

BACHELOR THESIS
Simon Kesting

Entwicklung einer Vorrichtung zur spezifischen Leitwertmessung des Wassers in einem hydroponischen System

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Information and Electrical Engineering

Simon Kesting

Entwicklung einer Vorrichtung zur spezifischen Leitwertmessung des Wassers in einem hydroponischen System

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Elektro- und Informationstechnik*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Robert Heß
Zweitgutachter: Prof. Dr. Martin Lapke

Eingereicht am: 09. Februar 2023

Simon Kesting

Thema der Arbeit

Entwicklung einer Vorrichtung zur spezifischen Leitwertmessung des Wassers in einem hydroponischen System

Stichworte

Sensorik, Leitwert, Hydroponik

Kurzzusammenfassung

Im Rahmen der Entwicklung eines hydroponischen Anzuchtssystems, besteht die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit in einer reproduzierbaren Messung des spezifischen Leitwertes von Nährlösungen. Dabei soll mit möglichst geringem technischen Aufwand in der Hardware eine stabile und genaue Messung realisiert werden. Die Umsetzung sollte somit möglichst kostengünstig und integrierbar in größere Systeme sein.

Es gilt Fragen zu beantworten, welche mit der elektrischen Messung im Wasser einhergehen. Mit welchen elektrischen Größen ist im spezifischen Leitwertbereich zu rechnen? Welche Komponenten sind in der Messvorrichtung notwendig, um eine bestimmte Messgenauigkeit zu erreichen? Im Bezug zur Anwendbarkeit ist es zudem fraglich, welche Rückschlüsse auf den Nährstoffgehalt des Wassers aus der Messung gezogen werden können.

Nach Recherchen zum theoretischen Hintergrund der Hydroponik und der damit verbundenen Messtechnik, wurde eine Entwicklungsumgebung aufgebaut. Die Komplexität im Aufbau der Hard- und Software wurde im Rahmen der technischen Vorgaben an Ergebnisse angepasst. Messungenauigkeiten wurden mit entsprechenden Messverfahren gering gehalten.

Mit einem kompakten Aufbau konnten reproduzierbare Messergebnisse festgehalten werden. Durch softwaretechnische Annäherungen wird anhand von Spannungsmessung ein spezifischer Leitwert berechnet.

In einem System ist die Messvorrichtung integrierbar, durch Anpassung an die Messumgebung und vorgegebene Schnittstellen. . .

Simon Kesting

Title of Thesis

Development of a device for specific conductance measurement of the water in a hydroponic system

Keywords

sensory, conductance, hydroponics

Abstract

In the context of the development of a hydroponic cultivation system, the overriding objective of this work is the reproducible measurement of the specific conductance of nutrient solutions. The aim is to realise a stable and accurate measurement with as little technical effort as possible in the hardware. The implementation should therefore be as cost-effective as possible and integrable into larger systems.

It is necessary to answer questions associated with the electrical measurement in water. What electrical quantities can be expected in the specific conductance range? Which components are necessary in the measuring device to achieve a certain measuring accuracy? With regard to applicability, it is also questionable what conclusions can be drawn about the nutrient content of the water from the measurement.

After researching the theoretical background of hydroponics and the associated measurement technology, a development environment was set up. The complexity in the structure of the hardware and software was adapted to results within the framework of the technical specifications. Measurement inaccuracies were kept low with appropriate measurement procedures.

With a compact design, reproducible measurement results could be recorded. By means of software-technical approximations, a specific conductance value is calculated on the basis of voltage measurements.

The measuring device can be integrated into a system by adapting it to the measuring environment and specified interfaces. . .

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	x
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Nachhaltige Entwicklung	2
1.2.1 SDG2 - Zero Hunger	2
1.2.2 SDG6 - Clean Water and Sanitation	3
2 Theorie	4
2.1 Hydroponik	4
2.2 Elektrochemie	7
2.3 Messtechnik	9
3 Anforderungen	11
3.1 Software Anforderungen	11
3.2 Hardware Anforderungen	13
3.3 Produktion	13
4 Entwurf	14
4.1 Systemstruktur	14
4.2 Systemkomponenten	17
4.2.1 Arduino Nano	17
4.2.2 DS18B20 Temperatursensor	18
4.2.3 Messzelle	20
4.2.4 Betriebsschaltung	26
4.2.5 Messschaltung	35
4.2.6 Anzeige	50
4.3 Arduino IDE	50

5 Implementierung	54
5.1 Realisierung der Schaltungen	54
5.2 Aufbau der Messvorrichtung	57
5.3 Systemsoftware	59
6 Test	62
6.1 Sichtprüfung	62
6.2 Inbetriebnahme	62
6.3 Test der Anforderungen	63
7 Fazit	68
7.1 Auswertung der Ergebnisse	68
7.2 Ausblick	69
Literaturverzeichnis	70
A Anhang	72
Selbstständigkeitserklärung	73

Abbildungsverzeichnis

1.1	SDG2-Logo. [6]	2
1.2	SDG6-Logo. [7]	3
2.1	Aufbau eines hydratisierten Kations. [15]	8
4.1	Entwurf - Systemstruktur, Messkette	14
4.2	Entwurf - Systemstruktur, Übersicht zum Gesamtaufbau.	15
4.3	Entwurf - Systemkomponenten, Anschlüsse des Arduino Nano. (Editor: Fritzing)	17
4.4	Entwurf - Temperatursensor, Anschlusschema. [4]	18
4.5	Entwurf - Temperatursensor, Hardware-Konfiguration. [4]	19
4.6	Entwurf - Messzelle, industrielle Bauweise.	20
4.7	Entwurf - Messzelle, Maße des Konturensteckers.[10]	22
4.8	Entwurf - Messzelle, Ersatzschaltbild.[13]	24
4.9	Entwurf - Betriebsschaltung, Übersicht zum Anschluss der Komponenten.	26
4.10	Entwurf - Betriebsschaltung, Simulation mit dem Steckbrett.	27
4.11	Entwurf - Betriebsschaltung, grundlegende Leiterplatte.	28
4.12	Entwurf - Betriebsschaltung, Ausgangsspannung an $D10 V_{arduino}$.	29
4.13	Entwurf - Betriebsschaltung, Varduino einstellbar mit stabilisiertem Spannungsteiler.	30
4.14	Entwurf - Betriebsschaltung, Simulation der einstellbaren Rechteckpulse vom Arduino.	30
4.15	Entwurf - Betriebsschaltung, Leiterplatte Referenzspannung und Rechteckpulse angepasst.	31
4.16	Entwurf - Betriebsschaltung, Varduino am nicht invertierenden Eingang und Ausgang des OPV.	32
4.17	Entwurf - Betriebsschaltung, LM358 <i>railtorail</i> fehlgeschlagen.	32
4.18	Entwurf - Betriebsschaltung, Ladungspumpe als negativer Spannungsumwandler. [9]	33

4.19	Entwurf - Betriebsschaltung, angepasste Leiterplatte mit negativer Spannungsversorgung.	34
4.20	Entwurf - Messschaltung, Schaltplan erster Entwurf.	36
4.21	Simulation - Messschaltung, Einschwingzeit der Eingangsspannung $V(\text{in})$, mit $R_x = 600\Omega$	36
4.22	Simulation - Messschaltung, Zeitverläufe: $U_{in}, U_{mess}, U_{opOut}, U_{out}$	38
4.23	Simulation - Messschaltung, Zeitverlauf: U_{out}	39
4.24	Simulation - Messschaltung, Analyse nach erstem Entwurf - $U_{out}(R_x)$	41
4.25	Entwurf - Messschaltung, erster Entwurf der Leiterplatte.	41
4.26	Entwurf - Messschaltung, Spannungsteiler mit Verstärkung - Anpassung.	43
4.27	Entwurf - Messschaltung, angepasste Leiterplatte.	44
4.28	Oszillogramm - Messschaltung, Rechteckpulse $V_{arduino}$ und Eingangsspannung V_{in}	44
4.29	Oszillogramm - Messschaltung, Rechteckpulse $V(\text{arduino})$ und Eingangsspannung $V(\text{in})$ - $R_x = 100\Omega$	45
4.30	Oszillogramm - Messschaltung, Spannungsverläufe $V(\text{mess})$ und $V(\text{opOut})$ - $R_x = 100\Omega$	45
4.31	Messung - der Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom EC-Wert - angepasste Messschaltung.	47
4.32	Oszillogramm - Messschaltung, Spannungsverläufe $V(\text{mess})$ und $V(\text{opOut})$ - $\kappa = 1 \text{ mS/cm}$	48
4.33	Entwurf - Messschaltung, stabilisierter Spannungsteiler mit Verstärkung.	49
4.34	Entwurf - Messschaltung, abschließend angepasste Leiterplatte.	49
4.35	Entwurf - LCD Modul. (Editor: Fritzing)	50
4.36	Entwurf - Softwarearchitektur.	51
4.37	Entwurf - header-Dateien.	51
4.38	Entwurf - Initialisierung des Temperatursensors.	52
4.39	Entwurf - Pinout des LCD.	52
4.40	Entwurf - Initialisierung des EC-Sensors.	53
5.1	Implementierung der Betriebsplatine - Bauteilseite.	55
5.2	Implementierung der Messplatine - Bauteilseite.	55
5.3	Implementierung der Betriebsplatine - Leiterbahnseite.	56
5.4	Implementierung der Messplatine - Leiterbahnseite.	56
5.5	gesamter Messaufbau.	57
5.6	Implementierung - Setup der Messung.	59

5.7	Implementierung - Messwerte der Sensoren werden erfasst.	60
5.8	Implementierung - Anzeige auf dem LCD und Ansteuerung der Nährstoffampel.	60
5.9	Implementierung - Berechnung des spezifischen Leitwertes, mit Temperatureausgleich.	61
6.1	Test - Inbetriebnahme der Messstation.	63
6.2	Test - Mischverhältnis der Elektrolytlösungen.	65

Tabellenverzeichnis

3.1	Muss-Ziele	11
3.2	Kann-Ziele	12
4.1	Entwurf - Betriebsschaltung, grundlegende Leiterplatte - Bauteile.	28
4.2	Entwurf - Betriebsschaltung, angepasste Leiterplatte - Bauteile.	31
4.3	Entwurf - Betriebsschaltung, abschließende Anpassung - Bauteile.	34
4.4	Entwurf - Betriebsschaltung, Schnittstellen zur Messschaltung.	35
4.5	Entwurf - Messschaltung, Analyse nach erstem Entwurf.	40
4.6	Entwurf - Messschaltung, Leiterplatte erster Entwurf - Bauteile.	42
4.7	Entwurf - Messschaltung, Analyse nach angepasstem Entwurf.	46
5.1	Implementierung - Messvorrichtung.	57
6.1	Test der Anforderungen.	64
6.2	Messwerte zur Bestimmung der Messunsicherheit.	66

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

An der Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAW) besteht ein Projekt zur Entwicklung eines hydroponischen Anzuchtssystems. Dabei liegt der Fokus auf Nachhaltigkeit, durch effiziente Ressourcennutzung und intelligente Systematik. Hinsichtlich der Effizienz wird an einem Kreislauf gearbeitet, welcher den Wasserverbrauch auf ein Minimum reduziert.

Die spezifische Leitfähigkeit von Wasser ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität und den Nährstoffgehalt des Wassers. Analytische Messungen des spezifischen Leitwertes sind den elektrochemischen Messverfahren zuzuordnen. Im Wasser gelöste Ionen lassen dieses erst leitfähig werden. In der Hydroponik ist der Nährstoffgehalt des Wassers von besonderem Interesse. Für eine effiziente An- und Aufzucht von Pflanzen sollte der spezifische Leitwert überwacht werden. Diese Arbeit setzt sich daher mit einer angepassten Konstruktion zur Anwendung in einem hydroponischen System auseinander. Dabei soll die Messvorrichtung auch unter schwierigen Voraussetzungen, z.B. in Entwicklungsländern, umsetzbar sein.

Die entwickelte Messvorrichtung muss definierte Anforderungen erfüllen, um eine zu hohe oder zu niedrige Konzentration gelöster Ionen im Wasser anzuzeigen. Ein Messbereich von ungefähr $0,1$ bis 3 mS/cm ist in der Hydroponik typischerweise gefordert. Im Dauerbetrieb wird durch eine Nährstoffampel signalisiert, ob ein definierter Messbereich eingehalten wird. Eine Anzeige zeigt den spezifischen Leitwert an. Für eine reproduzierbare und genaue Messung muss die Messeinrichtung kalibriert sein. Zudem ist die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Leitfähigkeit des Wassers zu kompensieren. Dazu wird die Temperatur mit einem wasserdichten Temperatursensor (DS18B20) gleichzeitig gemessen. Ein Arduino Nano erfasst die gemessenen Daten und berechnet den spezifischen Leitwert. Über eine USB-Verbindung können die Messungen auf dem PC gespeichert werden und dienen zur weiteren Analyse.

1.2 Nachhaltige Entwicklung

Durch die Folgen des Klimawandels muss die Menschheit immer Ressourcen schonender leben, daher gilt es auch schon bei technischen Entwicklungen, dies zu berücksichtigen. Die in dieser Arbeit entwickelte Messvorrichtung trägt mit seiner Funktion einen Teil zum geringeren Wasserverbrauch und damit zur Nachhaltigkeit bei. Im Kontext der siebzehn „Sustainable Development Goals“ (SDGs) der vereinten Nationen (UN), ist eine direkte Anwendbarkeit für zwei SDGs erkennbar. Im Folgenden wird ein Bezug zu bestimmten Unterzielen des „SDG2 – Zero Hunger“ und „SDG6 – Clean Water and Sanitation“ hergestellt.

1.2.1 SDG2 - Zero Hunger

Bei dem SDG2 geht es darum den Hunger in der Welt zu beenden. Im Zuge der aktuellen Krisen, wie z.B. der Konflikt in der Ukraine, Covid-19 und der globalen Klimaveränderung wird die Handlung zum Erreichen des Ziels immer dringender. Um den Hunger nachhaltig zu beenden, muss die Nahrungsversorgung gesichert sein, die Versorgung mit Nährstoffen verbessert und die nachhaltige Landwirtschaft gefördert werden. [6]



Abbildung 1.1: SDG2-Logo. [6]

Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) hat zehn Handlungsempfehlungen für eine Welt ohne Hunger formuliert. Die Produktivität sollte mit Agrarökologie gesteigert werden. Dies wird mit Anbaumethoden erreicht, welche Böden und Wasserressourcen schonen. Ein sparsamer Einsatz von Dünger, sowie die zielgenaue Bewässerung fördern die Nachhaltigkeit. Zudem werden digitale Innovationen genannt, wie z.B. Apps für Wetterinformationen. [12] Ein hydroponisches System, welches mit Hilfe von Sensorik optimale Wachstumsbedingungen schafft, ist eine gutes

Beispiel zum Erreichen der ersten Forderung. Mit der Überwachung des Nährstoffgehaltes im Wasser, trägt die Messung der Leitfähigkeit zur Umsetzung der erstgenannten Forderung bei.

Auch die zweite Empfehlung, die Landwirtschaft klimafreundlich und widerstandsfähiger gegen die Folgen des Klimawandels zu machen, wird vor allem durch die effiziente Bewässerung und den sparsamen Einsatz von Düngemittel erreicht. [7]

1.2.2 SDG6 - Clean Water and Sanitation

Das sechste SDG hat zum Ziel die Verfügbarkeit und die nachhaltige Verwaltung von Wasser und sanitären Anlagen für alle zu sichern. Ohne Wasser ist kein Leben möglich. Vom Wasser abhängige Ökosysteme sind alarmierend stark von Degradation betroffen. Auch Menschen sind vom Wasser abhängig. Für mindestens drei Milliarden Menschen ist die Qualität des Wassers, durch fehlende Überprüfung nicht bekannt. Zudem leben über 733 Millionen Menschen in Ländern, mit einem hoch bis kritisch belastetem Wasser. [7]



Abbildung 1.2: SDG6-Logo. [7]

Eine ungenügende Wasser- und Sanitärversorgung hat Einfluss auf die Ernährung. Durch fehlende Hygiene kann es zu Infektionen im Körper kommen, welche vor allem Kinder stark schwächen. Nährstoffe können nur noch schlecht verwertet werden, was zu einem Kreislauf von Krankheit, Unter- und Mangelernährung führt. Eine gesunde Entwicklung von Kindern wird somit verhindert. Ein wichtiger Ansatz, um die Ernährung zu sichern ist in der Entwicklungshilfe die Förderung von Effizienz- und Produktionssteigerungen u.a. im Ackerbau. Dabei ist ein effizientes und nachhaltiges Wassermanagement von großer Bedeutung. [11] In diesem Zusammenhang ist ein hydroponisches System zum Anbau von Pflanzen, sowie eine Überwachung des Nährstoffgehaltes im Wasser, nützlich.

2 Theorie

2.1 Hydroponik

Der Einblick in die Geschichte der Hydroponik (aus dem Griechischen abgeleitet „Wasserarbeit“) soll die gesellschaftliche Bedeutung, sowie die Besonderheit in der Kultivierung von Pflanzen verdeutlichen.

Die überlieferte Vorgeschichte der „Hydroponik“ geht bis 290 v.Chr. zurück. Die „hängenden Gärten von Babylon“ wurden in ihrer Konstruktion und Funktion dokumentiert und nach Jahrhunderten von Wissenschaftlern diskutiert. Nach moderner Ansicht ist es fraglich, inwiefern ein Zusammenhang zur heutigen bodenlosen Kultivierung von Pflanzen besteht. Auch die „schwimmenden Gärten“ der Azteken in Mexiko, im vierzehnten Jahrhundert n.Chr., können nicht als „Hydroponik“ klassifiziert werden. Einer der ersten Wissenschaftler, dessen Forschungen zum Wachstum von Pflanzen im Jahre 1648 veröffentlicht wurden, war der Chemiker Jan Baptist van Helmont. Er wurde 1634 im Zuge der spanischen Inquisition für seine Forschungen und Studien an Pflanzen zu zwei Jahren Haft verurteilt. Erste Erkenntnisse zur „Wasserkultur“, wurden 1699 von dem Naturalisten John Woodward veröffentlicht. Durch Versuche mit destilliertem Wasser und dem Zusatz von kleinen Mengen Boden, wurde die Abhängigkeit des Pflanzenwachstums vom Boden festgestellt. Ein fundamentales Konzept zur Ernährung von Pflanzen konnte allerdings nicht erfasst werden. Erst im 19. Jahrhundert wurden in groß angelegten Experimenten zur landwirtschaftlichen Nutzung der „Wasserkultur“ genauere Erkenntnisse zu benötigten Nährstoffen für das Pflanzenwachstum, gewonnen. Der deutsche Chemiker Justus Freiherr von Liebig erbrachte im Jahre 1840 mit seinen Erkenntnissen zu mineralischen Nährstoffen einen bedeutenden wissenschaftlichen Beitrag zur Agrarchemie. Seine Motivation war es, die weltweite Lebensmittelproduktion voranzubringen. Liebig gilt als „Vater der Dünger-Industrie“, unter anderem durch die Entwicklung vom „Gesetz des Minimums“, welches den individuellen Einfluss von Nährstoffkomponenten auf das Pflanzenwachstum aufzeigt. Auf diese Gesetzmäßigkeit wird zum Ende dieser Arbeit

genauer eingegangen, um die Bedeutung der Leitwertmessung einzuordnen. Ferdinand Gustav Julius von Sachs, ein bekannter deutscher Botaniker, veröffentlichte 1860 seine Nährstofflösungsformel und trieb damit die „Wasserkultur“ voran. Das Fundament für die heutige „Hydroponik“ wurde anschließend durch Ludwig Wilhelm Knop gelegt. Dies ist vor allem durch die Methodik zur Anzucht zu begründen. Nachdem die Samen in Sand und Fasernetzen ausgekeimt waren, verpflanzte er sie in Korkstopfen, in welche zuvor ein Loch gebohrt wurde. Mit Watte wurden die Pflanzen anschließend befestigt und auf einen Glasbehälter, mit einer Nährlösung gesteckt. Durch die verwendete Anbaumethodik wurden zwei grundlegende Erkenntnisse gewonnen. Man hat festgestellt, dass allein durch die im Samen gespeicherten Nährstoffe die Pflanzenteile, welche sich zuerst bilden, versorgt werden können. Zudem müssen Nährstoffe in löslicher Form vorliegen, was im Boden nur für einen sehr geringen Anteil zutrifft. Es gab zu dieser Zeit noch keine spezifischen Methoden zur Messung dieser Eigenschaften. Knop konnte feststellen, dass zu hoch konzentrierte Nährlösungen schädlich für das Pflanzenwachstum sind. Die Ursache dafür konnte er allerdings nicht erfassen. Bis Anfang des zwanzigsten Jahrhunderts wurden kaum neue Erkenntnisse zur „Wasserkultur“ gewonnen. Einige Wissenschaftler haben Forschungen zu Nährlösungen und der Kultivierungsform betrieben, sowie dem genauen Prozess, bei dem Pflanzen Nährstoffe absorbieren. Dennis Robert Hoagland wurde durch seine Formel zur Nährstofflösung bekannt. Er selbst war der Ansicht, dass es keine optimale Formel gebe. Es müssten Anpassungen, abhängig von der Pflanzenvielfalt und Umwelt stattfinden. [8]

1940 veröffentlichte William F. Gericke sein Buch „The Complete Guide to Soilless Gardening“ und etablierte dort den Ausdruck „hydroponics“ (im deutschen „Hydroponik“). Begründet ist dies durch das Verhältnis zur „Geoponik“, mit der Bedeutung aus dem griechischen „Erdarbeit“. Der zuerst ausgewählte Ausdruck „aquiculture“, im Verhältnis zur „agriculture“, was übersetzt „Pflege des Feldes“ bedeutet, wurde bereits in einem anderen Zusammenhang verwendet. Eines der Hauptziele war es, die kommerzielle Nutzbarkeit der Hydroponik zu erforschen und voranzutreiben. In der Einleitung zu seinem Buch nimmt Gericke Bezug zu den deutschen Wissenschaftlern Knop und von Sachs (1860). Nach damaliger Theorie wurde aufgrund der erkannten selektiven Absorption von Nährstoffen angenommen, dass Pflanzen nur die benötigten Nährstoffe aus dem Wasser aufnehmen und der Rest einfach übrig bleibt. Die damit einhergehenden Effekte konnten nicht erkannt werden. Erst mit der Theorie zur elektrischen Dissoziation von Molekülen wurde erkannt, dass Salzmoleküle innerhalb einer Lösung in Ionen aufgespalten werden. Die Anzahl an positiven und negativen Ladungsträgern ist dabei ausgeglichen. Negativ geladene

Nitrat-Ionen (NO_3^-) werden von Pflanzen bevorzugt. Der in der Verbindung enthaltene Stickstoff (N) wird schnell aufgenommen. Die Lösung wird alkalisch, wenn nicht die gleiche Anzahl an positiven Ionen aufgenommen wird. Als positiv geladenes Element wird Kalium (K) von Pflanzen bevorzugt. In einer guten Nährlösung für Pflanzen muss somit überwiegend Nitrat und Kalium vorhanden sein. Bei allen weiteren hauptsächlich in der Lösung vorhandenen Elementen, sollte auf ein ausgeglichenes Verhältnis der Anionen (-) und Kationen (+) geachtet werden. [2]

Abschließend werden, im Bezug zu der Leitwertmessung, wichtige Erkenntnisse festgehalten.

- Pflanzen benötigen für ihr Wachstum mineralische Nährstoffe im Wasser.
- Bei der Nährstoffversorgung von Pflanzen gilt das „Gesetz vom Minimum“.
- Im Samen einer Pflanze sind bereits Nährstoffe vorhanden, welche zur Ausbildung erster Pflanzenteile ausreichen.
- Es können nur im Wasser lösliche Nährstoffe von Pflanzen absorbiert werden.
- Zu hoch konzentrierte Nährlösungen schädigen dem Pflanzenwachstum.
- Nährlösungen müssen an die Pflanzenart und Umwelt angepasst sein.
- Pflanzen absorbieren selektiv Nährstoffe, bevorzugt Nitrat und Kalium.
- Die Anzahl an gelösten Anionen und Kationen sollte ausgeglichen sein.

2.2 Elektrochemie

Die elektrolytische Leitfähigkeit gehört als bedeutsamer experimenteller Befund zum Fachgebiet der Elektrochemie. Dabei wurde entdeckt, dass Elektrolytlösungen den elektrischen Strom leiten. Gemäß ihrer Definition, beschäftigt sich die Elektrochemie als Teilgebiet der physikalischen Chemie mit der Umwandlung von chemischer Energie in elektrische Energie und umgekehrt. Ferner wird die Natur der Elektrolyte, ihre Dissoziation und die Vorgänge an Elektroden untersucht. Im Folgenden werden grundlegende Begriffe und ihre Zusammenhänge geklärt, um die Messung des spezifischen Leitwertes von Wasser besser verstehen zu können.

Wasser gilt als Lösungsmittel, in welchem Elektrolyte gelöst werden können. Als Elektrolyte bezeichnet man ionische Leiter in gelöster, flüssiger oder fester Form. In Folge der elektrolytischen Dissoziation von Ionenbindungen entstehen frei bewegliche Ionen, welche in der Elektrolytlösung in ausgeglichener Anzahl von positiven und negativen Ladungsträgern vorkommen. Die Existenz von frei beweglichen positiv oder negativ geladenen Ionen, wird als spezifischer Leitwert gemessen. Die im englischen als EC-Wert (Electrical Conductivity) bezeichnete Größe, wird in der Fachliteratur häufig auch als spezifische Leitfähigkeit bezeichnet. Um die Verwechslung mit dem elektrischen Leitwert oder elektrischen Leitfähigkeit (Kehrwert des elektrischen Widerstandes) zu vermeiden, wird im Folgenden der Ausdruck EC-Wert oder das Formelzeichen κ („kappa“) verwendet. In Analogie zum spezifischen Widerstand ρ („rho“), welcher als Materialkonstante den elektrischen Widerstand definiert, ist der EC-Wert als Kehrwert des spezifischen Widerstandes definiert.

Es gilt:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \frac{l}{\kappa \cdot A} \quad (2.1)$$

,mit

$$[\kappa] = \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} = \text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \quad (2.2)$$

Dabei definiert l die Länge und A die Fläche des spezifischen Leiters. In Bezug auf die elektrolytische Leitfähigkeit wird der Quotient aus l und A als Zellkonstante oder Widerstandskapazität C bezeichnet.

Es gilt:

$$R = \frac{C}{\kappa} \quad (2.3)$$

Die Materialkonstante κ ist von der Anzahl der Ladungsträger, also der Konzentration der Elektrolytlösung abhängig. [15]

Im Unterschied zu metallischen- oder Elektronenleitern, welche auch als Leiter erster Klasse bezeichnet werden, bewegen sich bei Elektrolyten (Leiter zweiter Klasse) Ionen als Ladungsträger. Positiv geladene Ionen werden als Kationen und negativ geladene Ionen als Anionen bezeichnet. Es treten Wechselwirkungen der im Vergleich zu Elektronen sehr großen und langsamen Ionen in der Elektrolytlösung auf, wodurch die Leitfähigkeit mehrere Zehnerpotenzen kleiner ist als jene von metallischen Leitern. [13]

Zum einen gibt es Wechselwirkungen zwischen Wassermolekülen, welche im Allgemeinen als „van der Waals-Wechselwirkungen“ bekannt sind. Dabei findet permanent eine ungeordnete Fluktuation statt. Zum anderen finden Wechselwirkungen zwischen Ionen und Dipolen statt, welche dabei helfen die Gitterenergie des Ionenkristalls, beim Auflösungsprozess zu überwinden. Es bilden sich Hydrathüllen (allg. Solvathüllen) um ein gelöstes Ion. In der innersten Hydrathülle werden die Wassermoleküle festgebunden, wohingegen die äußeren Hydrathüllen von der Wechselwirkung zwischen Dipolen geprägt sind.

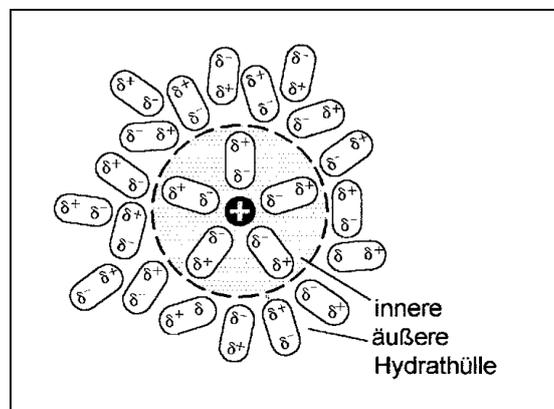


Abbildung 2.1: Aufbau eines hydratisierten Kations. [15]

In Abbildung 2.1 ist der prinzipielle Aufbau eines hydratisierten Kations dargestellt. Die Abgrenzung zwischen innerer und äußerer Hydrathülle ist durch eine gestrichelte Linie abgebildet. Mit der Hydratisierung vergrößert sich der Radius eines hydratisierten Ions

um ein Vielfaches, was die Beweglichkeit durch weitere Wechselwirkungen verringert. [15, 13]

Man unterscheidet echte und potenzielle Elektrolyte. Echte Elektrolyte sind Stoffe, welche aus Ionen aufgebaut sind. Potenzielle Elektrolyte werden erst durch die Wechselwirkung mit polaren Lösungsmittelmolekülen in Ionen überführt. Dabei entscheidet die elektrolytische Dissoziation, als Wechselwirkung zwischen undissoziierten Elektrolyten und dem jeweiligen Lösungsmittel, über die Stärke bzw. Konzentration einer Elektrolytlösung. Bei einem Dissoziationsgrad von $\alpha = 1$, gilt das Elektrolyt als vollständig dissoziiert. Schwache Elektrolyte weisen hingegen ein Gleichgewicht zwischen dissoziierten und undissoziierten Elektrolyteinheiten auf. Es erfordert aufwendige chemische Verfahren, um strukturelle und energetische Vorgänge bei der Lösung eines Stoffes zu erfassen. Dies gilt auch für Rückschlüsse auf die Zusammensetzung gelöster Elektrolyte. [15]

2.3 Messtechnik

Frei bewegliche Ionen in einer Elektrolytlösung können Ladung in beliebiger Richtung transportieren. Durch Anlegen einer Spannung an zwei indifferente Elektroden, eingetaucht in einer Lösung, zeigt sich die Ionenwanderung entlang des elektrischen Feldes. Die negativ geladenen Anionen wandern zum positiven Pol (Anode). Umgekehrt wandern die positiv geladenen Kationen zum negativen Pol (Kathode). Die Ionen stehen unter dem Einfluss der elektrostatischen Anziehung. An den Phasengrenzen der metallischen Elektroden und dem elektrolytischen Leiter gehen Elektronen über. Die Aufnahme von Elektronen bedeutet eine Reduktion und umgekehrt bedeutet die Abgabe von Elektronen eine Oxidation. Die auftretende elektromotorische Kraft (EMK) wird Polarisation E_P genannt. Es entsteht eine Polarisationsspannung, welche dem Spannungsabfall am ohmschen Widerstand des Elektrolyten entgegenwirkt. Die Polarisationserscheinung verringert somit den Strom durch den Elektrolyten. Es muss daher mit Wechselstrom gearbeitet werden, dessen Frequenz und Amplitude nicht zu groß sein darf, weil Polarisationserscheinungen sonst verstärkt auftreten. Zudem sollte die Zellkonstante C der Messzelle passend zum Messbereich sein. Für mittlere Leitfähigkeitsbereiche ($10 - 2000 \mu S/cm$) eignet sich eine Messfrequenz von $50 Hz$, mit einer Zellspannung von $0,5 - 2 V$. Es wird dabei von einer Zellkonstanten von etwa $1 cm^{-1}$ ausgegangen. Als Material der Elektroden von Eintaucharmaturen sind rostfreie Chromnickelstähle (V4A-Stahl) in der Industrie durch ihre Robustheit weit verbreitet. [13]

Gemäß der Definition wird zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit von elektrolytischen Leitern mit einer Einheitsmessstrecke vom Querschnitt 1 cm^2 und der Länge 1 cm gearbeitet. In der Praxis wird die Widerstandskapazität, bzw. Zellkonstante $C[\text{cm}^{-1}]$ einer beliebigen Messstrecke mit Hilfe von Lösungen bekannter spezifischer Leitfähigkeit bestimmt. Es gilt folgender Zusammenhang:

$$C = \frac{l}{A} = \kappa \cdot R \quad (2.4)$$

Zur Bestimmung der spezifischen Leitfähigkeit einer Elektrolytlösung genügt bei Kenntnis der Widerstandskapazität C eine Widerstandsmessung, unter der Voraussetzung für die Gültigkeit des ohmschen Gesetzes.

$$\kappa = \frac{C}{R} \quad (2.5)$$

Der gemessene EC-Wert wird in der Industrie physikalisch eindeutig direkt als κ in $\mu\text{S}/\text{cm}$ angegeben. Der Messbereich sollte nicht zu groß gewählt werden, damit die Genauigkeit im Rahmen einer bestimmten Zellkonstanten hoch bleibt. Zudem ist es nicht sinnvoll den Messbereich bei null zu beginnen, weil selbst reinstes Wasser noch einen EC-Wert von etwa $0,05\ \mu\text{S}/\text{cm}$ aufweist. [13]

3 Anforderungen

Als Anforderungen an die Software, Hardware und Produktion werden Ziele gesetzt, welche sich an der „SMART-Methode“ orientieren. Die Ziele müssen somit möglichst spezifisch, messbar, attraktiv, realistisch und terminiert sein. Zudem findet eine Unterteilung in verpflichtende Muss-Ziele und optionale Kann-Ziele statt. Anschließend werden die formulierten Anforderungen in Bezug zur Software, Hardware und Produktion erläutert und mit den entsprechenden Kürzeln gekennzeichnet. Die Anforderungen werden dabei vor dem Hintergrund gesehen, dass schwierige Umweltbedingungen herrschen.

Tabelle 3.1: Muss-Ziele

	MUSS-ZIELE
M1	Die Leitwertmessung ist reproduzierbar in einem Messbereich von $0,1 \text{ mS/cm}$ bis 5 mS/cm .
M2	Die elektrische Leitfähigkeit (EC-Wert) wird spezifisch auf einem LCD angezeigt.
M3	Die Temperatur des Wassers wird parallel gemessen, zum digitalen Ausgleich der Temperaturabhängigkeit bei der Leitwertmessung.
M4	Eine LED-Ampel zeigt intuitiv den aktuellen Nährstoffgehalt passend zum Wachstumsstadium und Nährstoffbedarf bestimmter Pflanzentypen.
M5	Die Platinen zum Aufbau der Betriebs- und Messschaltung sind selbst entwickelt

3.1 Software Anforderungen

Bei den Anforderungen an die Software steht die Funktionalität der Messvorrichtung im Vordergrund, zur Aufbereitung gemessener Werte, vor der Digitalisierung. Der Programmcode wird an gemessene Werte zur Kalibrierung angepasst. Zudem gibt es Anforderungen an die Bedienbarkeit und die Möglichkeit zur Erweiterung, bzw. dem Einbinden in

Tabelle 3.2: Kann-Ziele

	KANN-ZIELE
K1	Die Fehleranfälligkeit ist durch eine Messkettenüberwachung reduziert.
K2	Der Arduino Nano ist steckbar auf der Betriebsschaltungs-Platine.
K3	Messdaten sind über eine Bus-Verbindung auslesbar.
K4	Der Messbereich ist umschaltbar vom mittleren Messbereich (0,1 bis 5 mS/cm) auf einen höheren Messbereich (5 bis 10 mS/cm).

ein System. Allgemein sollte die Software der Entwicklungsumgebung frei zugänglich und kostenlos sein. Der festgelegte Messbereich muss durch den entsprechenden Aufbau der Messschaltung und Umrechnung gemessener Spannungen im Programmcode, spezifisch angezeigt werden (M1, M2). Im Laufe der Entwicklung kann es notwendig sein, dass der Messbereich angepasst wird oder umschaltbar in zwei Messbereichen realisiert wird, weil die Messung zu ungenau ist (K4). In Bezug zu einer reproduzierbaren und spezifischen Messung, muss eine Kalibrierung stattfinden, um gemessene Spannungswerte den entsprechenden EC-Werten zuordnen zu können. Dabei gilt es die Temperaturabhängigkeit in die Kalibrierung miteinzubeziehen. Die Messgenauigkeit sollte im Genauigkeitsbereich eines vergleichbaren Referenzmessgerätes liegen (M1). Dabei liegt die Messgenauigkeit zwischen $\pm 1\%$ (EC20 EC-Meter [5]) und $\pm 5\%$. Es wird sich für einen softwaretechnischen Temperatureausgleich gegenüber dem Einbau eines Temperatureausgleichswiderstandes in der Messschaltung entschieden (M3). Dies hat den Vorteil, dass die Temperatur der Messlösung direkt messbar und eine genauere Kalibrierung unter Einbezug der Temperaturabhängigkeit einer spezifischen Leitwertmessung möglich wird. Die Zuverlässigkeit der Überwachung des EC-Wertes im Dauerbetrieb, sollte durch möglichst geringe Komplexität hoch sein, damit auch Fehlbedienung vermieden wird. Es muss daher intuitiv möglich sein, das Verlassen eines erforderlichen Messbereiches zu erkennen (M2, M4). Um die Zuverlässigkeit der Messvorrichtung zu erhöhen, kann es notwendig sein die Messkette zu überwachen (K1). Für das Einbinden in ein System sollte der Programmcode modular und gut verständlich aufgebaut sein, hierzu werden geltende Konventionen eingehalten und der Programmcode kommentiert. Zur Anwendung in einem System kann es sinnvoll sein, Messdaten über einen Bus auslesen zu können (K3), hiermit können große Datenmengen auf einem PC abgespeichert und weiterverarbeitet werden.

3.2 Hardware Anforderungen

Der Aufbau der Messvorrichtung muss die Umsetzung der Funktionalität ermöglichen. Dabei sollten die elektronischen Komponenten durch ein passendes Gehäuse zumindest vor Spritzwasser (IP44) geschützt werden. Verwendete Materialien und Komponenten sollten zudem leicht verfügbar sein. Für eine reproduzierbare Leitwertmessung wird eine Messzelle benötigt, welche wasserdicht, korrosionsbeständig und robust in der Verarbeitung ist (M1). Ein Temperatursensor muss nahe der umströmten Messzelle die Wassertemperatur messen können (M3). Dabei sollte ein möglicher Einfluss auf die Messung, durch elektrisch leitende Materialien beachtet werden. Die Hardware sollte solide sein, durch Auswahl geeigneter Materialien und einem modularen Aufbau (M5). Bei dem Entwurf der Schaltungen ist auf einen kompakten Aufbau zu achten, um elektromagnetische Störeinflüsse und Beschädigung durch mechanische Einwirkungen zu vermeiden (K2). Dabei sollte die Komplexität möglichst gering sein, um eine hohe Fehlerresistenz zu erreichen. Um Ausfallwahrscheinlichkeiten zu reduzieren könnte Redundanz, bzw. Überwachung der Messkette notwendig sein (K1). Zur Bedienbarkeit werden Anzeigeelemente benötigt, welche dem Bediener den aktuellen Betriebsstatus anzeigen. Mit einzelnen LEDs muss der Betriebszustand schnell ersichtlich sein, was in Form einer Nährstoffampel umgesetzt wird (M4). Zudem sollten gemessene Werte spezifisch angezeigt werden, um als Anwender reagieren zu können, bezüglich dem Hinzufügen von Nährstoffen oder Wasser. Der passende EC-Wert ist dabei abhängig von der Art, sowie dem Wachstumsstadium der Pflanzen (M2).

3.3 Produktion

Neben dem Ziel der Langlebigkeit durch die Verwendung passender Materialien, muss ebenfalls auf eine kostengünstige Beschaffung der Einzelkomponenten geachtet werden, um eine leichte Reproduzierbarkeit zu ermöglichen (M1). Der Schaltungsentwurf hat ebenfalls die Anforderung reproduzierbar zu sein (M5), daher sollte die Entwicklung eines PCB (Printed Circuit Board) auf maximal zwei Lagen (Layer) beschränkt sein, damit einfache Produktionsverfahren ausreichen.

4 Entwurf

Beim Entwurf wird mit der übergeordneten Struktur des Messaufbaus begonnen. Anschließend werden die hauptsächlichen Komponenten des Systems und ihre Schnittstellen definiert. Es werden einheitliche Diagramme genutzt, um das Konzept übersichtlich darzustellen.

4.1 Systemstruktur

Die schematische Struktur des Messaufbaus wird in folgender Messkette abgebildet.



Abbildung 4.1: Entwurf - Systemstruktur, Messkette

Der Sensor besteht aus einer Messzelle, welche mit Elektroden einen definierten Messraum darstellt. Mit einer Wechselspannung wird die Leitfähigkeit des Wassers bemessen. Die Betriebsschaltung erzeugt eine definierte Spannung, durch Beschalten der Messstrecke als kapazitiven Widerstand. Die Messschaltung muss entsprechend mit einem passenden ausgelegt oder die gemessene Spannung verstärkt werden, um sie weiterverarbeiten zu können.[13]

Im AD-Umsetzer wird das gemessene Wechselsignal gleichgerichtet, damit eine definierte Gleichspannung im Arduino verarbeitet wird. Der Mikrocontroller des Arduino verarbeitet die gemessenen Informationen vom Messvorgang, um definierte EC-Werte zu berechnen. Zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit findet parallel eine Temperaturmessung statt. Die Kalibrierung erfolgt mithilfe von Referenzmessungen.[14] Die Anzeige der gemessenen Werte wird durch eine LCD-Anzeige und eine Nährstoffampel realisiert.

Die genaue Struktur des Systems wird im Folgenden mit den einzelnen Komponenten und ihren Schnittstellen im gesamten Messaufbau dargestellt. Abbildung 4.2 dient zur Orientierung für die anschließende Implementierung. Es sind Anpassungen nötig, um das System aufzubauen.

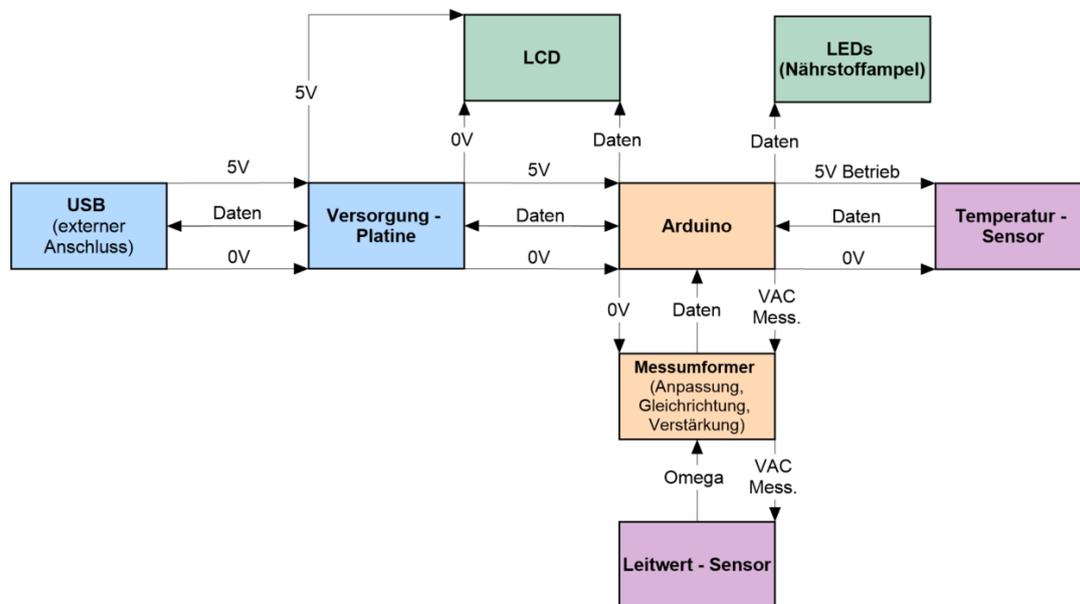


Abbildung 4.2: Entwurf - Systemstruktur, Übersicht zum Gesamtaufbau.

Farblich differenziert wird zwischen Anschluss- und Versorgungskomponenten (blau), informationsverarbeitenden Modulen (orange), Sensorik-Komponenten (lila) und Anzeige-Elektronik (grün).

Die Messvorrichtung wird extern mit Spannung versorgt. Es bestehen drei Möglichkeiten den Arduino Nano mit Spannung zu versorgen. Über den Anschluss V_{in} kann eine unregelmäßige Spannung von 6-20V angeschlossen werden. Die Spannung wird intern auf 5V heruntergeregelt, wobei die Spannungsdifferenz als Wärme verbraucht wird. Alternativ kann eine externe 5V Spannungsquelle eingespeist werden, durch den Mehraufwand kann auf diesem Weg eine stabile Spannungsversorgung genutzt werden. Nachteilig ist dabei, dass auf der Platine des Arduinos Anpassungen vorgenommen werden müssen, um einen sicheren Datentransfer zu ermöglichen. Die dritte und im weiteren Entwurf verwendete Spannungsversorgung ist die Mini-B USB Verbindung des Arduino Nano. Über den Standard USB 2.0 - Anschluss des genutzten PCs stehen 5V und 500mA zur Verfügung. Es ist davon auszugehen, dass die Stromaufnahme der Messvorrichtung zwischen 100 und

200 mA liegt. Neben des geringen Aufwands im Aufbau ist der einfache Datentransfer ein großer Vorteil der USB-Verbindung.[3]

Die einzelnen Komponenten werden zur Versorgung auf der Betriebsplatine angeschlossen. Es wird nur eine Lage zum Löten und Anordnen von Leiterbahnen genutzt, um die Realisierung auf einer einfachen Lochrasterplatine zu ermöglichen. Ein kompakter Aufbau wird durch Aufstecken des Arduino Nano, dem LCD und der Messschaltung erreicht.

Der Arduino Nano eignet sich durch seinen kompakten, ausgereiften Aufbau und die günstige Erhältlichkeit sehr gut für die geplante Anwendung. Es stehen 22 digitale Ein-/Ausgangspins, 8 analoge Eingangspins und ein Mini-B USB Anschluss zur Verfügung. Der verbaute Microcontroller ATmega328 ist mit 16 MHz getaktet. [3]

Der Messumformer wird zur Anpassung der generierten Rechteckpulse zu einer symmetrischen Rechteckspannung benötigt. Zudem wird die gemessene Spannung in der Messschaltung für die weitere Auswertung gleichgerichtet und verstärkt. Der kapazitive Widerstand des Leitwert-Sensors ist in dem Messumformer verschaltet und wird für den geforderten Bereich bemessen. Damit der geforderte Messbereich von 0,1 bis 5 mS/cm erreicht wird, muss eine geeignete Konstruktion der Messzelle gewählt werden. Abschließend wird die Messspannung in ihrer Amplitude und Frequenz angepasst, um den spezifischen Leitwert reproduzierbar messen zu können.

Für die Temperaturmessung wird ein DS18B20 Temperatursensor verwendet. Die wasserdichte Variante ist für das Eintauchen im Wasser geeignet. Über einen Eindrahtbus werden die Daten seriell übertragen. Im Betrieb mit einer externen Spannungsversorgung werden somit drei Anschlüsse benötigt.

Für den LCD wird ein auf Arduinos angepasstes Modul verwendet, welches mit einer vorkonfigurierten Stiftleiste direkt auf die Betriebsplatine steckbar ist. Die Displaygröße ist mit 16 Zeichen x 2 Zeilen ausreichend.

Die Nährstoffampel wird mit einzelnen LEDs realisiert, welche auf die Betriebsplatine gesteckt werden. Der transparente Deckel des Gehäuses ermöglicht die Sichtbarkeit des angezeigten Betriebsstatus.

4.2 Systemkomponenten

In den folgenden Abschnitten wird im Detail auf die einzelnen Komponenten der Messvorrichtung eingegangen. Dabei wird deren Funktion beschrieben und der Entwurf anhand von technischen Zeichnungen oder Schaltplänen erläutert. Für selbst entworfene Komponenten wird der gesamte Entwicklungsverlauf aufgezeigt. Anhand von Gegenüberstellungen werden Unterschiede beschrieben. Für den finalen Entwurf wird nachfolgend der Programmcode entworfen (siehe 4.3 Arduino IDE). Die anschließende Implementierung (siehe Kapitel 5, Implementierung) wird ebenfalls in Bezug zum finalen Entwurf aufgezeigt, um den Aufbau der Messvorrichtung übersichtlich darzustellen. Einzelne Funktionen werden im Zuge des Entwurfes simuliert, durch Verknüpfung auf einem Steckbrett oder digital mit dem Simulationsprogramm LTspice. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit werden die einzelnen Simulationsergebnisse und Anpassungen zusammenhängend aufgeführt und beschrieben.

4.2.1 Arduino Nano

Der Arduino Nano hat als zentrales Bauelement mehrere Funktionen in der Messvorrichtung. Abbildung 4.3 zeigt die Anordnung der einzelnen Anschlüsse. Die für den Entwurf relevanten Anschlüsse werden nachfolgend anhand der farblichen Markierungen beschrieben.

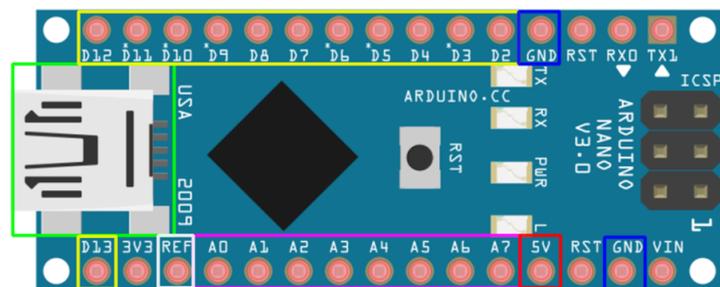


Abbildung 4.3: Entwurf - Systemkomponenten, Anschlüsse des Arduino Nano. (Editor: Fritzing)

Über den Mini-B USB Anschluss (grün) wird die Platine an eine Spannungsquelle angeschlossen. Außerdem können Daten über die USB-Schnittstelle übertragen werden, zum Empfangen des Programmcodes oder Senden von Messdaten.

Die Spannungsquelle versorgt den verbauten ATmega328 mit 5V. Die Spannung kann am 5V-Pin (rot) für die Versorgung weiterer Komponenten abgegriffen werden. Zwei GND-Pins (blau) können für den Anschluss zum Massepotential genutzt werden.

Die Steuerung angeschlossener Komponenten erfolgt über digitale Ein-/Ausgänge (gelb).

Die analoge Messspannung wird über einen der analogen Eingänge (lila) an den intern verbauten 10-Bit ADC des Arduino geleitet. Dieser wandelt die anliegende analoge Spannung in 1024 digitale Werte (0-1023) um. In der Grundkonfiguration bezieht sich die Auflösung auf einen Spannungsbereich von 0 bis 5V. An Pin-REF (weiß) kann durch Anschluss einer Referenzspannung und Anpassung im Programmcode die maximale Referenzspannung reduziert werden, wodurch die Auflösung steigt.

4.2.2 DS18B20 Temperatursensor

Der Temperatursensor DS18B20 von Maxim Integrated ist ein digitales Hoch-Präzisions-Thermometer, welches das 1Wire-Protokoll zur Kommunikation nutzt. Im Temperaturbereich von -55°C bis $+125^{\circ}\text{C}$ kann gemessen werden. Die Genauigkeit im Bereich von -10°C bis 85°C liegt bei $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Die programmierbare Auflösung liegt zwischen 9 Bits und 12 Bits. Der hier verwendete Standard von 12 Bits entspricht einer Temperaturschrittweite von $0,0625^{\circ}\text{C}$ und einer Umsetzungszeit von 750ms. Für geringere Auflösung ist pro Bit eine Verdopplung der Temperaturschrittweite und eine Halbierung der maximalen Umsetzungszeit kennzeichnend. [4]

Der Temperatursensor wird von einer externen Spannungsquelle versorgt. Abbildung 4.4 zeigt das Anschlussschema.

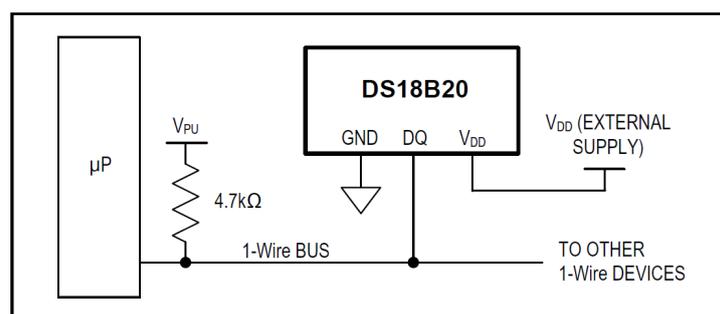


Abbildung 4.4: Entwurf - Temperatursensor, Anschlussschema. [4]

Die zentrale Leitung ist der Eindrahtbus, über welchen der gesamte Datentransfer stattfindet. Aus Abbildung 4.4 wird deutlich, dass der Microprozessor/-controller (ATmega328) des Arduino als Busteilnehmer mit dem Pin "DQ" des Sensors verbunden ist.

Für die Hardware-Konfiguration (Abbildung 4.5) vom Eindrahtbus wird ein externer Pullup-Widerstand benötigt, welcher den Eindrahtbus im Ruhezustand auf High-Pegel, bzw. logische 1 zieht. Die einzelnen Busteilnehmer können über einen Tri-State-Anschluss Eingabesequenzen Empfangen oder Senden. Der Datentransfer ist durch eine feste Abfolge von Sequenzen möglich.

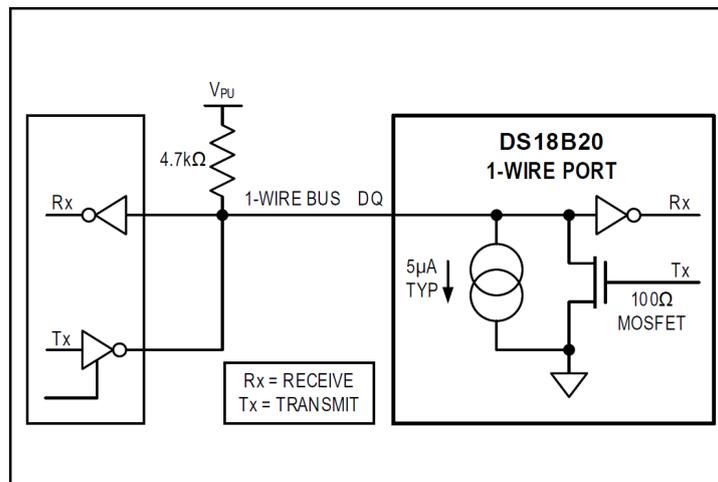


Abbildung 4.5: Entwurf - Temperatursensor, Hardware-Konfiguration. [4]

4.2.3 Messzelle

Industriekonstruktion

Bei den ersten Entwürfen wurde sich an einem industriellen Aufbau orientiert. Dabei handelt es sich um eine sehr robuste Konstruktion für Eintaucharmaturen. Für niedrige bis mittlere Leitfähigkeiten wird als Elektrodenmaterial bevorzugt nichtrostender Chrom-Nickel-Stahl (V4A-Stahl) verwendet. Dieser hat eine geringe aktive Oberfläche, weshalb die Maße der Messelektroden beim Entwurf beachtet werden sollten. Zudem müssen beide Messelektroden bestens voneinander isoliert sein, ansonsten wird statt der Leitfähigkeit der Elektrolytlösung der Isolationswiderstand des Messspannungsgebers gemessen. [13]

Die Leitfähigkeit wird durch das Anlegen einer Wechselspannung an zwei Elektroden gemessen. Der DS18B20-Tempersensord ist in der inneren Elektrode angebracht. Löcher in der äußeren Elektrode ermöglichen ein komplettes Durchspülen des Messraumes, mit der zu bemessenden Elektrolytlösung. In Hinblick auf die Erhältlichkeit benötigter Materialien, wurden zwei Varianten entworfen. Abbildung 4.6 zeigt den ersten Entwurf.

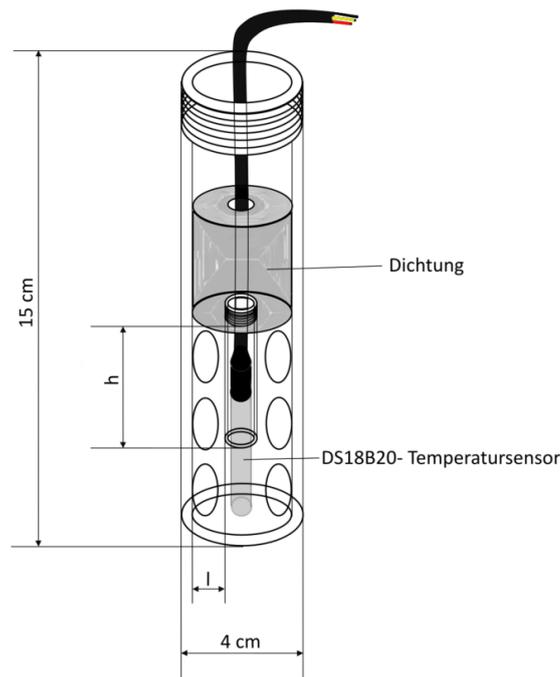


Abbildung 4.6: Entwurf - Messzelle, industrielle Bauweise.

Die Konstruktion der Messzelle definiert den Messraum, welcher entscheidend für den Messbereich ist. Dabei bestimmt die Fläche und der Abstand der Elektroden die Zellkonstante, welche zur Berechnung der Leitfähigkeit benötigt wird (siehe Kapitel 2.3). Es gilt folgender mathematischer Zusammenhang:

$$x = \frac{C}{R} \quad (4.1)$$

, mit

$$C = \frac{l}{A} \quad (4.2)$$

C ist somit der Quotient aus dem Abstand l und der Fläche A der Elektroden.

Der Durchmesser der inneren Elektrode ($d_1 = 13,16 \text{ mm}$), sowie dessen Höhe ($h = 1 \text{ cm}$) sind maßgebend für die Fläche A . Kleiner kann die innere Elektrode nicht gewählt werden, wenn der Temperatursensor zentral eingebaut wird. Die äußere Elektrode hat einen Durchmesser $d_2 = 32 \text{ mm}$.

Es gilt somit für die Zellkonstante:

$$l = \frac{d_2 - d_1}{2} \quad (4.3)$$

$$= \frac{32 \text{ mm} - 13,16 \text{ mm}}{2} \quad (4.4)$$

$$= 9,42 \text{ mm} \quad (4.5)$$

$$A = d_1 \cdot \pi \cdot h \quad (4.6)$$

$$= 13,16 \text{ mm} \cdot \pi \cdot 1 \text{ cm} \quad (4.7)$$

$$= 4,134 \text{ cm}^2 \quad (4.8)$$

Hiermit folgt für die Zellkonstante C :

$$C = \frac{9,42 \text{ mm}}{4,134 \text{ cm}^2} \quad (4.9)$$

$$= 0,228 \text{ cm}^{-1} \quad (4.10)$$

Die berechnete Zellkonstante passt zu einem niedrigen Leitwertbereich (bis 0,1mS/cm). Der Aufbau einer solchen Konstruktion ist eingeschränkt hinsichtlich einer größeren Zellkonstanten, welche zur Bemessung von mittleren Leitwertbereichen (bis 2mS/cm) nötig ist. Der Durchmesser der äußeren Elektrode müsste größer oder die innere Elektrode kleiner gewählt werden, um den Abstand zwischen den Elektroden zu vergrößern und somit den Wert der Zellkonstanten zu erhöhen. Zudem ist der Aufwand in der Produktion und Wartung einer zylindrischen Messzelle hoch.

Konturenstecker-Messzelle

Es wird im Folgenden ein genormter Konturenstecker, international als Typ D bezeichnet, in den Entwurf einbezogen. Dieser ist für größere Ströme als ein Eurostecker ausgelegt. Die Aussparungen für die Schutzkontakte einer Steckdose eignen sich für die Montage des Temperaturfühlers. Im Allgemeinen spricht ein kompakter und solider Aufbau, sowie eine einfache Reinigung, bzw. Wartung für die Verwendung eines Konturensteckers. Das gespritzte Gehäuse ist sehr enganliegend um die Kontakte und mit einer Zugentlastung am Kabel verbunden. Durch die Bauform sind die Kontakte gut voneinander isoliert. Er ist kostengünstig und gut erhältlich, oder kann von defekten Geräten (Geräte der Schutzklasse 2, mit hoher Stromaufnahme, z.B. Bohrmaschinen, Föhn) entfernt und neu verwendet werden. Abbildung 4.7 zeigt den schematischen Aufbau mit den dazugehörigen Maßen (in *mm*).

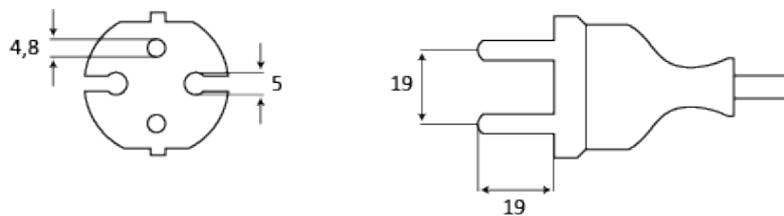


Abbildung 4.7: Entwurf - Messzelle, Maße des Konturensteckers.[10]

Auch hier gilt es die Zellkonstante anhand der Geometrie zu berechnen, um näherungsweise den zu bemessenden Widerstandsbereich zu ermitteln.

Dazu wird zunächst der mittlere Abstand zwischen den Elektroden berechnet, welcher als Quotient der Fläche zwischen den Elektroden q und dem Durchmesser einer Elektrode d definiert wird. Es gilt:

$$l_{\text{mittel}} = \frac{q_{\text{ges}} - q_{\text{kreis}}}{d} \quad (4.11)$$

$$= \frac{l_{\text{max}} \cdot d - \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi}{d} \quad (4.12)$$

$$= \frac{19 \text{ mm} \cdot 4,8 \text{ mm} - (2,4 \text{ mm})^2 \cdot \pi}{4,8 \text{ mm}} \quad (4.13)$$

$$= 1,523 \text{ cm} \quad (4.14)$$

Zudem wird die Fläche einer Elektrode bestimmt.

$$A = \frac{\pi}{2} \cdot d \cdot h \quad (4.15)$$

$$= \frac{\pi}{2} \cdot 4,8 \text{ mm} \cdot 19 \text{ mm} \quad (4.16)$$

$$\approx 1,433 \text{ cm}^2 \quad (4.17)$$

Für die Zellkonstante gilt somit:

$$C = \frac{l_{\text{mittel}}}{A} \quad (4.18)$$

$$= \frac{1,523 \text{ cm}}{1,433 \text{ cm}^2} \quad (4.19)$$

$$\approx 1,063 \text{ cm}^{-1} \quad (4.20)$$

Mit dem geforderten spezifischen Leitwertbereich von $\kappa = 0,1 \text{ mS/cm}$ bis 5 mS/cm wird der zu erwartende Widerstandsbereich des Elektrolyten angenähert. Es gilt:

$$R_{xmin} = \frac{C}{\kappa_{max}} \quad (4.21)$$

$$= \frac{1,063 \text{ cm}^{-1}}{5 \frac{\text{mS}}{\text{cm}}} \quad (4.22)$$

$$= 212,6 \Omega \quad (4.23)$$

$$R_{xmax} = \frac{C}{\kappa_{min}} \quad (4.24)$$

$$= \frac{1,67 \text{ cm}^{-1}}{0,1 \frac{\text{mS}}{\text{cm}}} \quad (4.25)$$

$$= 10,63 \text{ k}\Omega \quad (4.26)$$

Die berechnete Zellkonstante ist als Richtwert zu sehen, mit dem zu erwartende Widerstandswerte berechnet werden können. Die Messschaltung muss an den Widerstandsbe- reich angepasst sein, um den dazugehörigen Leitwertbereich abzudecken. Die Bestimmung einer genauen Zellkonstante muss abschließend mit einer Kalibrierung erfolgen.

Für die Simulation der Messzelle müssen auch parasitäre Größen beachtet werden, welche auf die Messung Einfluss nehmen. Abbildung 4.8 zeigt das Ersatzschaltbild einer Leitfähigkeitsmesszelle.

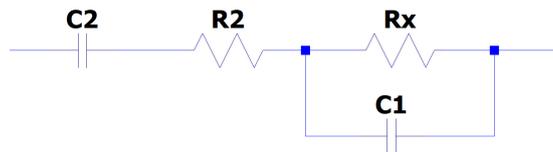


Abbildung 4.8: Entwurf - Messzelle, Ersatzschaltbild.[13]

Die Kapazität C_1 entsteht durch die Elektroden, wenn sie in eine Elektrolytlösung eingetaucht werden, welches ähnlich wie ein Dielektrikum wirkt. Zur Berechnung der Kapazität mit den bisher bestimmten Maßen der Messzelle wird von einer wässrigen Lösung ausgegangen, dessen Dielektrizitätskonstante ϵ in die Formel eingeht. Es gilt:

$$C_1 = \frac{\epsilon}{4\pi \cdot 0,9 \cdot C} \quad (4.27)$$

$$= \frac{80}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,9 \cdot C} \quad (4.28)$$

$$\approx 4,24pF \quad (4.29)$$

Die Messfrequenz sollte möglichst niedrig gewählt werden, um bei der Messung niedriger Leitfähigkeiten den Blindwiderstand der parasitären Kapazität C_1 gering zu halten.

Der Widerstand R_2 und die Kapazität C_2 entstehen in Folge von Polarisationserscheinungen. Es wird versucht durch Anpassung der Messfrequenz, -spannung und Elektrodenfläche die Polarisationseffekte möglichst gering zu halten.[13]

4.2.4 Betriebsschaltung

Die Betriebsschaltung versorgt die Messvorrichtung mit elektrischer Energie. Zudem werden die einzelnen Systemkomponenten auf ihr montiert. Abbildung 4.9 zeigt den Anschluss auf der Betriebsplatine:

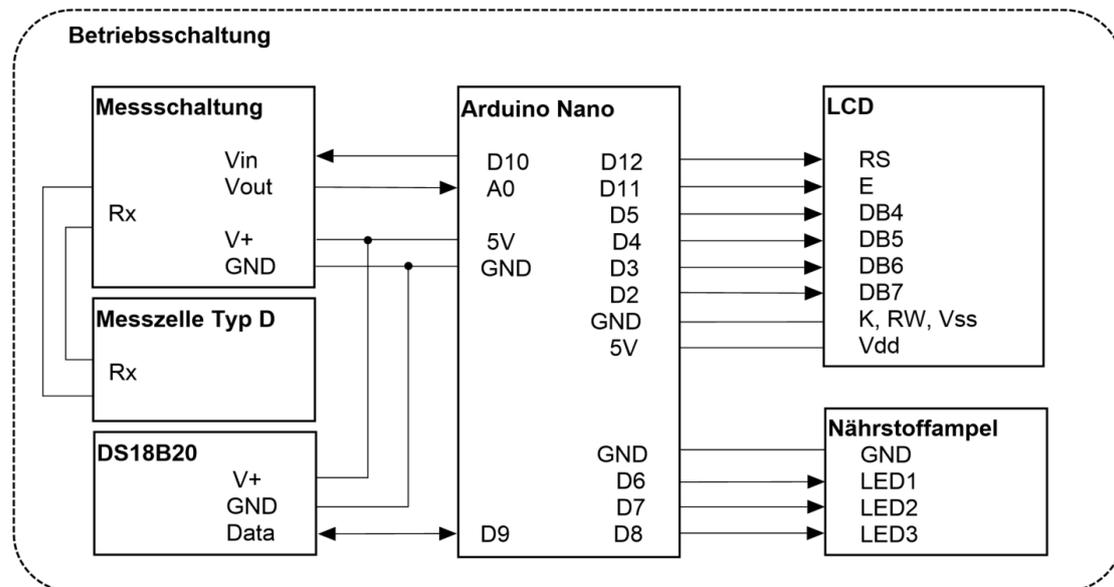


Abbildung 4.9: Entwurf - Betriebsschaltung, Übersicht zum Anschluss der Komponenten.

Die *MesszelleTypD* und *DS18B20* sind über Kabel, welche mit Aderendhülsen bestückt sind, in Schraubkontakten an die Betriebsplatine angeschlossen. Die weiteren Systemkomponenten sind über Steckkontakte, auf der Oberseite und Leiterbahnen auf der Unterseite der Betriebsplatine, miteinander verbunden.

Im Laufe der Entwicklung werden ausgehend vom ersten Entwurf, welcher mit der Grundkonfiguration des Arduino Nano arbeitet, Anpassungen vorgenommen. Beginnend mit dem einfachen Betrieb wird über den angepassten Betrieb eine den Anforderungen entsprechend funktionierende Messstation entworfen.

Einfacher Betrieb

Im ersten Entwurf werden die vom Arduino generierten 5 V Pulse, bei einer eingestellten Frequenz von 50 Hz (Pin: D10) als Eingangsspannung (V_{in}) direkt auf die Messschaltung gegeben. Die Ausgangsspannung der Messschaltung (V_{out}) wird auf einen analogen Eingang (A0) des Arduino Nano gegeben. Die Referenzspannung, zur Digitalisierung der gemessenen analogen Spannung, ist 5V gemäß Standard.

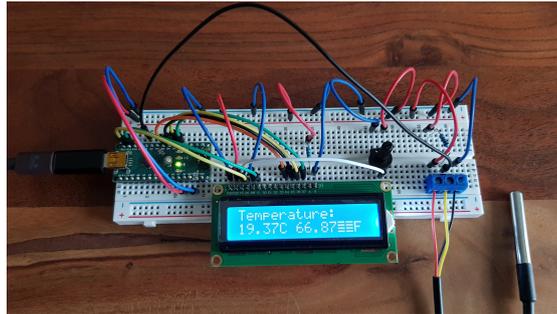


Abbildung 4.10: Entwurf - Betriebsschaltung, Simulation mit dem Steckbrett.

Für die erste Inbetriebnahme sind der DS18B20 Temperatursensor und das LCD gemäß Abbildung 4.9 und Abbildung 4.4 auf einem Steckbrett angeschlossen. In den Programmcode sind bestehende Bibliotheken eingebunden, welche im Kapitel 4.3 beschrieben werden.

Erste Messungen zur Generierung der Rechteckpulse für die Umsetzung der Messschaltung erfolgen auf dem Steckbrett. Für reproduzierbare Messungen, mit einem kompakten Aufbau, wird die Betriebsschaltung implementiert. Den ersten Entwurf der Betriebsschaltung auf einer Lochrasterplatine zeigt Abbildung 4.11.

Eine Zuordnung der einzelnen Pins ist im Editor *Fritzing* durch Anklicken der einzelnen Komponenten möglich. Die vorkonfigurierten Systemkomponenten wurden gemäß Abbildung 4.9 miteinander verbunden. Die Anordnung der Bauteile ist per Hand entworfen, um die Implementierung auf einer einfachen Lochrasterplatine zu ermöglichen. Die unteren Buchsenleisten (J1 und J2) sind zum Aufstecken der Messschaltung vorgesehen, welche separat entworfen wird. Tabelle 4.1 zeigt die Zuordnung der Beschriftung zu den einzelnen Bauteilen.

Mit dem Oszilloskop werden die Rechteckpulse vom Pin D10 des Arduino zum V_{in} der Messschaltung gemessen.

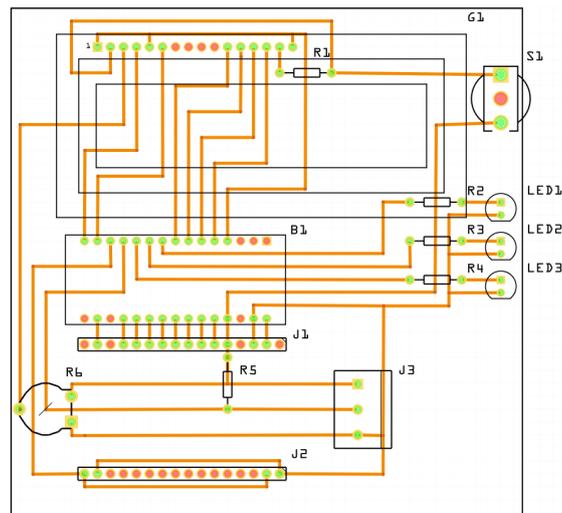


Abbildung 4.11: Entwurf - Betriebssystem, grundlegende Leiterplatte.

Tabelle 4.1: Entwurf - Betriebssystem, grundlegende Leiterplatte - Bauteile.

Nr.	Bauteil	Beschreibung
B1	Arduino Nano	Steuerplatine mit Mikrocontroller (ATmega328)
G1	LCD (16x2)	Anzeigeelement
J1, J2	Buchsenleiste (16 pol.)	Die Messschaltung ist aufsteckbar auf der Betriebsplatine
J3	Schraubklemmen (3 pol.)	Anschluss des Temperaturfühlers DS18B20
R1, R2, R3, R4	Vorwiderstand LED (220 Ω)	Strombegrenzung
R5	Pullup-Widerstand (4,7k Ω)	Die Datenleitung wird im Ruhezustand auf "high"gezogen
R6	Potentiometer (10k Ω)	Der Kontrast des LCD ist einstellbar
S1	Schalter	Der LCD kann während des Dauerbetriebes ausgeschaltet werden
LED1, LED3	LED (rot)	Messung außerhalb vom eingestellten spezifischen Leitwertbereich
LED2	LED (grün)	Messung ist im eingestellten spezifischen Leitwertbereich

Mit Hilfe der Cursorfunktion ist in Abbildung 4.12 zu erkennen, dass der maximale Wert der Rechteckpulse bei etwa 4,7V liegt. Dies ist mit Spannungsverlusten innerhalb des

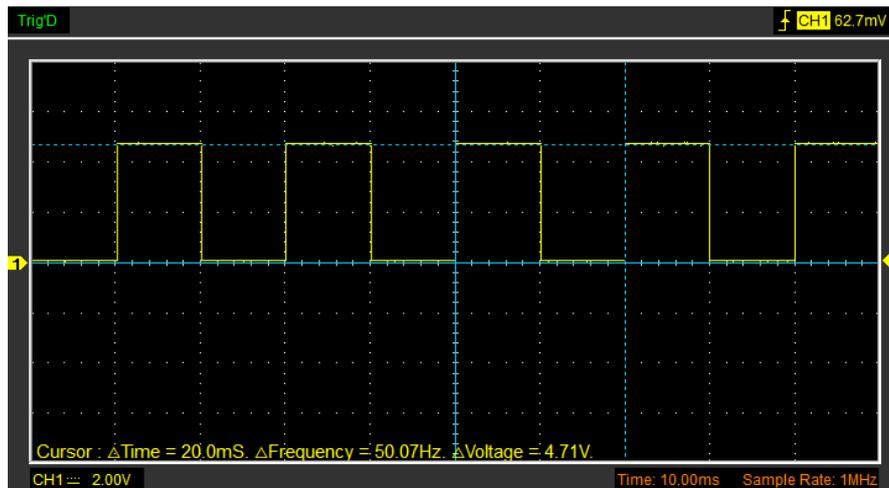


Abbildung 4.12: Entwurf - Betriebsschaltung, Ausgangsspannung an $D10$ $V_{arduino}$.

Arduino, am digitalen Ausgang zu erklären. Die Beschaltung von Logikgattern, welche für den PWM-Ausgang (Puls-Weiten-Modulation) nötig sind, bringen den geringen Spannungsabfall mit sich. Die über den Programmcode eingestellten 50Hz, mit einem Tastgrad von 50 Prozent, sind ebenfalls zu erkennen.

Anpassungen der eingespeisten Rechteckpulse sind im Zusammenhang mit der Messschaltung erforderlich, um den Messbereich einzustellen. Eine zunächst geplante Anpassung über den Programmcode ist nur für die Frequenz der Rechteckpulse möglich. Die Amplitude eines Pulses kann nicht über den digitalen PWM-Ausgang (D10) erfolgen, weil mit der Modulation kein sauberer Rechteck in der eingestellten Frequenz generiert wird. Die einzelnen Rechteckpulse werden in ihrer Weite modelliert, sodass als Mittelwert eine geringere Spannung generiert wird.

Anpassung der Rechteckpulse

Regelbare Eingangspulse werden mit einem Spannungsteiler realisiert. Dabei ist zu beachten, dass ein Operationsverstärker als Spannungsfollower, bzw. Impedanzwandler nachgeschaltet wird. Ansonsten würde die Messschaltung den Spannungsteiler belasten.

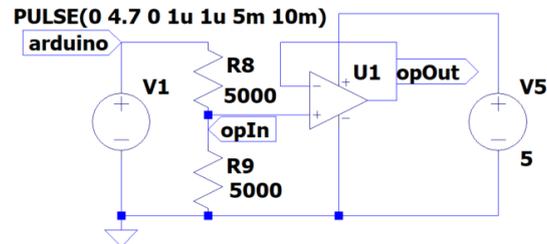


Abbildung 4.13: Entwurf - Betriebssystemung, Varduino einstellbar mit stabilisiertem Spannungsteiler.

Die Ausgangsspannung V_{opOut} am Potential $opOut$ wird auf die Messschaltung gegeben. Abbildung 4.14 zeigt das Ergebnis der Simulation.

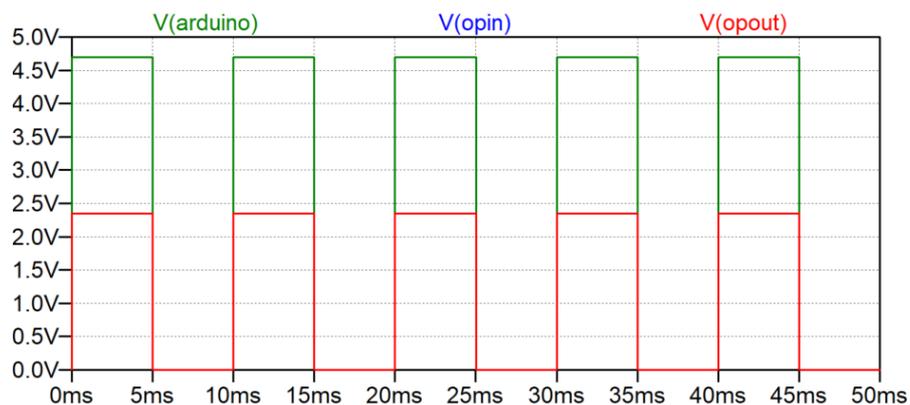


Abbildung 4.14: Entwurf - Betriebssystemung, Simulation der einstellbaren Rechteckpulse vom Arduino.

Erwartungsgemäß sind die Rechteckpulse am nicht invertierenden Eingang des OPV (V_{opIn}) deckungsgleich mit jenen am Ausgang (V_{opOut}). Die eingespeisten Rechteckpulse ($V_{arduino}$) mit einer Amplitude von $4,7\text{ V}$ werden auf $2,35\text{ V}$ halbiert.

Zudem wird die Referenzspannung mit einem Spannungsteiler halbiert, damit die Auflösung der Messung am analogen Eingang doppelt so hoch ist. Die beschriebenen Anpassungen im Entwurf der Betriebssystemung sind parallel zum Entwurf der Messschaltung vorgenommen.

Die Anpassung der Implementierung ist in Abbildung 4.15 dargestellt. Orientiert wurde sich an der simulierten Schaltung. Es wird eine komplett neue Platine bestückt, weil die Größe der Messschaltung ebenfalls angepasst wird.

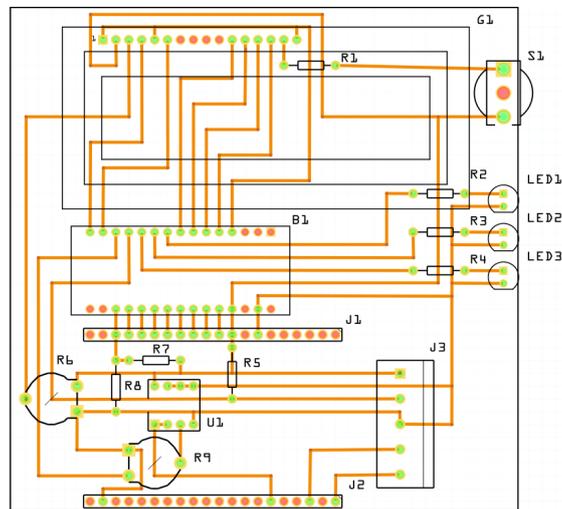


Abbildung 4.15: Entwurf - Betriebsschaltung, Leiterplatte Referenzspannung und Rechteckpulse angepasst.

Die Anpassung des Entwurfes ist Aufbau bedingt im unteren Teil der Leiterplatte. Bauteile, welche durch Anpassung des Entwurfes ergänzt wurden, sind in Tabelle 4.2 aufgeführt.

Tabelle 4.2: Entwurf - Betriebsschaltung, angepasste Leiterplatte - Bauteile.

Nr.	Bauteil	Beschreibung
J1, J2	Buchsenleiste (20 pol.)	Die angepasste Messschaltung ist aufsteckbar
J3	Schraubklemmen (5 pol.)	Anschluss des Temperaturfühlers DS18B20 und Messzelle Typ D
R7 u. R8	Widerstand ($1k\Omega$)	Spannungsteiler zum Halbieren der Referenzspannung ($2,33V$)
R9	Potentiometer ($10k\Omega$)	Spannungsteiler zum Verringern der Rechteckpulsamplitude (<i>max.</i> : <i>ca.</i> $4,7V$)
U1	OPV (LM358P Dual OP-Amp)	Operationsverstärker als Spannungsfolger, zur Stabilisierung des Spannungsteilers (R9)

Mit dem Oszilloskop werden die Rechteckpulse mit verringerter Amplitude gemessen. Die Frequenz der Rechteckpulse ist auf 100Hz im Programmcode eingestellt.

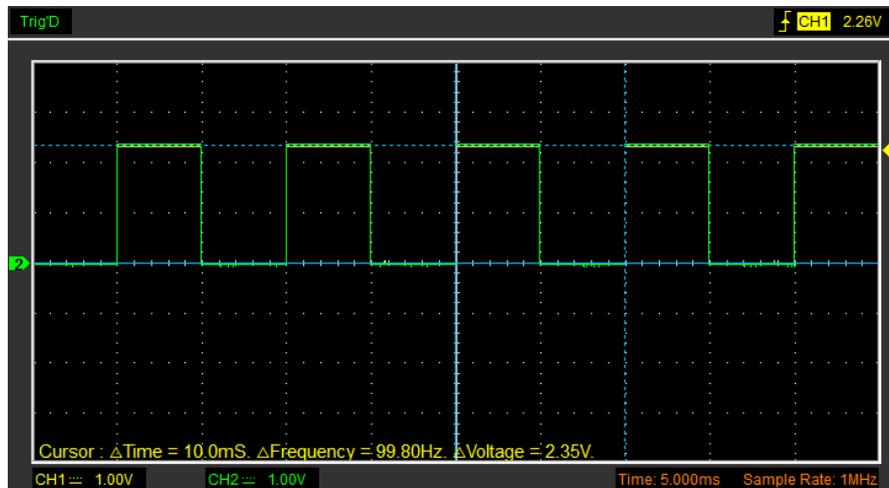


Abbildung 4.16: Entwurf - Betriebssystemung, Varduino am nicht invertierenden Eingang und Ausgang des OPV.

Das Messergebnis in Abbildung 4.16) stimmt bei einer Amplitude von $2,35V$ mit der Simulation des OPV als Spannungsfolger überein. Weitere Messungen, mit Variation der zu stabilisierenden Spannung nach dem Spannungsteiler (V_{opIn}), haben Grenzen im Betrieb des OPV aufgezeigt.

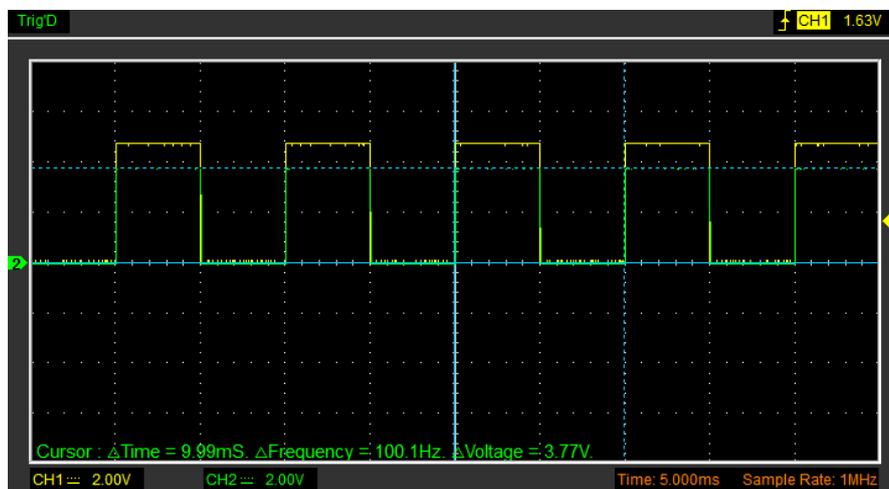


Abbildung 4.17: Entwurf - Betriebssystemung, LM358 *railtorail* fehlgeschlagen.

Die obere Grenze der Ausgangsspannung liegt bei dem Operationsverstärker LM358 unter seiner Betriebsspannung. Bei dem entworfenen unsymmetrischen Betrieb mit $4,7V$

an $V+$ stehen nur $3,77\text{ V}$ als Ausgangsspannung (CH2, grün) zur Verfügung. Gemäß Datenblatt liegt dies an der fehlenden Rail to Rail-Fähigkeit. Durch das Beschalten mit der Messchaltung zeigt sich eine Offsetspannung in Höhe der Spannungsdifferenz zwischen oberer Grenze der Ausgangsspannung und der Eingangsspannung des OPV. Im weiteren Entwicklungsverlauf wird daher ein OPV verwendet, welches auch bei Arbeit an der oberen Betriebsgrenze funktioniert. Der LM358 wird durch einen MCP6002 I/P ersetzt. Der symmetrische Betrieb des OPV mit einer extra generierten negativen Betriebsspannung ist mit größerem Aufwand verbunden.

Die folgende Anpassung der Spannungsversorgung wird im Entwicklungsverlauf vorgenommen, bevor das Verhalten des LM358 festgestellt wurde.

Anpassung Spannungsversorgung OPV

Zur Stabilisierung der Messspannung in der Messchaltung wird eine negative Spannungsversorgung benötigt. Die negative Spannung wird mithilfe einer Ladungspumpe erzeugt. Die Beschaltung ist in Abbildung 4.18 aufgezeigt.

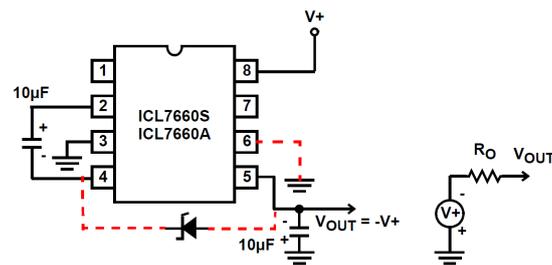


Abbildung 4.18: Entwurf - Betriebsschaltung, Ladungspumpe als negativer Spannungsumwandler. [9]

Die Eingangsspannung $V+$ (Pin 8) wird durch Beschalten der Ladungspumpe mit zwei Elektrolyt-Kondensatoren am Ausgang (Pin 5) negiert. Die rot gekennzeichneten Anschlüsse sind nicht erforderlich und werden daher vernachlässigt. Die Ladungspumpe verhält sich wie eine ideale Spannungsquelle, mit dem Ausgangswiderstand R_O . Gemäß Datenblatt hat der Widerstand bei Standardbetrieb mit 5 V und einer Temperatur von 25 C einen Wert von ca. $120\ \Omega$. [9]

Der Entwurf der Leiterplatte ist in Abbildung 4.19 dargestellt.

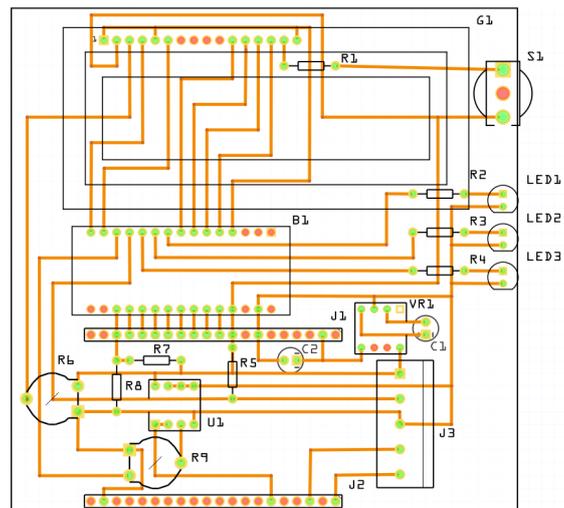


Abbildung 4.19: Entwurf - Betriebssystem, angepasste Leiterplatte mit negativer Spannungsversorgung.

Ergänzend zum bisherigen Aufbau sind in Tabelle 4.3 die zur Implementierung der negativen Spannungsversorgung benötigten Bauteile aufgeführt.

Tabelle 4.3: Entwurf - Betriebssystem, abschließende Anpassung - Bauteile.

Nr.	Bauteil	Beschreibung
VR1	Ladungspumpe (ICL7660S)	IC mit CMOS Technologie und internem Oszillator, ermöglicht Spannungsumsetzung von Positiven ins Negative
C1, C2	Kondensator ($10\mu F$)	Beschaltung der Ladungspumpe, wird bei internem Umschaltvorgang der Ladungspumpe ge-/entladen

Abschließend werden die Schnittstellen zur Messschaltung und ihre Funktionalität in Tabelle 4.4 aufgeführt. Die Pins der Steckerleisten (J1, J2 aus 4.19) sind von rechts nach links aufsteigend nummeriert.

Tabelle 4.4: Entwurf - Betriebsschaltung, Schnittstellen zur Messschaltung.

Leiste : Pin	Funktionsbeschreibung
J1 : 2	Negative Betriebsspannung zur Versorgung des OPV
J1 : 7	Massepotential zum Stabilisieren ungenutzter OPV Ein-/Ausgänge
J1 : 9	5V Betriebsspannung zur Versorgung der OPV
J1 : 18	Ausgangsspannung der Messschaltung zu A0 des Arduino
J2 : 1, 3	Anschluss der Messzelle (über J3 : 4, 5)
J2 : 6	Stabilisierte Rechteckpulse auf den Eingang der Messschaltung
J2 : 19	Massepotential zur Messschaltung

4.2.5 Messschaltung

Die Messschaltung wird auf die Betriebsplatine gesteckt. Über die Betriebsplatine werden die vom Arduino erzeugten Rechteckpulse zur Messschaltung geleitet. Die Ausgangsspannung wird anschließend über die Betriebsplatine zurück auf den analogen Eingang des Arduino gemäß Abbildung 4.9 gegeben.

Der Entwurf der Messschaltung basiert auf dem bisherigen Entwurf der Messzelle und der Betriebsschaltung. Anpassungen der beiden Komponenten haben somit Auswirkungen auf die Auslegung der Messschaltung. Die unter Kapitel 4.2 berechneten Werte für R_x , werden als Orientierung für den ersten Entwurf genutzt.

Spannungsteiler mit Verstärkung

Der erste Entwurf besteht aus einem Spannungsteiler, welcher aus dem gesuchten Widerstandswert der Messzelle R_x und einem bekannten Messwiderstand R_n besteht. In Abhängigkeit von R_x muss R_n so dimensioniert sein, dass in einem möglichst großen Spannungsbereich gemessen wird. Um die Veränderung von R_x , mit unterschiedlichen EC-Wert des Elektrolytes, annähernd linear messen zu können, sollte R_n sehr viel kleiner als R_x gewählt werden. Die nachfolgende Verstärkung der gemessenen Spannung (U_{mess}) ist an die maximale Versorgungsspannung des OPV, als obere Grenze, angepasst. Die untere Grenze ist durch das Massepotential definiert, wodurch negative Spannungen abgeschnitten werden.

Die mit LTspice simulierte Schaltung ist im Folgenden anhand von Abbildung 4.20 beschrieben.

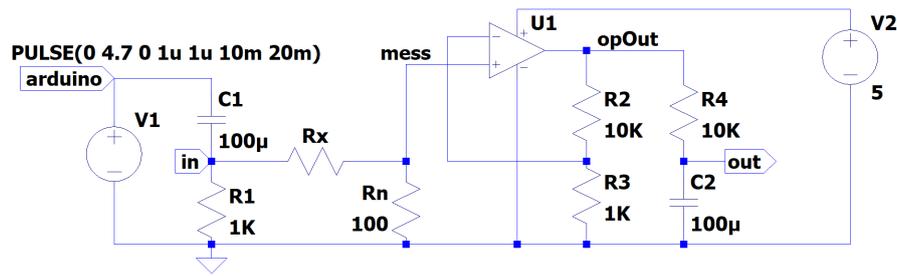
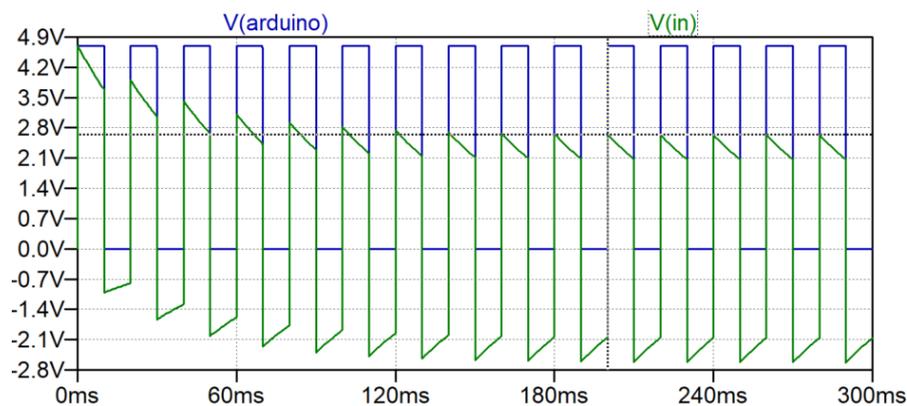


Abbildung 4.20: Entwurf - Messschaltung, Schaltplan erster Entwurf.

Am Eingang der Messschaltung werden Rechteckpulse mit einem Tastgrad von 50% und einer Amplitude von 4,7 V simuliert. Durch Beschaltung mit einem Kondensator (C1) und einem Widerstand (R1) wird das Massepotential angehoben. Weil die High- und Low-Phasen der Rechteckpulse gleich lang sind, kann nach einer bestimmten Einschwingdauer ein symmetrisches Rechtecksignal an $V(\text{in})$ abgegriffen werden. Je größer C1 und R1 gewählt werden, desto länger dauert der Einschwingvorgang. Abbildung 4.21 zeigt eine Simulation mit den Werten aus Abbildung 4.20 mit der Simulationszeit $t = 0 \dots 300 \text{ ms}$.

Abbildung 4.21: Simulation - Messschaltung, Einschwingzeit der Eingangsspannung $V(\text{in})$, mit $R_x = 600\Omega$.

In der Simulation des Einschwingverhaltens ist zu erkennen, dass mit einem $R_x = 600\Omega$ eine Einschwingzeit von ca. 200ms benötigt wird, bis das Signal V_{in} annähernd symmetrisch ist. Zu Beginn der Simulation ($t=0$) ist der Kondensator vollständig entladen, was sich durch die maximale Spannungsdifferenz zum Rechteckpuls zeigt. Mit der Aufladung des Kondensators sinkt die Spannungsdifferenz. Im Umschaltmoment des Rechteckpulses (nach 10ms) zeigt sich die Ladung als negative Spannung gegenüber dem Messepotential. Die darauffolgende Entladung (10ms bis 20ms) ist relativ gering, weil die Spannungsdif-

ferenz zur Masse gering ist. Die darauffolgenden Auf- und Entladungen des Kondensators gleichen sich an einen symmetrischen Verlauf an. Es entsteht kein sauberes Rechtecksignal, weil der Kondensator (C1) sich zu schnell entlädt. Die Kapazität und der Reihenwiderstand sind dabei entscheidend. Der Widerstand in Reihe zum Kondensator ergibt sich aus der Parallelschaltung $R1 // R_x + R_n$. Für die Zeitkonstante τ gilt somit:

$$\tau = R_{ges} \cdot C \quad (4.30)$$

$$= \frac{R1 \cdot (R_x + R_n)}{R1 + (R_x + R_n)} \cdot C \quad (4.31)$$

$$= \frac{1k\Omega \cdot (600\Omega + 100\Omega)}{1k\Omega + (600\Omega + 100\Omega)} \cdot C \quad (4.32)$$

$$\approx 40ms \quad (4.33)$$

Allgemein gilt, dass nach einem τ ca. 63 % eines Kondensators Ge- oder Entladen sind. Das berechnete τ ist mit 40ms zu klein, um ein stabiles Rechtecksignal zu ermöglichen. Zudem wird R_x klein bei großen Leitwerten der Elektrolytlösung, was zu einer Belastung des Rechtecksignals führt. Für eine genauere Betrachtung kann der Ladevorgang mit Hilfe folgender Formel berechnet werden.

$$u_c(t) = U \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (4.34)$$

Gemäß der Formel findet, ausgehend von einer bestimmten Spannung, im Umschaltmoment der Rechteckpulse eine Entladung des Spannungsbetrages im Kondensator statt.

Zur Orientierung für die Dimensionierung erfolgt die Simulation der gesamten Schaltung aus Abbildung 4.20 mit den bisher angenommenen Werten, mit $R_x = 600\Omega$. Gemessen wird im Folgenden immer im eingeschwungenen Zustand (bei 10s).

Es ist zu erkennen, dass die Spannung U_{mess} über dem Messwiderstand R_n zu gering ist, um sie mit dem Arduino reproduzierbar auswerten zu können. Der OPV (U1) verstärkt als nicht invertierender Verstärker bis zu seiner minimalen und maximalen Betriebsspannung. Somit kann maximal eine positive Spannung bis 5V verstärkt werden, wohingegen negative Spannungen bei 0V abgeschnitten werden.

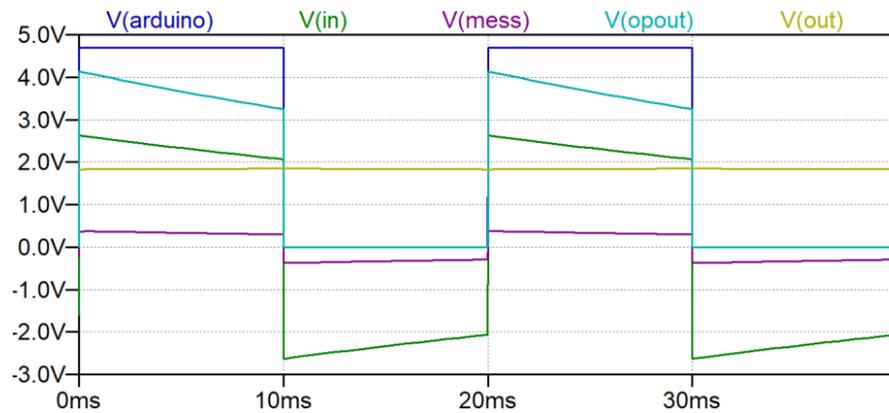


Abbildung 4.22: Simulation - Messschaltung, Zeitverläufe: U_{in} , U_{mess} , U_{opOut} , U_{out} .

Durch die negative Rückkopplung der Ausgangsspannung des OPV auf den invertierenden Eingang, wird der Verstärkungsfaktor v_n einstellbar.

Es gilt:

$$v_n = 1 + \frac{R2}{R1} \quad (4.35)$$

$$= 1 + \frac{10 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega} \quad (4.36)$$

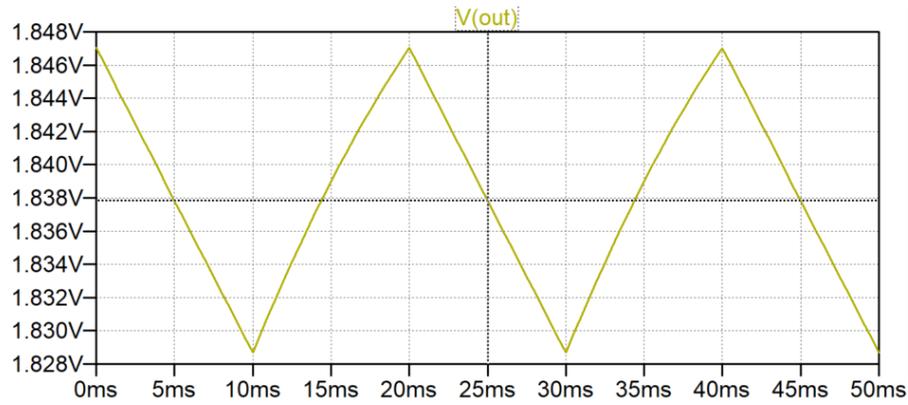
$$= 11 \quad (4.37)$$

Nach der Verstärkung ist eine um den Verstärkungsfaktor größere Spannung U_{opOut} am Ausgang des OPV, bei gleichbleibender Phase messbar. Die Ausgangsspannung U_{out} ist die Ladung des Kondensators C2, mit der halben Amplitude von U_{opOut} . Der eingeschwingene Spannungspegel ergibt sich durch den Tastgrad von U_{opOut} .

Die Auf- und Entladung von C2 ist aufgrund großer Widerstände in Reihe sehr langsam, wodurch die Ausgangsspannung relativ konstant bleibt. Bei genauer Betrachtung der Simulation (Abbildung 4.23) ist ein Sägezahnverlauf mit einer Amplitude im einstelligen Millivolt-Bereich zu erkennen. Als Mittelwert wird mit dem Cursor eine Spannung von ungefähr 1,838V gemessen.

Um anhand einer gemessenen Ausgangsspannung (U_{out}) den gesuchten Widerstandswert der Elektrolytlösung bestimmen zu können, wird eine Übertragungsfunktion der Messschaltung aufgestellt.

Ausgehend von der Ausgangsspannung U_{out} gilt:

Abbildung 4.23: Simulation - Messschaltung, Zeitverlauf: U_{out}

$$U_{out} = \frac{U_{op}}{2} \quad (4.38)$$

$$= \frac{U_{mess} \cdot v_n}{2} \quad (4.39)$$

$$= \frac{U_{in}}{2} \cdot \frac{R_n}{R_x + R_n} \cdot v_n \quad (4.40)$$

$$= \frac{U_{arduino}}{4} \cdot \frac{R_n}{R_x + R_n} \cdot v_n \quad (4.41)$$

$$\rightarrow R_x = \frac{U_{arduino}}{4 \cdot U_{out}} \cdot R_n \cdot v_n - R_n \quad (4.42)$$

$$= \frac{U_{arduino}}{4 \cdot U_{out}} \cdot R_n \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - R_n \quad (4.43)$$

Am Beispiel der Simulation lässt sich die Gültigkeit der Übertragungsfunktion prüfen:

$$R_x = \frac{4,7V}{4 \cdot 1,838V} \cdot 100\Omega \cdot \left(1 + \frac{10k\Omega}{1k\Omega}\right) - 100\Omega \quad (4.44)$$

$$\approx 603,21\Omega \quad (4.45)$$

Der berechnete Wert stimmt mit dem in der Simulation eingestellten Wert von R_x in guter Näherung überein.

Für große EC-Werte einer Elektrolytlösung wird dessen Widerstand klein. Die über R_n abfallende Messspannung U_{mess} wird somit groß. Bei dem aktuell eingestellten Verstär-

kungsfaktor $v_n = 11$ ist mit der positiven Betriebsspannung von 5V maximal eine Messspannung von ungefähr 455mV messbar. Mit $R_n = 100\ \Omega$ gilt für die aktuell messbare untere Grenze von R_x :

$$R_{xmin} = \frac{U_{arduino}}{U_{mess}} \cdot \frac{R_n}{2} - R_n \quad (4.46)$$

$$= \frac{4,7\text{ V}}{455\text{ mV}} \cdot \frac{100\ \Omega}{2} - 100\ \Omega \quad (4.47)$$

$$\approx 416,5\ \Omega \quad (4.48)$$

Zur Berechnung der Ausgangsspannung U_{out} wird Formel 4.39 genutzt:

$$U_{out} = \frac{U_{arduino}}{4} \cdot \frac{R_n}{R_x + R_n} \cdot v_n \quad (4.49)$$

geg.: $R_n = 100\ \Omega$; $v_n = 11$; $U_{arduino} = 4,7\text{ V}$

Tabelle 4.5: Entwurf - Messschaltung, Analyse nach erstem Entwurf.

$R_x[\Omega]$	$U_{out}[V]$ (berechnet)	$U_{out}[V]$ (simuliert)
330	3,006	2,394
417	2,500	2,394
470	2,268	2,249
1000	1,175	1,172
1500	0,808	0,806
2200	0,562	0,561
4700	0,269	0,269
10000	0,128	0,128
16700	0,077	0,077

Es ist zu erwarten, dass die Ausgangsspannung für Werte von R_x unterhalb von R_{xmin} weder simuliert, noch gemessen werden können, weil der OPV bei sehr kleinen Widerständen an der Betriebsgrenze arbeitet. Berechnete und simulierte Ausgangsspannungen stimmen in guter Näherung überein. Im Vergleich dazu fällt bei den gemessenen Ausgangsspannungen auf, dass die Abweichung bei kleineren Werten von R_x größer ist. Dies hängt mit der höheren Belastung der Eingangsspannung zusammen, was einen Spannungsverlust am Ausgang zur Folge hat.

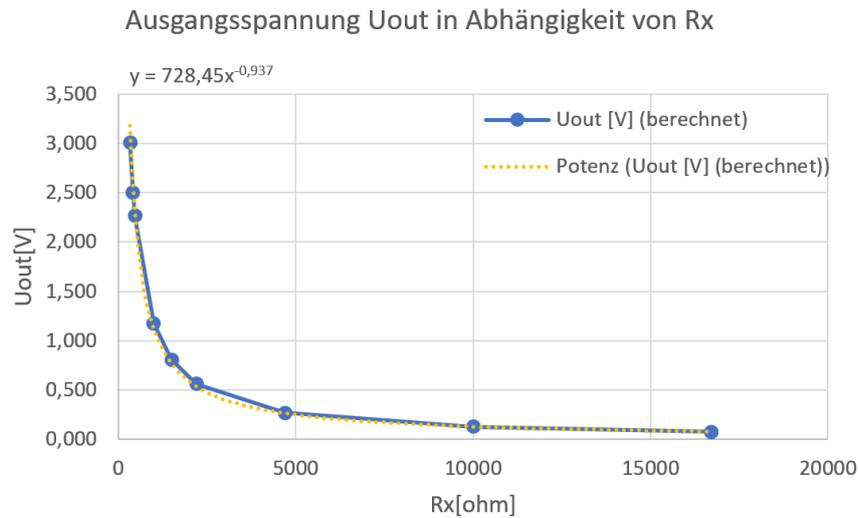


Abbildung 4.24: Simulation - Messschaltung, Analyse nach erstem Entwurf - $U_{out}(R_x)$.

Die Ergebnisse für die berechneten Werte sind aus Abbildung 4.24 zusammenhängend dargestellt. Es zeigt sich, dass mit der Messschaltung keine lineare Abhängigkeit zwischen der Ausgangsspannung U_{out} und dem Widerstand R_x herrscht. Mit Excel wurde eine Trendlinie generiert, welche den Kurvenverlauf annähernd wiedergibt.

Eine genaue Dimensionierung der Messschaltung kann nur durch Probemessungen mit den minimalen und maximalen spezifischen EC-Werten erfolgen, um anhand gemessener Ausgangsspannungen Rückschlüsse auf die Widerstandsverhältnisse zu ziehen.

Zur Messung der Ausgangsspannungen wird die Messschaltung gemäß dem ersten Entwurf implementiert. Abbildung 4.25 zeigt den Entwurf der Leiterplatte.

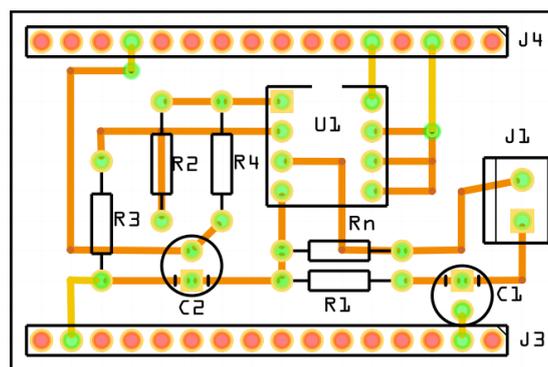


Abbildung 4.25: Entwurf - Messschaltung, erster Entwurf der Leiterplatte.

Die Betriebsplatine gibt den Rahmen zur Implementierung vor. Anpassungen wurden vorgenommen, um einen kompakten Aufbau der Messschaltung zu ermöglichen. Die Bezeichnung der Bauteile entspricht jenen der simulierten Schaltung. Tabelle 4.6 zeigt eine Zuordnung der einzelnen Bauteile.

Tabelle 4.6: Entwurf - Messschaltung, Leiterplatte erster Entwurf - Bauteile.

Nr.	Bauteil	Beschreibung
U1	OPV (LM358)	Operationsverstärker als nicht invertierender Verstärker
Rn	Widerstand (100 Ω)	Der Widerstand bildet einen Spannungsteiler mit dem unbekanntem zu ermittelnden Widerstand R_x
R1	Widerstand (1k Ω)	Strom begrenzender Widerstand zur Stabilisierung der Ladung vom Kondensator C1
C1	Kondensator (100 μF)	Rechteckpulse werden durch Anheben des Massepotentials nach dem Kondensator zu einem symmetrischen Wechselsignal
R2	Widerstand (10k Ω)	Bildet einen Spannungsteiler mit R3, zur Festlegung des Verstärkungsfaktors
R3	Widerstand (1k Ω)	Bildet einen Spannungsteiler mit R2, zur Festlegung des Verstärkungsfaktors
R4	Widerstand (10k Ω)	Strom begrenzender Widerstand (mit R2 und R3) zur Stabilisierung der Ladung vom Kondensator C2
J1	Anschlussklemme (2 pol.)	Die Messzelle (Typ D) wird angeschlossen
J3 J4	Steckerleiste (16 pol.)	Über die Steckerleisten wird die Messschaltung auf die Buchsenleisten gesteckt

Erste Messungen mit dem Oszilloskop entsprechen den Ergebnissen aus der Simulation. Es zeigen sich größere Abweichungen bei Belastung mit kleinen Widerstandswerten von R_x . Messergebnisse werden im weiteren Entwicklungsverlauf mit angepasster Dimensionierung festgehalten und anhand von Abbildungen beschrieben.

Angepasste Messschaltung

Für genauere Messungen in dem geforderten Messbereich sind Anpassungen erforderlich. Zunächst wird die Schaltung in der Simulation angepasst, wie in Abbildung 4.26 gezeigt.

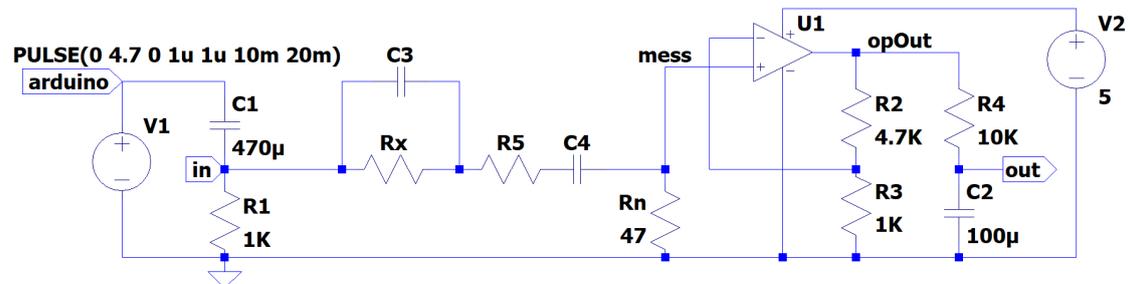


Abbildung 4.26: Entwurf - Messschaltung, Spannungsteiler mit Verstärkung - Anpassung.

Der Kondensator $C1$ wurde vergrößert, um das erzeugte Wechselsignal, mit einer besseren Rechteckform, trotz Belastung zu stabilisieren. R_n ist kleiner gewählt worden, um auch für kleinere Werte von R_x geeignet zu sein (siehe Kapitel 2.3). Der Verstärkungsfaktor ist geringer, durch einen kleiner gewählten Wert für $R2$. Die Kapazitäten $C3$ und $C4$, sowie der Widerstand $R5$ sind parasitär und werden nur zur Simulation der Messzelle eingefügt. Aus dem Entwurf der Messzelle (Typ D) wurde die parasitäre Kapazität $C3$ bestimmt, welche durch Eintauchen der Messzelle in die zu bemessende Elektrolytlösung entsteht.

Es gilt:

$$C3 = 4,24pF$$

Es wird zunächst davon ausgegangen, dass keine Polarisierungseffekte entstehen, welche durch die Reihenschaltung von $R5$ und $C4$ simuliert werden können. Anpassungen, welche gemäß Theorie möglich sind um den parasitären Effekten entgegenzuwirken, werden in den Entwurf miteinbezogen.

Abbildung 4.27 zeigt den Entwurf der angepassten Leiterplatte.

Die Bauteilwerte sind gemäß Abbildung 4.26 angepasst. Die Vergrößerung der Leiterplatte geht mit der Anpassung der Betriebsplatine einher. Zudem bietet dies mehr Platz für weitere Anpassungen.

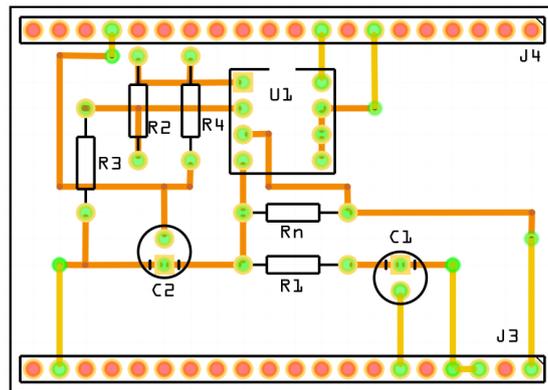
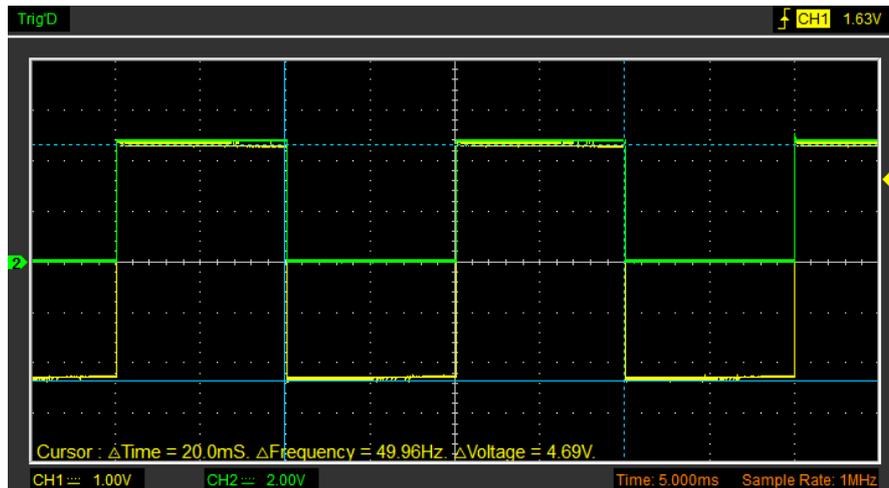


Abbildung 4.27: Entwurf - Messschaltung, angepasste Leiterplatte.

In Abbildung 4.28 sind die Eingangsspannungen der unbelasteten Messschaltung bemessen.

Abbildung 4.28: Oszillogramm - Messschaltung, Rechteckpulse $V_{arduino}$ und Eingangsspannung V_{in} .

In Abbildung 4.28 ist bei der Messung mit dem Oszilloskop ein sauberes Rechtecksignal an V_{in} (CH1, gelb) und saubere Rechteckpulse an $V_{arduino}$ (CH2, grün) zu erkennen. Die Ausgangsspannung U_{out} ist $0V$, weil über dem Messwiderstand R_n keine Spannung (U_{mess}) abfällt, wenn R_x sehr groß ist.

Eine hohe Belastung liegt vor, wenn R_x sehr kleine Werte annimmt. Die Messung der Eingangsspannung wird mit $R_x = 100\Omega$ wiederholt.

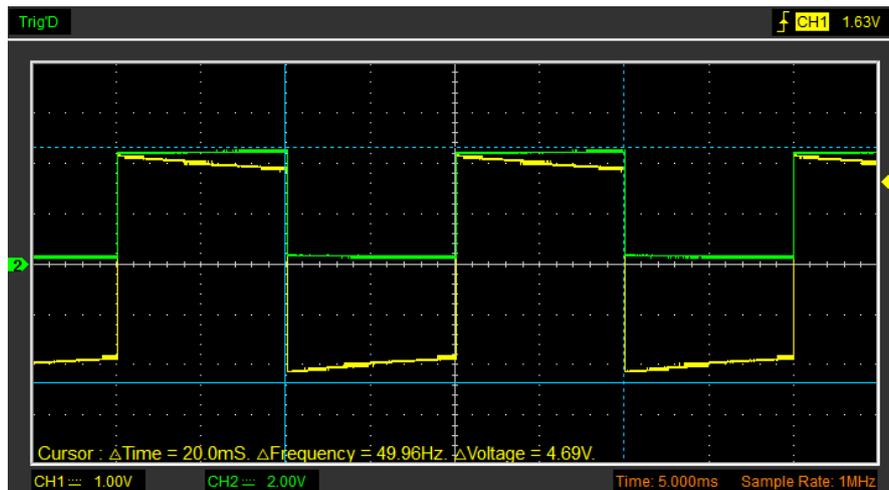


Abbildung 4.29: Oszillogramm - Messschaltung, Rechteckpulse $V(\text{arduino})$ und Eingangsspannung $V(\text{in})$ - $R_x = 100\Omega$.

Es ist zu erkennen, dass die Spannung an V_{in} (CH1, gelb) durch die Belastung einbricht. Dies ist, wie in der Simulation bereits gezeigt, mit der Ladung des Kondensators zu erklären.

Es wird eine Spannung von ca. $1,901\text{ V}$ vom Arduino gemessen. Abbildung 4.30 zeigt die Spannungsverläufe an V_{mess} (CH1, gelb) und V_{opOut} (CH2, grün).

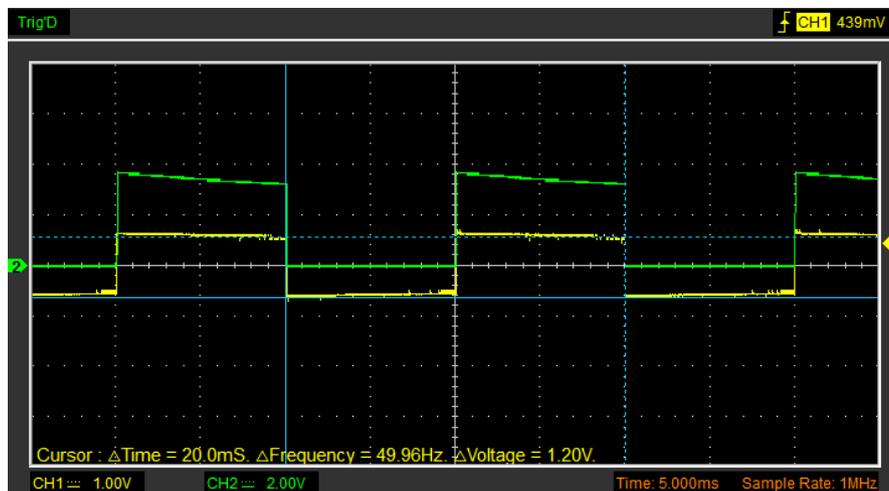


Abbildung 4.30: Oszillogramm - Messschaltung, Spannungsverläufe $V(\text{mess})$ und $V(\text{opOut})$ - $R_x = 100\Omega$.

Es ist zu erkennen (Abbildung 4.30), dass die Messspannung über R_n nur leicht einbricht, was sich wiederum in der verstärkten Spannung am Ausgang des OPV deutlich zeigt.

Tabelle 4.7 zeigt eine Zusammenfassung zur Analyse der Schaltung mit verschiedenen Widerstandswerten von R_x . Es wurden Drahtwiderstände an die Elektroden der Messzelle geklemmt, um R_x vorzugeben.

geg.: $U_{arduino} = 4,7 V$; $v_n = 5,7$; $R_n = 47 \Omega$

Tabelle 4.7: Entwurf - Messschaltung, Analyse nach angepasstem Entwurf.

$R_x[\Omega]$	$U_{out}[V]$ (berechnet)	$U_{out}[V]$ (simuliert)	$U_{out}[V]$ (gemessen)
47	3,349	2,495	2,478
100	2,141	2,137	1,901
150	1,598	1,596	1,471
220	1,179	1,178	1,119
330	0,835	0,835	0,806
470	0,609	0,609	0,601
1000	0,301	0,301	0,298
1500	0,203	0,204	0,205
2200	0,14	0,14	0,142
4700	0,066	0,066	0,064

Wie auch bei dem ersten Entwurf sind größere Abweichungen bei höherer Belastung der Eingangsspannung, durch kleine Werte von R_x zu erkennen. Eine Stabilisierung der Eingangsspannung ist notwendig, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

Um letzte Anpassungen im Entwurf vornehmen zu können, damit diese abschließend implementiert werden, sind erste Messungen mit Elektrolytlösungen wichtig.

Die Messschaltung wird mit Wasser verschiedener Leitfähigkeiten bemessen. Mit einem Referenzmessgerät wird der spezifische Leitwert vor jeder Messung kontrolliert. Zudem wird die Referenztemperatur des EC-Messgerätes möglichst konstant gehalten. Dazu wird die Wassertemperatur vor jeder Messung durch Erhitzen auf ca. 25°C gebracht. Zunächst ist die Frequenz des Wechselsignales auf 50Hz eingestellt. Diese wird in einer zweiten Messreihe auf 100Hz erhöht.

Die gemessenen Werte sind im Anhang tabellarisch aufgeführt.

Mit zunehmendem EC-Wert wird die Ausgangsspannung größer, weil mehr Spannung über dem Messwiderstand R_n abfällt, wenn R_x klein ist.

Abbildung 4.31 zeigt die Ausgangsspannung U_{out} in Abhängigkeit vom EC-Wert, für beide Frequenzen.

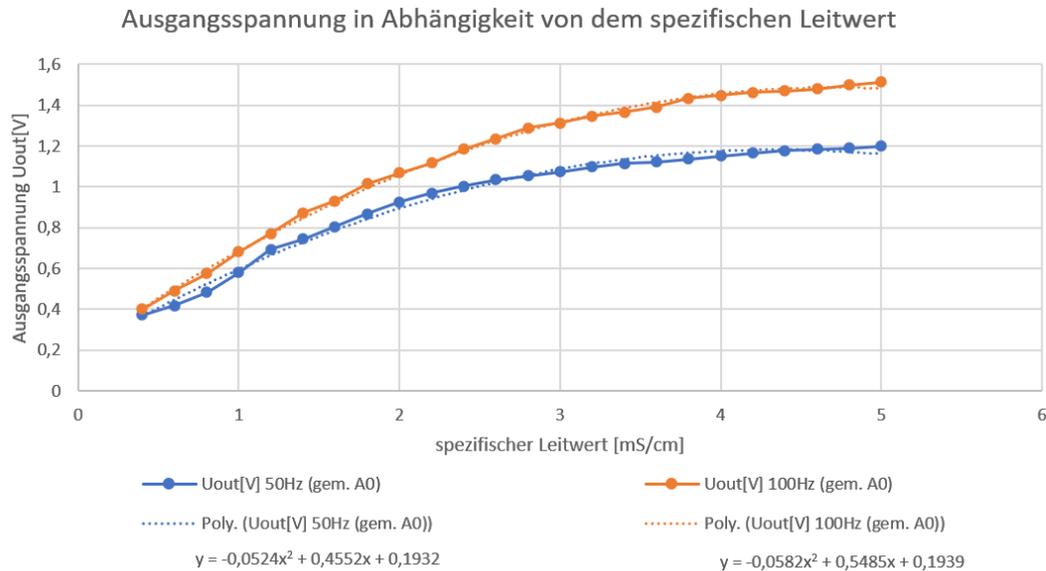


Abbildung 4.31: Messung - der Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom EC-Wert - angepasste Messschaltung.

Es ist zu erkennen (Abbildung 4.31), dass bei höherer Messfrequenz der gemessene Spannungsbereich größer ist. Der steilere Spannungsverlauf ermöglicht über die Annäherung mit einem Polynom zweiten Grades eine Reproduzierbarkeit in Bezug auf die Messung des EC-Wertes.

Die Zellkonstante wird mit den Werten der 50 Hz-Messung berechnet.

Es gilt:

$$C = \kappa \cdot R_x$$

, mit

$$R_x = \frac{U_{arduino}}{4 \cdot U_{out}} \cdot R_n \cdot v_n - R_n$$

Bei einem minimalen EC-Wert von $\kappa = 0,4 \text{ mS/cm}$ ergibt sich rechnerisch eine Zellkonstante von $C \approx 0,32 \text{ cm}^{-1}$. Bei einem maximalen EC-Wert von $\kappa = 5 \text{ mS/cm}$ ergibt sich rechnerisch eine Zellkonstante von $C \approx 1,08 \text{ cm}^{-1}$.

Die Berechnung der Zellkonstanten C ergibt, dass mit zunehmender Leitfähigkeit die Zellkonstante größer wird. Dies gilt ebenfalls bei gleicher Berechnung mit den Werten aus der Messreihe mit 100 Hz Messfrequenz.

Das bisherige Ziel gemäß Theorie mit den gemessenen Werten eine Zellkonstante zu berechnen, mit welcher wiederum die Messstation kalibriert wird, ist bei dem aktuellen Stand aufgrund fehlender Linearität nicht sinnvoll.

Mit einem Oszilloskop wird erneut der zeitliche Verlauf einzelner Spannungen am Ein- und Ausgang der Messschaltung, gemessen. Dabei wird als Last R_x eine Elektrolytlösung bemessen, dessen resultierende Ausgangsspannung U_{out} einem ohmschen Verbraucher mit hohem Wert entspricht, was wiederum eine relativ geringe Belastung bedeutet.

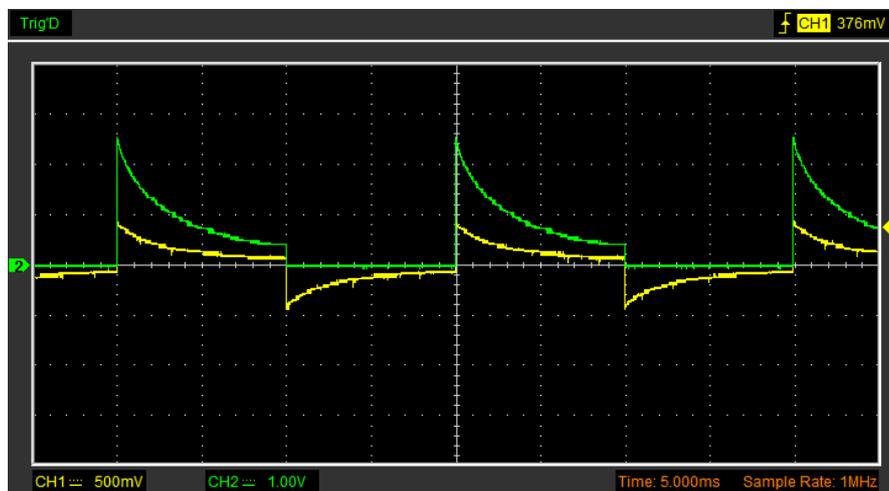


Abbildung 4.32: Oszillogramm - Messschaltung, Spannungsverläufe $V(\text{mess})$ und $V(\text{opOut})$ - $\kappa = 1\text{ mS/cm}$.

Abbildung 4.32 zeigt auf, dass der Spannungsverlauf über R_n stark durch parasitäre Kapazitäten verfälscht ist. Durch Simulation der Messschaltung mit dem Ersatzschaltbild der Messzelle (gemäß Abbildung 4.26) ist der Verlauf nachvollzogen worden.

Die Abschließende Anpassung der Messschaltung zielt darauf ab, möglichst stabile Spannungsverläufe zu erzielen.

Stabilisierung der Messspannung

Die Stabilisierung der Spannung erfolgt erneut mit einem OPV, welcher als Spannungsfollower beschaltet wird. Um das Wechselsignal der Messung stabilisieren zu können, muss der OPV symmetrisch betrieben werden. Die notwendige negative Spannung wird auf der Betriebsplatine erzeugt.

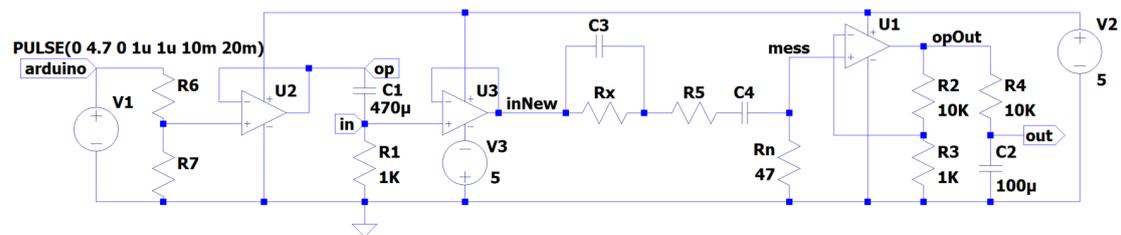


Abbildung 4.33: Entwurf - Messschaltung, stabilisierter Spannungsteiler mit Verstärkung.

Mit der Beschaltung von U3 aus Abbildung 4.33 wird das symmetrische Rechtecksignal an V_{in} stabilisiert.

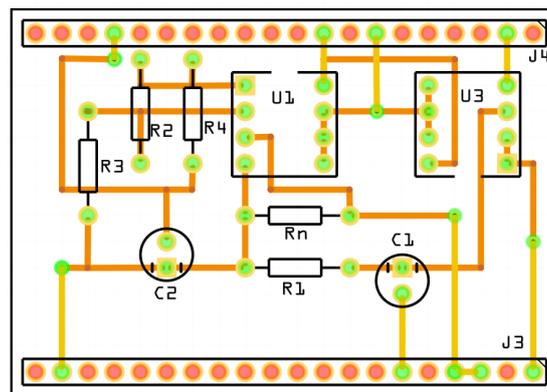


Abbildung 4.34: Entwurf - Messschaltung, abschließend angepasste Leiterplatte.

Durch die Anpassung mit U3 als Impedanzwandler, ist der zeitliche Verlauf des eingespeisten Wechselsignales an V_{inNew} von R_x unabhängig. Der Verstärkungsfaktor von U1 wird auf $v_n = 11$ erhöht, um den Bereich der Ausgangsspannung zu vergrößern.

Die Simulation der Schaltung zeigt auf, dass die parasitären Kapazitäten C3 und C4 weiterhin den Spannungsverlauf an V_{mess} beeinflussen. Es ist kein linearer Zusammenhang zwischen der Ausgangsspannung und dem EC-Wert zu erwarten. Die Kalibrierung wird

rechnerisch durch Annäherung an den Kurvenverlauf gemessener Werte stattfinden. Dies gilt es im Programmcode umzusetzen.

Genauere Informationen zum Aufbau sind in Kapitel 5 beschrieben. Messergebnisse, zum abschließenden Entwurf, sind in Kapitel 6 zusammenhängend aufgeführt und beschrieben.

4.2.6 Anzeige

Gemessene Werte werden über das LCD angezeigt. Dabei ist die Kompatibilität zum Arduino wichtig, um einen einfachen Anschluss zu ermöglichen.

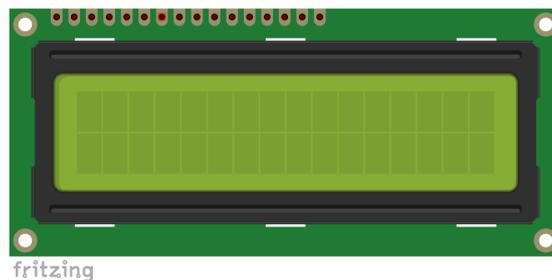


Abbildung 4.35: Entwurf - LCD Modul. (Editor: Fritzing)

Das 16x2 LCD Modul aus Abbildung 4.35 bietet genügend Platz zum Anzeigen des EC-Wertes. Zudem ermöglicht die aufsteckbare 16-Pin Leiste einen kompakten Aufbau.

Die Nährstoffampel wird mit LEDs umgesetzt. Es werden drei LEDs zu implementieren sein. Eine grüne LED um den passenden Betriebsbereich zu signalisieren und zwei rote LEDs um ein Verlassen des Bereiches zu signalisieren. Der Aufbau erfolgt gemäß Abbildung 4.19.

4.3 Arduino IDE

Die integrierte Entwicklungsumgebung (englisch: Integrated Development Environment, IDE) von Arduino wird genutzt, um den Arduino Nano zu programmieren. In diesem Abschnitt wird der Entwurf der Softwarearchitektur beschrieben. Ein modularer Aufbau ergibt sich dabei aus dem Entwicklungsverlauf der Hardware, weil die Funktionalität mit den einzelnen Systemkomponenten erweitert wird. Im Folgenden wird das Einbinden der

Systemkomponenten anhand der Softwarearchitektur beschrieben. Dabei wird mit statischer Komponentensicht das relative Verhältnis der Komponenten untereinander erklärt. Die entworfene Messzelle wird im Folgenden als EC-Sensor bezeichnet.



Abbildung 4.36: Entwurf - Softwarearchitektur.

Die Softwarearchitektur (Abbildung 4.36, i.A. [1]) zeigt den, auf dem Arduino Nano verbauten, Mikrocontroller ATmega328 und die Schnittstellen zu angeschlossenen Systemkomponenten. Dabei werden digitale Ein-/ Ausgänge und ein analoger Eingang dargestellt, welche im Programmcode angesteuert werden. Die Hardware-Abstraktionsschicht fasst das Einbinden der Hardware zusammen. Die Abstraktion besteht dabei in der Definition einheitlicher Bezeichner, welche eine einfache Wiederverwendbarkeit ermöglichen. Dabei unterstützt ein modularer Aufbau das Einbinden in größere Systeme, weil benötigte Funktionalitäten leichter auswählbar sind. Ein gutes Beispiel dafür ist die Verwendung des Temperatursensor DS18B20 und dem LCD ("Liquid Crystal Display"), deren Kompatibilität zum Arduino anhand bestehender Bibliotheken zum Einbinden benötigter Funktionalität deutlich wird.

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
```

Abbildung 4.37: Entwurf - header-Dateien.

Abbildung 4.37 zeigt benötigte header-Dateien, welche mit dem `#include`-Befehl eingebunden werden. Der Präprozessor bearbeitet diese, bevor der eigentliche Quell-Code abgearbeitet wird. Enthaltene Funktionen und Definitionen sind somit bekannt und können direkt im Anschluss verwendet werden.

Abbildung 4.38 zeigt die Initialisierung des Temperatur-Sensors, beginnend mit der Definition eines Makros. Dabei wird der Ausdruck `ONE_WIRE_BUS` durch die Zahl

```
#define ONE_WIRE_BUS 9
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
```

Abbildung 4.38: Entwurf - Initialisierung des Temperatursensors.

9 ebenfalls vom Präprozessor ersetzt. Dies ermöglicht eine einheitliche Verwendung des entsprechenden digitalen Pin, hier Pin 9 des Arduino, anhand eines aussagekräftigen Bezeichners. Übergeben wird das Makro anschließend an die Funktion *oneWire* aus der header-Datei *OneWire*. Die Kommunikation des DS18B20 mit dem ATmega328 erfolgt über einen Eindrahtbus, welcher definierten Befehlssequenzen folgt, um eine serielle Datenübertragung über eine Leitung zu ermöglichen. Dafür benötigte Funktionen werden durch Übergabe der Adresse, mit *oneWire* (Zeiger auf die Funktion) an die Funktion *sensors* aus der Bibliothek *DallasTemperature* miteinander verknüpft.

```
const int rs = 12, en = 11, d4 = 5, d5 = 4, d6 = 3, d7 = 2;
LiquidCrystal lcd(rs, en, d4, d5, d6, d7);
```

Abbildung 4.39: Entwurf - Pinout des LCD.

Abbildung 4.39 zeigt die Zuordnung digitaler Ein-/Ausgänge zum Ansteuern des LCD. Dabei werden die jeweiligen Pins als definierte Konstanten an die Funktion *lcd* aus der Bibliothek *LiquidCrystal* übergeben.

Abbildung 4.40 zeigt für das Implementieren des EC-Sensors notwendige Konstanten, Variablen und Funktionen.

Der analoge Eingang Pin A0 und der digitale Ausgang Pin 10 werden Konstanten zugewiesen, welche im weiteren Programm eingebunden werden. Die Variablen werden, mit Ausnahme vom minimalen Sensorwert *sensorMin*, Standard gemäß mit Null initialisiert, um für den weiteren Programmverlauf einen definierten Startwert zu erhalten.

In Bezug auf den EC-Sensor wird keine weitere Abstraktion durch Auslagern einer header-Datei, mit einheitlichen Bezeichnern vorgenommen, weil dadurch die Übersichtlichkeit des Programmcodes nicht verbessert wird.

Auf Grundlage des beschriebenen Entwurfes der Software, ist in Abschnitt 5 Implementierung der weitere Programmcode, bezüglich realisierter Funktionen, abgebildet und beschrieben.

```
//----- constants
// input pins
const int sensorPin = A0;           // EC-sensor
// output pins
const int voltagePin = 10;          // PWM Pin 10
// signal frequency
unsigned int frequency = 100;       // 100 Hz measuring frequency

//----- variables
float sensorValue = 0.000;          // initialising the EC-sensor
float celsius= 0.000;               // temperature DS18B20
float vOut = 0.000;                 // Uout[V]
float EC = 0.000;                   // EC value to be calculated
float ecMin = 5.000;                // lower limit of EC-value
float ecMax = 0.000;                // upper limit of EC-value

//----- functions
float calculation(float, float);     // concluding calculation of the EC value
```

Abbildung 4.40: Entwurf - Initialisierung des EC-Sensors.

5 Implementierung

Mit der Implementierung werden die abschließenden Entwürfe der Hardware zusammenhängend dargestellt. Benötigte Bauteile werden mit Beschreibung ihrer Kenndaten aufgelistet und anschließend preislich eingeordnet. Es wird damit ein Überblick zu benötigten Komponenten verschafft, um eine Reproduktion zu vereinfachen. In Bezug auf die Software wird die realisierte Funktionalität anhand von Abbildungen der entsprechend notwendigen Codezeilen beschrieben.

5.1 Realisierung der Schaltungen

Die Implementierung der Betriebsschaltung und der Messschaltung erfolgt anhand der beschriebenen abschließenden Entwürfe. Für den Aufbau werden Lochrasterplatinen mit den benötigten Bauteilen bestückt, welche für eine elektronische Verbindung mit Silberdraht verlötet werden. Mit dem Editor *Fritzing* ist aus dem Entwurf der Platinen die Sicht auf die Leiterbahnen generiert worden. Diese Ansicht wird zur Orientierung bei den Lötarbeiten genutzt.

Abbildung 5.1 zeigt die Bauteilansicht der Betriebsplatine im Entwurf auf der linken Seite und implementiert auf der rechten Seite.

Durch die Verwendung von Buchsenleisten ist der Einbau des Arduino Nano (B1) und des LCD (G1) steckbar realisiert. Für einen einfachen Austausch sind ebenso der Operationsverstärker (U1), die Ladungspumpe (VR1) und die LEDs steckbar realisiert.

Die Implementierung der Messplatine ist in Abbildung 5.2 auf der rechten Seite abgebildet.

Eine einfache Austauschmöglichkeit der Operationsverstärker ist auch auf der Messplatine gemäß Abbildung 5.2 realisiert. Es wird eine Platine mit Durchkontaktierung verwendet, um die Anschlusspins zu den Buchsenleisten, mit den Bauteilen zu verbinden.

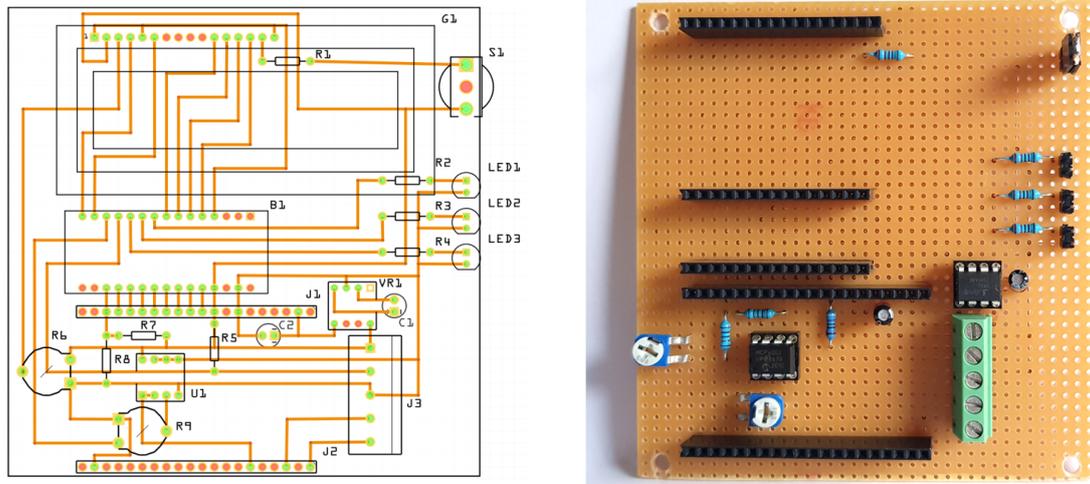


Abbildung 5.1: Implementierung der Betriebsplatte - Bauteilseite.



Abbildung 5.2: Implementierung der Messplatte - Bauteilseite.

Die Durchkontaktierung der Lötstellen erschwert das Austauschen von Bauteilen auf der Messplatte, weil das Lötzinn sich innerhalb beider Lötäugen verteilt, was wiederum das Entfernen von Lot mit einer Lötabsaugpumpe erschwert. Durch Erhitzen beider Kontaktstellen eines Bauteils, kann dieses an der selben Stelle auf der Platine ausgetauscht werden.

Die Leiterbahnseite der Betriebsplatte ist in Abbildung 5.3 dargestellt, als Gegenüberstellung des Entwurfes (links) und der Implementierung (rechts).

Leiterbahnen, welche als Lötendraht realisiert sind, sollten möglichst zentral über den Lötäugen und auf Stoß an Bauteilkontakte verlötet sein. In Abbildung 5.3 ist in der rechten Abbildung zu sehen, dass die beschriebene Vorgehensweise mit Ausnahme von Kontakten, welche nur ein Lötauge voneinander entfernt liegen, umgesetzt wurde. Es ist beim Löten darauf zu achten, einen Silberdraht nicht zwischen zwei fixierten Enden zu erhitzen, weil sich dieser sonst durch seine Ausdehnung verschiebt.

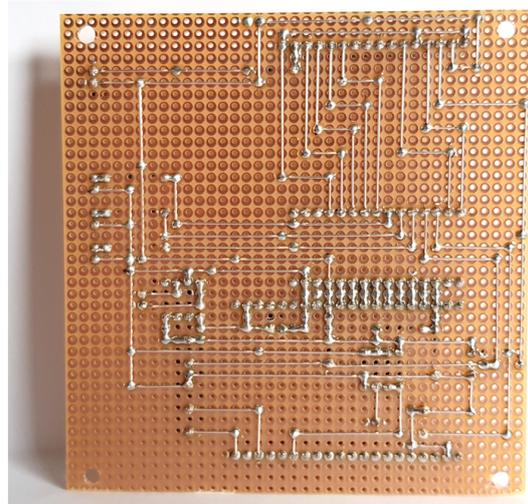
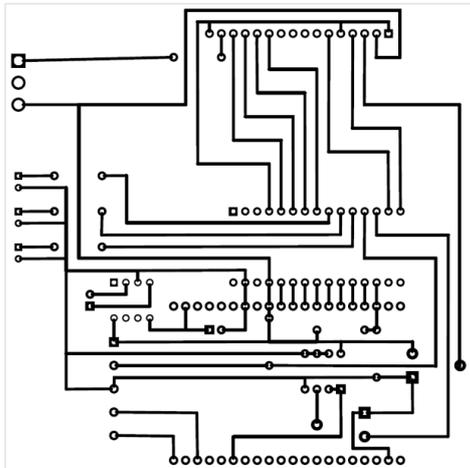


Abbildung 5.3: Implementierung der Betriebsplatine - Leiterbahnseite.

In Abbildung 5.4 sind der Entwurf und die Implementierung der Leiterbahnseite der Messschaltung gegenübergestellt.

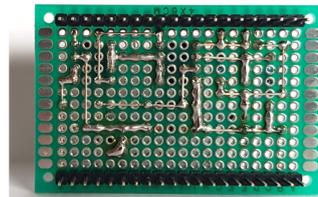
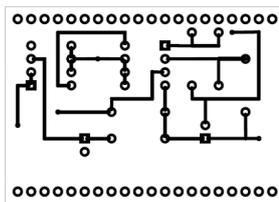


Abbildung 5.4: Implementierung der Messplatine - Leiterbahnseite.

Wegen der Durchkontaktierung muss darauf geachtet werden, Leiterbahnen nicht unbeabsichtigt kurzzuschließen.

5.2 Aufbau der Messvorrichtung

Die Implementierung der Messvorrichtung beinhaltet den gesamten Aufbau, durch Verknüpfen der einzelnen Komponenten. Abbildung 5.5 zeigt die fertig montierte Messvorrichtung. Anhand von Nummerierung einzelner Systemkomponenten, ist deren Spezifikation in Tabelle 5.1 aufgeführt.

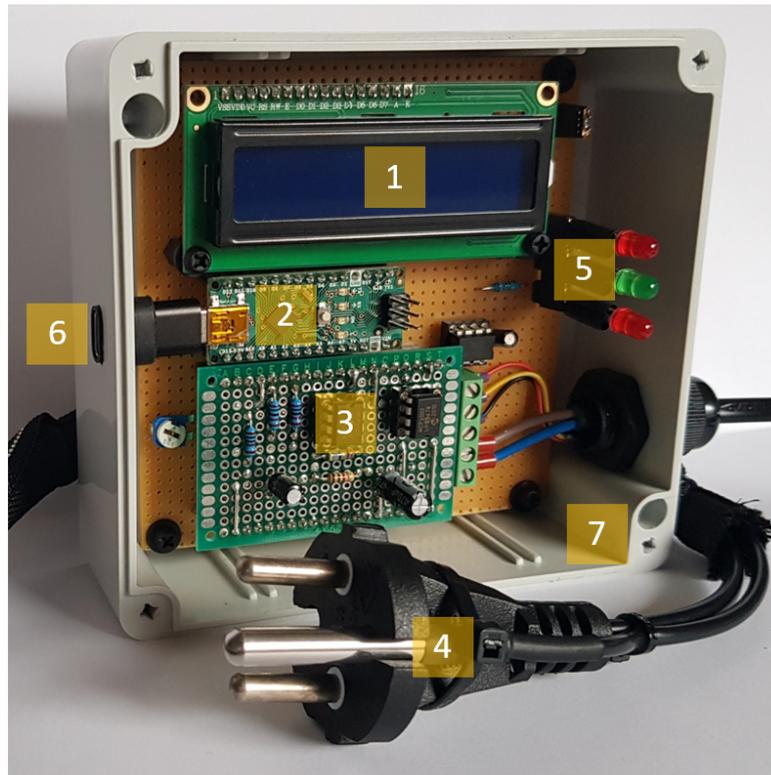


Abbildung 5.5: gesamter Messaufbau.

Tabelle 5.1: Implementierung - Messvorrichtung.

Nr.	Bauteilbeschreibung	Preis in Euro
1	LCD (16x2) (Joy-it com-lcd)	6
2	Arduino Nano: Steuerplatine mit ATmega328	16 bis 38
3	Messschaltung und Betriebsschaltung	
4	Konturenstecker mit DS18B20	0 bis 10
5	Nährstoffampel bestehend aus 3 LEDs	
6	USB C zu Mini USB 2.0 - Adapter	3,50
7	Universal-Gehäuse 125 x 115 (TRU COMPONENTS)	6,50

Komponenten in Tabelle 5.1, welche keine Preisangabe haben, sind als Standardbauteile nicht in die Preisabschätzung einbezogen, weil die Beschaffung in hohen Stückzahlen erfolgt. Für den Preis der gesamten Messvorrichtung ergibt sich eine minimale Summe von 32 Euro und eine maximale Summe von 64 Euro. Es ist davon auszugehen, dass beim Einkauf höherer Stückzahlen des Arduino Nano der Gesamtpreis für die Messtation bei ungefähr 30 Euro liegt.

5.3 Systemsoftware

Die Implementierung der Systemsoftware wird anhand von Abbildungen des Programmcodes beschrieben.

```
36 void setup() {
37   Serial.begin(9600);           // serial data transmission, data rate: 9600 Bit/s
38   analogReference(EXTERNAL);   // reads REF and sets Reference Voltage
39   tone(10, frequency);        // Rectangular voltage (ca. 5Vpp, 100Hz)
40   sensors.begin();            // DS18B20 Temperature sensor
41
42   // LCD setup
43   lcd.begin(16, 2);
44   lcd.print("Temp[C]|k[ms/cm]");
45
46   // turn on LEDs to signal the start of the calibration period:
47   for(int i = 0 ; i < 3 ; i++){
48     pinMode(6 + i, OUTPUT);
49     digitalWrite(6 + i, HIGH);
50   }
51   delay(5000);                // time to stable measurement
52   for(int i = 0 ; i < 3 ; i++){
53     digitalWrite(6 + i, LOW);
54   }
55 }
```

Abbildung 5.6: Implementierung - Setup der Messung.

Das Setup des Programmes erfolgt gemäß Abbildung 5.6 beginnend mit den Grundeinstellungen des Systems. Anschließend wird eine Wartezeit von 5 Sekunden durch Aufleuchten der Nährstoffampel angezeigt, wodurch die Kondensatoren in der Messschaltung genügend Zeit haben, sich auf stabile Spannungswerte zu laden. Es sind somit reproduzierbare Spannungswerte im nachfolgenden Programmcode gemäß Abbildung 5.7 messbar, mit anschließender Berechnung des EC-Wertes und eine um Zehn Prozent abweichende obere und untere EC-Wertgrenze.

```

57 void loop() {
58   //----- sensors
59   // read EC-sensor:
60   sensorValue = analogRead(sensorPin);
61   vOut = (sensorValue / 1023) * 2.33;    // calculate output voltage
62
63   // DS18B20
64   sensors.requestTemperatures();
65   celsius=sensors.getTempCByIndex(0);
66
67   // calculate EC-value
68   EC = calculation(vOut, celsius);
69   // define lower and upper limit for measurement
70   if (ecMin > 4.9){
71     ecMin = EC * 0.9;                // range: +-10%
72     ecMax = EC * 1.1;
73   }
74   Serial.println(ecMin);
75   Serial.println(ecMax);

```

Abbildung 5.7: Implementierung - Messwerte der Sensoren werden erfasst.

```

77   //----- monitors
78   // set the cursor to column 0, line 1
79   lcd.setCursor(0, 1);
80   // print on LCD
81   lcd.print(" ");
82   lcd.print(celsius);                // temperature
83   lcd.print(" | ");
84   lcd.print(EC, 3);                  // EC-value
85
86   // nutrient signalling
87   if(EC > ecMax){
88     digitalWrite(6, HIGH);
89     digitalWrite(7, LOW);
90     digitalWrite(8, LOW);
91   }else if(EC < ecMin){
92     digitalWrite(6, LOW);
93     digitalWrite(7, LOW);
94     digitalWrite(8, HIGH);
95   }else{
96     digitalWrite(6, LOW);
97     digitalWrite(7, HIGH);
98     digitalWrite(8, LOW);
99   }
100   delay(1000);
101 }

```

Abbildung 5.8: Implementierung - Anzeige auf dem LCD und Ansteuerung der Nährstoffampel.

Abbildung 5.9 zeigt den Programmcode zur Berechnung des spezifischen Leitwertes, mit Einbezug der Temperaturabhängigkeit in der Messung.

```
103 // function for calculating the EC value
104 float calculation(float Uout, float temp){
105     // convert the output voltage to 25°C -> UoutRef (Approximation)
106     float UoutRef = 0.000;
107     if(Uout < 0.001){
108         UoutRef = 0;
109     }else if (Uout < 0.088){
110         UoutRef = 0.002 * (25 - temp) + Uout;
111     }else if (Uout < 0.765){
112         UoutRef = 0.016 * (25 - temp) + Uout;
113     }else if (Uout < 1.403){
114         UoutRef = 0.022 * (25 - temp) + Uout;
115     }else if (Uout < 1.735){
116         UoutRef = 0.026 * (25 - temp) + Uout;
117     }else if (Uout < 1.936){
118         UoutRef = 0.024 * (25 - temp) + Uout;
119     }else{
120         UoutRef = 0.022 * (25 - temp) + Uout;
121     }
122     // Polynomial from measurement series
123     float ECcalc = 0.793 * sq(UoutRef) + 0.9383 * UoutRef;
124     return ECcalc;
125 }
```

Abbildung 5.9: Implementierung - Berechnung des spezifischen Leitwertes, mit Temperatureausgleich.

Die Übergabeparameter der Funktion *calculation* in Abbildung 5.9 sind die aktuell gemessene Ausgangsspannung U_{out} und die gleichzeitig gemessene Temperatur *temp*. Anhand von Messreihen zur Veränderung der gemessenen Ausgangsspannung in Abhängigkeit von der Temperatur, wird mit der Abweichung zur Referenztemperatur von 25°C die dazugehörige Referenzausgangsspannung berechnet. Diese dient als Eingangsgröße für ein Polynom, welches anhand von Messreihen zur Ausgangsspannung in Abhängigkeit vom Leitwert bei annähernd 25°C bestimmt wurde. Die Messreihen sind im Anhang beigefügt.

6 Test

Im Laufe der Entwicklungsarbeit wurden bereits verschiedenen Tests durchgeführt. Dazu gehören die Messreihen, welche zur abschließenden Implementierung der Systemsoftware benötigt wurden. Es gilt nun abschließend die Funktionalität der Messvorrichtung zu verifizieren, um das Ergebnis der Entwicklung hinsichtlich seiner Anwendbarkeit einzuordnen.

6.1 Sichtprüfung

Die Sichtprüfung der Messvorrichtung wird vorgenommen, nach einem Testzeitraum von ungefähr einem Monat. Das LCD, der Arduino Nano und die Messschaltung sind wiederholt von der Betriebsplatine an- und abgesteckt worden. Dabei sind keine mechanischen Schäden an den Kontakten der einzelnen Komponenten entstanden. Das Gehäuse mit transparentem Deckel schützt die Elektronik zuverlässig vor Spritzwasser während der Messung, wodurch keine Korrosion auf den Schaltungen zu erkennen ist. Die Elektroden der Messzelle weisen eine leichte Verfärbung auf, welche auf eine Oxidation, bzw. eine Reduktion hindeutet. Es sind bisher keine Auswirkungen auf das Messergebnis erfasst worden. Auf Anpassungsmöglichkeiten wird im Kapitel 7.2 eingegangen.

6.2 Inbetriebnahme

Für die Inbetriebnahme gilt es einzelne Schritte zu beachten. Abbildung 6.1 zeigt eine Abfolge zur ersten Inbetriebnahme für eine stabile Messung des spezifischen Leitwertes.

Das in Abbildung 6.1 gezeigte Ablaufschema zur Inbetriebnahme der Messstation ist vor jeder Langzeitmessung durchzuführen, um eine Überwachung des spezifischen Leitwertes innerhalb definierter Grenzwerte sicherzustellen. Das Umrühren des EC-Sensors durch

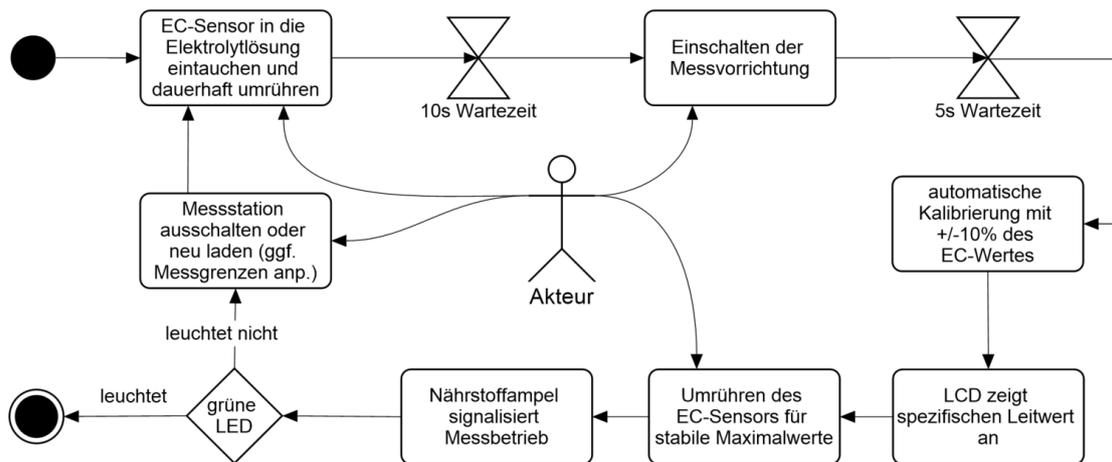


Abbildung 6.1: Test - Inbetriebnahme der Messstation.

den Akteur simuliert die strömende Elektrolytlösung innerhalb des hydroponischen Anzuchtssystems. Das Umrühren entfällt, falls eine stehende Elektrolytlösung gemessen wird. Die Wartezeit vor dem Einschalten der Messvorrichtung, bezieht sich auf die Temperaturveränderung des Temperatursensors, sowie eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Ionen in der zu bemessenden Elektrolytlösung. Es wird davon ausgegangen, dass der spezifische Leitwert durch den Akteur in Zusammenhang mit der Messung angepasst wird, falls nach längerer Überwachung die grüne LED erlischt und die obere oder untere EC-Wertgrenze durch Aufleuchten einer roten LED angezeigt wird. Dabei sollte zuvor eine erneute Inbetriebnahme stattfinden, um anhand des spezifischen Leitwertes die genaue Abweichung vom erforderlichen EC-Wertbereich festzustellen.

6.3 Test der Anforderungen

Der Test der Anforderungen bezieht sich auf die Spezifikationen aus Kapitel 3, welche zusammengefasst in Tabelle 6.2 dargestellt sind.

Zur Verifikation der Muss-Ziele werden zwei unterschiedliche Elektrolytlösungen in einem Temperaturbereich von annähernd 0°C bis 50°C bemessen. Dazu wird der spezifische Leitwert mit einem Referenzmessgerät [5] bei annähernder Referenztemperatur von 25°C erfasst und während der Temperaturveränderung kontrolliert. Die Abweichung von dem spezifischen Leitwert wird über die gesamte Messung qualitativ erfasst, weil geringe Abweichungen durch relativ schnelle Temperaturänderungen und unterschiedlich schnelles

Tabelle 6.1: Test der Anforderungen.

	MUSS-ZIELE	Status
M1	Die Leitwertmessung ist reproduzierbar in einem Messbereich von $0,1 \text{ mS/cm}$ bis 5 mS/cm .	✓
M2	Die elektrische Leitfähigkeit (EC-Wert) wird spezifisch auf einem LCD angezeigt.	✓
M3	Die Temperatur des Wassers wird parallel gemessen, zum digitalen Ausgleich der Temperaturabhängigkeit bei der Leitwertmessung.	✓
M4	Eine LED-Ampel zeigt intuitiv den aktuellen Nährstoffgehalt passend zum Wachstumsstadium und Nährstoffbedarf bestimmter Pflanzentypen.	✓
M5	Die Platinen zum Aufbau der Betriebs- und Messschaltung sind selbst entwickelt.	✓
	KANN-ZIELE	
K1	Die Fehleranfälligkeit ist durch eine Messkettenüberwachung reduziert.	×
K2	Der Arduino Nano ist steckbar auf der Betriebsschaltungs-Platine.	✓
K3	Messdaten sind über eine Bus-Verbindung auslesbar.	×
K4	Der Messbereich ist umschaltbar vom mittleren Messbereich ($0,1$ bis 5 mS/cm) auf einen höheren Messbereich (5 bis 10 mS/cm).	×

Umrühren des EC-Sensors zu erwarten sind. Der Messvorgang beginnt gemäß der Abfolge zur Inbetriebnahme in Abbildung 6.1 und wird unter dauerhaftem Umrühren des EC-Sensors und Kontrolle des spezifischen Leitwertes fortgeführt.

Für die Berechnung der Messunsicherheit wird zunächst für jede Elektrolytlösung der EC-Wert in möglichst gleichmäßigen Temperaturabständen von 5°C gemessen. Anschließend werden der arithmetische Mittelwert, die Varianz und die Standardabweichung für beide Messreihen berechnet.

Für den arithmetischen Mittelwert gilt allgemein:

$$x_{arithm} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i$$

Für die Varianz gilt allgemein:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - x_{arithm})^2$$

Für die Standardabweichung gilt allgemein:

$$s = \sqrt{\sigma^2}$$

Die Messergebnisse zur Berechnungen der Messunsicherheit sind in Tabelle 6.2 festgehalten. Abbildung 6.2 zeigt die Mischverhältnisse beider Elektrolytlösungen, mit Verwendung der Elektrolytlösungen der Kalibrierung.

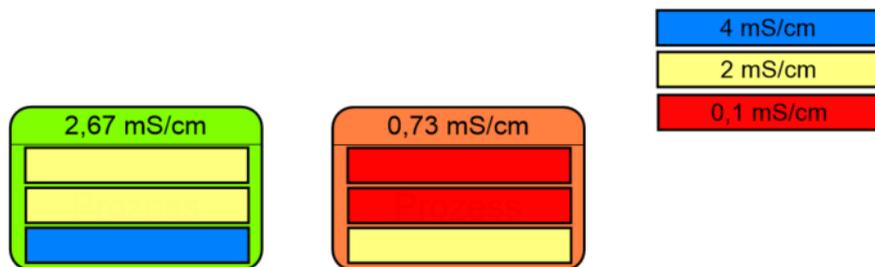


Abbildung 6.2: Test - Mischverhältnis der Elektrolytlösungen.

Die orangene Elektrolytlösung aus Abbildung 6.2 ist κ_1 und die grüne Elektrolytlösung ist κ_2 . Die berechneten Elektrolytwerte, welche sich aus einem exakten Mischverhältnis ergeben, unter der Annahme von genauen Leitwerten der genutzten Elektrolytlösung, sind als Richtwert für die folgenden Messreihen einzuordnen. Es wurden folgende Referenzwerte gemessen:

$$\kappa_{1_{ref}} = 0,86 \text{ mS/cm}$$

$$\kappa_{2_{ref}} = 2,62 \text{ mS/cm}$$

Tabelle 6.2: Messwerte zur Bestimmung der Messunsicherheit.

i	$\kappa_{1_i} [mS/cm]$	$\kappa_{2_i} [mS/cm]$
1	0,89	2,44
2	0,91	2,47
3	0,86	2,44
4	0,81	2,35
5	0,73	2,31
6	0,68	2,28
7	0,67	2,23
8	0,66	2,18
9	0,66	2,08

Anhand der Messwerte aus Tabelle 6.2 ergeben sich folgende arithmetische Mittelwerte:

$$\kappa_{1_{arithm}} \approx 0,76mS/cm$$

$$\kappa_{2_{arithm}} \approx 2,31mS/cm$$

Es wurden folgende Varianzen berechnet:

$$\sigma_1^2 = 0,0097$$

$$\sigma_2^2 = 0,0157$$

Daraus ergeben sich folgende Standardabweichungen:

$$s_1 = 0,098$$

$$s_2 = 0,125$$

Die Messergebnisse aus Tabelle 6.2 und die darauf folgenden Berechnungen zeigen, dass trotz der Temperaturveränderung die gemessenen Werte nur gering von ihrem Mittelwert abweichen. Die absoluten spezifischen Leitwerte der Berechnung, der Referenzmessung und der Messreihen zeigen im Vergleich untereinander relativ geringe Abweichungen, unter Beachtung von allgemein geltenden Messungenauigkeiten. Diese summieren sich durch Temperaturschwankungen, Toleranzen des Referenzmessgerätes und Messungenauigkeiten in Folge des Messverfahrens.

Eine gesonderte Messkettenüberwachung um die Fehleranfälligkeit der Messvorrichtung zu verringern, wurde nicht umgesetzt, weil mit der vorgegebenen Inbetriebnahme ein Verlassen des eingestellten Messbereiches durch die Nährstoffampel angezeigt wird. Ein Fehler im System, welcher die Messung beeinflusst, wird somit angezeigt. Das Auslesen von Messdaten ist grundlegend über die USB-Verbindung möglich. Eine entsprechende Anpassung des Programmcodes wurde nicht vorgenommen, weil die Notwendigkeit für den angestrebten Betrieb nicht besteht. Für die Optimierung der Messgenauigkeit ist die Umsetzung des optionalen Zieles K3 in Betracht zu ziehen. Ein umschaltbarer Messbereich gemäß K4 ist für den geforderten Messbereich gemäß M1 nicht notwendig.

7 Fazit

Das Fazit gibt einen kurzen Überblick zu den Ergebnissen der Entwicklung und stellt den Bezug zur Einleitung her. Zur weiteren Bearbeitung und Optimierung der Vorrichtung zur spezifischen Leitwertmessung werden mögliche Ansätze zur Anpassung in Ausblick gestellt.

7.1 Auswertung der Ergebnisse

Ausgehend von grundlegenden Schaltungen, ist bei der Entwicklung eine begrenzte Funktionalität zu erwarten. Es wurden Anpassungen im Aufbau der Schaltungen vorgenommen, unter Einfluss des Zieles den Schaltungsaufwand möglichst gering zu halten. In Bezug auf die Messschaltung ist damit einhergehend eine Limitierung der Anpassungsmöglichkeiten, zum Ausgleich parasitärer Eigenschaften der Messzelle, festzuhalten. Daraus folgt das Verwerfen der Absicht eine Zellkonstante zu ermitteln, mit welcher der spezifische Leitwert durch Messung des Widerstandes berechnet werden kann. Der dazu notwendige ohmsche Zusammenhang der Größen ist mit der implementierten Schaltung nicht gegeben. Die mathematische Annäherung gemessener Werte, an einen von der Temperatur unabhängigen spezifischen Leitwert, ist durch die Berechnung im Programmcode umgesetzt worden. Die Vorrichtung zur spezifischen Leitwertmessung ist durch die Ansteuerung der Hardwarekomponenten mit der programmierten Software für die Anwendung in einem hydroponischen Anzuchtssystem geeignet. Der Gesamtaufbau ist im Vergleich zu anderen EC-Messgeräten preislich und anwendungsspezifisch sehr günstig, wegen einer anpassungsfähigen Messgenauigkeit und der Integrierbarkeit in ein größeres System.

7.2 Ausblick

Die Optimierung der Messgenauigkeit ist aufgrund von dazu notwendigen Messreihen zur Kalibrierung mit dem Programmcode in Ausblick zu stellen. Der Aufwand in der Erfassung von Referenzmesswerten bestimmt dabei die Messgenauigkeit der Vorrichtung. Die Änderung der Messfrequenz kann genauer untersucht werden, im Hinblick auf das Auftreten von Polarisierungseffekten. Zudem sind der Vorrichtung V4A-Edelstahlhülsen beigefügt, welche zur Anpassung der Elektroden verwendet werden können. Die Messvorrichtung muss entsprechend in der Messspannung und Messfrequenz angepasst und neu kalibriert werden, mittels neuer Messreihen zur Abhängigkeit der Ausgangsspannung bei verschiedenen Leitwerten unter annähernd Referenztemperatur.

Literaturverzeichnis

- [1] ANSGAR MEROTH, Petre S.: *Sensornetzwerke in Theorie und Praxis: Embedded Systems-Projekte erfolgreich realisieren*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. – URL <https://katalog.haw-hamburg.de/vufind/Record/1024089002>. – ISBN 978-3-658-18386-8
- [2] GERICKE, William F.: *The Complete Guide to Soilless Gardening*. Prentice-Hall, Inc., 70 Fifth Avenue, New York, 1940. – URL <https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.271694>. – ISBN 1169938833, 978-1169938830
- [3] o.V.: *Arduino Nano, Product Reference Manual*. – URL <https://docs.arduino.cc/static/b25acf6247ca93c9718bee4b4454d832/A000005-datasheet.pdf>. – Zugriffsdatum: 06.01.2023
- [4] o.V.: *DS18B20, Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. – URL <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf>. – Zugriffsdatum: 06.01.2023
- [5] o.V.: *EC20 Value Leitfähigkeits-Taschenmessgerät*. – URL <https://aperainst.de/produkt/ec20-value-taschen-leitfaehigkeitsmessgeraet/>. – Zugriffsdatum: 04.02.2023
- [6] o.V.: *End hunger, achieve food security and improved nutrition and promote sustainable agriculture*. – URL <https://sdgs.un.org/goals/goal2>. – Zugriffsdatum: 17.11.2022
- [7] o.V.: *Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all*. – URL <https://sdgs.un.org/goals/goal6>. – Zugriffsdatum: 18.11.2022
- [8] o.V.: *Hydroponics History Part 1, Water Culture*. – URL <https://hydroponicgardening.com/history-of-hydroponics/water-culture-hydroponics-history/>. – Zugriffsdatum: 03.12.2022

- [9] o.V.: *ICL7660S, ICL7660A Super Voltage Converters*. – URL <https://www.renesas.com/us/en/document/dst/icl7660s-icl7660a-datasheet>. – Zugriffsdatum: 10.01.2023
- [10] o.V.: *Konturenstecker Typ C, CEE 7/17*. – URL https://www.wentronic.com/media/perfion/perfion-product/58913_Produkt-Datenblatt%23Product-Data-Sheet.pdf. – Zugriffsdatum: 27.01.2023
- [11] o.V.: *Wasser und Ernährungssicherung*. – URL <https://www.bmz.de/de/themen/wasser/wasser-und-ernaehrungssicherung-20646>. – Zugriffsdatum: 18.11.2022
- [12] o.V.: *Zehn Handlungsempfehlungen für eine Welt ohne Hunger*. – URL <https://www.bmz.de/de/themen/ernaehrungssicherung/einewelt-ohne-hunger/zehn-handlungsempfehlungen-fuer-eine-welt-ohne-hunger-66796>. – Zugriffsdatum: 17.11.2022
- [13] SCHUPPAN, Joachim: *Theorie und Meßmethoden der Konduktometrie*. Berlin Boston: De Gruyter, 2022. – URL <https://katalog.haw-hamburg.de/vufind/Record/1795197196>. – ISBN 978-3-11-256682-4
- [14] ULRICH TIETZE, Eberhard G.: *Halbleiter-Schaltungstechnik*. Erlangen und München, 2012
- [15] WOLFGANG BECHMANN, Ilko B.: *Einstieg in die Physikalische Chemie für Nebenfächler*. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum, 2016. – URL <https://katalog.haw-hamburg.de/vufind/Record/860145964>. – ISBN 978-3-662-49506-3

A Anhang

Der Anhang zur Arbeit befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original