bei 2,4 GHz. Es gibt keine Basisstation, sondern die Geräte kommunizieren direkt mit dem Server des Herstellers. Der Server wertet die Daten aus und stellt sie dem Anwender via der Smartphone-App dar. Die App ist recht umfangreich und enthält diverse Funktionen für die Verwaltung einzelner Pflanzen.

Zusätzlich zu den Sensorgeräten gibt es noch eine Bewässerungssteuerung. Diese verfügt auch über Solarzelle und Lithium-Akku und kommuniziert über WLAN.

Das Edyn-System wurde mit der Crowdfunding-Plattform *kickstarter* finanziert und entwickelt [9]. Derzeit ist es nur in den Vereinigten Staaten erhältlich. In Abbildung 3 sind die Geräte des edyn-Systems dargestellt. [10]

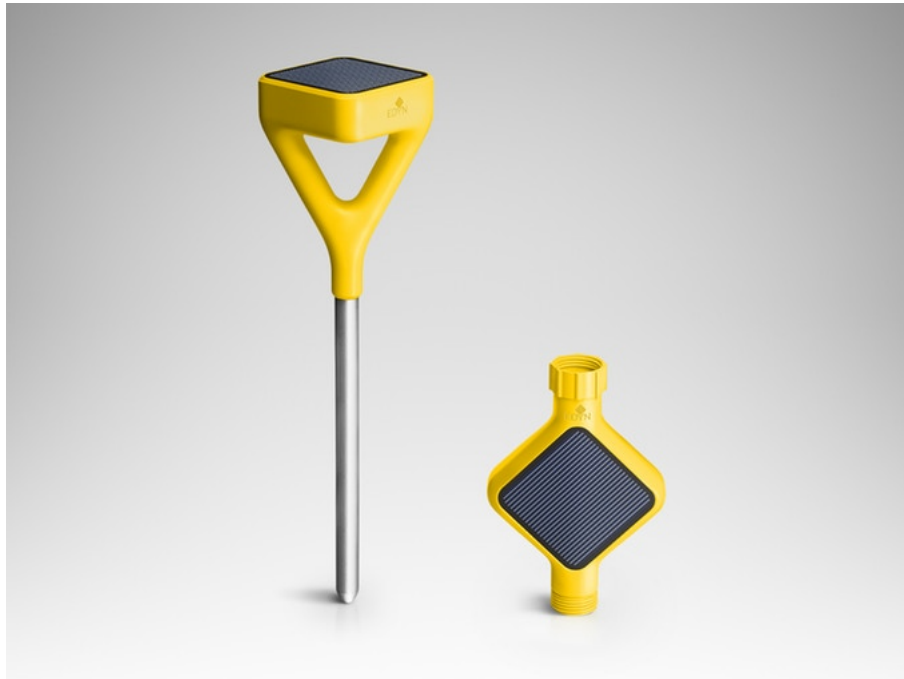


Abbildung 3: edyn-System: links Sensorgerät, rechts Wassersteuerung [9]

2.1.4 Vergleich der vorgestellten Systeme

Die Systeme werden in den drei wichtigsten Kategorien verglichen: Messparameter, Kommunikation und Energieversorgung. Tabelle 1 stellt die Eigenschaften der Systeme in diesen Kategorien gegenüber.

Parameter

Alle drei Geräte messen mit Lichtstärke, Bodenfeuchte und Temperatur die wichtigsten Größen, mit denen die Pflanzengesundheit überwacht werden kann. So können folgende Fragen beantwortet werden:

- Lichtstärke: Ist der Standort für die Pflanze geeignet? Liegt sie zu oft im Schatten?
- Bodenfeuchte: Erhält die Pflanze genug Wasser? Ist der Boden zu feucht?
- Temperatur: Ist es der Pflanze zu warm oder zu kalt?

Die Cloud-Dienste der Geräte können diese Fragen anhand der gesammelten Daten teilweise schon automatisch beantworten und den Benutzer informieren.

Kategorie	Gardena	Parrot	edyn
Messparameter	Lichtstärke Bodenfeuchte Temperatur	Lichtstärke Bodenfeuchte Temperatur Nährstoffgehalt	Lichtstärke Bodenfeuchte Temperatur Nährstoffgehalt Luftfeuchte
Energiespeicher	Primärzelle	Primärzelle	Sekundärzelle
Kapazität des Energiespeichers	4 Ah	1,2 Ah	1 Ah
Erwartete Lebensdauer	6 Monate	6 Monate	2 Monate
Verwendete Drahtlos- Kommunikationstechnik	868 MHz (ISM-Band)	Bluetooth Low Energy	WLAN (802.11 b/g/n)
Reichweite	ca. 100 m	ca. 10 m	ca. 100 m
Messfrequenz	variabel	15 min	20 min
Basisstation	ja	nein	nein
sonstiges	Aktoren	-	Solarzelle Aktoren

Tabelle 1: Smart-Gardening-Systeme im Vergleich

Die Geräte von edyn und Parrot verfügen noch über andere Sensoren. Mit diesen zusätzlichen Sensoren kann der Zustand der Pflanze noch besser beurteilt werden. Die Parameter sind:

- Nährstoffgehalt: Muss gedüngt werden? (edyn und Parrot)
- Luftfeuchtigkeit: Ist es der Pflanze zu trocken? (edyn)

Der Nährstoffgehalt wird durch eine resistive Leitfähigkeitsmessung mit zwei Elektroden an der Bodensonde gemessen. Der Messwert ist abhängig von den gelösten Ionen im Boden, zu denen auch die Dünger-Ionen gehören. Jedoch ist dieser Wert auch abhängig von der Bodenfeuchte und dem Bodentyp, muss also noch nachbearbeitet werden.

Durch die Messung der Luftfeuchtigkeit können Rückschlüsse auf die Wetterlage und die Wassersituation der Pflanze gezogen werden. Bei trockenen Wetterverhältnissen etwa kann der Anwender dann reagieren.

Fazit: alle Systeme messen die drei wichtigsten Parameter Lichtstärke, Bodenfeuchte und Temperatur. Die zusätzlichen Messwerte sind nicht unbedingt notwendig. Für das im Rahmen der Bachelorarbeit zu entwickelnde System wird zu den vorhandenen Messwerten Temperatur, Luftfeuchte und Luftdruck noch die Messung der Bodenfeuchte angestrebt. Die Realisierung einer Lichtstärkemessung wäre auch denkbar, ist allerdings im Vergleich mit der Bodenfeuchte zunächst nachrangig.

Drahtlose Kommunikation

Die drei Systeme verwenden sehr unterschiedliche Kommunikationstechnologien, die verschiedene Eigenschaften aufweisen:

- **Gardena: ISM-Band mit 868 MHz**

Der Vorteil dieser Funktechnologie besteht darin, dass auch bei Hindernissen gut kommuniziert werden kann. Für die vielen vernetzten Geräte des Gardena Smart Systems ist das von Vorteil, da im Garten teilweise viele Hindernisse in Form von Büschen, Bäumen und Gebäuden vorhanden sein können.

- **Parrot: Bluetooth Low Energy**

BLE wurde als energiesparende Variante von Bluetooth entwickelt. Die meisten Smartphones sind mit Bluetooth kompatibel, sodass eine Verwendung des Gerätes für den Anwender problemlos möglich ist. Die Reichweite ist allerdings vergleichsweise gering.

- **edyn: WLAN 802.11 b/g/n**

WLAN hat eine ähnlich große Reichweite wie der 868 MHz-Funk, benötigt jedoch mehr Energie. Da das edyn-System über Solarzellen und Akkus verfügt, ist dies jedoch durchaus vertretbar. Von Vorteil ist hier die direkte Anbindung an das Internet ohne ein Smartphone oder separates Gateway als Brücke, sodass das edyn-System eigenständig Nachrichten an den Benutzer senden kann.

Fazit: Für die geplante Anwendung des Sensor-Netzwerks ist die 868-MHz-Funktechnologie am besten geeignet, da hier viele Sensor-Geräte in unübersichtlichem Gelände miteinander verknüpft werden sollen. In [2] wurde mit der Freiraumformel nach Friis die maximale Reichweite für das ISM-Band bei 900 MHz und für WLAN beziehungsweise Bluetooth bei 2,45 GHz bestimmt. Dabei wurde für die Umgebung eine Anwendung im Büro angesetzt, wo es ähnlich viele Hindernisse gibt, wie in einem Garten. Mit dem 900-MHz-Funk wurde eine Reichweite von bis zu 1050 m errechnet. Die Berechnung der Reichweite der 2,4-GHz-Funktechnologien ergab einen Wert von maximal 175 m. Das 900-MHz-Band und somit auch das nahe 868-MHz-Band ist also deutlich besser geeignet. Zu beachten sind auch Störungen der Kommunikation, diese können bei den verbreiteten 2,4-GHz-Funktechnologien eher auftreten, da dieses Frequenzband mit WLAN und Bluetooth häufig verwendet wird.

Ein weiterer Vorteil ist die Lizenzfreiheit und Genehmigungsfreiheit des ISM-Bandes. Dieses Band ist speziell für Geräte im Industrie-, Wissenschafts- und Medizinbereich reserviert, da diese oft Daten sammeln und versenden müssen. Einzige Voraussetzung ist eine zeitliche Auslastung des Frequenzbandes von weniger als 1 %, es darf innerhalb einer Stunde nicht mehr als 1 % der Zeit gesendet werden.

Energiespeicher

Hier kommen zwei unterschiedliche Ansätze zum Einsatz:

- **Primärzelle**

Die Vorteile sind hier die geringe Selbstentladung und der leichte Austausch. Ein Austausch alle 6 Monate kann jedoch sehr umständlich für den Anwender sein und verursacht zusätzliche Kosten.

- **Sekundärzelle mit Solarzelle**

Lithium-Akkus haben eine höhere Selbstentladung als Primärzellen. Die verwendete Solarzelle sorgt dafür, dass der Akku immer wieder aufgeladen wird. Bei geschickter Platzierung des Geräts im Garten sollte das kein Problem darstellen. So wird dem Benutzer das Wechseln der Batterie erspart.

Fazit: Die Kombination von Sekundärzelle mit Solarzelle ist sehr attraktiv in einer Gartenumgebung. Das im Rahmen dieser Bachelorarbeit zu entwickelnde System wird diese Form der Energieversorgung verwenden.

Die vorgestellten Systeme verwenden teilweise gute Ansätze, schöpfen das Potenzial einer Gartenumgebung jedoch nicht aus. Die Energieversorgung kann durch die Verwendung von Energy Harvesting autark realisiert werden. Nur das System von edyn gewinnt Energie aus der Umgebung, die anderen Systeme erfordern ständige Batteriewechsel. Die Funktechnologien der Geräte von edyn und Parrot sind für die Anwendung im Garten nicht optimal. Das System von Gardena verwendet zwar den vorteilhafteren 868-MHz-Funk, hat allerdings den Nachteil der Batteriewechsel.

Aus diesen Gründen soll nun eine eigenes drahtloses Sensor-Netzwerk entwickelt werden. Dieses System soll besonders bezüglich Energie und Kommunikation für die Gartenanwendung optimiert werden.

2.2 Sensor-Netzwerk-Plattform

Grundlage für das zu entwickelnde Sensor-Netzwerk bildet eine an der Hochschule Offenburg entwickelte Sensor-Netzwerk-Plattform. Diese Plattform wurde speziell für die Low-Power-Anwendung entworfen, sie ist energieautark und verfügt über drahtlose Kommunikation. Die Entwicklung wurde in zwei Bachelorarbeiten durchgeführt. In [2] wurde das eigentliche System mit Mikrocontroller, Sensoren und Funkschnittstelle entwickelt (Sensorplatine). Die zweite Bachelorarbeit [3] hat eine Energieversorgung entwickelt, die Energieautarkie ermöglicht. Die Komponenten des Systems werden in diesem Abschnitt genauer vorgestellt.

2.2.1 Energieversorgung

Die Plattform wurde mit dem Leitgedanken entwickelt, möglichst lange mit einer Batterie auskommen zu können – angestrebt wird hier eine Betriebsdauer von 10 Jahren oder mehr. Um dies erreichen zu können, wurde die Sensorplatine sehr energiesparend realisiert und die Energieversorgung auf Energy-Harvesting ausgelegt. Das Konzept der Energieversorgung ist in Abbildung 4 dargestellt und zeigt gut die Unterteilung in Energieversorgung und Sensorplatine („Netzwerk-Participant“).

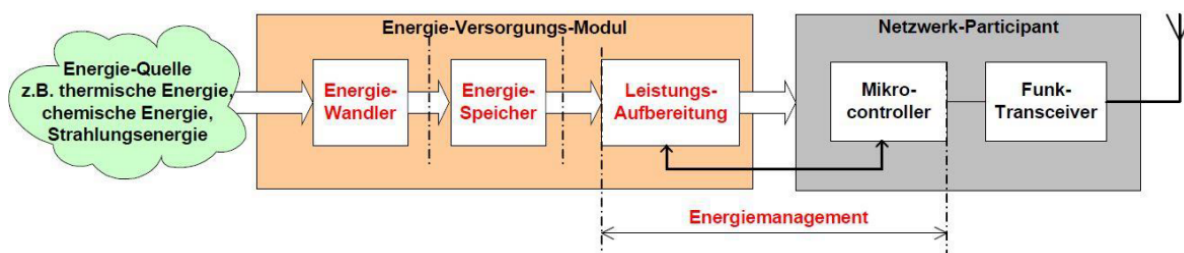


Abbildung 4: Konzept der Energieversorgung [11]

Energiespeicher

Das Energieversorgungsmodul enthält zwei Energiespeicher: einen Doppelschichtkondensator (Power-Cap) und eine Batterie. Der Kondensator wird per Energy-Harvesting wiederaufgeladen und kann kurzzeitig hohe Ströme bereitstellen, wie sie vom Funkmodul benötigt werden. Mit einer Kapazität von 1,5 F kann er ausreichend Energie speichern, um das System dauerhaft mit Energie zu versorgen. Die Batterie dient als zuverlässige Grundversorgung des Systems und gewährleistet eine Ausfallsicherheit.

Energieerzeugung

In [3] wurden für das Energy-Harvesting drei Methoden untersucht und umgesetzt: Fotovoltaik, Thermogeneration und Vibrationswandler. Die erzeugte Energie wird separat gleichgerichtet und lädt den Kondensator auf. Bei der Energiewandlung wird eine Effizienz von über 85 % erreicht. Das Blockschaltbild der Energieversorgung wird in Abbildung 5 dargestellt. Kondensator und Batterie können über zwei Schalter der Sensorplatine zugeschaltet werden. Die Batterie hat zusätzlich eine permanente Verbindung zur Sensorplatine, um die Grundversorgung bereitstellen zu können.

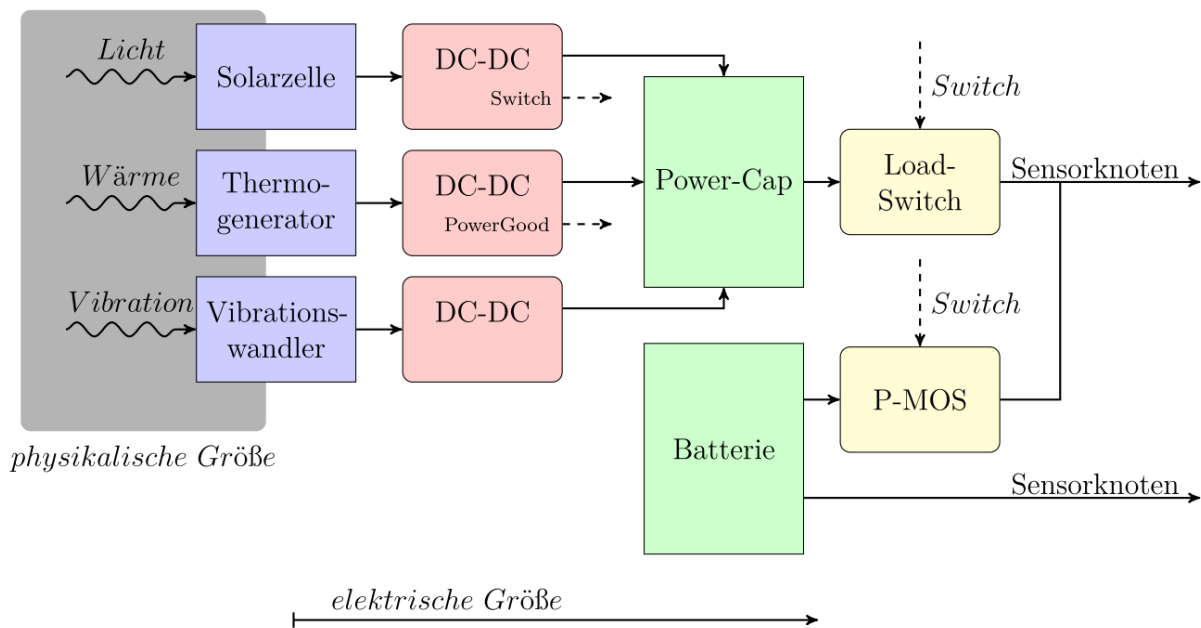


Abbildung 5: Blockschaltbild des Energieversorgungsmoduls [3]

Schnittstelle

Die Schnittstelle zwischen der Energieversorgungsplatine und der Sensorplatine enthält 6 Anschlüsse, dabei haben Kondensator und Batterie getrennte Anschlüsse für die Versorgungsspannung (V_{CC} und V_{Bat}). Ein Switch-Signal ermöglicht das Umschalten zwischen beiden Versorgungen. Das PowerGood-Signal teilt der Sensorplatine mit, ob der Kondensator genügend Energie für die Verwendung des Funkmoduls gespeichert hat. Schließlich gibt es noch zwei Masse-Anschlüsse zum Potentialausgleich der Platinen. Die Struktur der Schnittstelle ist in Abbildung 6 angegeben.

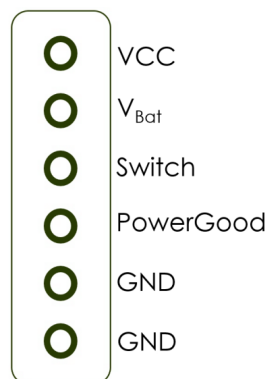


Abbildung 6: Schnittstelle des Energieversorgungsmoduls [3]

Das komplette Energieversorgungsmodul mit Kondensator und Batterie ist in Abbildung 7 dargestellt. Die Energieerzeuger werden an den drei hellen Steckanschlüssen am oberen Ende der Platine angeschlossen.



Abbildung 7: Energieversorgungsmodul mit Kondensator und Batterie

2.2.2 Sensorplatine

Die Sensorplatine wurde auf einen möglichst geringen Energieverbrauch ausgelegt. So kann zusammen mit dem Energieversorgungsmodul durch Energy Harvesting ein energieautarker Betrieb realisiert werden. Um den Energieverbrauch zu minimieren, wurden folgende Maßnahmen ergriffen:

- Verwendung des energiesparenden Mikrocontrollers *MSP430* von Texas Instruments
- Verwendung von FRAM-Speicher (Ferroelectric Random Access Memory) mit geringem Energieverbrauch und hoher Lebensdauer
- Last-Schalter zum Trennen von nicht verwendeten Komponenten
- Selbstabschaltung des Mikrocontrollers nach Messung der Parameter
- energiesparende, externe Echtzeituhr (Real-Time Clock, RTC) mit Dauerversorgung zum Aufwecken des Mikrocontrollers
- 868-MHz-Funkschnittstelle für schnelles und sicheres Senden

Schaltung

Abbildung 8 zeigt das Konzept der Schaltung. Oben links befindet sich die Schnittstelle zu dem Energieversorgungsmodul aus [3]. Dabei sind die beiden separaten Energieversorgungen V_{CC} und V_{BAT} gut sichtbar. Die Echtzeituhr wird dauerhaft mit der Batterie versorgt. Ein Step-Down-Converter sorgt dafür, dass die variable Eingangsspannung des Kondensators konstant gehalten wird. Mehrere Levelshifter (LS) stellen für die vielen unterschiedlichen Komponenten die jeweiligen optimalen Spannungslevel bereit. Die Sensoren und die Funkschnittstelle (RF) sind über Lastschalter mit dem Rest der Schaltung verbunden. Wenn sie nicht gebraucht werden, können sie elektrisch von der Schaltung getrennt werden, um Querströme zu vermeiden.

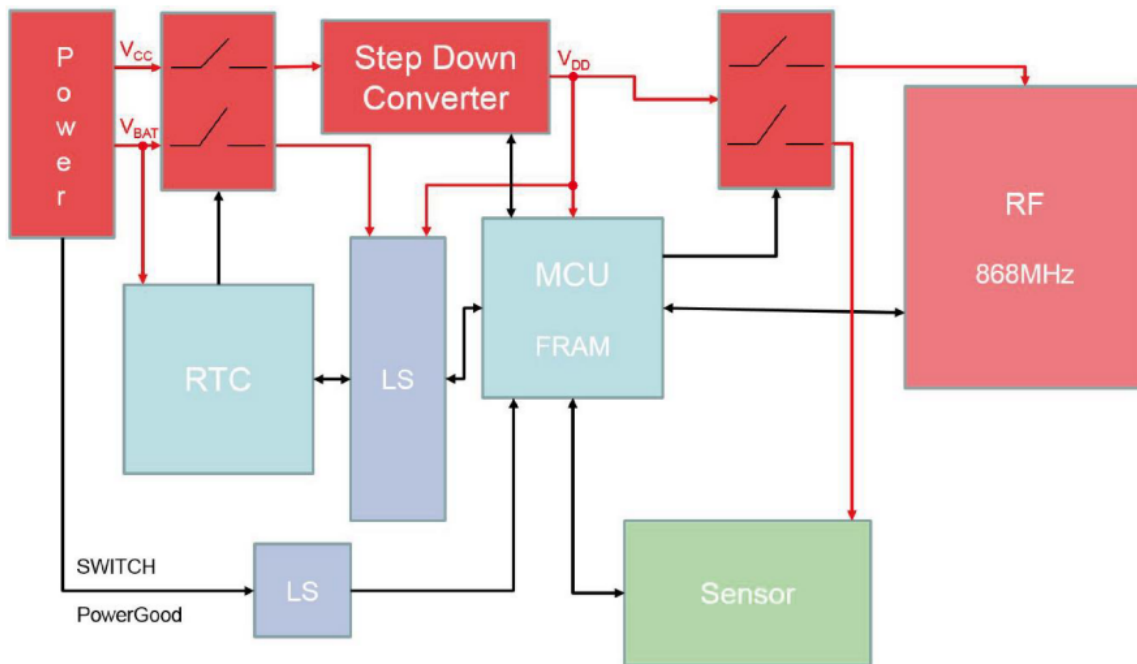


Abbildung 8: Konzept der Sensormodul-Hardware [2]

Sensoren

Das drahtlose Sensormodul enthält Sensoren für die Messung von Parametern typischer Industrieanwendungen. Verwendet wird der kombinierte Umgebungssensor *BME280* von Bosch [12]. Der Sensor erfasst folgende Messparameter:

- relative Luftfeuchtigkeit: 0 % bis 100 %
- Temperatur: -40 °C bis +85 °C
- Luftdruck: 0,3 bar bis 1,1 bar

Der Sensor ist per SPI (Serial Peripheral Interface) an den Mikrocontroller angeschlossen. Um möglichst präzise Messwerte zu erhalten, werden die Sensordaten nachbearbeitet. Der Hersteller stellt hierfür Code zur Verfügung, der in das Hauptprogramm integriert ist.

Kommunikation

Für die Kommunikation wird das Funkmodul *SPS-GRF868* der Firma *STMicroelectronics* [13] verwendet. Diese Funkschnittstelle für den 868-MHz-Bereich beinhaltet einen Funkchip des Typs *SPIRIT1* [14] und eine Antenne. Das Funkmodul ist sehr kompakt (13,5 mm auf 11,5 mm) und im Betrieb sehr stromsparend. Das 868-MHz-Band wurde ausgewählt, weil es für die Anwendung beim drahtlosen Sensormodul die besten Übertragungseigenschaften aufweist. Andere Frequenzbänder, wie etwa das 2,4-GHz-Band (Bluetooth und WLAN), haben durch die verbreitete Verwendung ein größeres Risiko für Übertragungsstörungen und

erreichen bei Strecken von 10 bis 15 Metern ihre Grenzen. Das 868-MHz-Band kann insbesondere bei Hindernissen auf der Sendestrecke eine größere Reichweite erzielen. Außerdem gehört es zu den ISM-Bändern, deren Verwendung lizenzfrei ist. [2]

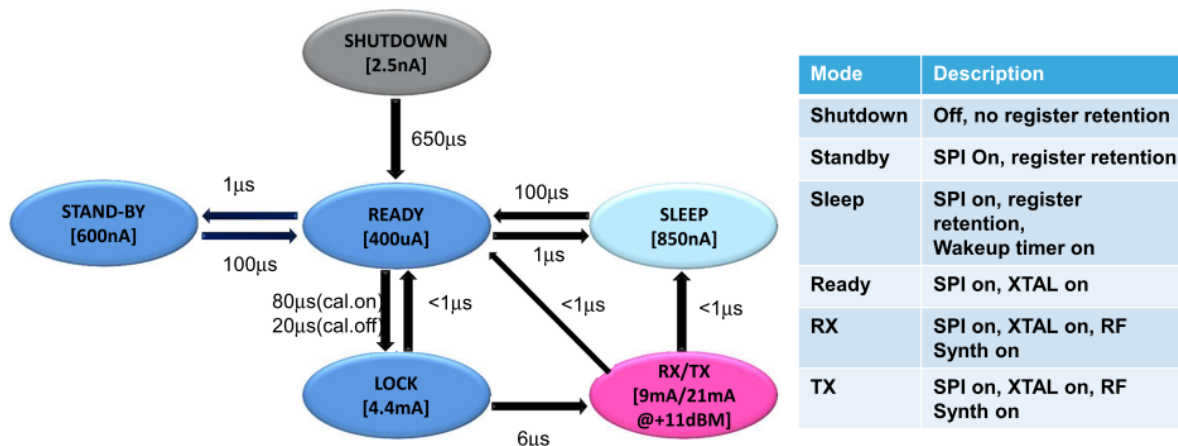


Abbildung 9: Zustandsdiagramm des SPIRIT1-Chips [15]

Abbildung 9 zeigt das Zustandsdiagramm des Funkchips *SPIRIT1*. Die Zustände sind jeweils mit Stromaufnahme aufgeführt. Den größten Energieverbrauch hat das Modul im Sende- und Empfangsmodus (RX/TX) – hier werden bis zu 21 mA benötigt. Die Bereitstellung dieses im Vergleich zum sonstigen Betrieb relativ großen Stromes ist durch die Verwendung eines Kondensators als Energiespeicher möglich.

Das vom Sensorgerät verwendete Datenpaket ist sehr kompakt gestaltet. Dadurch wird die Zeit im energieintensiven Sendemodus möglichst kurz gehalten. Tabelle 2 zeigt den Aufbau des verwendeten Telegrammrahmens.

Das Nutzdatenpaket („Payload“) des Telegramms enthält die Daten als 2-Byte-Variablen. Zusätzlich ist eine Sensor-ID zur Identifikation des sendenden Sensorgeräts und der Messgröße enthalten. Die Dataframe-ID enthält Informationen über die Anzahl der Daten und die fortlaufende Nummerierung der Datenpakete. Der Aufbau der Nutzdaten ist in Tabelle 3 dargestellt. [2]

4 Byte	2 Byte	64 Byte	2 Byte
Preamble	Sync (0x8888)	Payload	CRC (Poly 0x8005)

Tabelle 2: Aufbau des Telegrammrahmens [2]

2 Byte	2 Byte	60 Byte
Sensor-ID	Dataframe-ID	Data

Tabelle 3: Aufbau der Nutzdaten [2]

Software

Auch die Software wurde hinsichtlich des Energieverbrauchs optimiert. Die Echtzeituhr wird beim ersten Start konfiguriert und ist durch die Batterieversorgung dauerhaft in Betrieb. Der Mikrocontroller wird durch ein Signal der Echtzeituhr aufgeweckt und aktiviert die Sensoren, um die Messwerte aufnehmen zu können. Anschließend wird der Countdown-Timer der Echtzeituhr aktiviert und der Mikrocontroller schaltet sich ab. Nach Ablauf des Timers weckt die Echtzeituhr den Mikrocontroller wieder auf. Dieses Verfahren wird zyklisch wiederholt, bis eine Obergrenze an gesammelten Daten erreicht wird. Dann aktiviert der Mikrocontroller in seinem Programmablauf zusätzlich das Funkmodul und sendet die gespeicherten Daten. Für das Senden der Daten wird das PowerGood-Signal des Energieversorgungsmoduls kontrolliert, das indiziert, ob der Kondensator ausreichend Energie für das Senden bereitstellen kann. Nach dem Senden beginnt die Datensammlung erneut.

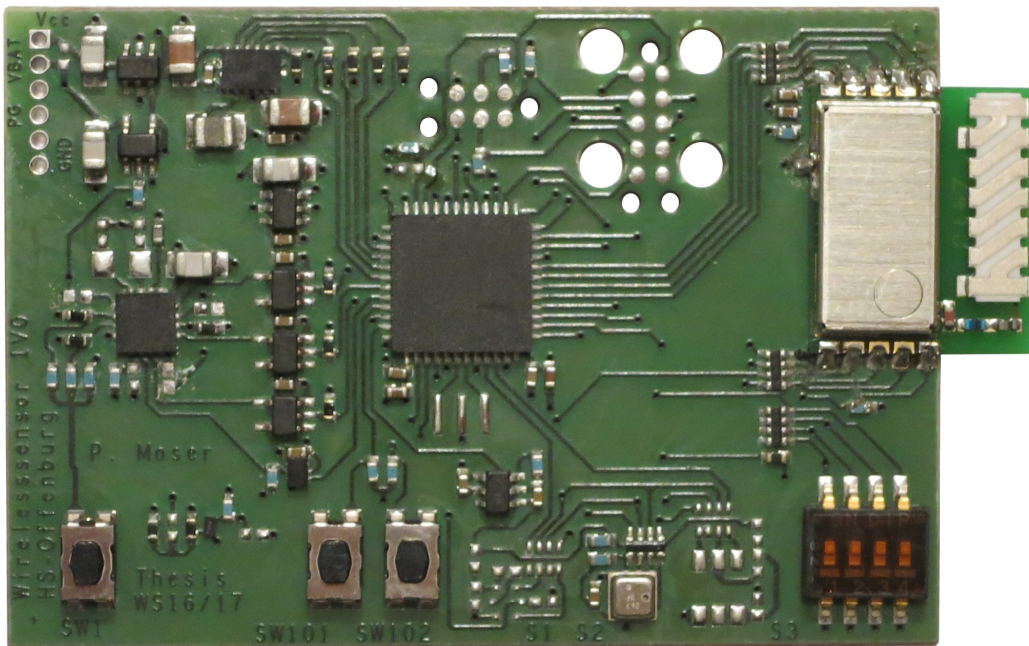


Abbildung 10: Sensorplatine der Sensor-Netzwerk-Plattform [2]

Die Sensorplatine der Sensor-Netzwerk-Plattform ist in Abbildung 10 dargestellt. In der Mitte befindet sich der Mikrocontroller *MSP430*. Das Funkmodul *SPS-GRF868* mit Antenne ist auf der rechten Seite zu sehen. Auf der linken Seite ist die Schnittstelle zum Energieversorgungsmodul und die Spannungselektronik untergebracht. Am unteren Rand sind mehrere Knöpfe, ein DIP-Schalter (Dual In-Line Package) und der Sensor *BME280*.

2.3 Bodenfeuchtemessung

Für die Anwendung der in Abschnitt 2.2 vorgestellten Sensor-Netzwerk-Plattform beim Smart Gardening ist die Messung der Bodenfeuchte sehr bedeutsam. Es gibt mehrere unterschiedliche Messverfahren, die in diesem Abschnitt vorgestellt und bewertet werden. Zuvor werden einige Grundlagen zur Bodenfeuchte behandelt.

2.3.1 Grundlagen

Pflanzen benötigen Wasser zum Überleben. Dieses Wasser wird über die Wurzeln aus der Erde gesaugt und enthält lebenswichtige Nährsalze. Für die Gesundheit einer Pflanze ist die Bodenfeuchtigkeit daher ein essentieller Parameter und sollte von dem Sensorgerät gemessen werden.

Bodenwasser

Normaler Erdboden setzt sich aus unterschiedlich großen Bodenpartikeln zusammen, zwischen denen immer etwas Luft eingeschlossen ist. Die Menge der eingeschlossenen Luft ist unter anderem abhängig vom Bodentyp und der Lockerheit.

Der Kreislauf des Bodenwassers ist in Abbildung 11 dargestellt. In den Boden eindringendes Niederschlagswasser kann entweder als Haftwasser im Boden verbleiben oder durchfließt ihn als Sickerwasser, um Grund- und Stauwasser zu bilden. Das Haftwasser setzt sich zusammen aus dem Adsorptionswasser und dem Kapillarwasser und wird der Schwerkraft entgegen im Boden gehalten. Adsorptionswasser bleibt an den Oberflächen fester Partikel haften, während das Kapillarwasser in Kapillaren und Poren gebunden wird. Das Haftwasser geht durch Verdunstung (Evaporation) oder durch Entnahme durch Pflanzen (Transpiration) verloren, kann aber durch kapillaren Aufstieg von Grund- und Stauwasser wieder aufgefüllt werden. Die eigentliche Bodenfeuchte wird durch das Haftwasser gebildet und ist für die Pflanze am wichtigsten. [16]

Wasserspannung

Der Boden übt auf das Wasser eine Saugspannung aus, die von den Adsorptions- und Kapillarkräften verursacht wird. Das Wasser setzt dieser Saugspannung eine eigene Wasserspannung entgegen. Die Wasserspannung wird in bar gemessen, ist bei niedrigem Wassergehalt im Boden hoch und nimmt mit zunehmendem Wassergehalt ab.

Abbildung 12 zeigt die Wasserspannungskurven für verschiedene Bodentypen. Dabei wird die gemessene Wasserspannung gegen den Wassergehalt im Boden aufgetragen. Der Wassergehalt wird nach ISO 11465 [17] als Verhältnis von Wasservolumen zu Gesamtvolumen angegeben. Neben diesem volumetrischen Wassergehalt gibt es auch den gravimetrischen,

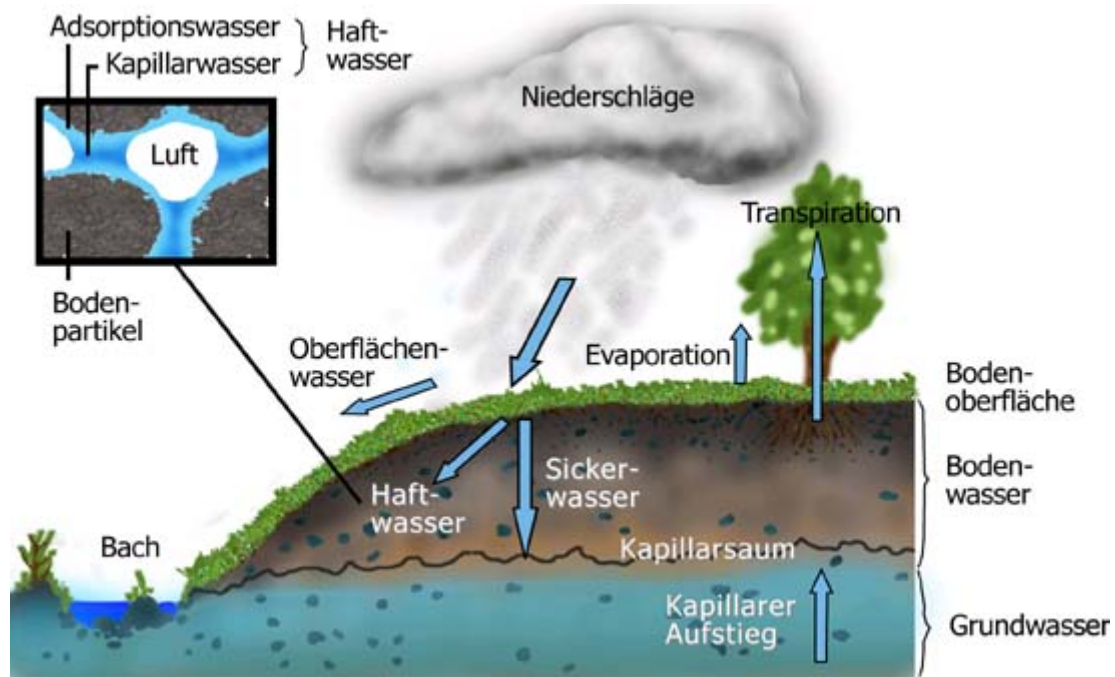


Abbildung 11: Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser [16]

der analog dazu das Verhältnis der Massen beschreibt. Auf der rechten Achse können Porengrößen und Beweglichkeit des Wassers zugeordnet werden. Das Diagramm gibt beispielsweise an, dass komplett trockener Boden Wasser mit einer Saugspannung von 10000 bar aufsaugt. Die Wasserspannung kann auch in cm Wassersäule angegeben werden. Daraus kann der sogenannte pF -Wert abgeleitet werden, der für die freie Energie des Wassers steht. Er ist definiert als dekadischer Logarithmus des Betrags der Bodenwasserspannung in Hektopascal. Es gilt:

$$1 \text{ cmH}_2\text{O} = 98,0665 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ bar} = 10^3 \text{ hPa} \approx 10^3 \text{ cmH}_2\text{O}, \quad pF = 3$$

Der pF -Wert ist gut zur Beurteilung der Bodenfeuchte geeignet. Tabelle 4 gibt Umrechnungswerte für die verschiedenen Einheiten und die entsprechenden Bodenfeuchte an. [18] Mithilfe der Wasserspannungskurve lassen sich unterschiedliche Bodentypen hinsichtlich ihrer Bodenwassereigenschaften bewerten. So ist in Abbildung 12 gut sichtbar, dass Sand und Ton bei gleichem Wassergehalt eine unterschiedliche Wasserspannung aufweisen. Etwa bei 30 % Wassergehalt hat Sand mit $pF = 1$ eine sehr niedrige Wasserspannung, kann also fast kein Wasser mehr aufnehmen. Ton hingegen hat mit $pF = 4$ eine tausendmal höhere Wasserspannung und kann noch mehr Wasser aufnehmen. Die Schnittpunkte der Kurven mit der x-Achse geben schließlich Auskunft darüber, wie viel Wasser der Boden insgesamt aufnehmen kann – Sand hat einen maximalen Wassergehalt von 41 %, Ton ungefähr 52 %.

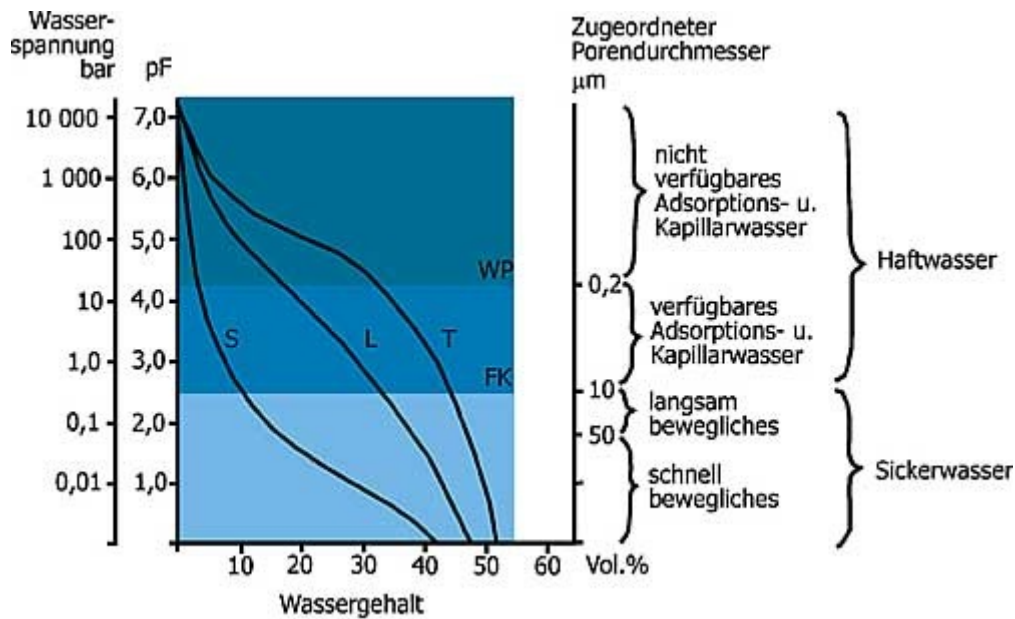


Abbildung 12: Wasserspannungskurven Sand- (S), Lehm- (L), Tonboden (T) [16]

pF-Wert	Bodenwasserspannung	Bodenwasserspannung	Bodenfeuchte
0	-10^0 hPa	$-10^{-2} \text{ mH}_2\text{O}$	
1	-10^1 hPa	$-10^{-1} \text{ mH}_2\text{O}$	nass
2	-10^2 hPa	$-10^0 \text{ mH}_2\text{O}$	feucht
3	-10^3 hPa	$-10^1 \text{ mH}_2\text{O}$	frisch
4	-10^4 hPa	$-10^2 \text{ mH}_2\text{O}$	trocken
5	-10^5 hPa	$-10^3 \text{ mH}_2\text{O}$	dürr

Tabelle 4: Umrechnungstabelle für Bodenfeuchtegrade, verändert nach [18]

Feldkapazität und Welkepunkt

Die Feldkapazität (FK) ist die Wassermenge, die ein zunächst wassergesättigter Boden nach zwei bis drei Tagen noch enthält. Sie wird zumeist in Prozent als Verhältnis von Wasservolumen zu Gesamtvolumen angegeben. Für Pflanzen muss zusätzlich der Anteil des sogenannten Totwassers (TOT) berücksichtigt werden. Dieses Wasser ist durch starke Adhäsionskräfte so fest gebunden, dass die Pflanze es nicht aus dem Boden entnehmen kann. Somit ergibt sich die nutzbare Feldkapazität (nFK) [19]:

$$nFK = FK - TOT \quad (2.1)$$

Tabelle 5 zeigt die Auswirkungen verschiedener nutzbarer Feldkapazitäten auf eine Pflanze. Der Welkepunkt, auch permanenter Welkepunkt (PWP) genannt, kennzeichnet den Austrocknungsgrad eines Bodens. Wenn er erreicht ist, kann die Pflanze kein Wasser mehr aus dem Boden aufnehmen und verwelkt. Dabei reißt der kapillare Wasserstrom von den Wurzeln zu den Blättern ab und es kann Luft eintreten – die Pflanze stirbt.

nFK in %	Pflanzenentwicklung
0-30	Pflanze steht unter Wasserstress, Ertragseinbußen möglich
30-80	noch ausreichende Wasserversorgung
80-100	optimales Wasserangebot
100+	Überversorgung und Sauerstoffmangel

Tabelle 5: Auswirkungen verschiedener nutzbarer Feldkapazitäten [19]

In Abbildung 12 ist der Welkepunkt eingezeichnet. Alle Wasserspannungen ab $pF = 4,2$ gehören dazu. Auch die Feldkapazität ist im Diagramm eingezeichnet, sie liegt zwischen $pF = 2,5$ und $pF = 4,2$. Hier steht der Pflanze eine optimale Menge an nutzbarem Wasser zur Verfügung. [20]

2.3.2 Messmethoden

Die Bodenfeuchte soll nun messtechnisch erfasst werden. Hierfür gibt es mehrere Verfahren, die im Folgenden vorgestellt werden. Unterscheiden lässt sich generell zwischen Verfahren, die die Wasserspannung direkt messen, und solchen, die durch die Messung einer anderen Größe auf die Bodenfeuchte schließen. Zu letzteren gehören auch elektrische Messverfahren, die für die Anwendung beim drahtlosen Sensormodul besonders interessant sind. Gemessen wird bei diesen Verfahren die Leitfähigkeit des Bodens, die mit dem Wassergehalt zusammenhängt. Die Bewertung der Bodenfeuchte anhand der thermischen Eigenschaften des Bodens ist auch möglich und wird in diesem Abschnitt vorgestellt. Abschließend wird noch auf die direkte Messung der Wasserspannung per Tensiometer eingegangen.

elektrisch – resistiv

Der Erdboden enthält viele unterschiedliche Ionen aus Mineralsalzen. Diese lösen sich im vorhandenen Haftwasser und erhöhen so die Leitfähigkeit des Bodens. Je mehr Wasser in Kontakt mit den Bodenpartikeln steht, desto mehr Ionen können in Lösung gehen. Somit hat man ein Maß für den Wassergehalt des Bodens – vorausgesetzt, der Ionengehalt bleibt im Messzeitraum ungefähr gleich. Die Leitfähigkeit kann dann sowohl resistiv als auch kapazitiv bestimmt werden.

Die einfachste Methode zur Bestimmung der Leitfähigkeit ist die direkte Messung des Widerstands. Dafür müssen zwei Elektroden in den Boden gesteckt werden, zwischen denen ein Strom fließen kann. Mit dem Ohm'schen Gesetz:

$$U = R \cdot I \quad (2.2)$$

kann schließlich der Widerstand berechnet werden, indem der Stromfluss bei der vorgegebenen Spannung gemessen wird.

Dieses Verfahren ist einfach und kostengünstig, da es sich nur um eine Bodensonde mit zwei Elektroden handelt. Abbildung 13 zeigt einen resistiven Bodenfeuchtesensor, der oft bei Arduino-Systemen zum Einsatz kommt. Der Sensor hat zwei Bodensonde, die jeweils eine Elektrode für die Messung der Leitfähigkeit bilden.

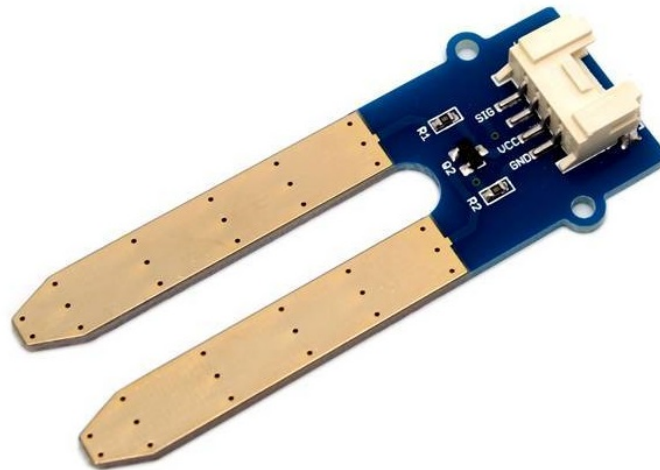


Abbildung 13: Arduino Grove Feuchtigkeitssensor (resistiv) [21]

elektrisch – kapazitiv

Die Anzahl und Beweglichkeit der Ionen im Haftwasser beeinflusst nicht nur die elektrische, sondern auch die dielektrische Leitfähigkeit (Permittivität). Somit kann ein Kondensator verwendet werden, um über Kapazität und Permittivität die Bodenfeuchte zu bestimmen. Für einen gewöhnlichen Plattenkondensator (Abbildung 14) gilt:

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d} \quad (2.3)$$

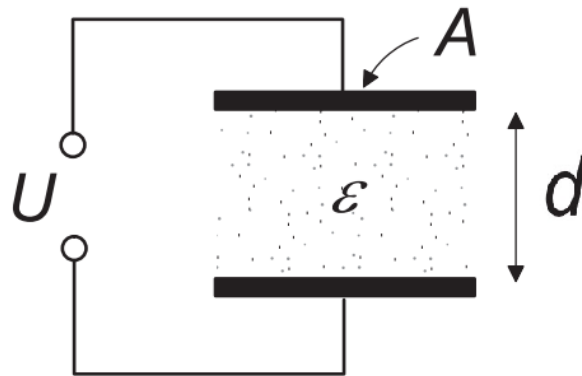
Die Spannung eines Plattenkondensators beträgt dann

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} \cdot \frac{Q}{A} \cdot d \quad (2.4)$$

Die relative Permittivität ϵ_r ist dabei vom Stoff zwischen den Platten abhängig.

Im Vakuum laufen die elektrischen Feldlinien direkt von der einen zur anderen Platte, wie in Abbildung 15a zu sehen ist. Wird ein Leiter in das Feld gebracht, werden an dessen Oberfläche Ladungen verschoben und es bildet sich ein Gegenfeld (Abbildung 15b). Die Leiteroberflächen sind Äquipotentialflächen, sodass die Spannung aus der Geometrie neu bestimmt werden kann:

$$U = \epsilon_0 \cdot (d - b) \cdot \frac{Q}{A} \quad (2.5)$$

Abbildung 14: Kondensator mit Spannung U , Fläche A , Abstand d , Permittivität ϵ [22]

Mit $C = \frac{Q}{U}$ folgt daraus:

$$C = \epsilon_0 \cdot \frac{A}{d} \cdot \frac{1}{1 - b/d} \quad (2.6)$$

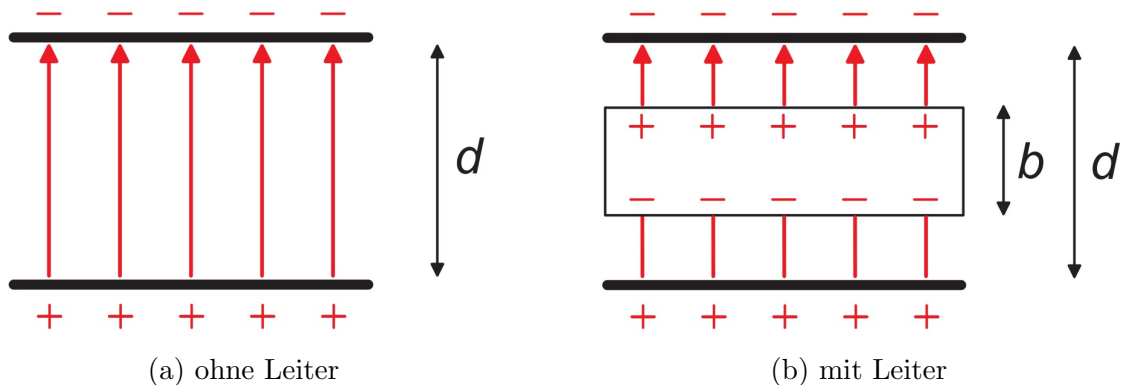


Abbildung 15: Feld im Plattenkondensator [22]

Der Faktor $\frac{1}{1-b/d}$ entspricht hier der relativen Permittivität ϵ_r und ist für einen Leiter immer größer Eins. Die Kapazität des Kondensators nimmt zu. [22]

Auch Isolatoren im elektrischen Feld können die Kapazität des Kondensators erhöhen. Die Ursache ist allerdings eine andere: durch das elektrische Feld werden im Isolator durch Polarisation Ladungen erzeugt (Abbildung 16). Dadurch entsteht im Inneren des Isolators ein dem äußeren Feld entgegengesetztes Feld. Die Kondensatorspannung wird reduziert, die Kapazität steigt.

Der Boden kann je nach Wassergehalt eher isolierend oder eher leitend wirken. Ist der Boden sehr trocken, wirkt er isolierend. Wenn der Boden sehr feucht ist, hat er eine gute Leitfähigkeit und enthält viele Ionen. Dadurch entspricht er eher einer Leiterplatte. Allerdings hat auch ein sehr trockener Boden eine relative Permittivität größer als 1, was dann dem Verhalten als Isolator zugeschrieben werden kann.

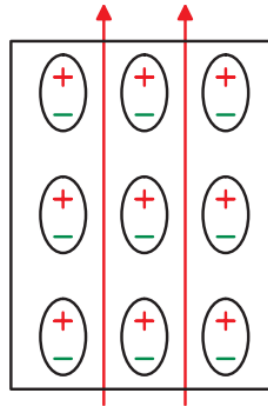


Abbildung 16: Polarisationsladungen eines Isolators im Kondensatorfeld [22]

Medium	ϵ_r
Vakuum	1
Wasser	1,77
Glas	6-8
Trockene Erde	3,9
Feuchte Erde	29

Tabelle 6: relative Permittivität einiger Stoffe [23]

Tabelle 6 enthält einige Werte für die relative Permittivität verschiedener Stoffe. Bemerkenswert ist hier der relativ große Unterschied zwischen feuchter und trockener Erde. Die Differenz zwischen den Werten sollte für eine gute Messbarkeit der Bodenfeuchte sorgen. Sowohl resistive als auch kapazitive Messmethoden haben einen Nachteil – sie benötigen eine Kalibrierung. Da kein direkter Zusammenhang zwischen Leitfähigkeit, beziehungsweise Kapazität, mit der Bodenfeuchte als Formel bekannt ist, muss das Verhalten der Sensoren an Bodenproben mit bekannter Bodenfeuchte überprüft werden.

thermisch

Neben den elektrischen Eigenschaften hat die Bodenfeuchte auch einen Einfluss auf die thermischen Eigenschaften des Bodens. Bei einem höheren Wassergehalt sind mehr Poren mit Wasser gefüllt, welches Wärme besser leitet als Luft. Dieser Zusammenhang kann benutzt werden, um die Bodenfeuchte bewerten zu können.

Die direkte Messung der Wärmeleitfähigkeit ist umständlich. Viel einfacher ist es, einen Sensor mit bekannten thermischen Eigenschaften aufzuheizen und die Zeit zu messen, die er für die Abkühlung braucht. Hierfür muss lediglich die Temperatur der umgebenden Erde zuvor gemessen werden. [5]

Die Wärmeleitfähigkeit von Erde beträgt ungefähr $0,47 \dots 2,1 \frac{W}{mK}$ je nach Bodenfeuchte [24] – auch hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen feuchter und trockener Erde.

Ähnlich wie bei der Messung mittels der elektrischen Leitfähigkeit, muss auch eine Messung mit diesem Verfahren zuerst kalibriert werden. Dabei muss auch die Wärmeleitfähigkeit der Bodengesteine berücksichtigt werden.

Dieses Verfahren zur Messung der Bodenfeuchte kommt unter anderem bei dem Gardena Smart System zum Einsatz. Ansonsten scheint es nicht sehr verbreitet zu sein – im Internet lassen sich keine thermischen Bodenfeuchtesensoren finden.

tensiometrisch

Die direkte Messung der Saugspannung stellt schließlich die genaueste Methode zur Messung der Bodenfeuchte dar. Ein Tensiometer (Abbildung 17) kann diese Wasserspannung messen und ist aus folgenden Komponenten aufgebaut:

- 1) poröse Keramikzelle, luftdicht, Porengröße ca. 1 μm
- 2) wassergefülltes Schauglas
- 3) Auswerteelektronik
- 4) Drucksensor

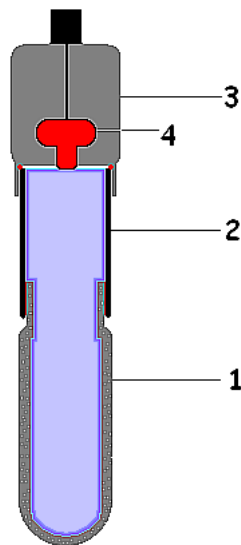


Abbildung 17: Tensiometer im Querschnitt [25]

Das Tensiometer wird im Boden platziert. Trocknet der Boden aus, so zieht die anliegende Saugspannung Wasser aus den Poren der Keramikzelle. Dadurch entsteht im Inneren ein Unterdruck, der mit einem Drucksensor gemessen werden kann. [26]

Alternativ kann die Anzeige auch analog erfolgen, entweder mit einem Manometer oder durch eine Füllstandsanzeige mit Skala für das Wasser im Messgerät. So können kostengünstige Bodenfeuchtesensoren realisiert werden, wie etwa die klassischen Gieß-Indikatoren für die Anwendung bei Zimmerpflanzen.

2.3.3 Auswahl des Sensors

Die Messmethoden werden nun in verschiedenen Kategorien bewertet und verglichen. Bei der Bewertung werden die Anforderungen des Sensormoduls berücksichtigt: geringer Energieverbrauch, einfache messtechnische Umsetzung und Implementierung, lange Haltbarkeit und akzeptable Genauigkeit. Die Messmethoden werden nach diesen Anforderungen beurteilt und mit + (Anforderung erfüllt), – (Anforderung nicht erfüllt) oder = (neutral) bewertet. Tabelle 7 zeigt die Bewertungen im Vergleich.

Kategorie	resistiv	kapazitiv	thermisch	tensiometrisch
Messgröße	Widerstand	Kapazität	Zeit	Druck
Energiebedarf	=	+	–	+
Messtechnische Umsetzung	+	+	=	=
Haltbarkeit	–	+	=	=
Genauigkeit	=	=	=	+

Tabelle 7: Messmethoden für Bodenfeuchte im Vergleich

Durch die Low-Power-Anforderung an das System fallen bereits zwei Methoden kategorisch weg: thermisch und tensiometrisch. Die thermische Messung verbraucht für die Erwärmung des Sensors zu viel Energie, die das Sensorgerät nicht zur Verfügung hat. Die meisten Tensiometer mit elektrischer Umsetzung haben ebenfalls zu hohe Energieanforderungen an das angeschlossene System. Tensiometer mit hoher Genauigkeit sind außerdem relativ teuer.

Bei der resistiven Messung stehen die Elektroden in direktem Kontakt zur Erde und können so korrodieren. Dadurch wird der Sensor zerstört und es können schädliche Metallionen in die Erde gelangen. Auch die Stromaufnahme bei der Messung ist vergleichsweise hoch.

Die kapazitive Messung ist für das Sensor-Netzwerk am Besten geeignet. Sie verbraucht wenig Strom, und die Elektroden sind versiegelt und haben keinen Kontakt zur Erde. Jedoch muss der Sensor vor der Verwendung kalibriert werden. Außerdem muss beachtet werden, dass Gegenstände im Boden, etwa Rohre oder Kabel, die Messung stören können. Dieser Umstand muss bei der Auswahl des Sensor-Standorts berücksichtigt werden.

Von den vorgestellten Messmethoden ist die tensiometrische die genaueste. Die ersten drei Messmethoden – resistiv, kapazitiv und thermisch – schließen über einen bekannten Zusammenhang auf den Wassergehalt des Erdbodens. Dabei geht es um den volumetrischen Wassergehalt, also das Verhältnis von Wasservolumen zu Gesamtvolumen. Für die Bodenfeuchte ist das ein guter Anhaltspunkt, jedoch nicht immer ausreichend.

Bei Pflanzen kommt es vor Allem auf die Saugspannung an – ist diese zu hoch, kann dem Boden kein Wasser entnommen werden, selbst wenn dieser einen hohen volumetrischen Wassergehalt hat. Die Saugspannung kann für verschiedene Bodentypen der Wasserspannungskurve. Abbildung 18 zeigt eine Wasserspannungskurve von Sandboden (Loamy Fine Sand)

und Schlick-Lehm (Silt Loam). Bei einem Wassergehalt von 10% in Sandboden muss eine Pflanze eine Saugspannung von nur ungefähr -7 kPa überwinden, um das Wasser aufnehmen zu können. Der Schlick-Lehm hält dieselbe volumetrische Menge Wasser aufgrund der Oberfläche seiner Partikel viel stärker fest. Dadurch ist der Betrag der Saugspannung sehr viel größer: bei -10000 kPa kann keine Pflanze mehr Wasser aufnehmen. [27]

Somit kann eine eindeutige Bewertung der Wasserverhältnisse im Boden für Pflanzen nur durch Messung der Saugspannung erfolgen. Für professionelle Messungen ist daher die Verwendung eines Tensiometers erforderlich, zum Beispiel bei der Landesgartenschau 2018 in Lahr. Hier gibt es mehrere Messstationen, wo die Tensiometer in 20 cm bis 40 cm Tiefe vergraben sind. [28]

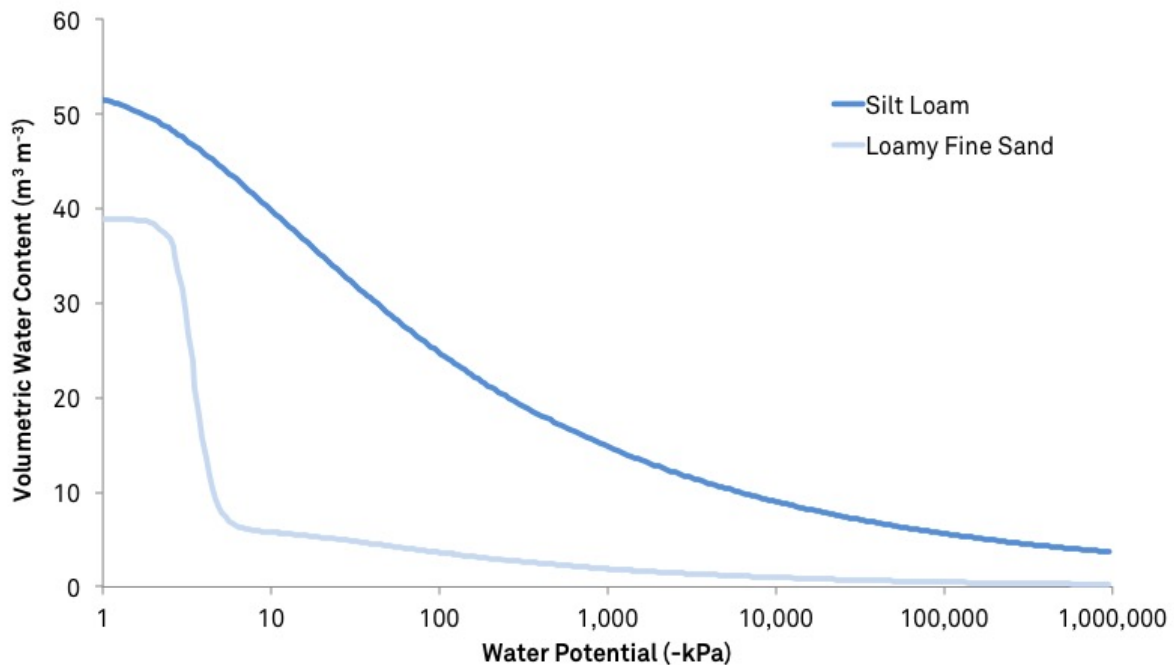


Abbildung 18: Wasserspannungskurve von Sand und Schlick-Lehm [27]

Für die Messungen im zu entwickelnden Sensor-Netzwerk reicht die kapazitive Messung des Wassergehalts aus. Bei guter Kalibrierung ist eine Bewertung der Bodenfeuchte problemlos möglich. Ideal ist natürlich die Kalibrierung für verschiedene Bodentypen – so können möglichst viele Anwendungsfälle abgedeckt werden.

Der letztendlich ausgewählte kapazitive Sensor heißt „Giesomat“ und wird im nächsten Abschnitt ausführlich vorgestellt.

2.3.4 Giesomat-Sensor

Der Giesomat ist ein kapazitiver Bodenfeuchte-Sensor, der von Dietmar Weisser entwickelt wurde [29]. Auf einer rechteckigen Platine sind zwei Elektrodenflächen angebracht, die zusammen einen koplanaren Kondensator bilden. Die Platine fungiert als Bodensonde und wird in den Boden gesteckt. Durch den Einfluss der Bodenfeuchte hat der Kondensator auf der Bodensonde eine variable Kapazität. Der variable Kondensator ist Teil eines Oszillators, der je nach Kapazität und somit Bodenfeuchte mit einer anderen Frequenz oszilliert. Das Ausgangssignal des Sensors ist das aufbereitete Signal des Oszillators, eine Rechteckfunktion. Dieses Signal kann für die Bestimmung der Frequenz digital ausgewertet werden.

Die Schaltpläne und das Platinendesign sind im Internet frei verfügbar. Abbildung 19 zeigt die Vorderseite eines Giesomat-Sensors von Ramser Elektrotechnik. Auf der linken Seite ist die Schaltung zur Auswertung zu sehen. Die rechte Seite, unter der die Kondensatorelektroden liegen, ist mit Informationen zu Bauteilen und Artikel versehen. Damit die Elektroden nicht in Kontakt mit dem Erdboden kommen, ist die rechte Seite der Platine mit Polyurethan-Lack versiegelt. [30]

Die Rückseite des Sensors ist in Abbildung 20 dargestellt. Hier sind die länglichen Elektroden des Kondensators gut sichtbar.



Abbildung 19: Vorderseite des Giesomat-Sensors

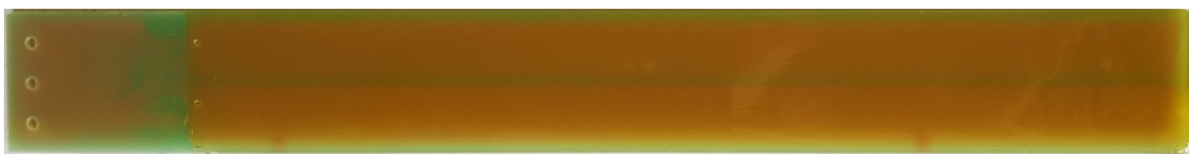


Abbildung 20: Rückseite des Giesomat-Sensors

Schaltung und Funktionsweise

Der Schaltplan des Giesomat-Sensors kann in zwei Teile getrennt werden. Ein Bestandteil der Schaltung ist ein Linearregler, der die Eingangsspannung auf 5 V begrenzt (Abbildung 21). Dieser Spannungsregler kann mit dem Jumper J1 überbrückt werden, falls mit einer vordefinierten Eingangsspannung gearbeitet wird. Bei der Anwendung im zu entwickelnden Sensor-Netzwerk wird das interne Spannungslevel bei 3,3 V verwendet, der Linearregler wird also nicht benötigt.

Parallel zu C1 ist der variable Kondensator mit der Auswertungsschaltung angeschlossen – dieser Teil der Schaltung ist in Abbildung 22 dargestellt.

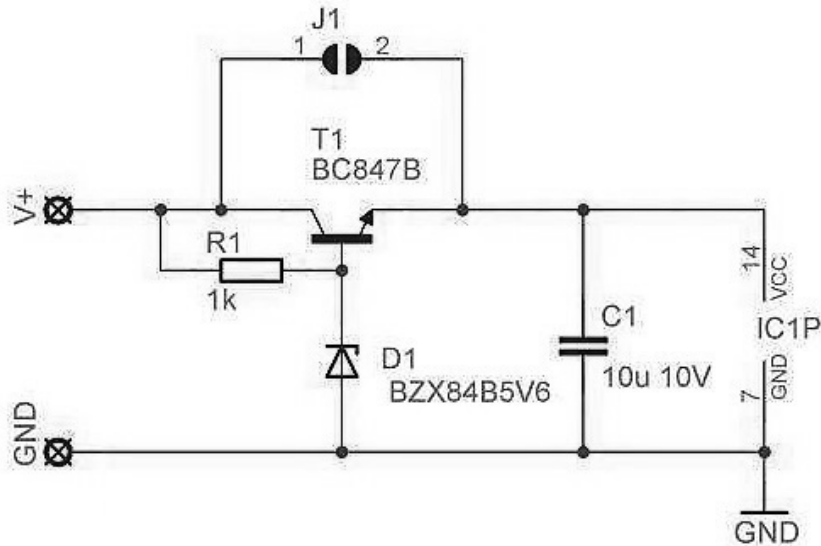


Abbildung 21: Schaltplan des Giesomat-Sensors: Linearregler, verändert nach [30]

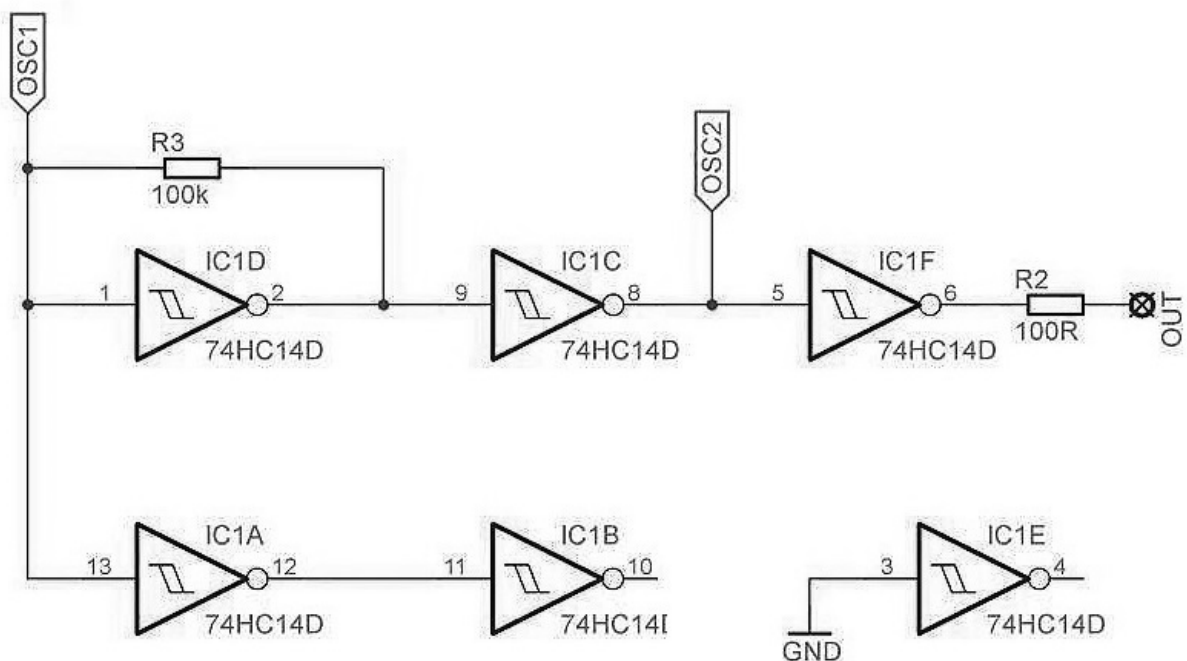


Abbildung 22: Schaltplan des Giesomat-Sensors: Auswertungsschaltung, verändert nach [30]

Der variable Kondensator ist an den Anschlüssen OSC1 und OSC2 mit der Schaltung verbunden. Er bildet zusammen mit R3 einen RC-Oszillator, dessen Frequenz von den angeschlossenen Schmitt-Trigger IC1D, IC1C und IC1F ausgewertet und am OUT-Pin ausgegeben wird. Der Oszillator ist dabei nicht mit dem Erdpotential verbunden, sondern liegt auf dem

Signalpegel – so können über die Masseleitung einkoppelnde Störungen minimiert werden. Das verwendete Bauteil 74HC14 enthält mehr Schmitt-Trigger als eigentlich benötigt werden. Die nicht gebrauchten Schmitt-Trigger IC1A und IC1B liegen auf dem Signalpegel, ihr Ausgangssignal wird allerdings nicht weiter verarbeitet. Der letzte Schmitt-Trigger IC1E ist mit der Masse verbunden und wird ebenfalls nicht verwendet. [29]

Die Schmitt-Trigger IC1D und IC1C erzeugen das eigentliche Rechteck-Ausgangssignal. Dieses Signal wird mit dem Schmitt-Trigger IC1F von dem am OUT-Pin angeschlossenen Mikrocontroller entkoppelt, um zu vermeiden, dass Lastkapazitäten die Messung beeinflussen. Der Widerstand R3 im RC-Oszillator kann zur Anpassung der Frequenz ausgetauscht werden. Um den optimalen Widerstand für die Anwendung in dem zu entwickelten Sensor-Netzwerk zu bestimmen, wurde der Giesomat-Sensor mit verschiedenen Widerständen vermessen. Dabei wurde eine Versorgungsspannung von 3,3 V verwendet, wie sie auch im Sensor-Netzwerk zum Einsatz kommen soll. Die Bodenfeuchte wurde mit einem feuchten Tuch simuliert. Die Grenzen des Frequenzbereichs wurden durch Isolation in Luft (höchste Frequenz) und durch Bedeckung mit dem Tuch (niedrigste Frequenz) ermittelt. Außerdem wurde die Stromaufnahme des Sensors gemessen; sie ist bei hoher Frequenz größer als bei niedriger Frequenz. Tabelle 8 enthält die Ergebnisse der Messreihe.

	100 kΩ	200 kΩ	390 kΩ	820 kΩ	1 MΩ
f_{\max}/kHz	328,7	168,2	83,3	41,61	33,7
f_{\min}/kHz	36,7	15,8	10,4	6,1	3,9
$I_{\max}/\mu\text{A}$	422,9	308,9	276,1	252,4	215,1
$I_{\min}/\mu\text{A}$	266,8	231,1	249,4	241,9	202,7

Tabelle 8: Frequenz- und Strommessung Giesomat-Sensor

Bei einem digitalen RC-Oszillator mit Verwendung des 74HC14 Schmitt-Triggers gilt für Frequenz, Widerstand und Kapazität folgende Gleichung [31]:

$$f = \frac{1}{1,45 \cdot R \cdot C} \quad (2.7)$$

Die umgekehrte Proportionalität von f zu R und C ist auch in Tabelle 8 gut zu erkennen. Die Frequenz nimmt mit steigendem $R3$ ab. Ebenso wird die Frequenz kleiner, wenn der Sensor bedeckt wird, da dann der Kondensator des Sensors eine größere Kapazität hat. Die Stromaufnahme nimmt mit steigendem $R3$ ab. Es zeigt sich, dass bei der Anwendung im Sensor-Netzwerk für den Oszillator-Widerstand $R3$ des Giesomat-Sensors ein großer Widerstand wie etwa $1 \text{ M}\Omega$ am Besten geeignet ist. Hier ist der Stromverbrauch am geringsten und der Frequenzbereich überschaubar. Von Vorteil ist dabei die Möglichkeit der Abspeicherung als 16-Bit unsigned Integer, dadurch wird eine gute Auflösung des Messbereiches erreicht. Eine weitere Erhöhung des Widerstands würde den Frequenzbereich und somit die Auflösung verringern, außerdem wäre die Schaltung durch den hohen Widerstand störungsanfälliger.

2.3.5 Kalibrierung

Vorgehen

Bevor der Giesomat-Bodenfeuchtesensor eingesetzt werden kann, muss er kalibriert werden. Dadurch kann bestimmt werden, wie die Frequenz des Sensors mit der Bodenfeuchte zusammenhängt. Für die Kalibrierung werden Bodenproben mit bekanntem Wassergehalt erstellt. Dabei wird folgendermaßen vorgegangen:

- Erde komplett austrocknen
- Probe mit bekanntem Gewicht und Volumen komplett mit Wasser sättigen
- Gewichtsänderung bestimmen
- Hinzugefügtes Wasser auf restliche Proben umrechnen

Die verwendete Erde wurde aus einer Tiefe von 20 cm dem Boden eines Gartens entnommen. Da das zu entwickelnde Sensor-Netzwerk hauptsächlich dort zum Einsatz kommen soll, werden so die meisten Anwendungsfälle abgedeckt.

Getrocknet wurde die Erde in einem Backofen bei 150 °C über mehrere Stunden. Der Wassergehalt wurde so auf nahezu 0 % gebracht. Mit dieser getrockneten Erde wurde ein Messgefäß gefüllt. Die Erde mit dem Gewicht von 950 g nahm dabei ein Volumen von 913 ml ein. Dieses Volumen wird auch bei den anderen Behältern möglichst eingehalten.

Anschließend wurde die getrocknete Erde mit Wasser vermischt, bis sie komplett gesättigt war. Die Sättigung tritt ein, wenn sich nach dem Vermischen und einer kurzen Wartezeit eine Wasserschicht oben auf der Erde gebildet hat. Dieses Wasser kann von der Erde nicht mehr aufgenommen werden, da bereits alle Poren mit Wasser gefüllt sind. Die Sättigung der Erde war nach dem Hinzufügen von 350 g Wasser erreicht, wodurch sich ein gravimetrischer Wassergehalt ω von

$$\omega = \frac{M_{Wasser}}{M_{Erde}} = \frac{350 \text{ g}}{950 \text{ g}} \approx 0,368 \quad (2.8)$$

ergibt. Die Gartenerde hat also einen maximalen gravimetrischen Wassergehalt von 36,8 %. Der Zustand der vollständigen Sättigung wird nun als Referenz für die anderen Proben verwendet. Ausgehend von diesem wird der Bereich zwischen maximaler Trockenheit (0 %) und kompletter Sättigung (100 %) in 10-%-Intervalle unterteilt. Für diese Abstufungen können nun entsprechende Proben hergestellt werden, indem der gleichen Menge trockener Erde die korrekte Menge Wasser hinzugefügt wird. Die Bodenproben sind in Abbildung 23 dargestellt. Diese Bodenproben mit bekanntem Wassergehalt wurden anschließend mit einem Giesomat-Sensor vermessen. Die Ausgabefrequenz des Sensors wurde mit einem Raspberry Pi 3 ausgewertet [32]. Es wurden drei Messreihen mit demselben Sensor im Abstand von einigen Stunden durchgeführt. Die Messung der Bodenfeuchte ist in Abbildung 24 dargestellt.

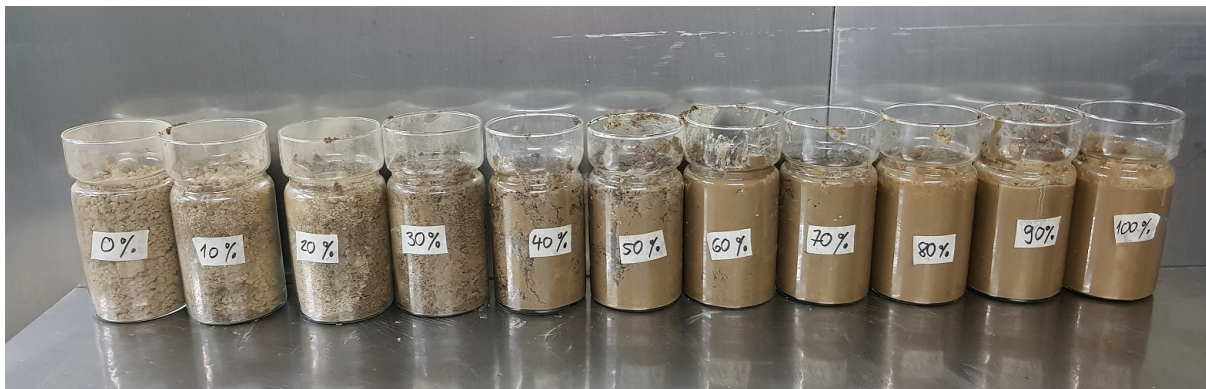


Abbildung 23: Bodenproben mit abgestuftem Wassergehalt

Bei der Messung wurde darauf geachtet, dass der Sensor möglichst in der Mitte des Gefäßes und immer gleich tief in die Erde gesteckt wird. Nach einer kurzen Einschwingzeit wurde die Frequenz des Sensors abgelesen. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 9 aufgeführt.



Abbildung 24: Messung der Bodenfeuchte mit einem Giesomat-Sensor

Probe	M_E/g	M_W/g	$\omega/\%$	$\omega_{rel}/\%$	f_1/Hz	f_2/Hz	f_3/Hz	ω_{rel}/Hz
1	950	0	0	0	9056	8714	7504	8425
2	950	35	3,7	10	9348	7004	6390	7581
3	950	70	7,4	20	9692	6750	6682	7708
4	950	105	11,1	30	3360	5544	4186	4363
5	950	140	14,7	40	4040	5938	4288	4755
6	950	175	18,4	50	4940	5152	4492	4861
7	950	210	22,1	60	3216	3372	3290	3293
8	950	245	25,8	70	4336	3346	3272	3651
9	950	280	29,5	80	2882	3360	3338	3193
10	950	315	33,2	90	2770	3150	3204	3041
11	950	350	36,8	100	3060	3550	3190	3267

Tabelle 9: Versuchsergebnisse der Kalibrierung

Ergebnisse

Aus den drei Messreihen wurde der Mittelwert gebildet. Dieser Frequenzmittelwert f_M wurde in einem Diagramm gegen den relativen gravimetrischen Wassergehalt ω_{rel} aufgetragen. Abbildung 25 zeigt das Diagramm des Frequenzverlaufs.

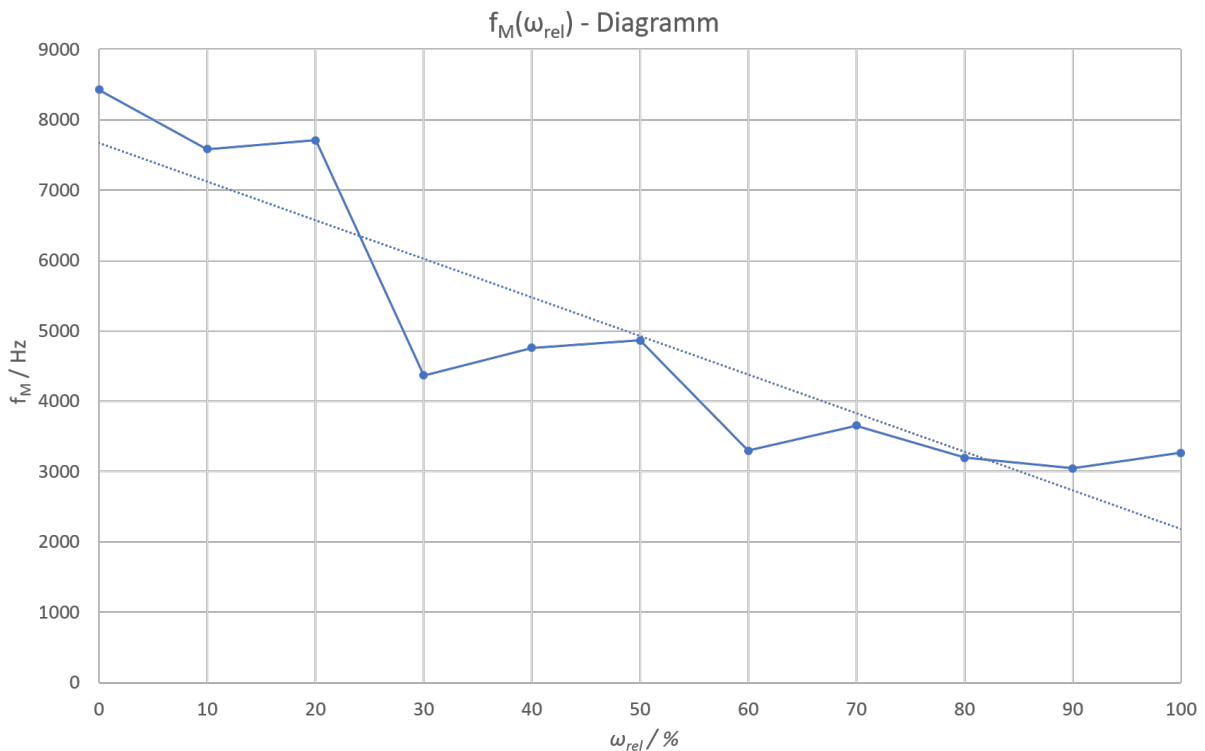


Abbildung 25: Diagramm der Frequenzmessung

Der Verlauf der Frequenzkennlinie kann linear angenähert werden, die entsprechende Ausgleichsgerade ist im Diagramm gepunktet eingezeichnet. Eine vergleichbare Kalibrierung des Sensors wurde in [33] durchgeführt und kommt zu einem ähnlichen linearen Verlauf.

Die Geradengleichung der Ausgleichsgerade wird bestimmt zu

$$f = 7666,2 \text{ Hz} - 54,89 \frac{\text{Hz}}{\%} \cdot \omega_{rel} \quad (2.9)$$

Umgekehrt gilt also für den relativen, gravimetrischen Wassergehalt:

$$\omega_{rel} = \frac{7666,2 \text{ Hz} - f}{54,89 \frac{\text{Hz}}{\%}} \quad (2.10)$$

Mit dieser Formel kann näherungsweise der relative gravimetrische Wassergehalt aus der Frequenz des Giesomat-Sensors bestimmt werden. Eine weitere Umrechnung in den absoluten gravimetrischen Wassergehalt macht hier keinen Sinn, weil die Formel nur für den verwendeten Bodentyp gilt. Da von diesem Bodentyp der Wassergehalt in trockenem und gesättigtem Zustand bekannt ist, kann die tatsächliche Bodenfeuchte mit dem relativen Wassergehalt besser bewertet werden.

Diskussion

Im Zuge der Versuchsdurchführung sind einige Besonderheiten aufgefallen, die bei der Anwendung des Sensors beachtet werden müssen. Obwohl die drei Messreihen alle den gleichen Trend zeigen, gibt es teilweise recht unterschiedliche Werte für denselben Wassergehalt. Eine Ursache dafür ist die Platzierung des Sensors. Abhängig davon, wie dieser in die Erde gesteckt wird, übt die Erde einen unterschiedlichen Druck auf ihn aus, was die Kapazität und somit die Frequenz beeinflusst. Im Rahmen dieses Versuchs war die Platzierung des Sensors nicht immer exakt reproduzierbar, sodass es zu Schwankungen gekommen ist.

Eine weitere Ursache für die Abweichungen ist die für die Bodenprobe verwendete Erde. Sie war in ihrer Dichte und Beschaffenheit nicht immer homogen. Dies führt durch Unregelmäßigkeiten bei Volumen und Gewicht zu einer Abweichung von dem berechneten Wassergehalt. Somit können die gemischten Bodenproben einen anderen tatsächlichen Wassergehalt aufweisen. Die Proben wurden vielleicht korrekt gemessen, jedoch passt der gemessene Wert dann nicht zu dem berechneten Wassergehalt und die Messreihe weicht von der Gerade ab. Die in diesem Versuch bestimmte Formel 2.10 zur Berechnung der Bodenfeuchte ist also definitiv nur eine Näherung und sollte auch bei der Anwendung des Sensors so verwendet werden. Die Platzierung der verwendeten Giesomat-Sensoren sollte immer mit möglichst gleichem Druck und gleicher Tiefe erfolgen. Im Betrieb sollte dann die gemessene Bodenfeuchte mit den tatsächlichen Gegebenheiten verglichen werden. Falls hier eine deutliche Diskrepanz auftritt, sollte die Kalibrierung erneut durchgeführt werden.

Der Giesomat-Sensor ist nun einsatzbereit. Das OUT-Signal wird an einen digitalen Input-Pin des MSP430 gelegt, wodurch der Mikrocontroller die Frequenz erfassen kann.

Kapitel 3

Netzwerk

Mit der in Kapitel 2 vorgestellten Sensor-Netzwerk-Plattform wird nun ein drahtloses Sensor-Netzwerk entwickelt. Dabei soll das System speziell auf die Anwendung im Smart Gardening ausgelegt werden. In diesem Kapitel wird die Erstellung eines Netzwerk-Konzepts und die anschließende Umsetzung beschrieben.

3.1 Anforderungen

An das zu entwickelnde System werden folgende Anforderungen gestellt:

- Gewährleistung der Energieautarkie des Systems
- Bidirektionale Kommunikation der Netzwerkteilnehmer
- Auslegung des Systems auf Smart Gardening
- Messwerterfassung mit Zeitangabe
- Bereitstellung der Daten via Smartphone-App
- Einsatz von mehr als 10 Sensorgeräten

Diese Anforderungen sollen unter Verwendung der bestehenden Sensor-Netzwerk- Plattform umgesetzt werden. Zu Beginn dieser Bachelorarbeit war die Plattform so weit entwickelt, dass sie die Messwerte erfassen, sammeln und senden konnte. Im Zuge der Entwicklung des Sensor-Netzwerks wurde deshalb auch hier die Software erweitert, insbesondere um die Möglichkeit der bidirektionalen Kommunikation. Für die Illustration der Netzwerke wird im Folgenden eine vereinfachte Darstellung der Sensorgeräte verwendet (Abbildung 26). Sie enthält auf der linken Seite das Energieversorgungsmodul mit Energieerzeugung und Energiespeicher, auf der rechten Seite ist das Sensormodul mit den drei Messparametern dargestellt. Enthalten ist auch eine Antenne zum Senden und Empfangen.

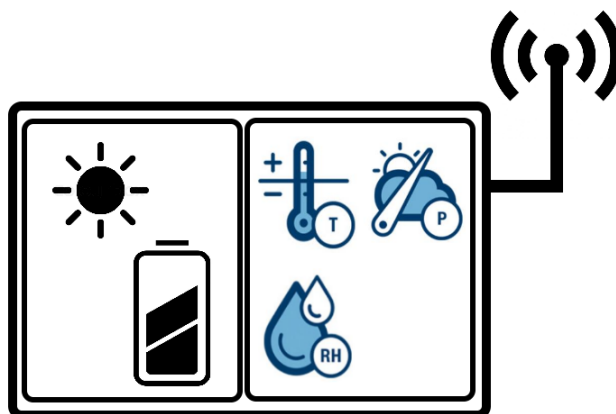


Abbildung 26: Symbolbild: Sensorgerät

3.2 Topologie

Am Anfang der Entwicklung des Sensor-Netzwerks steht die Konzeption der Topologie. Durch die Festlegung auf eine Topologie wird sichergestellt, dass die Netzwerkteilnehmer sicher und koordiniert kommunizieren können – bei drahtlosen Netzwerken keineswegs eine triviale Aufgabe. Zunächst werden zwei für die Smart-Gardening-Anwendung besonders interessante Topologien vorgestellt und bewertet.

3.2.1 Mesh-Netzwerk

In einem Mesh-Netzwerk beziehungsweise vermaschten Netzwerk kann jeder Teilnehmer mit mehreren (teilvermascht) oder allen (vollvermascht) anderen Teilnehmern kommunizieren. Jeder Teilnehmer stellt daher einen eigenständigen Netzwerkknoten dar und hat dieselben Funktionen. Bei einer Vollvermaschung mit N Teilnehmern beträgt die Anzahl der Verbindungen $N(N - 1)$. In Abbildung 27 ist ein Mesh-Netzwerk dargestellt. [34]

Die Vorteile eines Mesh-Netzwerks sind:

- Ausfallsicherheit
- Dezentralisation
- Hohe Reichweite

Für das Sensor-Netzwerk ist der Aspekt der Reichweite besonders relevant. Da jeder Teilnehmer mit jedem anderen kommunizieren kann, kann das Netzwerk beliebig weit „gestreckt“ werden – solange immer eine Verbindung zwischen zwei Teilnehmern besteht, bleibt das Netzwerk intakt. Dadurch kann eine große Fläche mit drahtlosen Sensormodulen abgedeckt werden. Das Netzwerk hat dabei keine zentrale Verwaltung, da die Teilnehmer alle dieselben Funktionen haben. Dadurch ist es dezentral und ausfallsicher: das Ausfallen einzelner

Teilnehmer stört den Rest des Netzwerkes nicht, solange alle anderen Verbindungen noch bestehen können [35]. Die Verwendung eines Mesh-Netzwerkes hat auch einige Nachteile:

- hoher Energieverbrauch
- aufwändige Koordination
- dezentrale Daten

Durch die große Anzahl an Verbindungen wird viel kommuniziert, das heißt der Energieverbrauch ist relativ hoch. Das ist für das Sensor-Netzwerk ein Problem, da es nicht viel Energie zur Verfügung hat. Außerdem ist die Koordination der Netzwerkteilnehmer, besonders bei drahtloser Kommunikation, sehr aufwändig. Speziell bei der Anwendung des Sensor-Netzwerkes kommt noch dazu, dass die gesammelten Messwerte jeweils nur auf einem Teilnehmer gespeichert sind. Die Sensormodule haben zu wenig Speicher, um alle Daten speichern zu können. Daher könnte man bei Verwendung dieser Topologie immer nur auf einen Teil der Daten zugreifen.

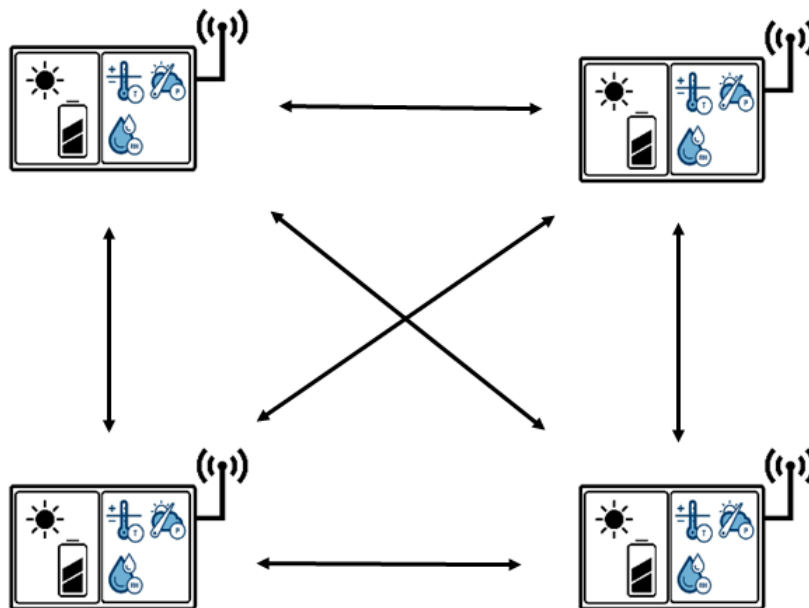


Abbildung 27: Mesh-Netzwerk mit 4 Teilnehmern, vollvermascht

Hidden Terminal Problem

Durch die räumliche Verteilung der Teilnehmer eines Mesh-Netzwerkes können bei drahtloser Kommunikation Probleme auftreten. Es kann vorkommen, dass zwei Teilnehmer jeweils in Reichweite eines dritten Teilnehmers sind und mit diesem kommunizieren können, aber aufgrund der größeren Distanz nicht miteinander in Verbindung treten können. In Abbildung 28 ist dies mit den Teilnehmern A, B und C dargestellt. A und C sind jeweils in Reichweite

von B und wollen mit B kommunizieren, sind aber gegenseitig nicht in Reichweite für eine Kommunikation. Die Funkschnittstellen der Sensormodule stellen vor dem Senden mit dem CSMA-Verfahren (Carrier Sense Multiple Access) sicher, dass der Kanal frei ist. Dabei wird das Medium angehört und erst dann gesendet, wenn gerade kein anderer Teilnehmer sendet. Andernfalls wird mit dem Senden gewartet und kurze Zeit später ein neuer Versuch gestartet. Da die Teilnehmer A und C nicht in der gegenseitigen Kommunikationsreichweite sind, können sie nicht erkennen, ob der Kanal durch den jeweils anderen belegt ist. Daher kann es dazu kommen, dass beide gleichzeitig anfangen zu senden, um mit B zu kommunizieren. Das führt dazu, dass bei B zwei Datenpakete gleichzeitig ankommen, was eine Auswertung der Daten unmöglich macht – die Daten gehen verloren. [36]

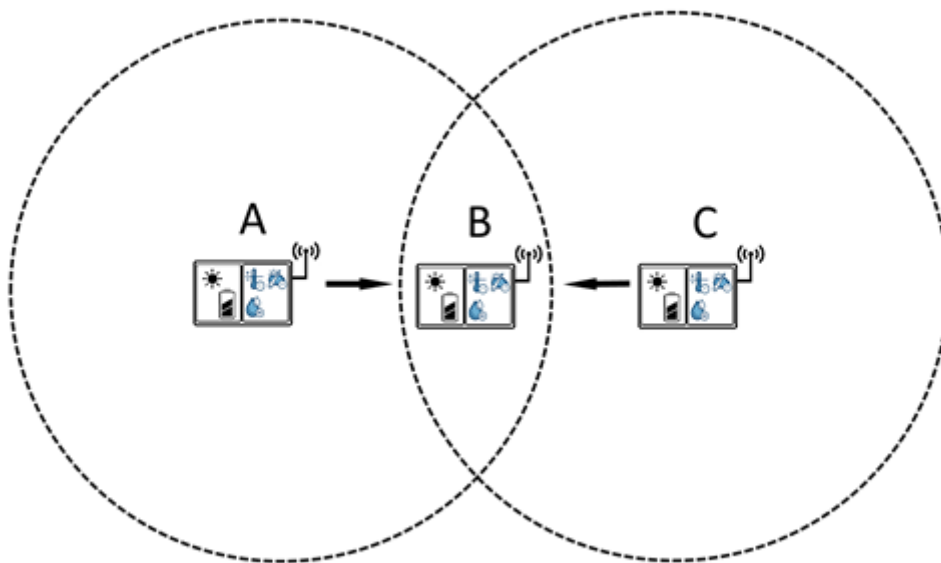


Abbildung 28: Hidden Terminal Problem

Bei Verwendung der Mesh-Topologie für das drahtlose Sensor-Netzwerk muss dieses sogenannte „Hidden-Terminal“-Problem berücksichtigt werden. Als Lösung bietet sich die Verwendung von Sendefreigaben vor einer Kommunikation an. Hier kann zum Beispiel das RTS/CTS-Handshake-Verfahren angewendet werden (Request to Send, Clear to Send). [37]

3.2.2 Stern-Netzwerk

Bei der Stern-Topologie gibt es einen zentralen Knoten, der mit allen Netzteilnehmern verbunden ist. Jeder Teilnehmer kann nur mit dieser „Basisstation“ kommunizieren. Abbildung 29 zeigt ein Stern-Netzwerk. Die Vorteile der Topologie sind:

- einfache Vernetzung
- einfache Erweiterung

- zentrale Verwaltung

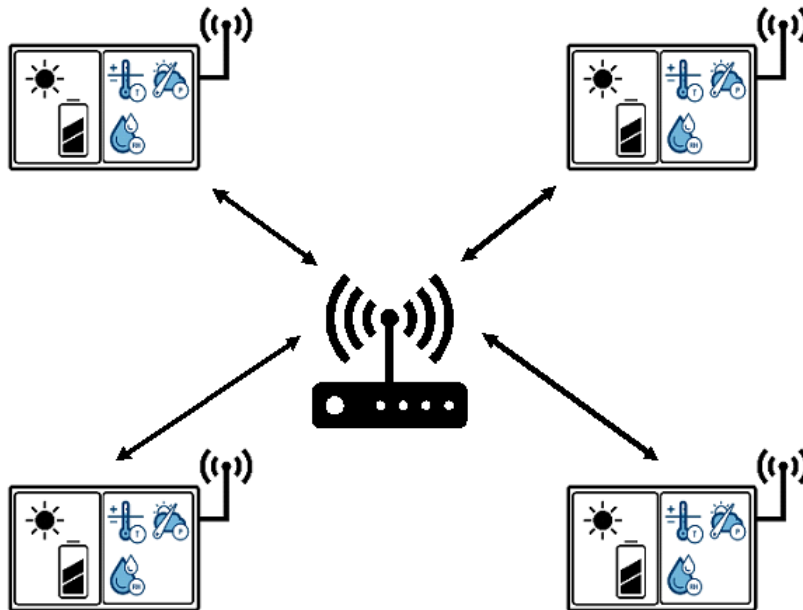


Abbildung 29: Stern-Netzwerk mit 4 Teilnehmern und Basisstation

Da das Netzwerk von der Basisstation verwaltet wird, lassen sich recht einfach zusätzliche Teilnehmer hinzufügen. Durch die Einfachheit der Netzstruktur wird der Kommunikationsaufwand reduziert, wodurch die Störanfälligkeit verringert wird. Für das Sensor-Netzwerk hat die Verwendung einer Stern-Topologie mit Basisstation den Vorteil, dass die Daten der Sensorgeräte dort zentral gesammelt und bereitgestellt werden können. Die Nachteile eines Stern-Netzwerks sind:

- begrenzte Reichweite
- Ausfallrisiko
- Notwendigkeit eines zusätzlichen Geräts

Vor allem bei drahtloser Kommunikation muss darauf geachtet werden, dass sich alle Teilnehmer in Reichweite der Basisstation befinden. Bei dem drahtlosen Sensor-Netzwerk wird dadurch die maximal abdeckbare Fläche begrenzt. Kritisch ist auch ein Ausfall der Basisstation – dieser führt zum Ausfall des kompletten Netzwerks. Auch bei Verwendung der Stern-Topologie bei drahtlosen Netzwerken muss die Kommunikation koordiniert werden, um Kollisionen durch das gleichzeitige Senden mehrerer Teilnehmer zur Basisstation zu vermeiden. Verschiedene Zugriffsverfahren gewährleisten, dass immer nur ein Teilnehmer mit der Basisstation kommuniziert und die anderen in dieser Zeit abwarten. Die Umsetzung der Basisstation erfordert ein zusätzliches Gerät. Speziell bei der Verwendung einer anderen Hardware als die Netzwerkteilnehmer wird das System noch komplexer. [38]

3.2.3 Auswahl der Topologie

Für das zu entwickelnde drahtlose Sensor-Netzwerk soll nun eine der vorgestellten Topologien ausgewählt und umgesetzt werden. Hierfür werden die Vor- und Nachteile, die beim Einsatz der jeweiligen Topologie entstehen, gegenübergestellt und in Tabelle 10 zusammengefasst.

	Mesh-Topologie	Stern-Topologie
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - hohe Reichweite - Ausfallsicherheit - keine zusätzliche Hardware 	<ul style="list-style-type: none"> - Kommunikation einfach umzusetzen - geringer Energieverbrauch - Zentrale Datensammlung - Schnittstelle für Datenanzeige
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - aufwändige Kommunikation - Daten dezentral verteilt - anfällig für Störungen 	<ul style="list-style-type: none"> - begrenzte Reichweite - Ausfallrisiko der Basisstation - zusätzliche Hardware

Tabelle 10: Vorteile und Nachteile der Topologien für das Sensor-Netzwerk

Anhand dieser Informationen wird schließlich die *Stern-Topologie* für das zu entwickelnde Sensor-Netzwerk ausgewählt.

Es zeigt sich, dass die Vorteile der Stern-Topologie besonders gut zu den Anforderungen an das Sensor-Netzwerk passen. Letztendlich geht es darum, dass dem Anwender des Systems die gesammelten Daten möglichst einfach und vollständig zur Verfügung gestellt werden. Die Verwendung einer zentralen Basisstation ist für diese Anwendung ideal. Die Basisstation kann dabei auch mit anderer Hardware umgesetzt werden, muss aber die gleiche Funkschnittstelle verwenden wie die Sensormodule. Dadurch kann in der Basisstation eine Schnittstelle für den Anwender implementiert werden, die die per 868-MHz-Funk gesammelten Daten mit einer anderen, verbreiteteren Übertragungstechnik (zum Beispiel Bluetooth oder WLAN) bereitstellt. Von Vorteil ist dabei, dass die Basisstation die Daten aller Netzwerkteilnehmer sammelt und somit die Daten des kompletten Systems vollständig anzeigen kann. Die Nachteile der Stern-Topologie sind verkräftbar und werden von den Vorteilen deutlich überwogen. Die Mesh-Topologie bietet einige sehr interessante Vorteile bei der Anwendung für das Sensor-Netzwerk. Allerdings ist die Kommunikation mit so vielen Teilnehmern sehr komplex und schwierig umzusetzen, besonders bei der nicht sehr leistungsfähigen Sensor-Netzwerk-Plattform. Zusätzlich entsteht ein hoher Energieverbrauch durch die vielen Sendevorgänge, der in dieser Low-Power-Anwendung einfach nicht tragbar ist.

Um eine Stern-Topologie mit Basisstation umsetzen zu können, muss der Kommunikationszugriff der Netzwerkteilnehmer auf die Basisstation geregelt werden. Dafür wird ein Zugriffsverfahren eingesetzt, auf dessen Basis ein Kommunikationsprotokoll entworfen wird. Darum geht es im nächsten Abschnitt.

3.3 Kommunikation

Die Kommunikation aller Netzwerkteilnehmer findet auf dem 868-MHz-Kanal statt. Somit benutzen alle Teilnehmer das selbe Übertragungsmedium, was bei gleichzeitigem Senden zu Kollisionen führen kann. Um dies zu vermeiden, wird ein Zugriffsverfahren implementiert und ein Funkprotokoll entwickelt.

3.3.1 Zugriffsverfahren

Für drahtlose Kommunikation gibt es mehrere Zugriffsverfahren. Folgende werden für das Sensor-Netzwerk in Betracht gezogen:

- TDMA (Time Division Multiple Access)
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- CDMA (Code Division Multiple Access)
- SDMA (Space Division Multiple Access)
- ALOHA

Die Eigenschaften dieser Zugriffsverfahren werden nachfolgend genauer untersucht.

TDMA: Bei dem TDMA-Verfahren übertragen die Teilnehmer ihre Daten nacheinander in getrennten Zeitschlitzten („Zeitslots“). Dadurch sendet immer nur ein Teilnehmer und es kann nicht zu Kollisionen kommen. Um das Einhalten der Zeitschlitzte zu gewährleisten, müssen die Teilnehmer alle miteinander synchronisiert werden. Abbildung 30 stellt das Prinzip von TDMA dar. In getrennten Zeitschlitzten senden verschiedene Teilnehmer ihre Daten, in diesem Zeitraum ist also ein Signalpegel vorhanden. [39]

FDMA: Hier wird das benutzte Frequenzband in einzelne kleinere Kanäle aufgeteilt und den Teilnehmern zugewiesen. So kann bei gleichzeitigem Senden durch den verwendeten Kanal festgestellt werden, welcher Teilnehmer welche Daten gesendet hat. Abbildung 31 zeigt die Aufteilung des Frequenzbandes. Die Teilnehmer senden gleichzeitig in getrennten Frequenzkanälen. Der Signalpegel ist dabei um die Kanalfrequenz herum verteilt. [40]

CDMA: Das CDMA-Verfahren weist jedem Teilnehmer eine unterschiedliche Codierung des Nutzsignals zu. Dabei wird von allen Teilnehmern der selbe Frequenzbereich genutzt. Durch die verschiedene Codierung können die Daten den Teilnehmern zugeordnet werden. [41]

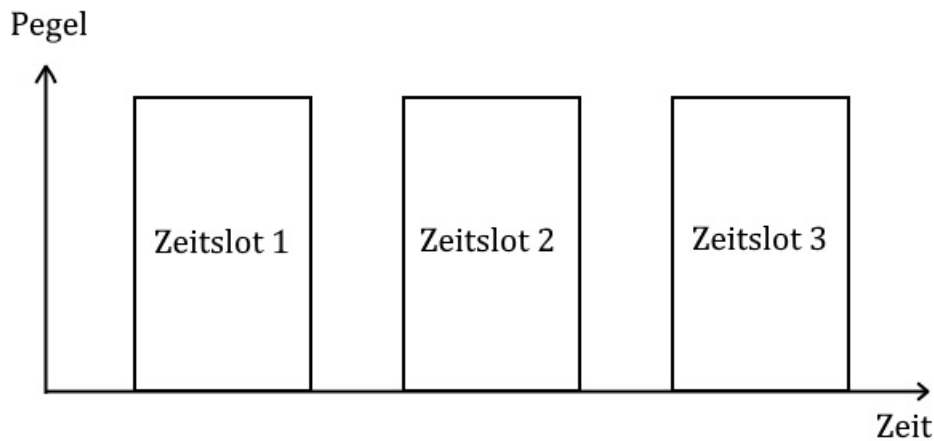


Abbildung 30: Prinzip des TDMA-Verfahrens, frei nach [39]

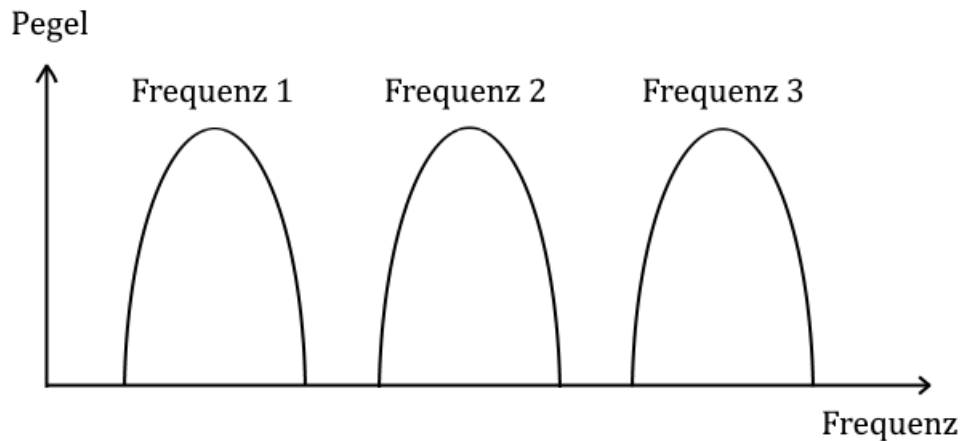


Abbildung 31: Prinzip des FDMA-Verfahrens, frei nach [40]

SDMA: Die Signale der Teilnehmer werden auf dem selben Frequenzband übertragen, jedoch mit unterschiedlichen Polarisierungsebenen. Mit einer polarisationsselektiven Antenne können die Signale dann zugeordnet werden. [42]

ALOHA: Das ALOHA-Verfahren gehört zu den TDMA-Verfahren. Die Teilnehmer senden zu einem beliebigen Zeitpunkt ihre Daten und erhalten bei Erfolg eine Bestätigung des empfangenden Teilnehmers. Senden mehrere Teilnehmer gleichzeitig, gehen die Daten verloren und der Verlust wird durch das Ausbleiben der Bestätigung erkannt. Nach einer zufälligen Wartezeit wird ein erneuter Versuch unternommen. Das Verfahren kann synchronisiert oder unsynchronisiert verwendet werden, das heißt die Teilnehmer senden zu einem beliebigen Zeitpunkt (unsynchronisiert) oder in einem festgelegten Zeitschlitz (synchronisiert). Abbildung 32 zeigt die Anwendung des ALOHA-Verfahrens mit vier Sendern. Die grauen Pakete wurden durch Kollisionen mit anderen Teilnehmern nicht übertragen und werden verworfen. Die weißen Pakete hingegen wurden erfolgreich, ohne Kollision, übertragen. [43]

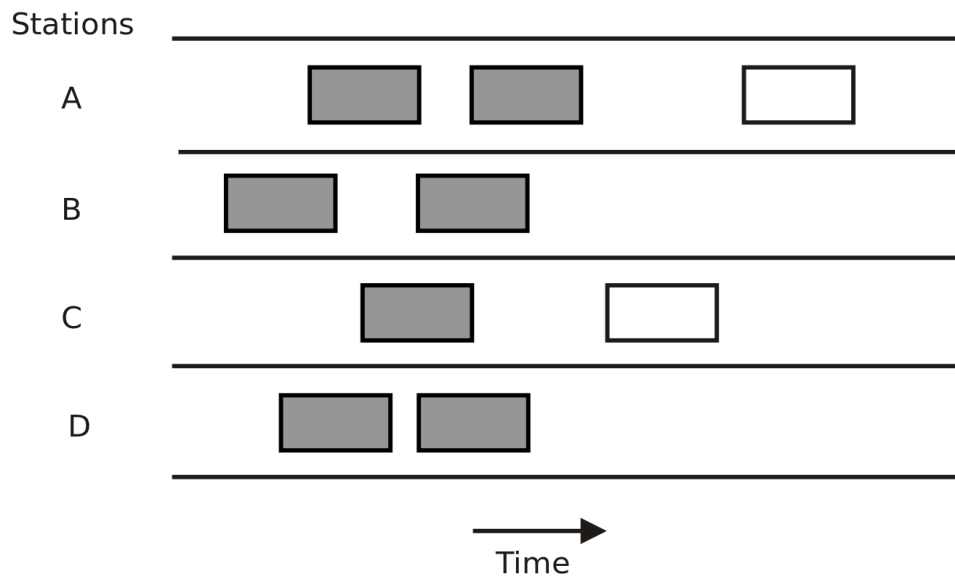


Abbildung 32: Aloha-Verfahren, unsynchronisiert [44]

Bei der Auswahl des Zugriffsverfahrens müssen folgende Eigenschaften des Sensor-Netzwerks berücksichtigt werden:

- die Zuordnung der Daten zum Messzeitpunkt muss möglich sein
- der Sendeintervall der Sensormodule kann einige Stunden betragen
- die Basisstation hat nur eine 868-MHz-Funkschnittstelle

Für diese Anforderungen ist das *TDMA-Verfahren* am Besten geeignet. Es ermöglicht die zeitliche Zuordnung der Daten und ist einfach umzusetzen. Der im Betrieb des Sensor-Netzwerks relativ große Sendeintervall von einigen Stunden ermöglicht es, relativ viele Teilnehmer an das Netzwerk anzubinden. Die zuvor beschriebene Hidden-Terminal-Problematik wird durch die Verwendung von Zeitschlitzten umgangen.

Die Verfahren FDMA und SDMA scheiden allein schon deshalb aus, weil die verwendete Funkschnittstelle vom Typ SPSGRF-868 immer nur auf einer Frequenz empfangen kann und nicht polarisationsselektiv ist. Die Verwendung mehrerer Funkschnittstellen an der Basisstation wird nicht in Betracht gezogen.

Die Verfahren CDMA und ALOHA können nicht verwendet werden, da die Messwerte keiner Zeit zugeordnet werden können. Bei einer zusätzlichen Synchronisation der Netzwerkteilnehmer wäre dies möglich, jedoch ist in diesem Fall die Anwendung des TDMA-Verfahrens praktikabler, da die Sendefrequenz recht niedrig ist.

Auf Basis des ausgewählten TDMA-Verfahrens wird nun ein Kommunikationsprotokoll für das Sensor-Netzwerk entworfen.

3.3.2 Protokoll

Die Verwendung des TDMA-Verfahrens setzt voraus, dass die Netzwerkteilnehmer synchronisiert sind. Als Zeitvorgabe wird hierfür die Zeit der Basisstation verwendet. Die Zeit kann in der Echtzeituhr *AM1815* des Sensormoduls eingestellt werden, die im Energiesparmodus eine Abweichung von ± 16 ppm aufweist (ungefähr 1,4 Sekunden pro Tag). [45]

Für die Einrichtung des Netzwerks muss es deshalb eine „Anmeldephase“ geben, in welcher der anzumeldende Teilnehmer eine Zeitangabe von der Basisstation erhält. Außerdem sendet der Teilnehmer seine ID, welche die Basisstation abspeichert und so später dieser ID die passenden Daten zuordnen kann. Die Anmeldephase wird manuell durch einen Knopfdruck ausgelöst und muss für jeden Teilnehmer durchgeführt werden. Abbildung 33 zeigt ein Sequenzdiagramm der Anmeldephase. Die Basisstation stellt dabei den Master dar, die Sensorgeräte sind die Slaves.

Im laufenden Betrieb senden die Sensorgeräte nur in ihrem zugewiesenen Zeitschlitz. Vor dem Senden wird geprüft, ob alle Voraussetzungen erfüllt sind: vorgegebene Anzahl an Messwerten gesammelt, genügend Energie vorhanden und Zeitslot erreicht. Die Basisstation schaltet kurze Zeit vor Beginn des Zeitschlitzes auf Empfangsmodus und empfängt die gesendeten Daten. Anschließend prüft sie, ob die Daten komplett sind und ob es Übertragungsfehler gibt. Falls nicht, wird eine Bestätigung an das Sensorgerät gesendet, welches nach dem Senden der Daten direkt in den Empfangsmodus wechselt, um die Bestätigung zu erhalten. Nach dem Empfang der Bestätigung setzt das Sensorgerät die Datensammlung fort. Auf diese Weise senden zyklisch alle Sensorgeräte nacheinander ihre Messwerte an die Basisstation.

Bei einer Übertragungsstörung erkennt die Basisstation, dass die Daten nicht korrekt übertragen worden sind. In diesem Fall wird keine Bestätigung gesendet, und das Sensorgerät sendet nach einer festgelegten Wartezeit unaufgefordert die Daten erneut. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis das Datenpaket erfolgreich gesendet wurde. Falls kein erfolgreiches Senden möglich ist, wird nach einer bestimmten Anzahl an Versuchen abgebrochen, um Energie zu sparen. Das Datenpaket geht in diesem Fall verloren.

In Abbildung 34 ist die Kommunikation im laufenden Betrieb des Systems dargestellt. Der untere Teil des Sequenzdiagramms zeigt das Verhalten bei einer Übertragungsstörung.

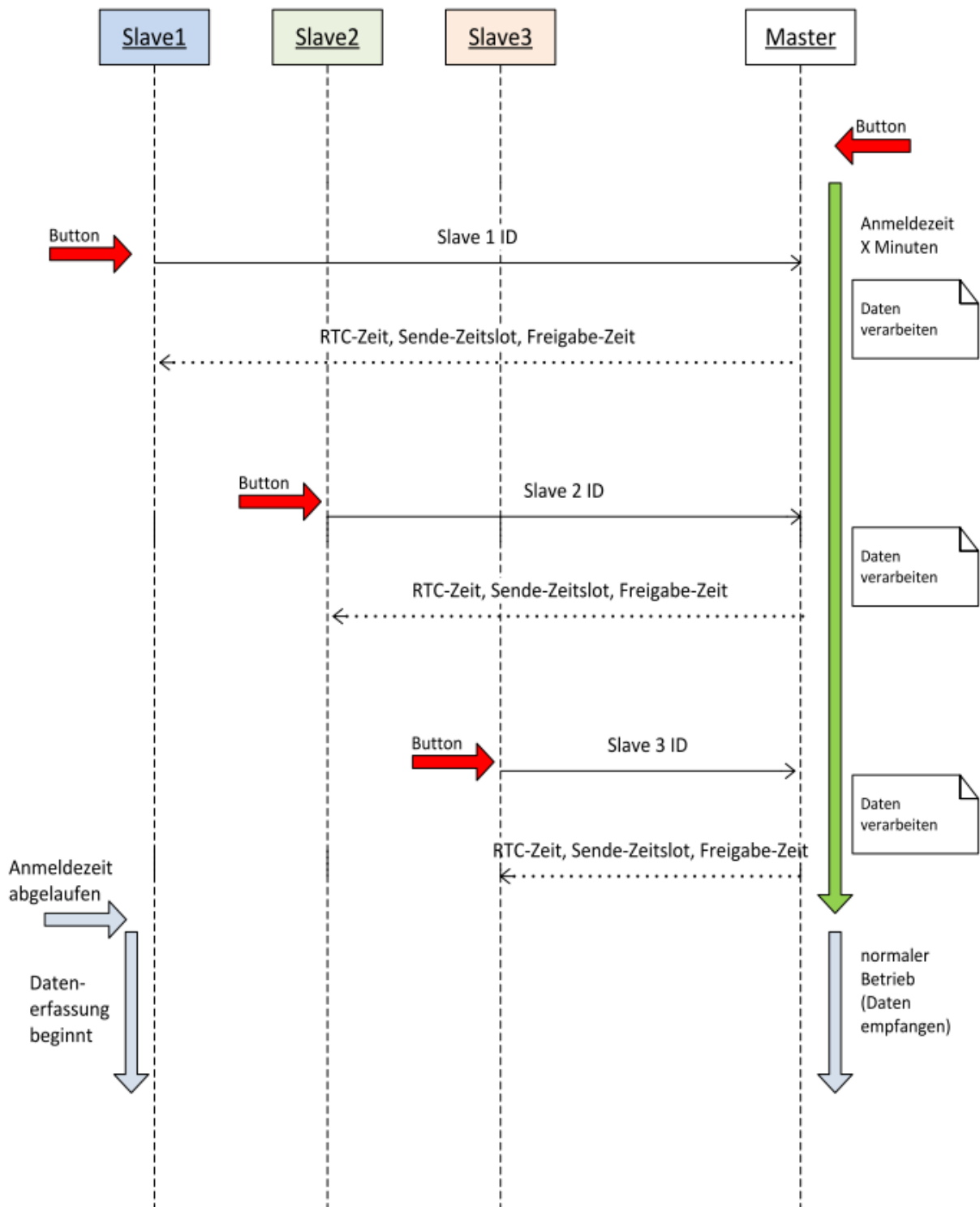


Abbildung 33: Sequenzdiagramm der Anmeldephase

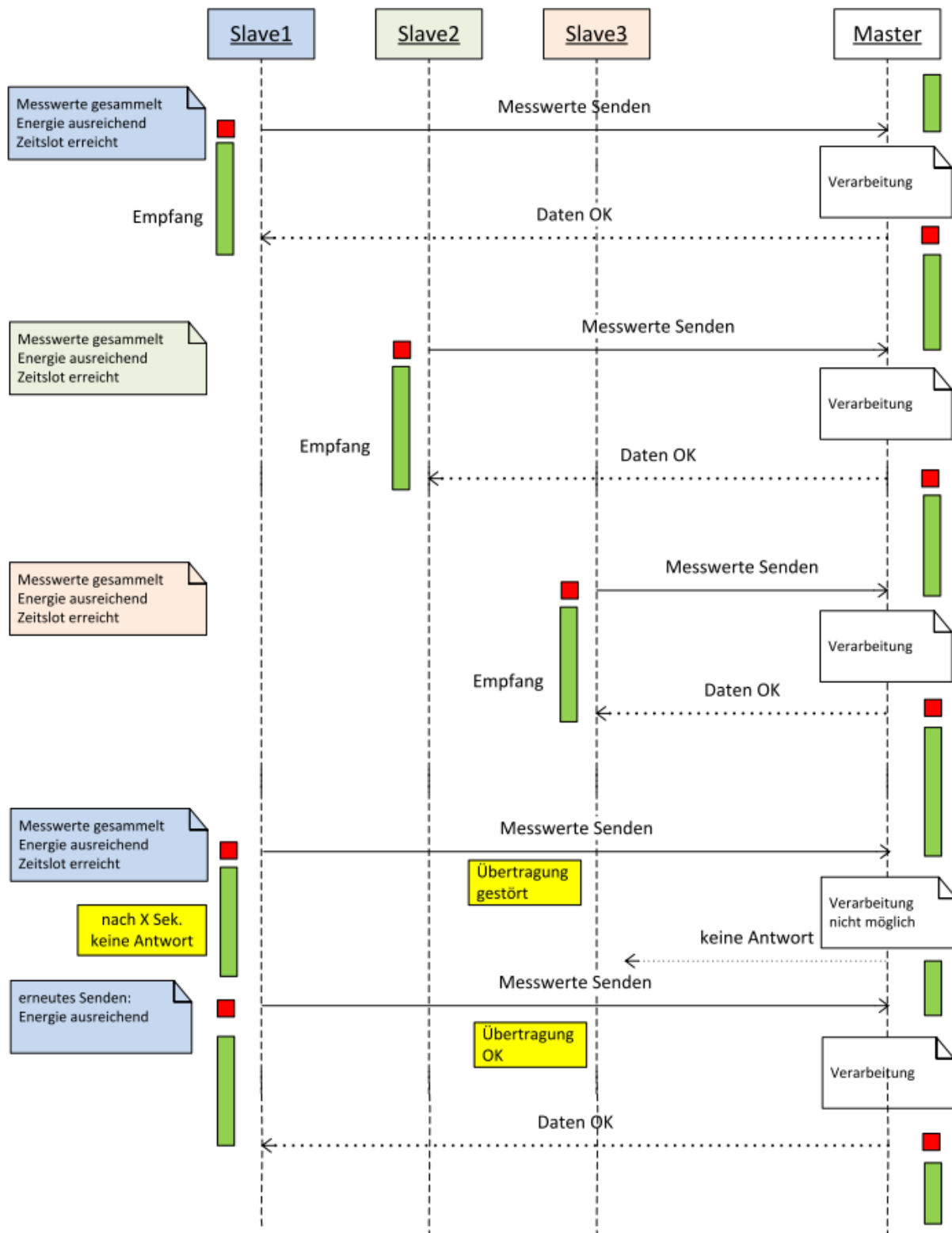


Abbildung 34: Sequenzdiagramm der Betriebsphase

3.4 Basisstation

Für die Umsetzung der ausgewählten Stern-Topologie wird eine Basisstation benötigt. Die Entwicklung der Basisstation wird in diesem Abschnitt beschrieben.

3.4.1 Konzept

Die Basisstation ist das zentrale Element des Sensor-Netzwerks. Sie muss die Sensorgeräte synchronisieren, die Zeitschlitze koordinieren, die Daten speichern und schließlich die Daten bereitstellen. Die Basisstation muss nicht zwingend mit der gleichen Hardware wie die Sensorgeräte umgesetzt werden – einzige Voraussetzung ist eine kompatible Funkschnittstelle. Durch die Verwendung drahtloser Kommunikation gibt es bezüglich der Reichweite einen gewissen Spielraum. Die Basisstation als Koordinator und Datensammler muss dabei nicht unbedingt direkt im Garten platziert werden. Aus diesem Grund wird bei der Entwicklung davon ausgegangen, dass die Basisstation über eine dauerhafte Energieversorgung verfügt, etwa durch eine Steckdose an der Hauswand. Für eine mobilere Umsetzung wäre auch ein Lithium-Akku mit ausreichend großer Solarzelle vorstellbar.

Die Sensorgeräte werden nach der Anmeldephase im Garten in Reichweite der Basisstation platziert. Die gesendeten Daten werden von der Basisstation empfangen, verarbeitet und gespeichert. Die Basisstation fungiert als Schnittstelle zum Anwender und stellt diesem die aufbereiteten Daten zur Verfügung. Der Zugang zum System ist somit sehr einfach gehalten und ermöglicht dem Anwender einen unkomplizierten Umgang mit dem Sensor-Netzwerk.

3.4.2 Hardware

Folgende Anforderungen werden an die Hardware der Basisstation gestellt:

- Anbindung der Funkschnittstelle SPSGRF-868 möglich, die auch von den Sensorgeräten verwendet wird
- ausreichende Leistung für das Verarbeiten und Speichern der Daten
- einfach zugängliche Schnittstelle für Anwender: ideal wäre die Möglichkeit der Kommunikation mit einer Smartphone-App
- möglichst einfache Programmierung
- ausreichender Speicherplatz für die dauerhafte Aufzeichnung der Daten

Um eine problemlose Kommunikation gewährleisten zu können, soll die Basisstation die gleiche Funkschnittstelle SPSGRF-868 wie die Sensorgeräte verwenden. Für die Anbindung der Funkschnittstelle ist bei der Basisstation ein SPI-Bus erforderlich. [13]

Für die Hardware wurde schließlich ein *Raspberry Pi 3 Model B* ausgewählt, der die gestellten Anforderungen erfüllt und folgende Vorteile bietet:

- leistungsfähiger Quad-Core ARM Cortex-A53 Prozessor
- linuxbasiertes Betriebssystem mit großer Community
- integrierte WLAN- und Bluetooth-Funkschnittstelle
- 27 GPIO-Ports für zusätzliche Peripherie
- große Speicherkapazität durch Verwendung von MicroSD
- USB-, Ethernet- und HDMI-Schnittstellen

Der Raspberry Pi 3 ist ein kompakter Ein-Platinen-Computer, der von der englischen Stiftung *Raspberry Pi Foundation* entwickelt wurde. Der Prozessor BCM2837 bietet ausreichend Leistung für die Funktionen der Basisstation. Dazu kommt der von einer MicroSD-Karte bereitgestellte Speicher, der das Speichern von großen Datensätzen ermöglicht. Besonders nützlich ist die Verfügbarkeit einer WLAN- und einer Bluetooth-Schnittstelle. Mit diesen Schnittstellen können die Daten direkt an das Smartphone übertragen werden, das mit einer noch zu entwickelnden App die Daten des Sensor-Netzwerks anzeigen soll. Auf dem Raspberry Pi 3 läuft ein linuxbasiertes Betriebssystem, das von einer großen Online-Community unterstützt wird – die Entwicklungsarbeit wird somit vereinfacht. Durch die Verwendung eines Betriebssystems können mehrere Anwendungen gleichzeitig bearbeitet werden – hierdurch lässt sich zum Beispiel die Datenübertragung per Bluetooth als separates Programm realisieren, was die Komplexität der Sensor-Netzwerk-Anwendung verringert. Abbildung 35 zeigt die Platine des Raspberry Pi 3. [46]

Der Raspberry Pi 3 ist nicht speziell auf Energiesparsamkeit ausgelegt. Tabelle 11 legt die Stromaufnahme diverser Modelle dar, unter anderem auch von dem in dieser Bachelorarbeit verwendeten, aktuellen Modell 3B. Die Stromaufnahme wurde in 3 Zuständen gemessen: im Idle-Zustand ohne Auslastung, beim Anzeigen einer Desktopumgebung und beim Abspielen eines 1080p-Videos. [47]

	Zero	A+	A	B+	B	Pi2B	Pi3B
	I/mA	I/mA	I/mA	I/mA	I/mA	I/mA	I/mA
Idling	100	100	140	200	360	230	230
Desktop	140	130	190	230	400	310	310
1080p Video	140	140	200	240	420	290	290

Tabelle 11: Stromaufnahme verschiedener Raspberry-Pi-Modelle [47]

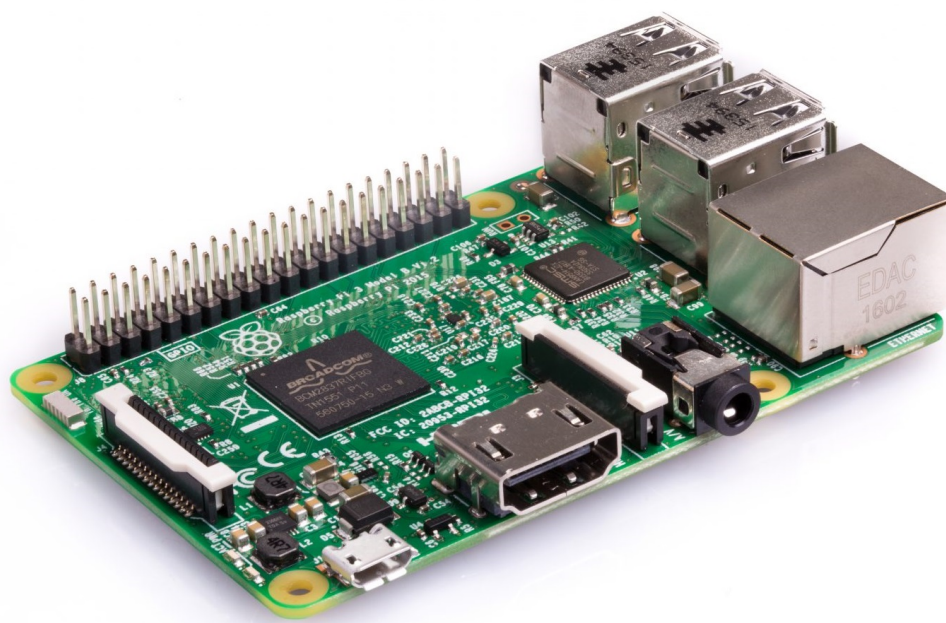


Abbildung 35: Raspberry Pi 3 Model B [46]

Alle Raspberry Pi werden mit einer Spannung von 5 V versorgt, sodass sich für das Modell 3B eine Leistung im Bereich von 1,15 W bis 1,55 W ergibt. Im Dauerbetrieb würde das einer Energiemenge von 27,6 Wh bis 37,2 Wh pro Tag entsprechen. Falls also gerade keine Steckdose für die Basisstation verfügbar ist, müsste diese Energiemenge von einem Akku bereitgestellt werden, beispielsweise von einer USB-„Powerbank“.

3.4.3 Software

Als Betriebssystem wird *Raspbian Stretch* verwendet, das auf *Debian 9 Stretch* basiert und speziell für den Raspberry Pi 3 angepasst wurde. Für die Entwicklung der Software der Basisstation wurde die grafische Nutzeroberfläche verwendet, auf die per Remote Desktop über Windows zugegriffen wurde.

Die Bibliotheken der SPSGRF-868-Funkschnittstelle sind nur in C verfügbar, sodass als Programmiersprache für die gesamte Software C ausgewählt wurde. Die Verwendung der Funkschnittstelle erfordert einen SPI-Treiber für den Raspberry Pi. Ausgewählt wurde dafür die Bibliothek *bcm2835 v1.55*, die Funktionen für den Zugriff auf GPIO und SPI enthält. [48]

Die Software der Basisstation wird als Konsolenanwendung programmiert. Hierfür wird die Entwicklungsumgebung (Integrated Development Environment, IDE) *Geany v1.32* verwendet. Dabei handelt es sich letztendlich um einen Texteditor, der die Programmdateien organisiert und die Kompilierung via Kommandozeile vornimmt [49]. Bei der Programmierung wird die Versionsverwaltungssoftware *Git 2.11.0* verwendet. Als Backup für die programmierte Software wird die Online-Plattform *GitHub* benutzt. [50] [51]

Der vereinfachte Programmablauf der Basisstation ist in Abbildung 36 dargestellt. In dem Idle-Zustand wird im Sekundentakt die Zeit aktualisiert und geprüft, ob ein Zeitslot beginnt. Falls gerade kein Zeitslot beginnt, kann ein Knopf an der Basisstation gedrückt werden, um einen Anmeldeprozess auszulösen. Dabei sendet das neue Sensorgerät seine ID und erhält von der Basisstation eine Synchronisationszeit und eine Freigabezeit zurück. Die Basisstation erstellt für das neue Sensorgerät eine Datei zum Ablegen der empfangenen Daten.

Wenn ein Zeitslot beginnt, aktiviert die Basisstation das Funkmodul und beginnt den Empfangsmodus. Sind die empfangenen Daten in Ordnung, wird eine Bestätigung gesendet. Falls nicht, bleibt die Basisstation im Empfangsmodus und wartet auf den nächsten Versuch des Sensorgeräts. Sind die Daten OK, werden sie von der Basisstation in eine Datei geschrieben und sie wechselt zurück in den Idle-Zustand.

Abbildung 37 zeigt die vom Sensorgerät übertragenen Daten im Hexadezimalsystem. Die Daten werden getrennt nach Messparameter in drei separaten Paketen versendet, in diesem Fall nacheinander Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit. Jedes Paket enthält zu Beginn eine Präambel von 4 Byte Länge, anschließend folgen die Messwerte, von denen pro Parameter 10 Stück mit jeweils 2 Byte übertragen werden.

Die Bodenfeuchte ändert sich langsamer als die anderen Parameter und muss deshalb nicht so oft gemessen werden. Sie wird alle paar Stunden erfasst und der Messwert als viertes Paket von dem Sensorgerät versendet.

Die Basisstation sortiert die empfangenen Daten und ordnet ihnen einen Zeitstempel zu. Da die Sensorgeräte mit der Basisstation synchronisiert sind, kann diese anhand der Empfangszeit die Messzeitpunkte der Daten zurückrechnen. Anschließend werden die Daten für jedes Sensorgerät in eine separate CSV-Datei geschrieben (Comma-Separated Values). Diese Dateien können über eine Anwenderschnittstelle aus dem Dateisystem des Raspberry Pi abgerufen und so weiter verarbeitet werden – hier bietet sich zum Beispiel eine Übertragung per Bluetooth an. Eine beispielhafte CSV-Datei mit den Daten eines Sensorgeräts ist in Abbildung 38 dargestellt.

Bei der Programmierung der Basisstation sind einige Probleme aufgetreten. Da mit einem Betriebssystem gearbeitet wird, ist die Verwendung von Interrupts nicht möglich. Interrupts könnten dazu führen, dass kritische Betriebssystemprozesse, die dauerhaft im Hintergrund laufen, unterbrochen werden und das System so abstürzt. Auch bei der SPI-Kommunikation können Interrupts Probleme verursachen. Daher wurde auf Interrupts verzichtet und stattdessen die Systemzeit als regelmäßiges Zeitsignal verwendet.

Das Betriebssystem verhindert außerdem die Realisierung einer harten Echtzeit, da Prozesse des Betriebssystems kurzzeitig höher priorisiert werden können und so den Programmablauf verzögern. Dies kann insbesondere beim Empfangen der Daten kritisch werden – deshalb wurde hier eine ausreichend große Pufferzeit eingeplant.

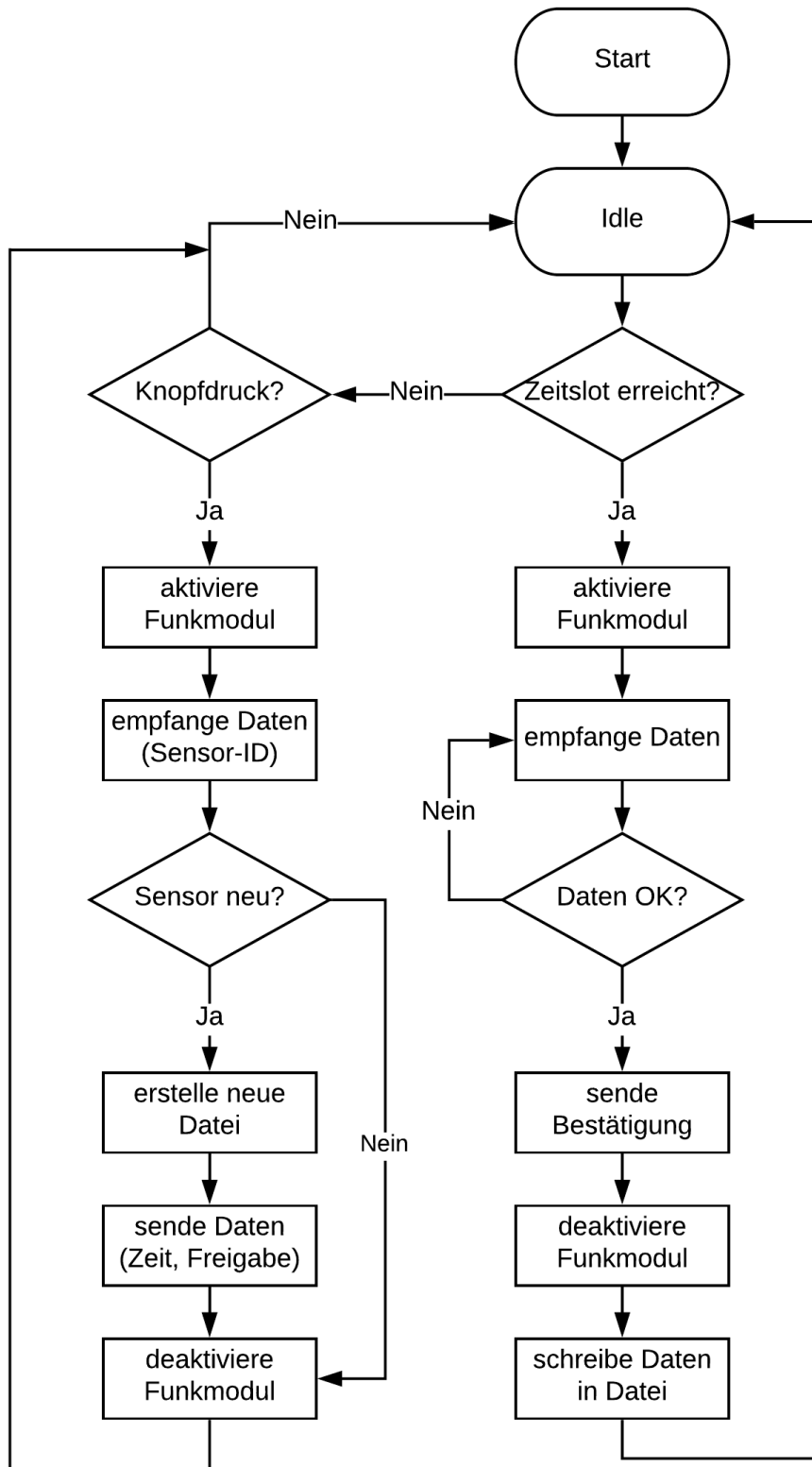
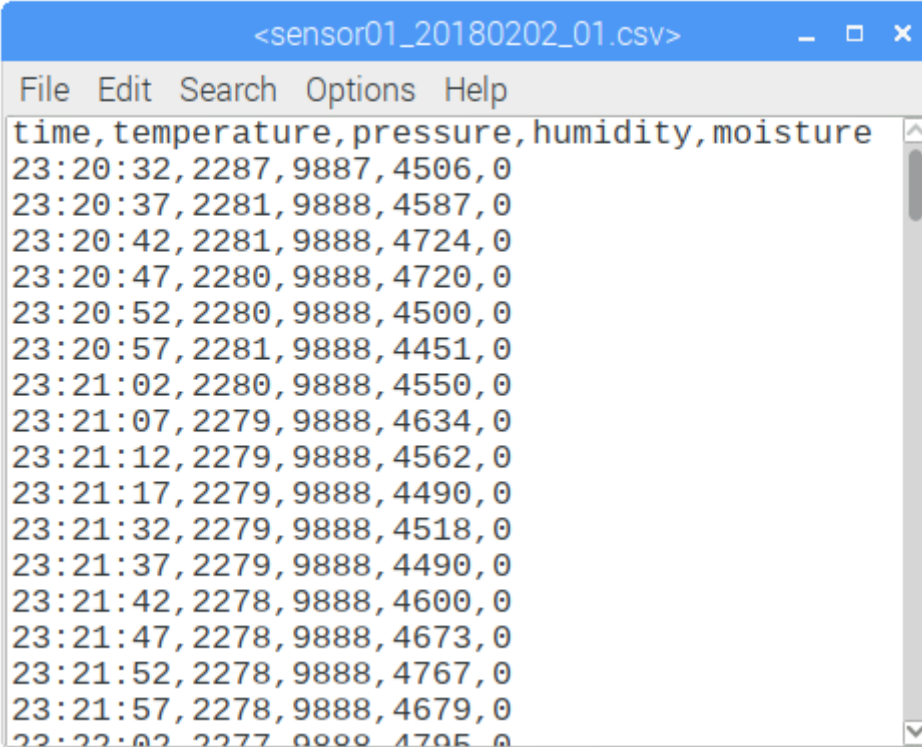


Abbildung 36: Flussdiagramm der Basisstation-Software

Data Received
41 00 95 00 1D 09 1C 09 1B 09 19 09 19 09 18 09 18 09 17 09 18 09 16 09
42 00 95 00 93 26 93 26 93 26 93 26 93 26 93 26 93 26 92 26 93 26 93 26
43 00 94 00 41 0E 3D 0E 26 0E 1B 0E 2A 0E 20 0E 27 0E 1B 0E 13 0E 0C 0E

Abbildung 37: Übertragene Datenpakete



time	temperature	pressure	humidity	moisture
23:20:32	2287	9887	4506	0
23:20:37	2281	9888	4587	0
23:20:42	2281	9888	4724	0
23:20:47	2280	9888	4720	0
23:20:52	2280	9888	4500	0
23:20:57	2281	9888	4451	0
23:21:02	2280	9888	4550	0
23:21:07	2279	9888	4634	0
23:21:12	2279	9888	4562	0
23:21:17	2279	9888	4490	0
23:21:32	2279	9888	4518	0
23:21:37	2279	9888	4490	0
23:21:42	2278	9888	4600	0
23:21:47	2278	9888	4673	0
23:21:52	2278	9888	4767	0
23:21:57	2278	9888	4679	0
23:22:02	2277	9888	4705	0

Abbildung 38: CSV-Datei mit den Messwerten eines Sensorgeräts

Die Implementierung des SPI-Treibers und der Funkschnittstelle war aufgrund einiger Komplikationen deutlich zeitintensiver als erwartet. Mit dem anfangs ausgewählten SPI-Treiber *wiringPi* [52] war keine Kommunikation mit dem Funkmodul möglich. Erst nach dem Wechsel zu dem näher an der Hardware realisierten Treiber *bcm2835* [48] wurde erfolgreich eine Verbindung mit dem Funkmodul hergestellt.

Die Software der Basisstation wurde direkt auf dem Raspberry Pi 3 unter Verwendung einer grafischen Benutzeroberfläche erstellt. Für die Anwendung des Sensor-Netzwerks ist es geplant, die grafische Benutzeroberfläche zu deaktivieren und die Anwendung direkt in der Kommandozeile auszuführen. Auf diese Weise wird die benötigte Rechenleistung und somit der Stromverbrauch reduziert.

Software der Sensorgeräte

Die Software der Sensorgeräte muss auch angepasst werden, um Stern-Topologie und Kommunikationsprotokoll umsetzen zu können. Die Software wurde in C geschrieben und mit der IDE *Code Composer Studio 7.4.0* von TI [53] erstellt.

Zunächst wurde der Anmeldeprozess hinzugefügt. Hierfür wird auf einen vorhandenen Knopf auf der Sensorplatine zurückgegriffen. Anschließend wurde der Empfang von Daten implementiert – dieser war in der ursprünglichen Software nicht vorhanden. Dadurch ist das Empfangen einer Synchronisationszeit möglich. Diese wird in der Echtzeituhr eingestellt, die somit dem Mikrocontroller signalisieren kann, wenn der Zeitschlitz erreicht ist. Das Kommunikationsprotokoll wurde schließlich auch auf der Seite der Sensorgeräte umgesetzt.

Abbildung 39 zeigt eine Übersicht des fertigen Systems mit Sensorgerät, Basisstation und Smartphone. Die Entwicklung der Smartphone-App wird im nächsten Kapitel beschrieben.

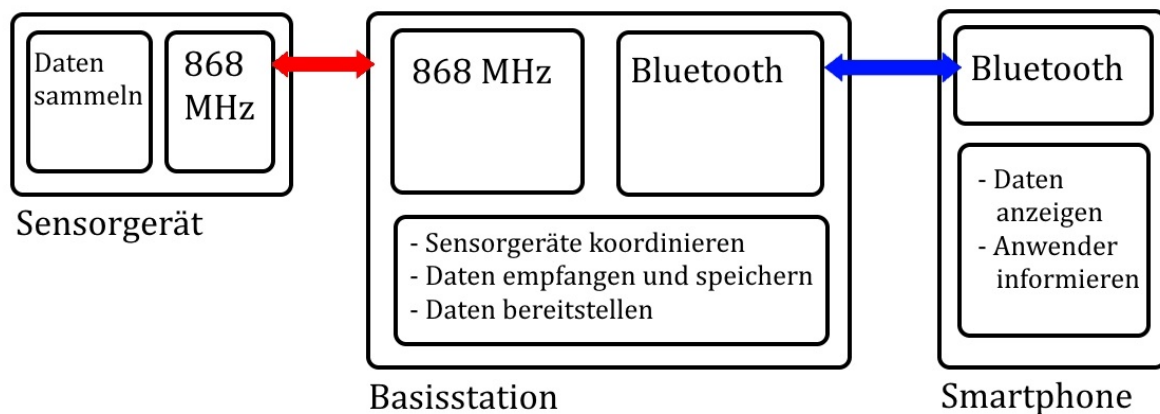


Abbildung 39: Sensor-Netzwerk in der Übersicht

Nach Entwurf und Realisierung von Hardware und Software ist das Sensor-Netzwerk nun einsatzbereit. Es wird in Kapitel 5 ausführlich getestet.

Kapitel 4

Android-App

Die Daten des Sensor-Netzwerks sollen dem Anwender möglichst einfach zur Verfügung gestellt werden. Aus diesem Grund wurde für die Anzeige der Daten eine Realisierung mittels Android-Applikation ausgewählt, da diese sehr verbreitet sind und die meisten Smartphones über eine Bluetooth-Schnittstelle verfügen, auf die zur Kommunikation mit der Basisstation zurückgegriffen werden kann. Der globale Marktanteil von Android-Smartphones betrug 2017 im Quartal 1 85,0 %, der Marktanteil von iOS war 14,7 % [54]. Durch die Auslegung als Android-Applikation können somit mehr potenzielle Anwender erreicht werden.

In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Android-App zur Anzeige der Daten beschrieben.

4.1 Anforderungen

An die App werden folgende Anforderungen gestellt:

- Kommunikation mit der Basisstation
- Anzeige der gesammelten Daten

Die höchste Priorität hat zunächst die Anzeige der Daten des Sensor-Netzwerks. Weitere Funktionen können später hinzukommen, werden aber vorerst nicht umgesetzt.

4.2 Konzept

Zu Beginn dieser Arbeit war die zu verwendende Topologie noch nicht bestimmt, die Android-App hingegen war als fester Bestandteil des Systems eingeplant. Dadurch wurde anfangs noch eine direkte Kommunikation mit den Sensorgeräten in Betracht gezogen – hierfür wäre dann eine 868-MHz-Schnittstelle für das Smartphone notwendig, die beispielsweise per microUSB hätte angeschlossen werden können. Diese Variante wäre durch die Verwendung dieses zusätzlichen Adapters für den Anwender eher umständlich.

Mit einer Basisstation lässt sich die Kommunikation mit dem Smartphone viel einfacher realisieren. Ein Grund für den Einsatz eines Raspberry Pi 3 als Basisstation ist die integrierte Bluetooth-Schnittstelle. Diese kommt nun zum Einsatz und soll zum Datenaustausch mit dem Smartphone eingesetzt werden.

Die gesammelten Daten des Sensor-Netzwerks sind nach Sensor getrennt in CSV-Dateien im System der Basisstation gespeichert. Die zu entwickelnde App soll eine Bluetooth-Verbindung zur Basisstation aufbauen und die Dateien in den eigenen Speicher kopieren. Die App liest anschließend die nun lokal gespeicherten Daten ein und erstellt daraus Diagramme, die dem Anwender angezeigt werden.

4.3 Design

Die App wurde möglichst einfach und unkompliziert gestaltet. Der Hauptbildschirm (Abbildung 40a) bietet mehrere Buttons für die Funktionen der App – das Beschaffen der Daten (Get Data), das Einlesen der Daten (Read Data) und die Anzeige der Sensordaten (Sensors). Die Buttons erstellen eine neue „Activity“, also einen neuen Bildschirm mit den gewählten Funktionen. Von hier kommt man über einen Zurück-Button wieder zum Hauptbildschirm. In der Sensor-Übersicht (Abbildung 40b) gibt es diverse Drop-Down-Menüs („Spinner“), mit denen der gewünschte Sensor ausgewählt werden kann. Im unteren Teil des Bildschirms wird dann das Diagramm dargestellt.

4.4 Programmierung

Die App wurde mit der Google-Software *Android Studio 3.0.1* [55] in der Programmiersprache *java* entwickelt. Die Funktion der App kann in die Teilfunktionen „Kommunikation“ und „Datenanzeige“ geteilt werden. Diese wurden innerhalb der App getrennt realisiert. Zum Testen der App wurde ein *Motorola Moto G XT1032* mit dem Betriebssystem *Android 5.1 Lollipop* verwendet. Die App ist für Android 4.4 und höher konzipiert, was einem API-Level (Application Programming Interface) von 19 und höher entspricht. In Android Studio wurden die entsprechenden Entwicklungswerkzeuge verwendet, also SDK (Software Development Kit) 19 und höher. Zum Vergleich – die aktuelle Android-Version 8.0 Oreo hat das API-Level 26. Laut der Android-Statistik von Google benutzen im Februar 2018 ungefähr 94,3 % aller Android-Smartphones die Version 4.4 Kitkat oder höher [56]. Durch die Begrenzung auf Android-Systeme ab Version 4.4 Kitkat wird somit ein gutes Gleichgewicht zwischen größtmöglicher Kompatibilität der Geräte und aktueller Software erzielt.

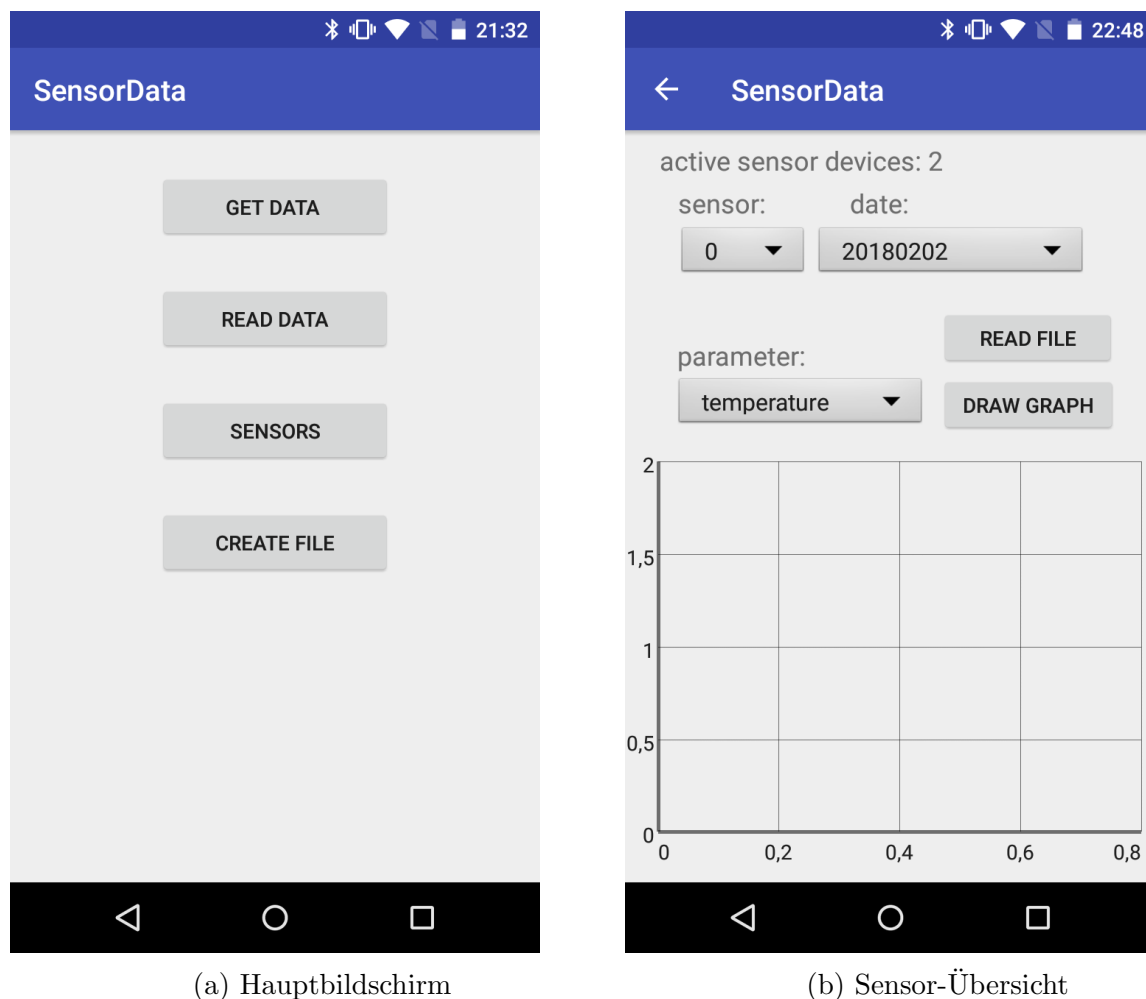


Abbildung 40: Design der App

4.4.1 Kommunikation

Die Daten sollen drahtlos per Bluetooth übertragen werden. Zunächst müssen dafür Smartphone und Basisstation gekoppelt werden. Der Kopplungsvorgang ist nicht in die App integriert und muss zuvor durch den Anwender durchgeführt werden. Um die Kopplung durchführen zu können, muss auf die Kommandozeile der Basisstation zugegriffen werden, beispielsweise über eine SSH-Verbindung (Secure Shell). Daher sollte die Kopplung bereits beim Einrichten des Sensor-Netzwerks durchgeführt werden. Die erforderliche Kopplung der Geräte hat den Vorteil, dass nur bekannte Geräte auf die Basisstation zugreifen können. Für die Übertragung der Dateien wird das Kommunikationsprotokoll *OBEX (Object Exchange)* verwendet. Es wurde von der *Infrared Data Association* ursprünglich als Protokoll für die einfache Übertragung von Dateien per Infrarot-Schnittstelle entwickelt [57]. Das OBEX-Protokoll wurde später auch für Bluetooth umgesetzt. Die Kommunikation zwischen Smartphone und Basisstation erfordert die beidseitige Verwendung des Protokolls.

Die Basisstation verwendet die Open-Source-Implementierung *OpenOBEX* [58], die auch mit dem Raspberry Pi 3 kompatibel ist. Auf dem Smartphone wird die App *ASTRO Bluetooth Module* [59] installiert, die Kommunikation über das OBEX-Protokoll ermöglicht.

Für die eigentliche Kommunikation wird die Variante *ObexFTP* verwendet, die eine Dateiübertragung via FTP (File Transfer Protocol) unter Verwendung des OBEX-Protokolls ermöglicht. Dabei wird das Smartphone als FTP-Server konfiguriert – diese Einstellung wird in der ASTRO-Bluetooth-App vorgenommen. Die Basisstation agiert als FTP-Client und sendet die Daten.

Damit die Daten gesendet werden können, muss der Anwender eine Anfrage an die Basisstation richten. Diese Anfrage könnte grundsätzlich per Bluetooth realisiert werden, würde aber voraussetzen, dass die Basisstation ihr Bluetooth dauerhaft aktiviert hat. Um dies zu vermeiden und Energie einzusparen, wird ein zweiter Hardware-Taster an der Basisstation verwendet. Eine Betätigung des Tasters signalisiert der Basisstation, dass sie Bluetooth einschalten und eine Verbindung zum gekoppelten Smartphone aufbauen soll. Anschließend nimmt die Basisstation die FTP-Konfiguration vor und sendet die Dateien. Welche Dateien gesendet werden sollen, wird intern von der Basisstation koordiniert. Sie speichert, welche Daten zuletzt an das Smartphone übertragen wurden, und überträgt die seitdem hinzugekommenen Dateien in das vordefinierte Verzeichnis.

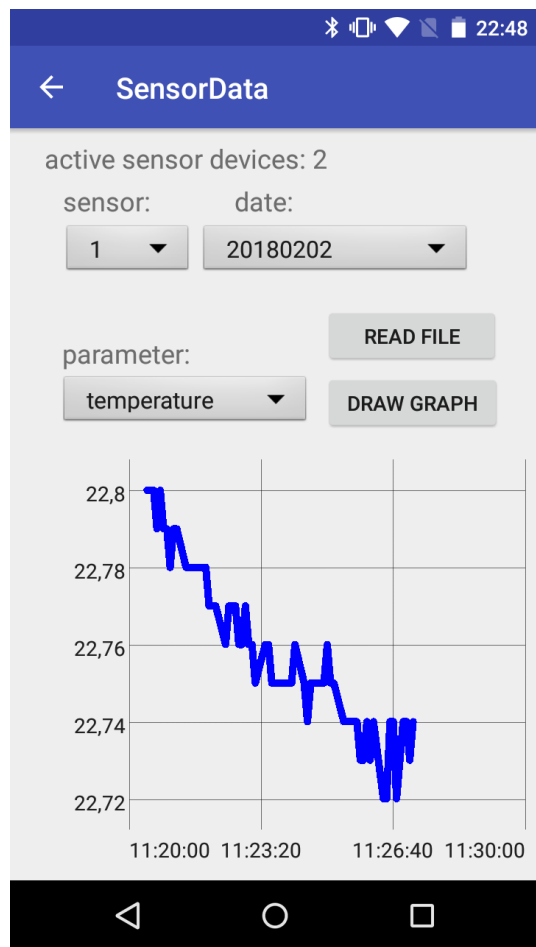
4.4.2 Datenanzeige

Die Daten, die nun im Gerät gespeichert sind, müssen zunächst eingelesen werden. Dabei wird die CSV-Datei nach Kommas getrennt und die Werte werden in Arrays kopiert. Für diese Aufgabe wird das Paket *OpenCSV* [60] eingesetzt, das entsprechende Funktionen enthält. Mit den ausgelesenen Daten können nun die Diagramme erstellt werden – hierfür wird das Paket *GraphView* [61] verwendet. Welche Datei und welches Diagramm ausgewählt werden, kann der Anwender in mehreren Menüs einstellen. Die Auswahl des Anwenders wird von der App registriert, woraufhin eine entsprechende Unterfunktion aufgerufen wird. Wie die App die Diagramme anzeigt, ist in Abbildung 41 dargestellt.

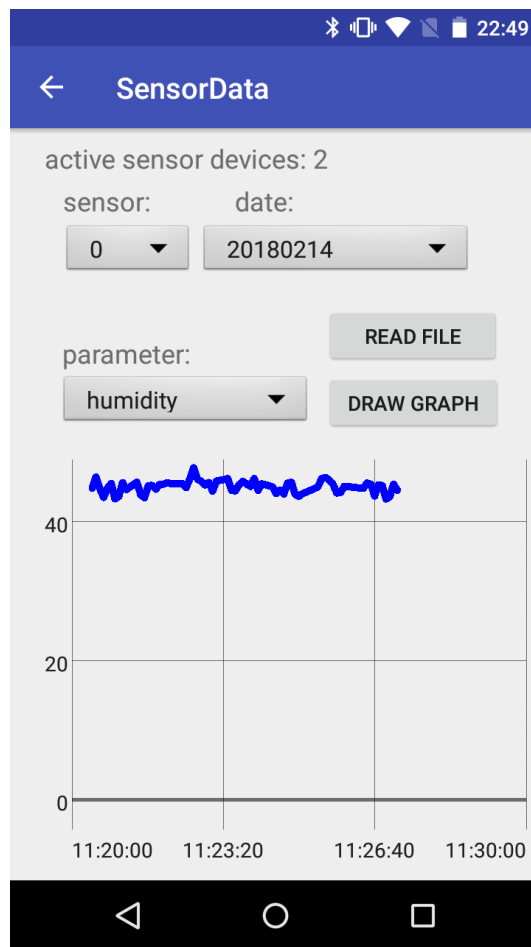
4.5 Erweiterungen

Folgende Erweiterungen sind für eine zukünftige Umsetzung denkbar:

- Erkennen von kritischen Messwerten und Benachrichtigung an Anwender
- Synchronisation der Basisstation-Zeit mit aktueller Smartphone-Zeit
- Einsatz der mobilen Datenverbindung zum Hochladen der Daten auf einen Server
- Anzeige von detaillierten Systeminformationen



(a) Temperatur-Diagramm



(b) Luftfeuchte-Diagramm

Abbildung 41: Sensor-Übersicht mit Sensor-Auswahl und Diagrammen

Insbesondere die Verwendung der Internetverbindung des Smartphones ist für einen späteren Einsatz von Webservern für das Sensor-Netzwerk interessant. Eine Bereitstellung der Daten im Internet würde die Analyse der Messwerte erheblich vereinfachen.

Kapitel 5

Test und Bewertung

In diesem Kapitel wird das entwickelte Sensor-Netzwerk getestet. Dabei werden die Funkkommunikation und Datenerfassung überprüft.

5.1 Aufbau und Durchführung

Für den Test wurden die zwei bei der Entwicklung verwendeten Sensorgeräte eingesetzt. Ein drittes wurde zwischenzeitlich hergestellt, war zum Zeitpunkt des Tests jedoch noch nicht funktionsfähig. Durch die Verwendung der beiden verfügbaren Sensorgeräte kann die Netzwerkfähigkeit des Systems ausreichend überprüft werden.

Der Test wurde an der Hochschule Offenburg im Raum B101 durchgeführt. Das erste Sensorgerät wurde im Raum platziert, jedoch ohne direkte Sichtlinie zur Basisstation in einer Entfernung von 3 Metern. Das zweite Sensorgerät wurde an der Außenseite des Fensters befestigt und war von der Basisstation 3 Meter entfernt. Der Raum mit den Positionen der Geräte ist in Abbildung 42 dargestellt. Mit diesem Messaufbau kann sowohl die Integrität der Daten als auch die Zuverlässigkeit der Kommunikation getestet werden. Die Sensorgeräte wurden bei dem Test von einer externen Spannungsquelle versorgt.

Das Sensor-Netzwerk wurde eingerichtet und war über Nacht in Betrieb. Die Konsolenausgabe der Basisstation wurde aufgezeichnet und gibt den Ablauf des Tests wieder.

5.2 Ergebnisse

Die Datenreihen wurden mit *Microsoft Excel* ausgewertet. Sie zeigen den erwarteten Verlauf der Messwerte beider Sensorgeräte und bestätigen so die korrekte Übertragung der Daten. Die Aufzeichnung der Konsolenausgabe der Basisstation zeigt eine reibungslose Kommunikation während des Tests.

Einige Diagramme und ein Ausschnitt des Protokolls der Basisstation befinden sich im Anhang dieser Arbeit.

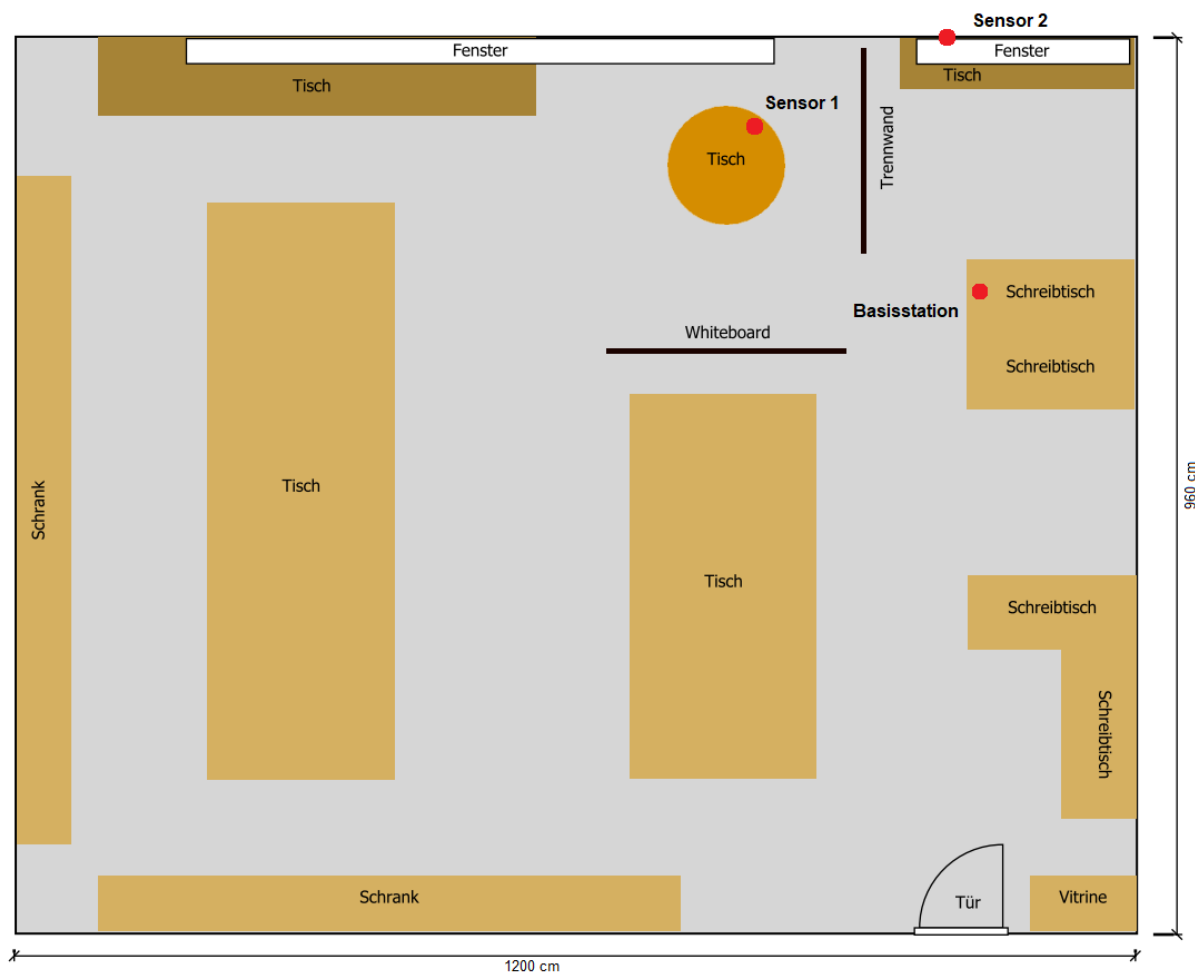


Abbildung 42: Grundriss des Raumes B101 mit Standorten der Geräte

5.3 Bewertung

Der Test hat die Funktionsfähigkeit des Systems einwandfrei bestätigt. Die Sensorgeräte haben ihre von der Basisstation zugeteilten Zeitschlitze eingehalten. Die Messwerte der Sensoren wurden zuverlässig übertragen. Während des Tests gab es keine nennenswerten Kommunikationsstörungen.

Das Sensor-Netzwerk könnte auf diesem Entwicklungsstand bereits eingesetzt werden. Interessant wäre allerdings noch ein Austesten der Grenzen des Systems – zu diesem Zweck werden weitere Sensorgeräte hergestellt und in einem späteren Test eingesetzt. Außerdem wurde die Verwendung des Energieversorgungsmoduls für diesen Test nicht berücksichtigt. Die energetischen Eigenschaften des Systems werden bei einem zukünftigen Test genauer untersucht und sind nicht mehr Teil dieser Arbeit.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In dieser Bachelorarbeit wurde aus einer vorhandenen, an der Hochschule Offenburg entwickelten Sensor-Netzwerk-Plattform ein drahtloses, energieautarkes Sensor-Netzwerk aufgebaut. Dieses System wurde speziell auf die Anwendung in einer Gartenumgebung ausgelegt. Dafür wurden vorhandene kommerzielle Systeme untersucht und verglichen. Außerdem wurden verschiedene Messmethoden zur Erfassung der Bodenfeuchte untersucht und eine kapazitive Messmethode ausgewählt und integriert. Die kapazitive Messung ist relativ energiesparsam und ermöglicht eine ausreichende Bewertung der Bodenfeuchte. Der Sensor wurde durch Messungen an Bodenproben kalibriert.

Für den Aufbau des Netzwerks wurden die Stern-Topologie und die Mesh-Topologie untersucht. Die Stern-Topologie mit einer zentralen Basisstation hat sich als vorteilhaft erwiesen, da hier weniger Energie verbraucht wird und die Kommunikation einfacher umsetzbar ist. Um Störungen bei der Kommunikation zu vermeiden, wird ein Zugriffsverfahren implementiert. Hier wurden mehrere verschiedene Zugriffsverfahren verglichen und schließlich das TDMA-Verfahren ausgewählt. Mit diesem Verfahren wurde ein Kommunikationsprotokoll entworfen, das eine reibungslose Übertragung der Messdaten gewährleistet. Verwendet werden dabei Zeitschlitzte, die den Sensorgeräten zugeteilt werden und in denen nur das zugeteilte Sensorgerät senden darf.

Die Basisstation wurde mit einem Raspberry Pi 3 und einer 868-MHz-Funkschnittstelle umgesetzt. Sie koordiniert die Sensorgeräte und sammelt die Daten. Die Software wurde als Konsolenanwendung mit C realisiert. Die Datenanzeige wurde in einer Android-App realisiert, die über Bluetooth die Daten von der Basisstation erhält. Aus diesen Daten werden Diagramme erstellt, die dem Anwender angezeigt werden. Das fertige Sensor-Netzwerk wurde schließlich mit mehreren Sensorgeräten getestet. Dabei konnte die geforderte Funktionalität bestätigt werden.

Zusammenfassend als Vergleich mit den Anforderungen aus Abschnitt 1.2:

- bidirektionale Kommunikation wurde bei den Sensorgeräten implementiert
- die Stern-Topologie wurde als energetisch optimale Topologie ermittelt und ein Konzept erarbeitet
- ein Konzept für das energieautarke Sensor-Netzwerk wurde entwickelt und umgesetzt
- die Messwerte des Sensor-Netzwerks wurden gesammelt und ausgewertet
- eine Android-App wurde für das Anzeigen der Daten entwickelt
- die Hardware der Sensorgeräte wurde um einen Bodenfeuchte-Sensor erweitert

Somit wurden alle zu Beginn gestellten Aufgaben erfolgreich umgesetzt.

6.2 Ausblick

6.2.1 Änderungen

Folgende Verbesserungen können bei der Hardware vorgenommen werden:

- Entwurf und Herstellung eines Gehäuses für Sensorgeräte und Basisstation
- Überarbeitung der Sensorplatine, siehe [2]
- Anschluss zusätzlicher Sensoren, zum Beispiel Lichtstärke
- Anpassung und Erweiterung des Energieversorgungsmoduls
- Verwendung einer energiesparsameren Basisstation, zum Beispiel Raspberry Pi Zero
- Erweiterung der Basisstation um ein GSM-Modul für Internetzugriff
- Hinzufügen von Aktoren, zum Beispiel eine Bewässerungssteuerung

Auch bei der Software gibt es Erweiterungspotenzial:

- Ergänzung der Android-App um weitere Funktionen
- Zeitsynchronisation von Smartphone und Basisstation
- Umsetzung einer AES-Verschlüsselung (Advanced Encryption Standard)
- Einsatz von einem Webserver zum Speichern der Daten
- Änderung des Messintervalls durch die Basisstation im laufenden Betrieb

6.2.2 Anwendung

Das Sensor-Netzwerk ist grundsätzlich schon funktionsfähig, muss für den tatsächlichen Einsatz jedoch noch um ein Gehäuse und eine Solarzelle erweitert werden. Das System bildet nun die Grundlage für ein Smart-Gardening-System, das schon zahlreiche Messparameter automatisch erfasst und abspeichert. Schon allein mit dieser Funktion kann ein Anwender den Zustand des Gartens bewerten und wird so bei der Pflege des Gartens unterstützt. Mit einer energieautarken Versorgung und drahtloser Kommunikation wurden zwei für die Gartenanwendung sehr vorteilhafte Technologien eingesetzt. Das Sensor-Netzwerk soll für die Smart-Gardening-Anwendung auch schon bald eingesetzt werden: bei der Landesgartenschau 2018 in Lahr wird das System vorgestellt und eingerichtet.

Im Zuge der Vorbereitungen auf die Landesgartenschau wurden zwei große Gartengelände angelegt, in denen viele unterschiedliche Pflanzen angesiedelt sind. Hier wird es mehrere interessante Stellen für den Einsatz des Systems geben, etwa bei der Überwachung einer Blumenanlage oder einer Baumgruppe. Das Sensor-Netzwerk wird schließlich Teil einer Ausstellung der Hochschule Offenburg in Zusammenarbeit mit der Landesgartenschau sein, die sich besonders der Zukunft des Gartens widmet – eine Zukunft, die man sich ohne Smart Gardening gar nicht vorstellen kann.

Literatur

- [1] *dieter kienast Archives - Garten & mehr.*
<https://www.brennemann.com/tag/dieter-kienast/>. (Abgerufen am 05.02.2018).
- [2] Patrick Moser. *Entwicklung einer drahtlosen Sensor-Netzwerk-Plattform für den Low-Power- Anwendungsbereich: Bachelorthesis : Bearbeitungszeitraum/Abgabe: 1.09.2016 - 28.02.2017 / 28.02.2017.* Offenburg, 2017.
- [3] Stefan Unrein. *Entwicklung eines miniaturisierten Energieversorgungs-Moduls zur autarken Versorgung von Funkmodulen: Abschlussarbeit : Fakultät Elektrotechnik / Informationstechnik : Studiengang: Elektrotechnik / Informationstechnik : Vertiefung: Kommunikationstechnik : Eingereicht am: 28. Februar 2017.* Offenburg, 2017.
- [4] *Gardena smart system Produkte: smart system Set.*
<https://www.gardena.com/de/produkte/smart/smartsystem/smart-system-set/967264703/>. (Abgerufen am 06.02.2018).
- [5] GARDENA Manufacturing GmbH. *Bedienungsanleitung Smart System.*
- [6] Kevin Taubert. *Das neue Gardena Smart System.*
<http://smarthomeprodukte.de/das-neue-gardena-smart-system-wenn-die-gartenpflege-smart-wird/>. (Abgerufen am 14.11.2017).
- [7] *Parrot - Flower Power - intelligent wireless sensor for your plants.*
<http://global.parrot.com/au/products/flower-power/>.
(Abgerufen am 06.02.2018).
- [8] Parrot SA. *Flower Power Sensor User Guide.* (Abgerufen am 13.09.2017).
URL: https://parrotcontact.parrot.com/website/user-guides/download-user-guides.php?pdf=flower-power/Flower-Power_User-guide_UK.pdf.
- [9] *Edyn: Welcome to the connected garden. by Edyn — Kickstarter.*
<https://www.kickstarter.com/projects/edyn/edyn-welcome-to-the-connected-garden>. (Abgerufen am 22.12.2017).
- [10] *Edyn.* <https://edyn.com/>. (Abgerufen am 06.02.2018).

- [11] Elke Mackensen.
Analyse, Simulation und Entwurf intelligenter, autarker Mikrosysteme für drahtlose Sensor-Aktor-Netzwerke: Zugl.: Freiburg im Breisgau, Univ., Diss., 2006. Bd. 5.
MEMS Technology and Engineering. Tönning: Der Andere Verl., 2006.
ISBN: 978-3-89959-537-6.
- [12] Bosch Sensortec GmbH. *BME280*.
https://www.bosch-sensortec.com/bst/products/all_products/bme280.
(Abgerufen am 11.09.2017).
- [13] STMicroelectronics. *SPSGRF. Sub-GHz (868 or 915 MHz) low power programmable RF transceiver modules*.
<http://www.st.com/en/wireless-connectivity/spsgrf.html>.
(Abgerufen am 11.09.2017).
- [14] STMicroelectronics. *SPIRIT1. Low data rate, low power sub-1GHz transceiver*.
<http://www.st.com/en/wireless-connectivity/spirit1.html>.
(Abgerufen am 11.09.2017).
- [15] STMicroelectronics. *SPIRIT1 Technical Details*.
http://www.emcu.it/Wireless/SubGHz/AN/Spirit1-TechnicalDetails_em.pdf.
(Abgerufen am 26.02.2017).
- [16] Dr. Gesine Hellberg-Rode. *Projekt Hypersoil, Universität Münster*.
<http://hypersoil.uni-muenster.de/0/03/p/p04.htm>.
(Abgerufen am 08.02.2018).
- [17] *Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts auf Grundlage der Masse – Gravimetrisches Verfahren*. Standard.
International Organization for Standardization, Dez. 1996.
- [18] Diedrich Schroeder. *Bodenkunde in Stichworten* -. Stuttgart: Borntraeger, 1992.
ISBN: 978-3-443-03103-9.
- [19] *Bodenfeuchte Hilfe*.
<http://www.wetter.rlp.de/Internet/global/themen.nsf//?OpenDocument>.
(Abgerufen am 02.01.2018).
- [20] Paul Schachtschabel, Fritz Scheffer und Hans-Peter Blume.
Lehrbuch der Bodenkunde -. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verlag, 2002.
ISBN: 978-3-827-41324-6.
- [21] *Grove Moisture Sensor - SODAQ*.
<https://shop.sodaq.com/en/moisture-sensor.html>. (Abgerufen am 18.02.2018).
- [22] Hanspeter Helm. *Experimentalphysik II. Elektromagnetismus*. Vorlesung SS 2007.
Universität Freiburg, 2007.

- [23] Arthur R. Von Hippel. *Dielectric Materials and Applications* -. Norwood: Artech House, 1995. ISBN: 978-1-580-53123-8.
- [24] punktwissen Ingenieurbüro für Technische Physik und IT-Dienstleistungen. *Wärmequelle: ERDE, Physikalische Eigenschaften Erde*. <http://punktwissen.at/pdf/punktwissen-Waermepumpe-Waermequelle-Erde.pdf>. (Abgerufen am 03.01.2018).
- [25] F. Möckel. *Tensiometer*. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/77/Tensiometer.png>. (Abgerufen am 09.02.2018).
- [26] F. Möckel. *Entwicklung eines elektronischen Tensiometers mit analogem Ausgang und nachgeschaltetem Schaltverstärker unter Berücksichtigung bodenphysikalischer Kriterien*. Diplomarbeit. FH Weihenstephan, 1989.
- [27] METER Group AG. *KNOWLEDGE BASIS — Bodenfeuchte-Sensoren messen nicht alles — METER Environment*. <https://www.metergroup.com/de/environment/artikel/bodenfeuchte-sensoren-messen-nicht-alles/>. (Abgerufen am 03.01.2018).
- [28] Landesgartenschau Lahr 2018 GmbH. *Tensiometerstation hat einen neuen Standort gefunden*. <http://landesgartenschau-lahr2018.de/gartenschau/neuigkeiten/tensiometerstation-hat-einen-neuen-standort-gefunden/>. (Abgerufen am 03.01.2018).
- [29] Dietmar Weisser. *Bodenfeuchte-Sensor*. <http://www.dietmar-weisser.de/elektronik-projekte/analogtechnik/sensoren/bodenfeuchtesensor.html>. (Abgerufen am 03.01.2018).
- [30] Ramser Elektrotechnik. *Giesomat - Kapazitiver Bodenfeuchtesensor*. <https://www.ramser-elektro.at/shop/bausaetze-und-platinen/giesomat-kapazitiver-bodenfeuchtesensor-erdfeuchtesensor-mit-beschichtung/>. (Abgerufen am 03.01.2018).
- [31] *Digitaler RC-Oszillator: Elektronik-Magazin*. <http://www.elektronik-magazin.de/page/digitaler-rc-oszillator-13>. (Abgerufen am 09.02.2018).
- [32] *Kapazitiven Erdfeuchtigkeitssensor "Giess-o-Matäm Raspberry Pi auslesen*. <https://tutorials-raspberrypi.de/raspberry-pi-giessomat-kapazitiver-erdfeuchtigkeitssensor/>. (Abgerufen am 17.02.2018).

- [33] *Internet der Dinge WS2015/SmartPlant – Verteilte Systeme - Wiki.*
https://wwwvs.cs.hs-rm.de/vs-wiki/index.php/Internet_der_Dinge_WS2015/SmartPlant.
(Abgerufen am 18.02.2018).
- [34] *Vermaschte Struktur :: meshed topology :: ITWissen.info.*
<https://www.itwissen.info/Vermaschte-Struktur-meshed-topology.html>.
(Abgerufen am 09.02.2018).
- [35] *Netzwerk-Topologie.*
<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0503281.htm>.
(Abgerufen am 09.02.2018).
- [36] *CSMA (carrier sense multiple access) :: CSMA-Verfahren :: ITWissen.info.*
<https://www.itwissen.info/CSMA-carrier-sense-multiple-access-CSMA-Verfahren.html>. (Abgerufen am 10.02.2018).
- [37] *Hidden terminals.* <https://folk.uio.no/kenneho/studies/essay/node7.html>.
(Abgerufen am 10.02.2018).
- [38] *Netzwerk-Topologie.*
<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/net/0503281.htm>.
(Abgerufen am 10.02.2018).
- [39] *TDMA (time division multiple access) :: TDMA-Verfahren :: ITWissen.info.*
<https://www.itwissen.info/TDMA-time-division-multiple-access-TDMA-Verfahren.html>. (Abgerufen am 10.02.2018).
- [40] *FDMA (frequency division multiple access) :: FDMA-Verfahren :: ITWissen.info.*
<https://www.itwissen.info/FDMA-frequency-division-multiple-access-FDMA-Verfahren.html>. (Abgerufen am 10.02.2018).
- [41] *CDMA (code division multiple access) :: CDMA-Verfahren :: ITWissen.info.*
<https://www.itwissen.info/CDMA-code-division-multiple-access-CDMA-Verfahren.html>. (Abgerufen am 10.02.2018).
- [42] *SDMA (space division multiple access) :: SDMA-Verfahren :: ITWissen.info.*
<https://www.itwissen.info/SDMA-space-division-multiple-access-SDMA-Verfahren.html>. (Abgerufen am 10.02.2018).
- [43] *ALOHA.*
<http://einstein.informatik.uni-oldenburg.de/rechnernetze/aloha.htm>.
(Abgerufen am 10.02.2018).

- [44] helix84. *Pure ALOHA1*.
https://de.wikipedia.org/wiki/ALOHA\#/media/File:Pure_ALOHA1.svg.
Unverändert nach CC BY 2.5 (<https://creativecommons.org/licenses/by/2.5/>)
(Abgerufen am 10.02.2018).
- [45] Ambiq Micro, Inc. *AM18X5 Datasheet*. http://www.ambiqmicro.com/wp-content/uploads/2016/11/am18x5_data_sheet_ds0003v1p2.pdf.
(Abgerufen am 24.10.2017).
- [46] *Raspberry Pi 3 Model B - Raspberry Pi*.
<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>.
(Abgerufen am 11.02.2018).
- [47] *How Much Power Does Raspberry Pi3B Use? How Fast Is It Compared To Pi2B? - RasPi.TV*. <http://raspi.tv/2016/how-much-power-does-raspberry-pi3b-use-how-fast-is-it-compared-to-pi2b>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [48] Mike McCauley.
bcm2835: C library for Broadcom BCM 2835 as used in Raspberry Pi.
<http://www.airspayce.com/mikem/bcm2835/>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [49] *Geany : Home Page*. <https://www.geany.org/>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [50] *Git*. <https://git-scm.com/>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [51] *GitHub*. <https://github.com/>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [52] Gordon Henderson. *WiringPi*. <http://wiringpi.com/>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [53] *CCSTUDIO Code Composer Studio (CCS) Integrated Development Environment (IDE) — TI.com*. <http://www.ti.com/tool/CCSTUDIO>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [54] *IDC: Smartphone OS Market Share*.
<https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share/os>.
(Abgerufen am 11.02.2018).
- [55] *Download Android Studio and SDK Tools — Android Studio*.
<https://developer.android.com/studio/index.html>. (Abgerufen am 11.02.2018).
- [56] *Dashboards — Android Developers*.
<https://developer.android.com/about/dashboards/index.html>.
(Abgerufen am 21.02.2018).
- [57] *IRDA.ORG*. <http://www.irda.org/>. (Abgerufen am 18.02.2018).
- [58] *OpenOBEX - WikiStart*. <http://dev.zuckschwerdt.org/openobex/wiki/>.
(Abgerufen am 18.02.2018).

-
- [59] Metago. *ASTRO Bluetooth Module – Android-Apps auf Google Play*. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.metago.astro.network.bluetooth>. (Abgerufen am 18.02.2018).
- [60] *opencsv – General*. <http://opencsv.sourceforge.net/>. (Abgerufen am 21.02.2018).
- [61] *Android Graph View plotting library*. <http://www.android-graphview.org/>. (Abgerufen am 21.02.2018).

Anhang A

Testergebnisse

Nachfolgend sind die Messwertdiagramme des Sensor-Netzwerk-Tests dargestellt. Ergänzend dazu ist ein Auszug aus der Konsolenausgabe der Basisstation angehängt. Während des Tests hat die Basisstation diverse Informationen des Programmablaufs ausgegeben. Anhand dieses Protokolls kann die Kommunikation der Netzteilnehmer nachvollzogen werden.

A.1 Sensorgerät 1

Das erste Sensorgerät wurde zunächst im Netzwerk registriert und anschließend an der Außenseite des Fensters befestigt. In dem Temperaturdiagramm dieses Sensors zeigt sich deshalb anfangs Zimmertemperatur, die sehr schnell auf die Außentemperatur abfällt. Im restlichen Diagramm schwankt die Temperatur leicht um die 5 °C Umgebungstemperatur, die durch die relative Nähe zum Gebäude noch etwas höher war als die tatsächliche Außentemperatur. Das Diagramm zeigt zwei Spitzen gegen Ende der Messreihe, hier wurde jeweils bei einem Datenpaket eine höhere Temperatur übertragen. Diese Messwerte sind eindeutig fehlerhaft, die Ursache wurde bisher noch nicht gefunden. Da das andere Sensorgerät im Innenraum derartige Fehler nicht aufweist, könnte es mit den Umgebungsbedingungen draußen zusammenhängen. Auch ein Fehler im Programm des Sensorgeräts könnte die falschen Messungen verursacht haben. Das Ereignis wird weiter untersucht werden, zwischenzeitlich könnte eine Plausibilitätsprüfung im Programmcode ähnliche Messfehler erkennen und ausgleichen.

Das Diagramm des Luftdrucks zeigt einen normalen Verlauf der Messwerte. Durch die Auflösung von 0,1 hPa und die insgesamt eher geringe Änderung des Luftdrucks um ungefähr 1 hPa, ist das Diagramm noch relativ grob. Hier könnte eine Mittelwertbildung eingesetzt werden, um das Diagramm zu glätten.

Bei der Messung der relativen Luftfeuchtigkeit ist ein ähnlicher Messfehler wie bei der Temperatur aufgetreten. Ansonsten verläuft das Diagramm normal.

Dieses Sensorgerät verfügte über keinen Bodenfeuchte-Sensor – sie sind nicht für jedes Sensorgerät vorgesehen und können flexibel dort eingesetzt werden, wo sie gebraucht werden.

A.2 Sensorgerät 2

Das zweite Sensorgerät war den ganzen Test hindurch innen angebracht. Der Temperaturverlauf, hier ohne Messfehler, zeigt den Betrieb der Raumheizung. Diese wird zu Beginn heruntergefahren und wird schließlich um 4 Uhr und um 6 Uhr wieder hochgeregelt – hier sind zwei deutliche Anstiege der Temperatur zu sehen.

Das Luftdruckdiagramm zeigt den gleichen Verlauf wie das des anderen Sensorgeräts. Allerdings ist die Kurve um ungefähr 1 hPa nach oben verschoben, was vermutlich an dem langsamen Druckausgleich zwischen dem Gebäude und der Umgebung liegt.

Die relative Luftfeuchtigkeit änderte sich während des Tests kaum, weist jedoch eine deutliche Streuung im mittleren Teil des Diagramms auf. Ursache dafür könnten lokale Verdunstungsphänomene sein, die durch fehlende Luftbewegung für eine variable relative Luftfeuchtigkeit sorgen.

An dieses Sensorgerät war ein Bodenfeuchte-Sensor angeschlossen. Hier wurde wieder mit einem feuchten Tuch der Erdboden simuliert. Die Formel zur Bestimmung des Wassergehaltes (Formel 2.10) wurde im Programmcode der Basisstation implementiert und führt durch die unterschiedlichen Eigenschaften des Tuches zu Werten über 100 %. Der Messwert bleibt während des Testes hindurch konstant – hier kann entweder ein Messfehler vorliegen, oder die Verdunstung hat zu keiner nennenswerten Veränderung der Kapazität des Sensors geführt. Durch einen zukünftigen Test mit Erde soll dieser Effekt weiter untersucht werden.

A.3 Basisstation

Während des Programmablaufs werden von der Basisstation diverse Daten in der Konsole ausgegeben. Dazu gehören die Empfangszeit, Sensor-ID, Datenpakete und die Zeitdifferenz zum letzten Sendevorgang des gleichen Sensorgeräts. Mit diesem Protokoll kann die Kommunikation der Netzwerkteilnehmer rekonstruiert werden. Ein Ausschnitt des Protokolls wird nachfolgend wiedergegeben. Der Ausschnitt beginnt mit der Einrichtung des Sensor-Netzwerks per Knopfdruck und zeigt anschließend den Austausch einiger Datenpakete. Tabelle A.1 zeigt die Einstellungen der Funkmodule bei dem Test.

Sendeleistung	11 dBm	Modulation	2-GFSK1
Datenrate	36,482 kS/s	FEC	ja
Basisfrequenz	868,0 MHz	Data whitening	ja
Bandbreite	20,629 kHz	Sync-Wort	0x8888
Kanalfilter	100,5 kHz	CRC	0x8005

Tabelle A.1: Einstellungen der Funkmodule


```
button pressed!
Waiting for device...
received data:  0 45 AA AA
Sensor-ID: 2
first transmission: approx. 17:18:39
Offset time: 30 sec
sent data: AA 12  2 16 11  E  9  0 1E
new device: slot 0
button pressed!
Waiting for device...
received data:  0 25 AA AA
Sensor-ID: 1
first transmission: approx. 17:20:39
Offset time: 139 sec
sent data: AA 12  2 16 11  E 14  0 8B
new device: slot 1
time: 17:18:20
slave 0 sending in 20 seconds...
time difference: 240
packets: 3, moisture data: 0
23 0 D4 E B8 E 81 D 37 C 2D C A6 C 39 C D6 C 77 C 86 C 89 C
21 0 95 18 7D 18 7B 18 78 18 77 18 76 18 74 18 72 18 71 18 70 18 71 18
22 0 15 27 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26
ID: 1, sensor no. 1
time: 17:18:34
slave 0 sending in 20 seconds...
time difference: 240
packets: 3, moisture data: 0
43 0 54 0 AD D 92 C 97 B A2 9 70 A B4 A 72 B A C A1 C 10 D
41 0 55 0 B3 18 AD 18 44 18 E8 16 87 15 87 14 D1 13 6A 13 3 13 D2 12
42 0 55 0 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F3 26 F2 26
ID: 2, sensor no. 0
time: 17:22:13
slave 1 sending in 20 seconds...
time difference: 240
packets: 3, moisture data: 0
23 0 14 F AF C 18 D BE C 2 D 10 D 2D D 4A D 49 D 33 D 2E D
21 0 D5 18 6F 18 6E 18 6E 18 6D 18 6D 18 6D 18 6B 18 6B 18 6A 18 6B 18
22 0 55 27 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FE 26 FF 26 FF 26 FF 26
ID: 1, sensor no. 1
time: 17:23:43
```

```

slave 0 sending in 20 seconds...
time difference: 240
packets: 3, moisture data: 0
43 0 94 0 5B D A5 D C2 D E6 D 5 E 1C E 3E E 42 E 5C E 48 E
41 0 95 0 B9 12 9D 12 8B 12 77 12 6D 12 70 12 6C 12 68 12 56 12 52 12
42 0 95 0 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F2 26 F3 26 F2 26 F3 26 F3 26 F3 26
ID: 2, sensor no. 0
time: 17:28:33
slave 1 sending in 20 seconds...
time difference: 310
packets: 3, moisture data: 0
23 0 54 F 15 D 21 D 1B D 2F D 50 D 69 D 54 D 60 D 49 D 4C D
21 0 15 19 69 18 69 18 67 18 67 18 67 18 65 18 65 18 65 18 64 18 64 18
22 0 95 27 FE 26 FE 26 FE 26 FF 26 FE 26 FF 26 FF 26 FF 26 0 27 FF 26
ID: 1, sensor no. 1
time: 17:28:52
slave 0 sending in 20 seconds...
time difference: 305
packets: 3, moisture data: 0
43 0 D4 0 7F E A0 E 6B E 95 E A7 E 9D E 89 E A2 E E6 E BA E
41 0 D5 0 56 12 58 12 55 12 58 12 58 12 55 12 51 12 48 12 4B 12 43 12
42 0 D5 0 F2 26 F3 26 F3 26 F2 26 F3 26 F3 26 F3 26 F3 26 F3 26 F2 26
ID: 2, sensor no. 0
time: 17:33:41
slave 1 sending in 20 seconds...
time difference: 309
moisture data received
packets: 4, moisture data: 1
24 0 54 0 0 0
21 0 55 19 64 18 63 18 62 18 62 18 62 18 61 18 60 18 5F 18 5F 18 5E 18
22 0 D5 27 FF 26 FF 26 FF 26 FF 26 0 27 FF 26 0 27 FF 26 FF 26 FF 26
23 0 95 F 2D D 33 D 57 D 2B D 24 D 77 D 51 D 49 D 49 D 17 D
ID: 1, sensor no. 1
time: 17:34:01

```

A.4 Diagramme

Es folgen die Diagramme der Messwerte aus dem in Kapitel 5 beschriebenen Systemtest.

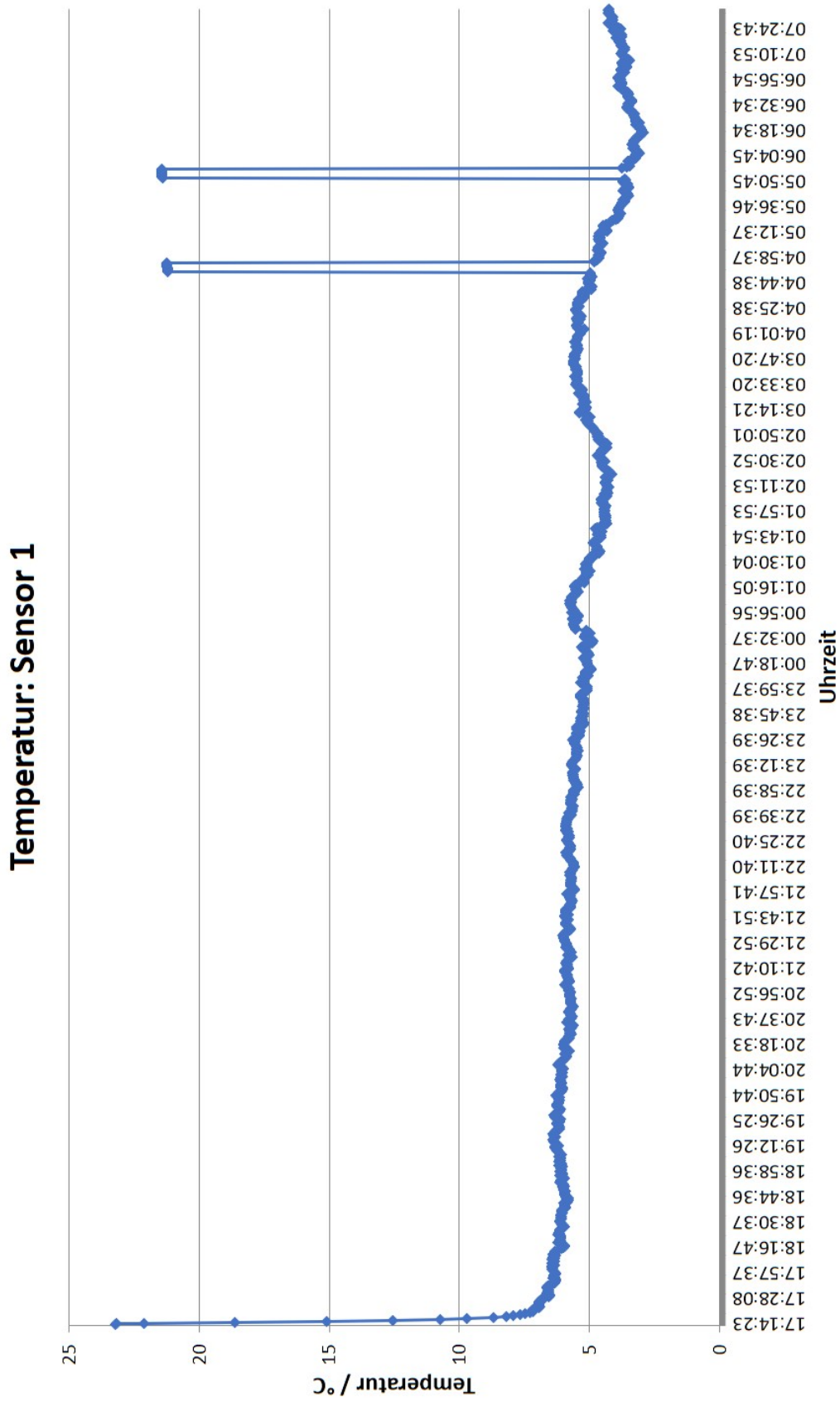


Abbildung A.1: Temperatur-Diagramm von Sensorgerät 1

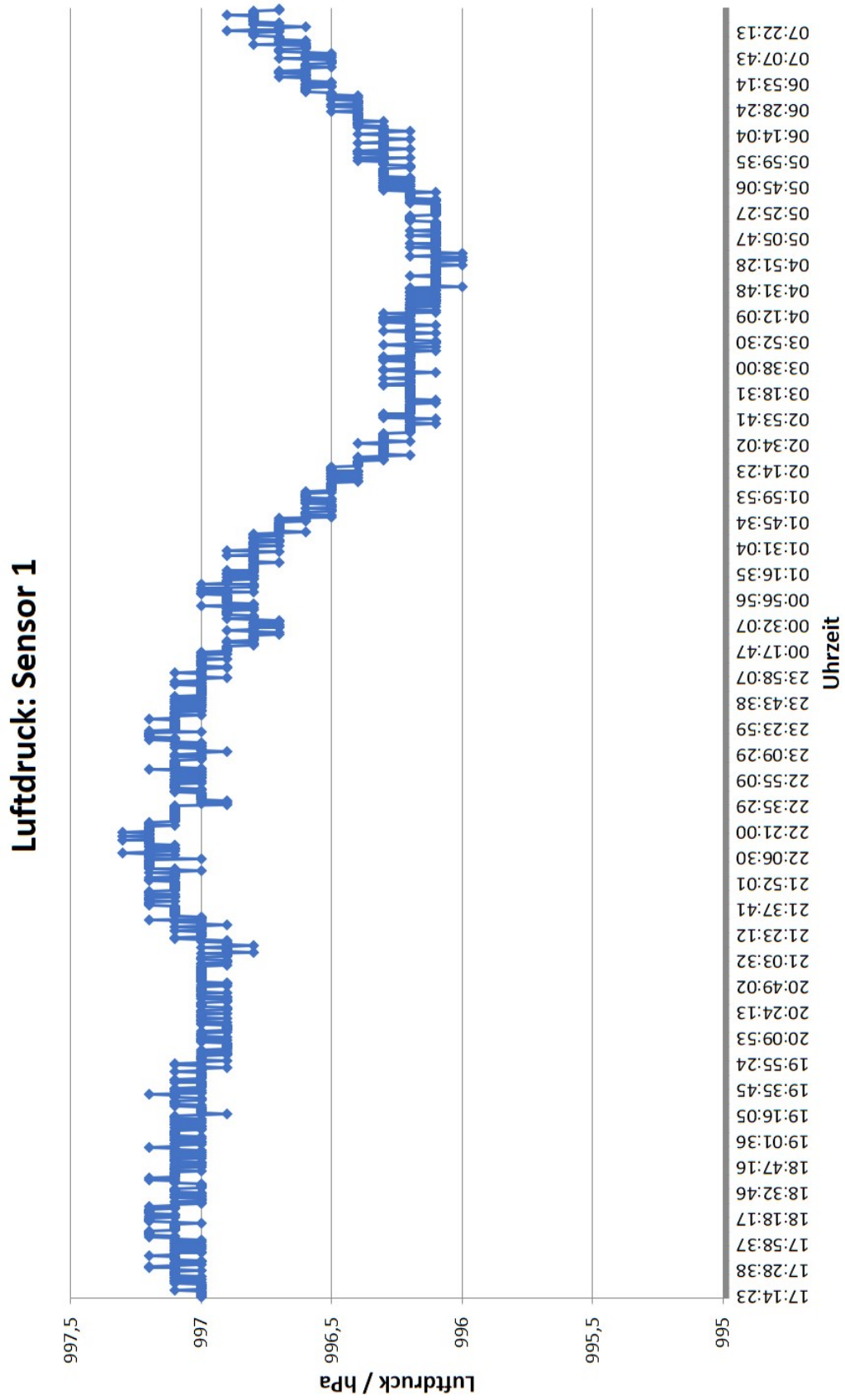


Abbildung A.2: Luftdruck-Diagramm von Sensorgerät 1

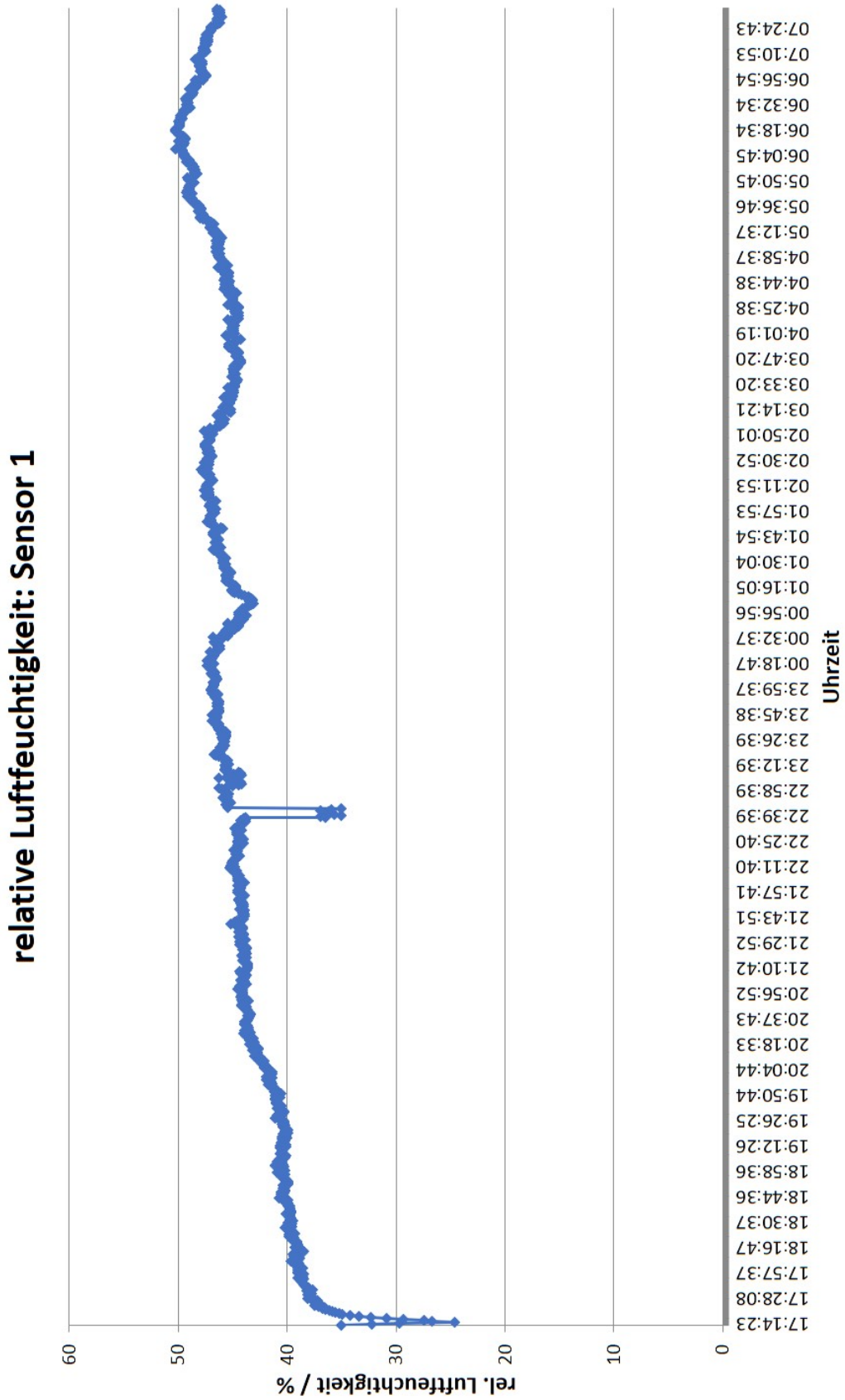


Abbildung A.3: Luftfeuchtigkeits-Diagramm von Sensorgerät 1

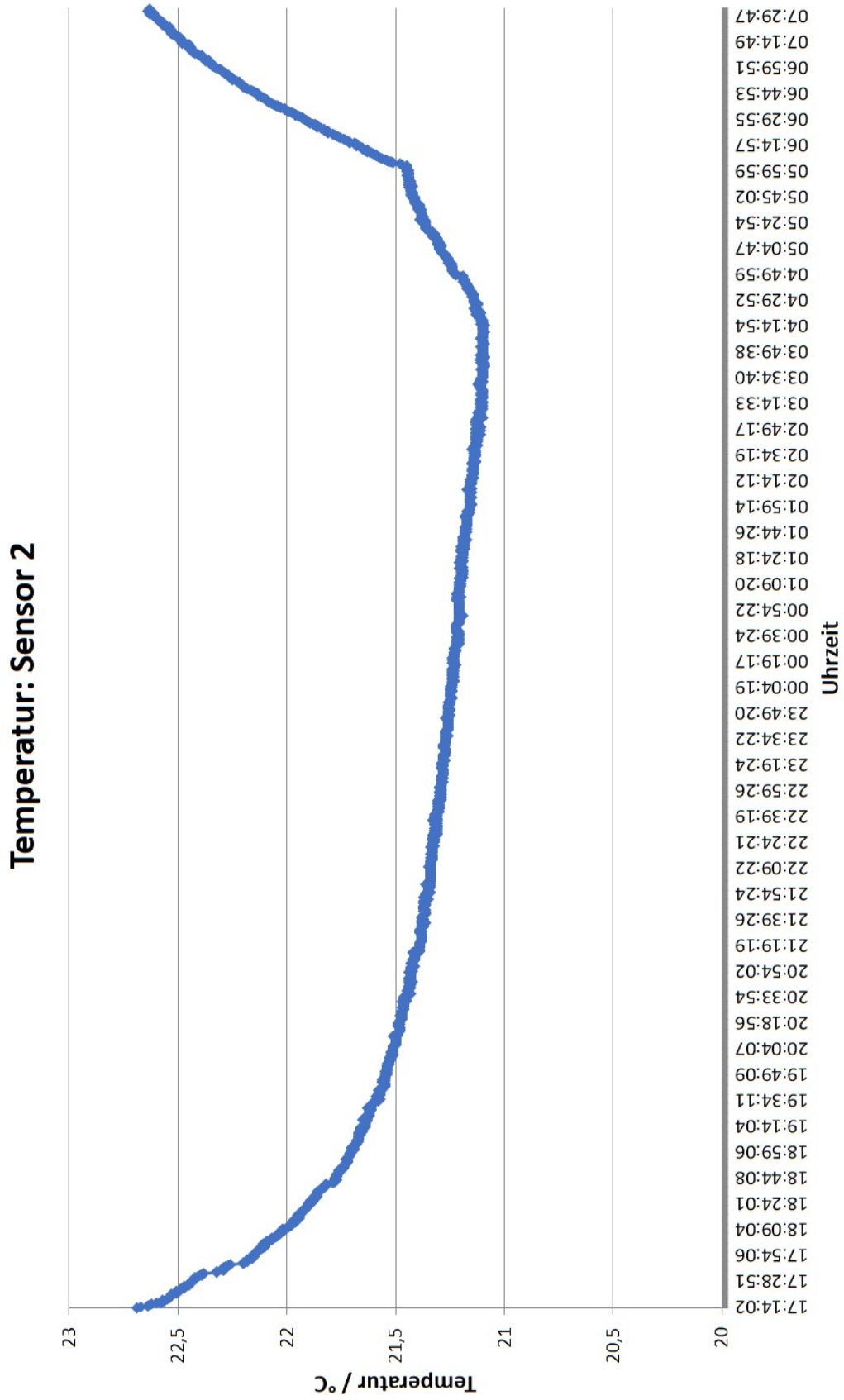


Abbildung A.4: Temperatur-Diagramm von Sensorgerät 2

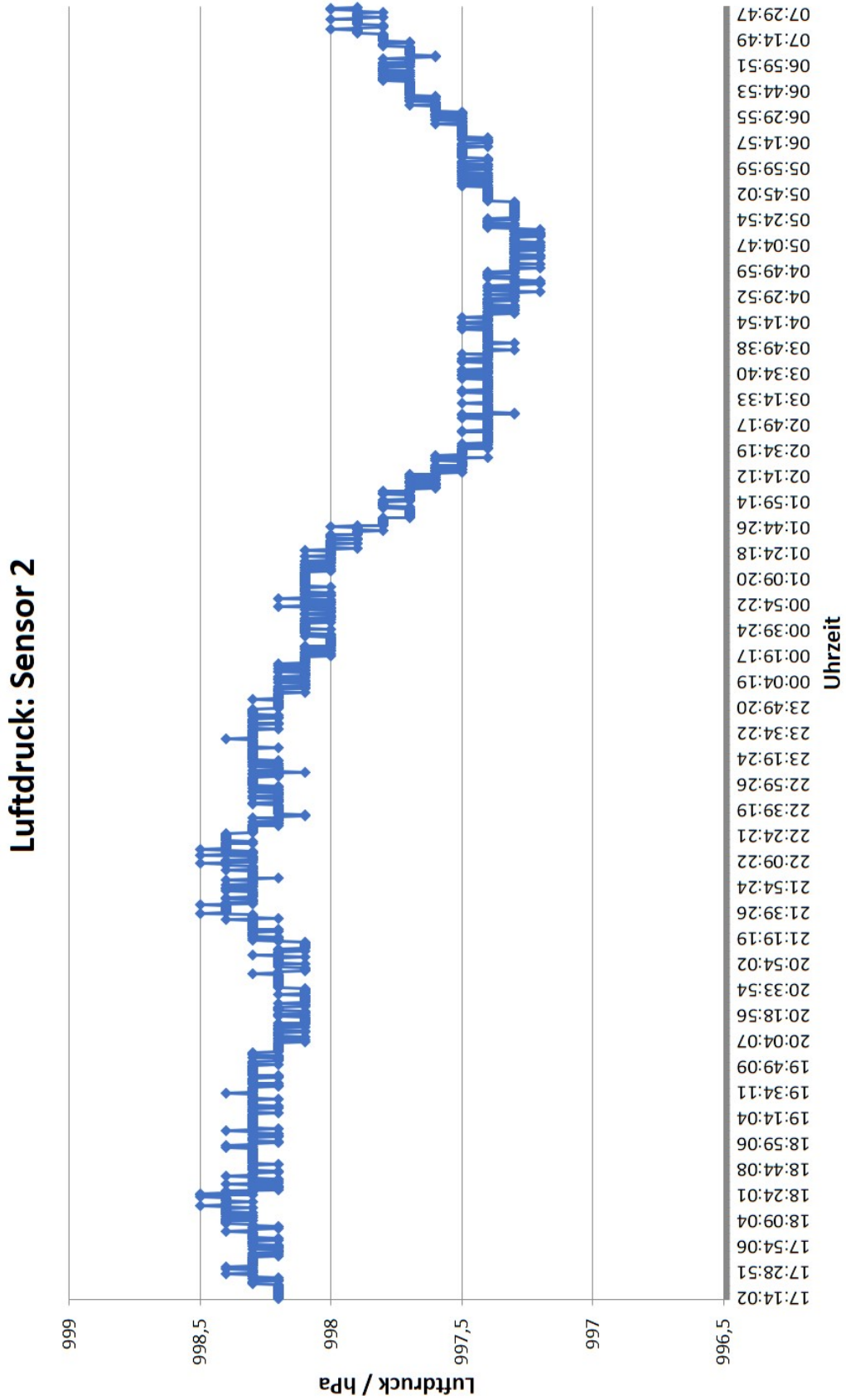


Abbildung A.5: Luftdruck-Diagramm von Sensorgerät 2

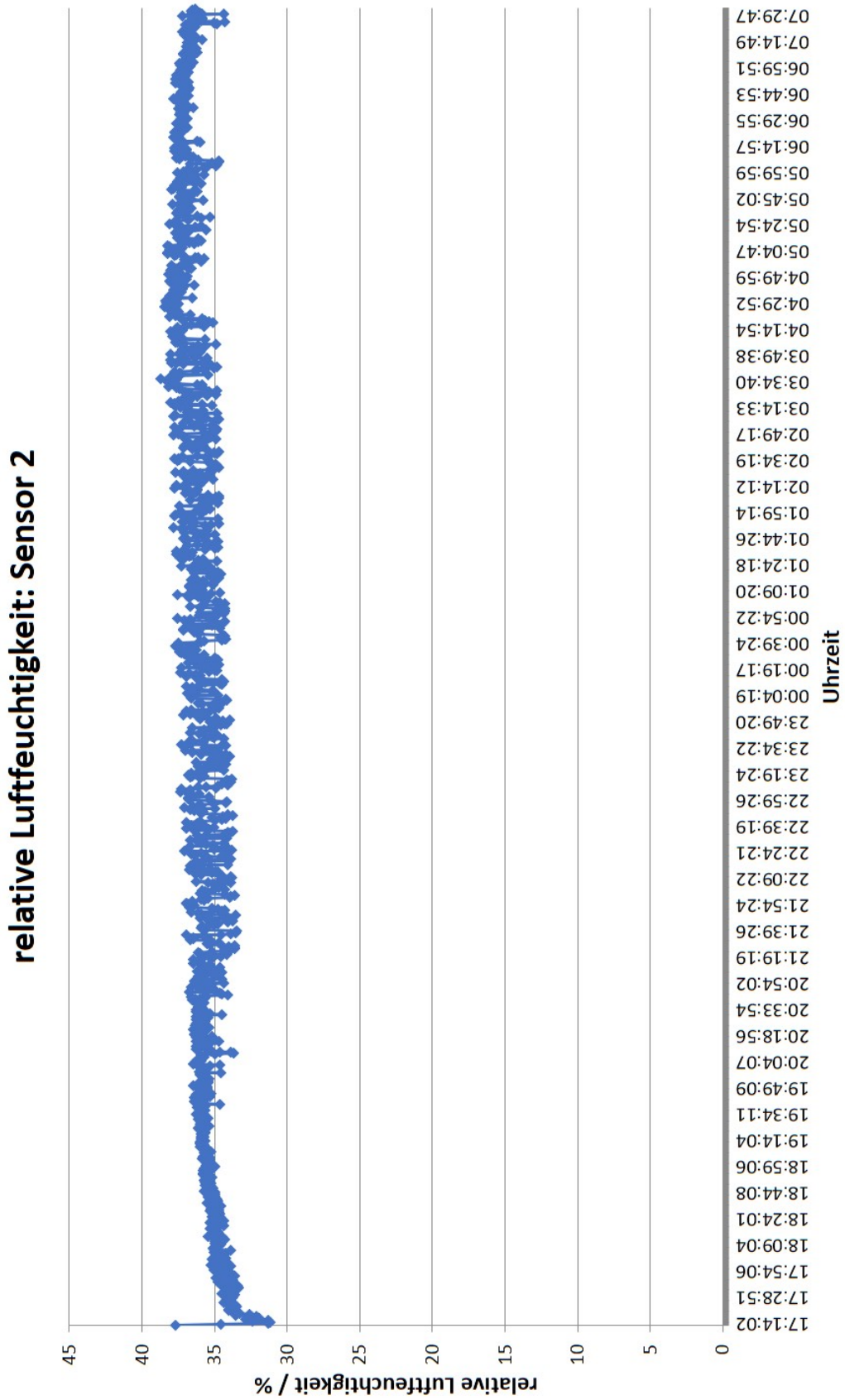


Abbildung A.6: Luftfeuchtigkeits-Diagramm von Sensorgerät 2

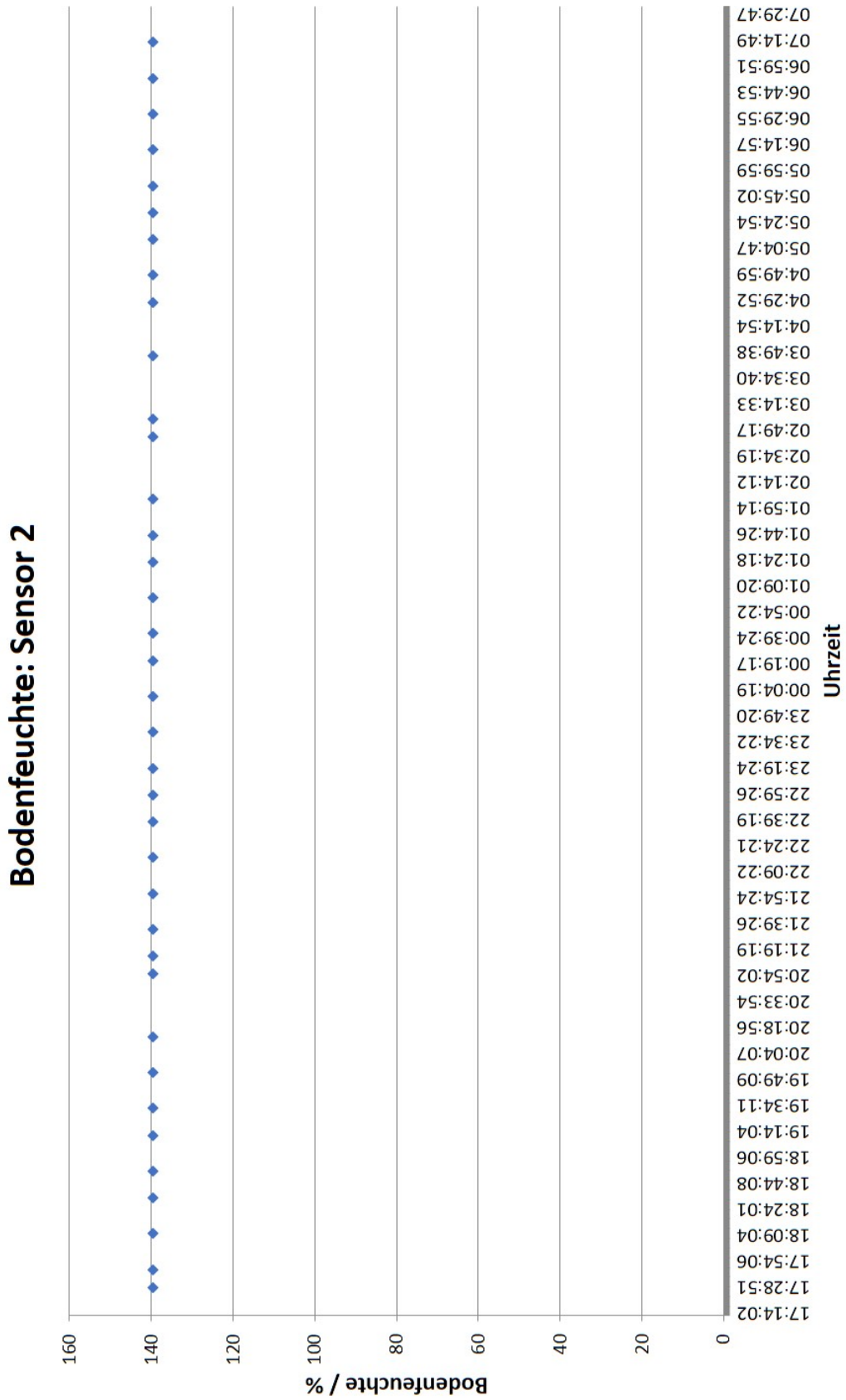


Abbildung A.7: Bodenfeuchte-Diagramm von Sensorgerät 2