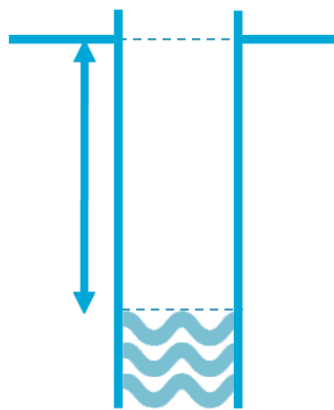


Sensorsysteem voor SubDowser

R.C. van Beelen
S.C.A. de Groot

Een betaalbaar sensorsysteem voor het monitoren van
waterkwaliteit en -kwantiteit in Afrikaanse waterput-
ten



Sensorsysteem voor SubDowser

door

R.C. van Beelen
S.C.A. de Groot

te verdedigen op maandag 27 juni om 11:00 uur.

Studenten:	Sjoerd de Groot	4233204
	Ruben van Beelen	4244893
Duur project :	April 15, 2016 – Juni 15, 2016	
Opdrachtgever:	Erik van der Putte Msc.	SkyDowser
Supervisor:	dr. ir. Andre Bossche	TU Delft
Dagelijks begeleider:	ing. Jeroen Bastemeijer	TU Delft
Beoordelingscommissie:	dr. Nuria Llombart Juan	TU Delft
	dr. ir. Andre Bossche	TU Delft
	dr. ir. Arjan van Genderen	TU Delft
	Erik van der Putte MSc.	SkyDowser

Een digitale versie van deze thesis zal beschikbaar zijn op <http://repository.tudelft.nl/>.

Abstract

Deze thesis beschrijft de ontwerpkeuzes, het ontwerp en het begin van de implementatie van een sensorsysteem dat voor €12,50 aan componenten de waterdiepte, temperatuur en conductiviteit meet in waterputten. Aan de hand van de temperatuur en de conductiviteit kan de zoutconcentratie benaderd worden. Er is gekozen voor een combinatie van nieuwe sensoren en kant en klare sensoren. Het systeem gebruikt een contactloze capacatieve m tussen de 100 kHz sinus aan de ingang en de stroom aan de uitgang wordt de conductiviteit bepaald. Een digitale sensor voor de temperatuur en een drukmeting voor de diepte completeren het systeem. Het systeem verwerkt de gemeten waarden zodat deze digitaal gemaakt kunnen worden met gangbare ADC's. Uiteindelijk wordt er een definitief circuit besproken en zijn er voor de geleiding en temperatuur eerste resultaten van het prototype te zien. Er is geconcludeerd dat de temperatuursensor toereikend is en dat de geleidingssensor functioneert van 0 - 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Met verder onderzoek kan dit uitgebreid worden tot een groter bereik. Voor de dieptemeting is aangeraden een druksensor te gebruiken.

English This thesis describes the design choices, the design and the beginning of the implementation of the sensorsystem that has to measure conductivity, depth en temperature with a budget of €12,50 for the entire sensor system. A combination of home made and purchaced sensors was used. The system uses a contactless capacitive measurement with two RF mixers to measure conductivity. Using the phaseshift of the 100kHz sine wave and current the conductivity can be determined. A digital temperature and pressure sensor complete the system. The system conditions the signals to be optimally converted with an ADC. Eventually a definitive design is discussed, and first results for temperature and conductivity are presented. It is concluded that the temperature sensor is satisfactory and the conductivity sensor functions in the range 0 - 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$. With further research this range can be extended. A recommendation for a digital pressure sensor was made.

Voorwoord

Deze thesis hoort samen met twee anderen bij het bachelorafstudeerproject van de studie elektrotechniek van de faculteit EWI aan de TU Delft. Groep K: 'Keeping water under surveillance' ontwikkelt een sensor-systeem voor waterputten. De opdrachtgever is het bedrijf SkyDowser en het product dat ontwikkeld wordt draagt de naam SubDowser. Dit verslag beschrijft het sensorgedeelte van het product.

De doelgroep van deze thesis zijn studenten en docenten elektrotechniek, die geïnteresseerd zijn in sensoren en het meten van waterkwaliteit. Enige kennis van analoge circuits, elektromagnetisme en meettechniek is aanbevolen alvorens het verslag te lezen.

Onze dank gaat uit naar de volgende personen:

Erik van der Putte
André Bossche
Jeroen Bastemeijer
Rob Remis

*R.C. van Beelen
S.C.A. de Groot
Delft, 30 juni 2016*

Inhoudsopgave

1	Inleiding	1
2	Analyse totaalsysteem	2
2.1	Totaalsysteem	2
2.2	Deelsystemen	3
2.3	Interfaces	4
3	Conceptueel ontwerp	5
3.1	Probleemanalyse en ontwerptaak	5
3.2	Programma van eisen	5
3.2.1	Functionele eisen	6
3.2.2	Niet-functionele eisen	6
3.3	Functieanalyse	8
3.4	Concepten per onderdeel	9
3.4.1	Diepte	9
3.4.2	Temperatuur	10
3.4.3	Geleiding	11
3.5	Criteria voor selectie totaalconcept	12
3.6	Evaluatie en selectie van het totaalconcept	13
3.6.1	Temperatuur	13
3.6.2	Geleiding	13
3.6.3	Diepte	14
4	Detailontwerp	16
4.1	Geleiding	16
4.1.1	Equivalent circuit	16
4.1.2	Signaalgenerator	18
4.1.3	Sensorconfiguratie	20
4.1.4	Versterkers	24
4.1.5	Impedantiemeting	25
4.1.6	Definitief circuit	26
4.2	Diepte	27
4.3	Temperatuur	28
5	Resultaten	29
5.1	Geleiding	29
5.2	Diepte	31
5.3	Temperatuur	31
5.4	Energie	33
5.5	Kosten	33
6	Discussie	34
7	Aanbevelingen	35
A	Systeemeisen	36
A.1	Functionele eisen	36
A.2	Non-functionele eisen	36
A.2.1	Producteisen	36
A.2.2	Organisatorische eisen	37

B Simulatie	38
C Circuits	40
C.1 Circuit geleidingssensor.	40
Bibliografie	42

Inleiding

Weten hoeveel water er in de grond zit en van welke kwaliteit dit water is, is van vitaal belang voor vele sectoren. Als er op een plek voldoende water in de grond zit is er plotseling landbouw mogelijk, kunnen er dorpen worden neergezet of kunnen er dieren leven. Aan de andere kant kan teveel water ook weer funest zijn voor bijvoorbeeld de landbouw. Het veranderende klimaat brengt nieuwe uitdagingen op dit vlak met zich mee. Gebieden die altijd voldoende water hadden zijn plotseling het droogst in 100 jaar en gebieden die bekend stonden om droogte hebben zoveel water dat ze niet weten wat ze er mee moeten. Enkele recente voorbeelden zijn de droogte in de zomer van 2015 in California en de extreme droogte van zomer 2016 in Kenia en Ethiopië. Waar er in de maatschappij een probleem ligt is de techniek daar om die problemen aan te pakken en minder te maken.

Een eerste stap in het beter omgaan met de veranderende waterstand en regenval zou het beter monitoren van het (grond)water zijn. Door over grote gebieden veel meetpunten te hebben die men op afstand uit kan lezen is het mogelijk nieuwe stappen te zetten in het bestrijden van droogte of overstromingen. Daarom zijn er dus betaalbare, betrouwbare en efficiënte oplossingen nodig die grondwater kunnen monitoren.

Met deze maatschappelijke achtergrond in gedachten is er in dit Bachelor Afstudeer Project gekeken naar hoe er voor €50,- een systeem ontwikkeld kan worden dat autonoom waterstand en kwaliteit kan monitoren. In deze thesis zal specifiek aandacht worden besteed aan de sensoren van dit systeem. Op welke manier worden bepaalde fysieke grootheden uitgelezen, met welke elektronica moet dat en hoe werkt het in de praktijk? De belangrijkste randvoorwaarden hierbij waren het beperkte budget van €12.50, het autonoom functioneren van minstens twee jaar en een waterdichtheid tot 20 meter waterkolom. De scope van de ontwerptaak liep hier van de daadwerkelijke sensor tot het punt waar de elektrische signalen digitaal gemaakt zouden worden.

In deze thesis zal allereerst het hele systeem worden opgesplitst in deelsystemen, waaronder het sensorsysteem, in hoofdstuk 2. Hier wordt gekeken wat de interfaces zijn voor het sensorsysteem met andere deelsystemen, maar ook in welke omgeving het zal moeten opereren. In hoofdstuk 3 wordt allereerst het probleem van de ontwerptaak geanalyseerd en daarna wordt gekeken naar het conceptueel ontwerp. Welke eisen zijn er gesteld, welke functies moet het systeem vervullen en met welke concepten is dit mogelijk? Uiteindelijk wordt er één totaalconcept gekozen wat daarna in hoofdstuk 4 tot in detail zal worden uitgewerkt tot een daadwerkelijk ontwerp wat ook echt gemaakt is. In hoofdstuk 5 zijn de meetresultaten van het prototype te vinden. Daarna wordt in hoofdstuk 6 de discussie gevoerd over wat de meetresultaten zeggen over de prestaties van het prototype en of de ontwerpdoelstelling ook gehaald is. Vervolgens wordt in hoofdstuk 7 nog gekeken naar welke aanbevelingen er zijn om het ontwerp te verbeteren.

Analyse totaalsysteem

In dit hoofdstuk zal eerst worden gekeken naar welke eisen er door de opdrachtgever aan het totaalsysteem zijn gesteld. Daarna wordt de indeling besproken die is gehanteerd met het opsplitsen van het totaalsysteem in deelsystemen. Van deze deelsystemen wordt besproken met welke interfaces ze te maken hebben, zoals de buitenwereld of andere deelsystemen. Dit is van belang voor het latere ontwerp omdat het deelsysteem alleen een succesvol ontwerp kan zijn als het op een nuttige en juiste manier met de andere systemen communiceert.

2.1. Totaalsysteem

SkyDowser is een Delftse startup uit 2014 met als doel om Afrikaanse boeren van betere informatie te voorzien over het water wat in de grond zit. Hiervoor is een drone (UAV) in ontwikkeling die met behulp van de reflectie van elektromagnetische golven al vliegend data verzameld over het grondwater. Helaas is het vliegen van een drone duur. Een week vliegen kost ongeveer €20.000,-, aldus SkyDowser. Daarom is vanuit SkyDowser de vraag gekomen om een ontwerp te maken voor een sonde die autonoom de waterkwantiteit en -kwaliteit kan monitoren van waterputten in Kenia en Tanzania. De grootheden die met deze kwaliteit en kwantiteit geassocieerd worden zijn de waterhoogte ten opzicht van het maaiveld, de temperatuur van het water en de soortelijke geleiding van het water. De eerste van de drie zegt iets over de kwantiteit, de laatste twee kunnen gebruikt worden om de zoutconcentratie (aantal mg zout per liter water) te benaderen. Allereerst is er samen met SkyDowser gekeken aan welke randvoorwaarden zo'n sonde moet voldoen.

De meest voor de hand liggende randvoorwaarden zijn afhankelijk van het doelgebied. De sonde moet bruikbaar zijn voor waterputten in Afrika. In de ontwerpkeuzes zal dus rekening gehouden moeten worden met de aldaar aanwezige omgeving, beschikbare communicatietechnieken en de vereiste robuustheid van dergelijke meetsystemen. Dit heeft geleid tot de volgende systeemeisen (de uitgebreide, specifieke systeemeisen zijn te vinden in appendix A, hier worden voor het overzicht alleen de omschrijvingen en/of samenvattingen gegeven):

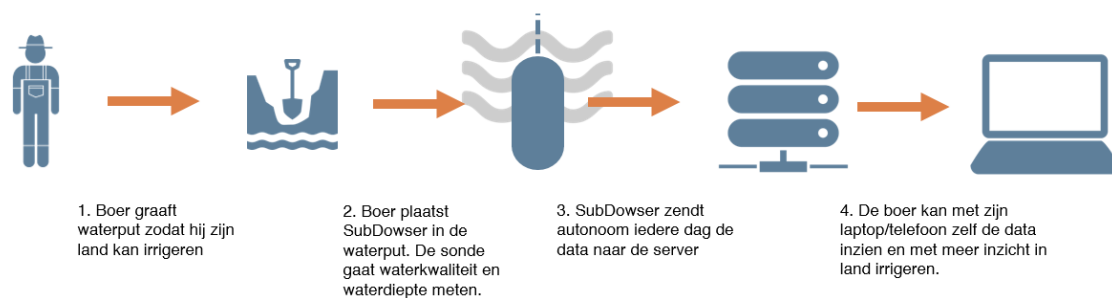
1. De omgevingstemperatuur in Kenia en Tanzania varieert van 0 tot 38 °celsius [1]. De sonde moet hier tegen bestand zijn. De temperatuur in de zon kan oplopen tot 70°celsius.
2. Daarnaast is over het algemeen de GSM (GPRS) dekking in Afrikaanse landen vrij goed [2]. Vanwege het feit dat internettoegang hier net als in de rest van de wereld steeds belangrijker wordt en telefoons goedkoper zijn dan PC's is de vraag naar mobiele data vrij groot. Daardoor is ook het aanbod van deze diensten op veel plekken al geregeld.
3. Tenslotte moet het systeem minstens 2 jaar autonoom kunnen functioneren. Er kan niet iedere maand een monteur langs komen om een batterij of sensor te vervangen of schoon te maken. De eerste drie randvoorwaarden zijn globaal omschreven:

Daarnaast zijn er ook randvoorwaarden ontstaan vanuit de beoogde eindgebruiker. Zoals gezegd wil SkyDowser zich richten op Afrikaanse boeren in Kenia en Tanzania. Hierdoor ontstaan er ook een aantal beperkingen voor het ontwerp:

4. Het mag de boeren niet teveel kosten. De koopkracht van de beoogde landen ligt een stuk lager. Om een betaalbare eindprijs te kunnen realiseren is de kostprijs vastgezet op €50, voor alle onderdelen, bij een oplage van 10.000 stuks.
5. Het product moet plug&play zijn. Er is bij de eindgebruikers weinig technische kennis van zaken. Daarom moet de boer het apparaat uit de doos kunnen halen, aanzetten en moet het product direct werken. De gebruiker kan door middel van één unieke productcode zijn meetdata inzien via de diensten van SkyDowser.
6. De data moet autonoom naar de servers van SkyDowser worden verzonden, hier hoeft de boer niets voor te doen. De frequentie van het verzenden moet kunnen variëren tussen 1x per half uur en 1x per dag.

Deze randvoorwaarden leiden samen al tot een globaal systeemconcept. In afbeelding 2.1 is dit concept samengevat. De boer graaft zijn waterput, plaatst een sonde (ook wel SubDowser te noemen, naar de ondergrondse variant van SkyDowser) en krijgt daarna de data op zijn telefoon of laptop binnen. Deze globale functionaliteit is in twee functionele eisen samengevat, die als fundering dienen voor de andere eisen in appendix A. De ontwerptaak voor het gehele systeem loopt van het omzetten van de fysieke grootheid naar het elektrische domein tot het opsturen van de data naar de SkyDowser servers.

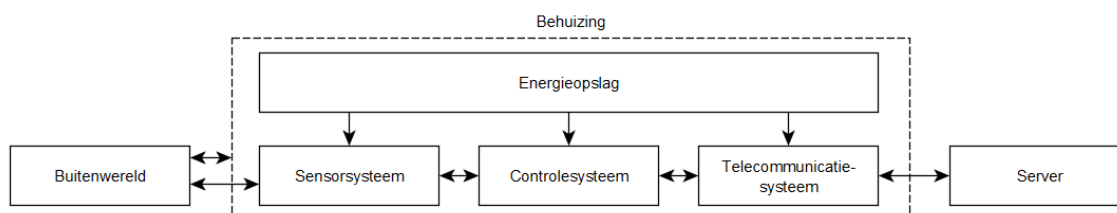
1. Het product moet het waterniveau ten opzichte van het maaiveld, conductiviteit en temperatuur meten van het water in een waterput.
2. De verkregen data moet verstuurd worden naar de SkyDowser data servers.



Figuur 2.1: Een schematisch overzicht van de beoogde functionaliteit van het systeem.

2.2. Deelsystemen

Nadat de randvoorwaarden en de beoogde functionaliteit van het systeem zijn vastgesteld is het systeem opgedeeld in deelsystemen met bijbehorende ontwerptaken. Dit zodat de ontwerptaak over drie groepen van twee teamleden verdeeld kon worden en daarmee sneller en efficiënter aangepakt kon worden. De deelsysteem zijn zo gescheiden mogelijk opgesteld, zodat er zo min mogelijk overlap tussen is, maar ze samen toch het hele systeem vormen (Het zogenaamde MECE principe; Mutually Exclusive, Collectively Exhaustive). Zo kunnen de delen los van elkaar ontworpen worden.



Figuur 2.2: Een blokdiagram van alle systemen en de interfaces tussen de systemen.

Zoals te zien is in figuur 2.2 bestaat het systeem uit een sensor-, controle-, telecommunicatie- en energie-opslagsysteem. De functionaliteit van ieder systeem zal kort beschreven worden:

Sensoren De sensoren moeten de eigenschappen van de omgeving omzetten naar het elektrische domein. De te meten eigenschappen zijn waterdiepte ten opzichte van het maaiveld, temperatuur en geleiding. Daarna moeten de gemeten signalen worden geconditioneerd en worden doorgegeven aan het controlesysteem.

Controlesysteem Het controlesysteem moet de andere drie deelsystemen aansturen. Het controlesysteem moet de metingen die gedaan worden door de sensormodule eventueel nog omzetten naar een digitale waarde die opgeslagen kan worden, deze waarde daadwerkelijk ook opslaan en vervolgens doorgeven aan het telecommunicatiesysteem. Voor de data naar het telecommunicatiesysteem kan moet er een datapakket worden gemaakt wat verzonden kan worden naar het modem.

Telecommunicatiesysteem Het telecommunicatiesysteem krijgt van het controlesysteem een kant en klaar datapakket aangeleverd wat het vervolgens mag verzenden naar de server. De telecommunicatie moet ervoor zorgen dat alle data aankomt op de server van SkyDowser en dit op een zo efficiënt mogelijke manier gebeurt.

Energieopslag Alle deelsystemen moeten van energie worden voorzien. Het is de taak van de energieopslag om precies genoeg energie aan de deelsystemen te leveren en daarna de energie te bewaren voor de volgende meting zodat de accu het zo lang mogelijk, minstens 2 jaar, vol houdt.

2.3. Interfaces

Zoals in figuur 2.2 reeds te zien is zijn sommige deelsystemen direct met elkaar verbonden. We kunnen dan zeggen dat er sprake is van een interface. De interfaces zijn op bepaalde standaarden, spanningen, etc. vastgesteld om latere compatibiliteit te garanderen. Bij de interfaces is vaak voor veel voorkomende protocollen gekozen. Dit omdat een protocol wat veel voorkomt en veel gedocumenteerd is vaak ook goedkopere componenten toestaat in het systeem dan een exotisch protocol wat weinig gebruikt wordt. Voorbeelden hiervan zijn het i²c protocol of een voedingsspanning van 3.3V of 5V voor een IC.

- **Sensorsysteem - Controlesysteem:** Het sensorsysteem kan op twee mogelijke manieren meetwaarden doorgeven aan het controlesysteem. Allereerst kan een analoge waarden worden doorgegeven tussen 0 en 3.3V aan een 12-bits ADC. Het spanningsbereik is zo gekozen omdat dit een gebruikelijk bereik is voor microprocessors en de 12-bits ADC omdat dit een redelijk gangbare resolutie is en voldoende resolutie biedt voor de metingen. De maximale frequentie die het signaal voor de ADC mag hebben is op 100 kHz gezet. De maximale meetfrequentie mag 2 maal de sample rate zijn, wat een minimale sample rate van 200 kHz voor de ADC eist. Eventuele communicatie tussen digitale sensoren (daarmee worden sensoren bedoeld met een kant en klare ADC en communicatie IC erin) en het controlesysteem moet via het i²c of 1Wire protocol. Dit omdat het gangbare protocollen zijn en eventuele modulariteit van het systeem ten goede komt omdat er dan later gemakkelijk extra sensoren toegevoegd kunnen worden.
- **Sensorsysteem - Energieopslag:** Het sensorsysteem krijgt 5V aangeleverd als beschikbare voedingsspanning. Er is voor deze spanning gekozen omdat het een van de meest gangbare ingangsspanningen is voor IC's die vaak gebruikt worden in analoge circuits.
- **Controlesysteem - Telecommunicatiesysteem:** Het telecommunicatiesysteem krijgt van het controlesysteem een datapakket aangeleverd.
- **Energieopslag - Telecommunicatiesysteem:** Het telecommunicatiesysteem heeft een voedingsspanning van 3.7V vanaf de energieopslag, omdat dit voor GSM modems een veelvoorkomende spanning is (spanning van een lithium-ion accu).
- **Energieopslag - Controlesysteem:** Het controlesysteem wordt met 3.3V gevoed, maar stuurt op zijn beurt ook de energieopslag aan. Dit betekent dat het controlesysteem via de energieopslag bepaalde delen van het systeem uit kan zetten, waarmee energie bespaard kan worden. Dit wordt gedaan door middel van digitale signalen van 0 of 3.3V

3

Conceptueel ontwerp

In dit hoofdstuk zal gekeken worden naar wat het precieze probleem is wat de sonde op moet lossen en welke ontwerptaak daaruit voort komt. Daarna wordt gekeken aan welke functionele- en niet-functionele eisen het product moet voldoen om het later als een succesvol ontwerp te kunnen zien. Aan de hand van een functienalyse zullen voor iedere deelfunctie concepten voor het systeem worden bedacht, waarna er één totaalconcept wordt geselecteerd aan de hand van selectiecriteria. Dit concept kan daarna in hoofdstuk 4 verder worden uitgewerkt.

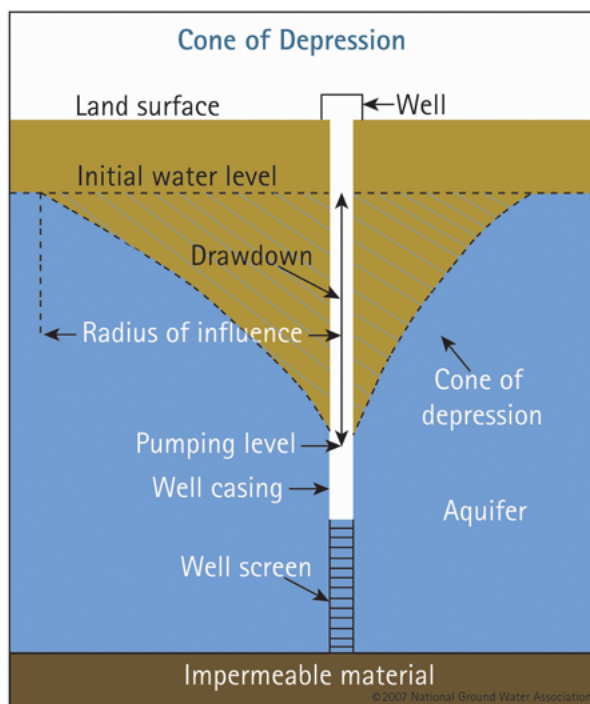
3.1. Probleemanalyse en ontwerptaak

De twee grootheden waar SkyDowser uiteindelijk naar op zoek is zijn de waterdiepte ten opzichte van het maaiveld en de concentratie zout in het water. De waterdiepte is interessant omdat aan de hand van deze diepte de hoeveelheid grondwater in het gebied in de gaten gehouden kan worden. Hierdoor kan een boer bepalen of hij een waterput niet uitput. Dit kan gebeuren wanneer hij meer water pompt uit een put dan er door de natuur kan worden aangevoerd. In figuur 3.1 is te zien dat door het pompen uit een waterput een depressiekegel (cone of depression) ontstaat. Wanneer de boer teveel water uit de put haalt zal de waterstand in de put tot de ondoordringbare bodemlaag (impermeable material) komen. Door de waterstand te monitoren kan een boer de waterconsumptie uit de waterput beter afstemmen op de omgeving. De zoutconcentratie, het aantal mg zout per liter water, is interessant omdat gewassen hier gevoelig voor zijn. Deze gevoeligheid hangt af van welk gewas het betreft, maar over het algemeen kan worden uitgegaan van een maximaal toelaatbare concentratie van 750 ppm[3]. Omdat het water uit nabijgelegen grond naar de put toestroomt is het mogelijk dat er uit nabijgelegen gesteente zout wordt aangevoerd. Daarom moet een boer ook in staat zijn om te zien wanneer er te veel zout in zijn put zit zodat hij daarnaar kan handelen. De zoutconcentratie is niet gemakkelijk compact en autonoom te meten met elektrische sensoren. De enige oplossingen zijn het verwarmen van het water en daarna de massa van het residu te meten of capillaire elektroforese, waarbij het water door een zeer dunne spiraal wordt geleid waarbij de aankomsttijd van de ionen afhangen van de massa en de concentratie.[4].

Daarom zal gebruik gemaakt moeten worden van een gevolg van de aanwezigheid van ionen in water. Des te meer ionen er in een vloeistof aanwezig zijn, des te beter de vloeistof zal geleiden (en dus een lagere weerstand zal hebben). De ionen fungeren hier dus als ladingsdragers. Deze geleiding is wel direct te meten. Naast het zoutgehalte is de geleiding ook afhankelijk van de temperatuur van het water[5, 6]. Daarom zal naast een conductiviteitssensor ook een temperatuursensor in het systeem opgenomen moeten worden. Volgens kan met deze twee metingen en een rekenmodel het zoutgehalte van het water in de put benaderd worden[7]. De vuistregel is dat 1 uS/cm aan geleiding gelijk staat aan 0.66 ppm zout/liter. Deze conversie hangt af van het soort ionen dat in het water aanwezig is.

3.2. Programma van eisen

Met de probleemanalyse, de analyse van de grenssystemen en de eisen van de opdrachtgever is een programma van eisen voor het sensorgedeelte opgesteld. Dit programma van eisen bestaat uit functionele eisen



Figuur 3.1: Een overzicht van de grondwaterstand als er uit een waterput gepompt wordt. Door het pompen van water ontstaat een despressiekegel (cone of depression).

en niet-functionele eisen. Functionele eisen zijn eisen die kwalitatief van aard zijn, ze bepalen de functionaliteit van het systeem. Ze beschrijven in normatieve woorden de functies van het systeem. Niet-functionele eisen zijn kwantitatief van aard, ze stellen meetbare eisen aan de functionaliteit van het systeem.

3.2.1. Functionele eisen

Zoals gezegd in hoofdstuk 2 moet het totaalsysteem twee dingen doen; meten en data opsturen. Het meetgedeelte kan daarna in 3 functies worden opgesplitst. Dit zijn de drie basisfuncties van een meetsysteem zoals ze ook worden omschreven in Regtien [8].

1. Het sensorsysteem moet de waterstand t.o.v. het maaiveld, de conductiviteit en de temperatuur van het grondwater in waterputten meten.
2. Het sensorsysteem moet de verkregen signalen zo conditioneren dat ze met zo min mogelijk fouten kunnen worden uitgelezen door de microcontroller.
3. De analoge signalen moeten worden omgezet naar het digitale domein.

Een systeem moet eerste een fysieke waarde omzetten naar het analoge domein, daarna deze waarde conditioneren zodat deze in de derde stap met zo min mogelijk fouten digitaal gemaakt kan worden en verder kan worden verwerkt.

3.2.2. Niet-functionele eisen

Zoals gezegd zijn er dus ook niet-functionele eisen. Deze eisen zijn SMART opgesteld (Specifiek, Meetbaar, Acceptabel, Realistisch en Tijdgebonden) opgesteld, zodat achteraf goed te verifiëren is of ze gehaald zijn. Tijdgebonden is voor alle eisen 10 weken, de looptijd van het BAP.

Bruikbaarheid Allereerst de bruikbaarheid, waar moet het systeem aan voldoen zodat het niet alleen goed geïntegreerd kan worden met andere deelsystemen maar ook voor de eindgebruiker makkelijk en realistisch bruikbaar is?

4. De afgeleverde signalen moeten tussen 0 en 3.3V zijn

5. De maximale frequentie van het afgeleverde signaal mag 100 kHz zijn.
6. Het systeem moet afhankelijk van een signaal van de microcontroller in een energiezuinige stand gezet kunnen worden.
7. Het gehele sensorsysteem mag maximaal €12,50 aan componenten bevatten

Uit de interfaces die in hoofdstuk twee zijn besproken volgen eis nummer 4 en 5. Eisen nummer 6 en 7 komen voort uit de randvoorwaarden gesteld door doelgebied en eindgebruiker in hoofdstuk 2. Eis 6 komt voort uit de randvoorwaarde 3, namelijk dat het systeem twee jaar autonoom gebruikt moet kunnen worden en daardoor zo zuinig mogelijk met zijn energie om moet gaan. Eis nummer 7 komt voort uit randvoorwaarde 4, het hele systeem mag €50,-kosten, voor ieder deelsysteem is 1/4e van het budget beschikbaar.

Prestaties Na de bruikbaarheid moeten er eisen worden gesteld aan de prestaties van het systeem. Deze hebben vooral betrekking op het bereik, nauwkeurigheid en resolutie van de te meten grootheden [8]. Met de nauwkeurigheid wordt hier de maximale afwijking ten opzichte van de juiste waarde bedoeld. Deze zijn opgesteld in overleg met de opdrachtgever en op basis van beschikbare data over het milieu [1, 3]

8. De conductiviteit moet over een bereik van 1 tot 15000 uS/cm gemeten worden. Het meetbereik mag in drie delen worden opgedeeld.
 - (a) Deel I: bereik 1-100 uS/cm, resolutie 0.1 uS/cm, maximale afwijking 0.5 uS/cm
 - (b) Deel II: bereik 100-1500 uS/cm, resolutie 1uS/cm, maximale afwijking 5 uS/cm
 - (c) Deel III: bereik 1500-15000 uS/cm, resolutie 10uS/cm, maximale afwijking 50 uS/cm
9. De temperatuur van het water in de put moet over een bereik van 5-20 °C worden bepaald met een maximale afwijking van ± 1 °C en resolutie van 0.5 °C.
10. De waterstand van de waterput moet over een bereik van 0-60 m worden bepaald met een nauwkeurigheid van ± 5 cm en resolutie van 1 cm.
11. Het systeem mag in actieve modus maximaal 100 mA gebruiken.
12. Het systeem mag in energiezuinige modus maximaal 1 mA gebruiken.

Allereerst de specificaties aan de conductiviteit die gemeten moet worden. Het totale bereik loopt van 1 uS/cm tot 15.000 uS/cm, meer dan 3 decaden dus. Dit bereik is gekozen aangezien 1 tot 1.500 uS/cm het bereik is waar het grondwater binnen valt waarmee (zei het in beperkte mate) gewassen geïrrigeerd kunnen worden. De 1.500-15.000 uS/cm schaal is relevant omdat de opdrachtgever het apparaat ook wil kunnen gebruiken bij installaties die brak water omzetten naar zoet water. Dit totale bereik is opgedeeld in 3 bereiken, omdat het definiëren van de resolutie en nauwkeurigheid anders erg lastig is. Een nauwkeurigheid van 1% betekent in het laagste gedeelte meten op 0.01 uS/cm nauwkeurig, maar in het hoogste gedeelte een afwijking van 150 uS/cm, een vrij grote fout dus. Een vast getal levert dezelfde soort problemen. Daarom is het bereik ongeveer opgesplitst in 3 decaden (met de tweede tot 1500 uS/cm, de grens voor irrigatiewater). De resolutie is op ongeveer 1/1000e van de decade gekozen en de maximale afwijking op 5 maal de resolutie. Precies vaststellen welke marge oké is een lastige klus, maar in overleg met de opdrachtgever is voor ongeveer 5% marge gekozen.

Voor de temperatuur gaat hetzelfde verhaal op. Het bereik is gebaseerd op welke temperaturen het grondwater aan kan nemen, de resolutie en nauwkeurigheid zijn zo gekozen omdat het een gangbare specificatie is voor digitale temperatuursensoren en zo kosten drukt. Daarnaast is de invloed van de temperatuur op de geleiding ongeveer 2%/°C voor vers water [5]. De waterstand moet bepaald kunnen worden over een bereik van 0-60m met een resolutie van 1cm en een nauwkeurigheid van +/-5cm. Deze waarden komen voort uit de eisen van de opdracht gever. 60 meter is de maximale diepte van een waterput en de resolutie en nauwkeurigheid zouden volgens hen voldoende moeten zijn. Er is verder weinig data beschikbaar over de variaties van het grondwater in de doelgebieden (vandaar natuurlijk dat dit product zo'n grote impact kan hebben), dus voor deze specificaties moeten we op hen vertrouwen. De verbruiksstromen zijn arbitrair vastgesteld op 100mA en 100µA, omdat bij het vaststellen van de eisen nog een duidelijk beeld was van de energieopslag en

de beschikbare energie. 100mA en 1μA zijn voor een systeem dat 10 seconden aan staat en daarna weer een dag slaapt redelijk zuinig. Dit komt bij een spanning van 5V neer op 0.012 Wh aan energie per dag:

$$E = \frac{5V \cdot 1A \cdot 10^{-4} \cdot (3600s \cdot 24h - 10s)}{3.6 \cdot 10^3} = 0.12 \cdot 10^{-1} Wh \quad (3.1)$$

4 AA batterijen van 2500 mAh (een gangbare energiecapaciteit) kunnen de batterijen dan

$$t = \frac{5V \cdot 2500mAh}{0.12 \cdot 10^{-1} Wh} = 1042 \text{dagen} \quad (3.2)$$

de sensoren voor 1042 dagen van energie voorzien. Natuurlijk zijn de gestelde stromen de bovengrenzen en is tijdens het ontwerp met het team van de energieopslag verder overlegd over de stromen, maar het geeft een goede eerste indicatie.

Dimensies Er is één simpele eis aan de dimensies van het systeem, het moet in een buis van 6cm passen. Dit is de minimale afmeting van een waterput, aldus vastgesteld door de opdrachtgever.

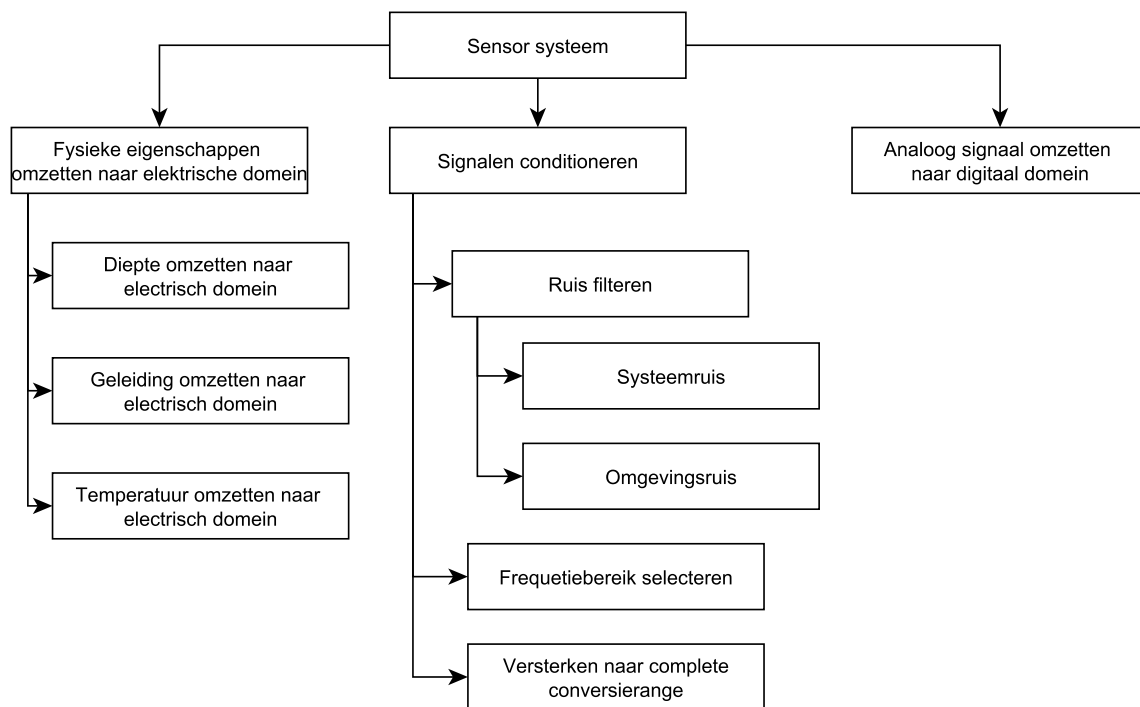
13. Het gehele systeem moet in een buis passen met een diameter van 6 cm

Veiligheid Tenslotte zijn er enkele eisen gesteld aan de veiligheid. Deze waarborgen dat de sonde bij normaal gebruik bestand is tegen hoge temperaturen, water en mechanische impact.

14. Het product moet voldoen aan de Europese wetgeving voor product veiligheid, De General Product Safety Directive 2001/95/EC
15. Het product bovengronds moet bestand zijn tegen een maximale temperatuur van 70 graden.
16. Het product ondergronds moet bestand zijn tegen een maximale temperatuur van 30 graden als deze operationeel is.
17. Tijdens transport en opslag moet het ondergrondse gedeelte tot 70 graden bestand zijn.
18. Indien een deel van de sonde zich ondergronds en onderwater bevindt moet voor dat deel voldaan worden aan de IP-68. dit betekent stofdicht en waterdicht tot 20m waterkolom boven de sonde.
19. Indien een deel van de sonde zich bovengronds bevindt moet voor dat deel voldaan worden aan de IP-64 codering. Dit betekent stoficht en spatwaterdicht.
20. Het product bovengronds moet bestand zijn tegen normale mechanische impact, minimaal IK-07. Dit komt overeen met 1 Joule.
21. Het product ondergronds moet bestand zijn tegen redelijke mechanische impact, minimaal IK-05. Dit komt overeen met 2 Joule.
22. Het systeem mag het grondwater niet verontreinigen zoals is vastgesteld in de Europese regelgeving hiervoor.

3.3. Functieanalyse

Nadat de eisen zijn vastgesteld is verder gekeken naar de functies van het systeem. Voor iedere deelfunctie van het systeem moeten concepten worden opgesteld, waarna er één concept gekozen kan worden en verder ontworpen kan worden. In figuur 3.2 zijn de functies van het sensorsysteem grafisch weergegeven. Bovenaan staan de drie funtionele eisen als drie hoofdfuncties. Daarna zijn de deelfuncties per functie opgeschreven. Ook deze zijn weer MECE (Mutually Exclusive, Collectively Exhaustive) opgesteld, een tak moet samen de bovenliggende functie vormen en takken mogen niet overlappen. Als eerste zullen de te meten eigenschappen omgezet moeten worden naar het elektrische domein. Dit zijn de drie te meten grootheden zoals die ook eerder zijn besproken. Vervolgens zullen deze signalen zo geconditioneerd moeten worden dat ze zo goed mogelijk van de eigenschappen van de ADC gebruik kunnen maken en zo min mogelijk ruis bevatten. Zo zal de ruis gefilterd moeten worden en de versterker zo ontworpen dat deze zo min mogelijk ruis in het systeem introduceert. De signalen zullen op frequentie gefilterd moeten worden en zodanig versterkt dat ze optimaal gebruik maken van het spanningsbereik van de ADC. Tenslotte moet het signaal naar de ADC worden gevoed alvorens het zijn weg verder kan vervolgen in het digitale domein.



Figuur 3.2: Functieanalyse van het sensorsysteem. De drie hoofdfuncties, meten, conditioneren en digitaliseren zijn uitgesplitst in onderliggende deelfuncties.

3.4. Concepten per onderdeel

Per onderdeel bestaan meerdere meetmethodes. In deze paragraaf zullen per onderdeel een aantal concepten besproken worden die gebruikt kunnen worden voor het uitvoeren van de functionaliteit van dit onderdeel

3.4.1. Diepte

Druk De statische druk in een vloeistof is lineair afhankelijk van de diepte waar het meetpunt zich bevindt. Als de sensor op een van tevoren afgesproken diepte onder het grondoppervlak geplaatst wordt, kan de druk die het water op de sensor uitoefent gebruikt worden om de waterstand in de put te bepalen. In formule 3.3 is te zien hoe de druk zich tot de diepte verhoudt. hierin is p de druk, ρ de dichtheid van het water, h de hoogte van de waterkolom boven de sensor en p_{atm} de luchtdruk.

$$p = \rho \cdot g \cdot h + p_{atm} \quad (3.3)$$

Als de diepte waarop het meetpunt zich bevindt vooraf bekend is, kan uit de gemeten druk dus de hoogte van de waterkolom boven het meetpunt worden berekend en daarmee ook de waterstand ten opzichte van het maaiveld. Uit deze formule is op te maken dat voor het nauwkeurig bepalen van de waterkolom er twee druksensoren nodig zijn, één om de waterdruk te meten en één om de luchtdruk te meten aan het oppervlak. In de praktijk wordt bij de gangbare methode gebruik gemaakt van piëzoelektrische druksensoren. Er is een breed aanbod van nauwkeurige digitale druksensoren die tegen een hoge druk bestand zijn met digitale interface en hoge nauwkeurigheid.[9, 10].

TDR TDR staat voor Time Domain Reflectometry. Hierbij wordt gebruik gemaakt van het verschil in eigenschappen van water en lucht. Er bestaan veel varianten die allemaal één ding gemeen hebben, namelijk het gebruik van de reflectie van golven. Dit kunnen elektromagnetische golven zijn of geluidsgolven. Elektromagnetisch kan uitgevoerd worden met lucht als transmissiekanaal of door een transmissielijn. Er wordt dan een transmissielijn in de put geplaatst. De karakteristieke impedantie van deze transmissielijn wordt deels bepaald door de diëlectrische eigenschappen van het medium waar het zich in bevindt, in het geval van water en lucht met name het verschil in permittiviteit. Door de abrupte overgang aan het wateroppervlak ontstaat

een discontinuïteit in de transmissielijn. Als men nu een puls door de lijn stuurt zal op de plek van de discontinuïteit een deel van de puls gereflecteerd worden, terug naar de plek waar deze vandaan komt. Nu kan men aan de hand van de propagatiesnelheid, de tijd tussen het versturen van de puls en het aankomen van de reflectie de afstand tot de discontinuïteit, en daarmee het wateroppervlak bepaald worden.[11] Als gebruik gemaakt wordt van licht als transmissiekanaal, kunnen licht, geluid of elektromagnetische golven gebruikt worden. Door de snelheid van licht is een hoge samplefrequentie nodig om een goede resolutie te bereiken als gebruik wordt gemaakt van een simpele tijdmeting. bij $c = 3 \cdot 10^8 m/s$ en een resolutie van 10cm is een sample rate van 3GHz nodig als puur de tijd wordt gemeten.

Capacitief Bij het capacitief meten wordt net als bij TDR gebruik gemaakt van het verschil in diëlektrische eigenschappen tussen water en lucht. Naarmate een groter deel van de transmissielijn omvat is met water, neemt de capaciteit van de transmissielijn toe. [12]. Deze capaciteit kan gemeten worden en vervolgens kan deze met behulp van een model of met behulp van ijkwaarden worden omgezet naar een waterdiepte. Deze methode heeft als voordeel dat het uitleescircuit ook gebruikt kan worden voor het meten van de geleiding van het water. Dit wordt verder besproken in paragraaf 3.4.3.

Resistief Een resistieve methode is het gebruik maken van een dubbele draad die van boven naar beneden loopt, met op punten met een vaste afstand tot elkaar een opening in het isolatiemateriaal van de draad. Als deze punten in contact staan met water wordt dit punt kortgesloten. Doordat de stroom nu een kortere afstand af hoeft te leggen is de weerstand van de draad lager en kan aan de hand van deze weerstand de diepte van het water bepaald worden. Bij deze methode kan alleen van bovenaf gemeten worden, omdat de draden aan de onderkant altijd kortgesloten zijn. Dit in contrast met de TDR en Capacitieve methode waar het mogelijk is van beide plekken te meten. Daarnaast kan bij deze methode de draad niet ook als transmissielijn voor de sensordata gebruikt worden, omdat deze is kortgesloten.

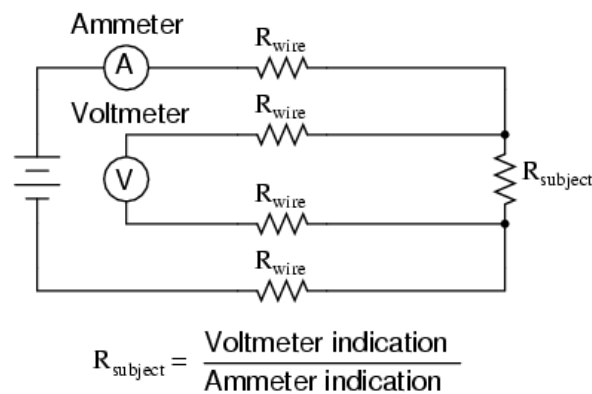
Glasvezel Bij een methode met behulp van glasvezel kan gebruik gemaakt worden van het feit dat de brekingsindex van licht in water sterk verschilt met die van lucht. Bij deze methode plaatst met een glasvezel in een medium. Door het verschil in brekingsindex tussen de glasvezel en het medium waarin de glasvezel zich bevindt ontstaat er een kritische hoek waaronder al het licht zich binnen de vezel blijft reflecteren. Omdat de brekingsindex van water zich dichterbij die van glasvezel dan die van lucht zal de hoek in het geval van een glas-water barrière een stuk kleiner zijn dan in het geval van een glas-lucht barrière. Dit betekent dat er in een vezel die in contact staat met water er meer licht uit de vezel zal lekken. Nu kan aan de hand van de ontvangen lichtintensiteit bepaald worden hoe lang het deel is van de vezel dat zich in water bevindt.

3.4.2. Temperatuur

In moderne elektronica wordt zeer veel gebruik gemaakt van temperatuurmetingen. Daardoor zijn er veel goedkope sensoren beschikbaar met hoge resolutie en nauwkeurigheid voor een lage prijs. Het is dus niet logisch om zelf een temperatuursensor te ontwikkelen, als gebruik gemaakt kan worden van deze kant en klare packages. Daarom wordt in deze paragraaf alleen de afweging gemaakt tussen een analoge en een digitale variant van een kant en klare temperatuursensor.[13]

Digitaal Met een digitale temperatuursensor wordt een package bedoeld met digitale interface, over het algemeen een serieel communicatie protocol zoals i²c of 1Wire, zoals de DS18B20.[14] De digitale sensor leest zijn eigen waarde uit, maakt deze digitaal en verstuurt deze vervolgens over het eerder genoemde protocol. Veelgebruikte transducers in een digitale sensor zijn bandgap-sensoren.

Analoog Met een analoge sensor wordt bedoeld een sensor met een spanning of stroom als uitgang. Deze kan vervolgens worden uitgelezen met de ADC van de microcontroller. Deze aanpak is minder modulair, maar er is meer controle over de metingen van de sensor, omdat de gebruikte ADC zelf gekozen kan worden. Voorbeelden hiervan zijn een Thermistor of een sensor op basis van halfgeleider materiaal zoals de TMP36[15]



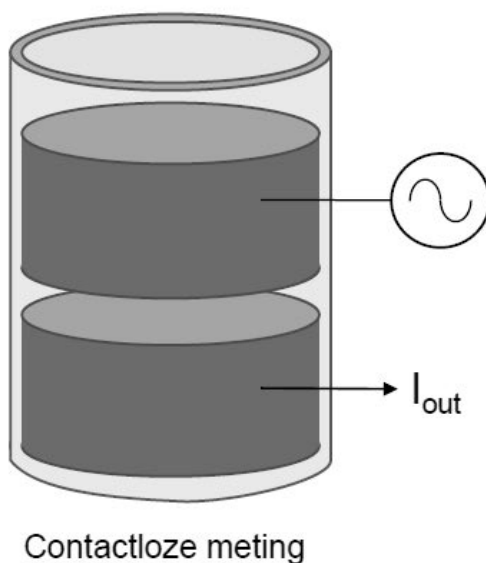
Figuur 3.3: Schematische weergave van een vierpuntsmeting. De buitenste twee elektroden leveren de spanning, de binnenste twee meten de spanning.

3.4.3. Geleiding

De geleiding is de verhouding tussen stroom en spanning, de inverse van weerstand. Deze verhouding is in principe waar elke meetmethode gebruik van maakt. Er wordt een stroom of spanning op het medium aangebracht, met als gevolg daarvan een spanning of stroom, die vervolgens gemeten wordt. Nu kunnen we in deze twee methodes onderscheid maken tussen twee hoofdgroepen, contact en contactloos. Bij contactmeten staan de elektroden in direct contact met het medium. Bij contactloos meten is dit niet het geval, en wordt er door een barriere heen gemeten.

Contact Bij contactmetingen staan de elektroden in direct contact met het medium en wordt dit medium benaderd als weerstand. Hier kan een eenvoudige spanningsdeling volstaan voor het meten van de geleiding. In de praktijk is deze opstelling niet ideaal vanwege het feit dat componenten zich anders gedragen dan theoretische ideale componenten. Zo hebben de meetdraden en bronnen in het ideale geval geen weerstand, maar in de praktijk wel. Dit zorgt voor een afwijking in de meting. Een methode om deze afwijking te beperken, is het gebruik van een vierpuntsmeting. Dit concept is te zien in figuur 3.3[8]. Als gevolg van de spanningsbron ontstaat een stroom door de te meten weerstand, oftewel het water. Door de spanningsmeter loopt geen stroom, waardoor er geen spanningsval over de draad is en de echte spanning wordt gemeten. Nu zijn de daadwerkelijke stroom en spanning door het water bekend, en kan de geleiding van het water bepaald worden. Een nadeel van deze meetmethode is het continue contact met het water, veel metalen zullen na verloop van tijd gaan reageren met het zout in het water, zeker in de aanwezigheid van een elektrisch veld. Dit kan opgelost worden door gebruik te maken van elektroden van edelmetaal.[16] Nog steeds moet dan goed worden gelet op de gebruikte spanning, omdat bij een te hoge spanning redox reacties kunnen optreden waardoor de elektrode langzaam oplost in het water.

Contactloos Bij contactloos meten wordt gebruik gemaakt van elektroden die niet in contact staan met het medium dat gemeten wordt. Er wordt vervolgens een quasi-statisch elektrisch veld opgewekt tussen de elektroden met behulp van een wisselspanning op een van de elektroden. Door dit veld wordt een stroom tot stand gebracht door het medium die gemeten kan worden aan de tweede elektrode. Een voorbeeldconfiguratie is in afbeelding 3.4 te zien. Het equivalente circuit wat door deze opstelling ontstaat is te zien in afbeelding 4.2. Aan de hand van de amplitude en fase van de gemeten stroom kan bepaald worden wat de karakteristieke impedantie van het systeem is. De geleiding van het water is verantwoordelijk voor het resistieve deel van deze impedantie. Dit deel wordt ook wel het verlies genoemd. Het reactieve deel komt door de capaciteiten die ontstaan door twee geleider en verschillende isolatoren daartussen (behuizing, lucht, water). Doordat de impedantie voor een deel complex is door de capaciteiten ontstaat er een faseverschil tussen de wisselspanning die wordt aangebracht en de gemeten uitgangsstroom (eventueel omgezet in een spanning met een stroom naar spanningsversterker). Nu kan aan de hand van deze fase en de amplitude, in combinatie met bekende systeemconstanten zoals de afmetingen en permittiviteit van de gebruikte materialen bepaald worden wat de geleiding is van het water en zoals eerder gezegd in paragraaf 3.1, bepaald worden wat de soortelijke geleiding van het water is. [17–19]



Figuur 3.4: Voorbeeld van een opstelling met contactloze meting. De donkere schijven zijn de elektroden aan de binnenkant van de lichter gekleurde behuizing. Op de bovenste elektrode wordt een signaal aangebracht, op de onderste wordt de stroom gemeten.

3.5. Criteria voor selectie totaalconcept

Er zijn per onderdeel van het totaalconcept meerdere mogelijkheden voor de implementatie. Nu zal er per onderdeel een concept gekozen moeten worden dat in het ontwerp geïmplementeerd gaat worden. Om deze keuze goed te kunnen maken zullen er een aantal selectiecriteria opgesteld moeten worden. Deze selectiecriteria vloeien voort uit het programma van eisen. In totaal zijn er zes gebieden waarop de concepten beoordeeld zullen worden. Iedere categorie weegt even zwaar.

1. **Kosten:** Met het beperkte budget van €12,50 voor het systeem zal hier rekening mee moeten worden gehouden.
2. **Betrouwbaarheid:** Omdat het systeem voor 2 jaar autonoom zal moeten kunnen functioneren, scoort een concept hoger als de kans groter is dat het minstens 2 jaar mee gaat. Factoren zoals bouw kwaliteit en aantal onderdelen wegen hierin mee.
3. **Bruikbaarheid:** Is een concept al klaar om toegepast te worden in een eindproduct of nog in de experimentele fase en werkt het alleen in laboratoria met dure ondersteunende apparatuur?
4. **Nauwkeurigheid:** Een concept is beter als de methode meer nauwkeurige resultaten zal geven.
5. **Gebruiksgemak:** Het product moet plug & play zijn. Concepten die dus minder calibratie of handelingen nodig hebben zullen hoger scoren.
6. **Energieverbruik:** Een concept wat minder energieverbruikt scoort hoger.

In de volgende paragraaf zal elke concept beoordeeld worden op deze zes criteria. Per criterium zal er een score toegekend worden tussen de – en ++, waar – staat voor "zeer slecht" en ++ staat voor "zeer goed". Deze score is gebaseerd op een vergelijking met een concept waarvan verwacht wordt dat deze gemiddeld zal presteren (deze zal dus vastgezet worden op een score van 0). Vervolgens zal aan de hand van de behaalde score per onderdeel een concept gekozen worden. Deze concepten worden uitgewerkt in hoofdstuk 4. Daar wordt ook de hele functietak "signaal conditioneren" verder uitgewerkt, omdat deze sterk afhankelijk is van het gekozen concept.

3.6. Evaluatie en selectie van het totaalconcept

3.6.1. Temperatuur

Bij temperatuur is digitaal als gemiddelde methode gekozen. Het verschil in kosten tussen analoge en digitale temperatuursensoren is verwaarloosbaar, ze zijn beide zeer goed beschikbaar bij de grote leveranciers. Een analoge sensor zal gebruik moeten maken van de ADC van de microcontroller. Om deze optimaal te kunnen benutten zal het signaal van de analoge sensor in veel gevallen geconditioneerd moeten worden om optimaal van de ADC gebruik te maken. Dit voegt extra kosten toe aan het ontwerp. Op het gebied van kosten krijgt de analoge sensor om deze reden een punt aftrek. Een ander voordeel van digitale sensoren over analoge sensoren is het feit dat deze direct kunnen communiceren met de microcontroller zonder gebruik van de ADC van de microcontroller. Dit zorgt voor meer flexibiliteit in het kiezen van sensor, en kan deze makkelijk omgewisseld worden met een andere sensor op hetzelfde protocol, zonder dat een eventueel conditioneringscircuit aangepast hoeft te worden. Door de afwezigheid van het conditioneringscircuit, zijn er ook minder componenten in het totaalsysteem, wat de assemblage eenvoudiger maakt, en het systeem robuuster en minder storingsgevoelig. Al deze punten in beschouwing genomen, krijgt de analoge sensor een minpunt op het gebied van bruikbaarheid. Omdat bij iedere gekozen methode de situatie voor de eindgebruiker niet verandert, maakt op dit vlak geen verschil. Hierdoor scoren beiden sensoren gelijk op het gebied van gebruiksgemak. Nauwkeurigheid en energiegebruik zijn geen intrinsiek verschillende eigenschappen van de twee soorten sensoren. Nauwkeurigheid en energieverbruik zijn afhankelijk van de implementatie die gedaan is door de fabrikant van de sensor. Bij het kiezen van een specifieke sensor zal hier rekening mee moeten worden gehouden, daarom scoren de digitale en analoge sensor hetzelfde op deze criteria. De scores van de concepten zijn te zien in tabel 3.1 Deze tabel laat duidelijk zien dat de digitale sensor de voorkeur geniet.

Tabel 3.1: De vergelijkingstabel voor de concepten van de temperatuurmeting

Criterion	Digitaal	Analoog
Kosten	0	-
Betrouwbaarheid	0	-
Bruikbaarheid	0	-
Nauwkeurigheid	0	0
Gebruiksgemak	0	0
Energieverbruik	0	0
Totaal	0	-3

3.6.2. Geleiding

Bij geleiding is de contactmethode als gemiddelde gekozen. Bij het implementeren van deze methode zal rekening moeten worden gehouden dat de elektroden die hierbij gebruikt worden minimaal 2 jaar in contact zullen staan met water dat zout bevat. Om te voorkomen dat het water de elektroden aantast zal gebruik moeten worden gemaakt van elektroden van edelmetaal. Bij de contactloze methode zijn de elektroden beschermd door de behuizing van het systeem. Hierdoor kunnen de elektroden gemaakt worden van goedkoper materiaal. Het uitleescircuit van de contactloze methode is wel ingewikkelder, en daarmee duurder dan die van de contactmethode. Dit weegt echter niet op tegen de extra kosten voor de edelmetaal elektroden. vanwege dit feit krijgt de contactloze methode een plus bij het kostencriterium. Het systeem zal zich tijdens zijn complete levensduur in een vijandig milieu bevinden. Het zal hoge drukken moeten verdragen, continu in contact staan met water met een onbekend zoutgehalte, en tegen de wand van de put aan schuren. Er kan aanslag op de elektroden van de contactmeting komen, ze kunnen beschadigd raken, of ze kunnen door chemische processen veranderen van eigenschappen. Doordat bij de contactloze methode het complete systeem beschermd is door de behuizing hoeft met deze eigenschappen van de omgeving geen rekening gehouden worden en zullen de eigenschappen van de elektroden ook niet veranderen tijdens de beoogde levensduur. Hierdoor verdient het contactloze systeem twee pluspunten op het gebied van betrouwbaarheid.

Beide methodes zijn bewezen methodes die uitvoerig zijn beschreven in de literatuur en in de praktijk in verschillende situaties worden toegepast. Op het gebied van bruikbaarheid scoren de twee methodes dus gelijk. De nauwkeurigheid van de methodes is afhankelijk van de implementatie van de methodes. In principe is de contactmethode eenvoudiger te implementeren. Bij het gebruik van dezelfde middelen heeft deze methode dus een voordeel. Er is direct contact met het te meten medium, de meting wordt dus niet beïnvloed

door de behuizing van het systeem. Vanwege deze feiten krijgt de contactloze methode een minpunt op het gebied van nauwkeurigheid. Voor de eindgebruiker is de contactloze methode voordeliger, er hoeft niet voorzichtig omgegaan te worden met het systeem vanwege kwetsbare elektroden aan de buitenkant van het systeem. Daarnaast hoeven deze elektroden ook niet schoongemaakt of vervangen te worden, omdat ze beschermd zijn door de behuizing. Gezien deze feiten krijgt het contactloze systeem een pluspunt op het gebied van gebruiksgemak. Omdat het contactloze systeem ingewikkelder is en gebruik maakt van meer componenten, verbruikt het ook meer energie. Daarom krijgt het contactloze systeem een minpunt op het gebied van energieverbruik. De scores van de concepten zijn te zien in tabel 3.2 Als de punten bij elkaar worden opgeteld wordt het duidelijk dat de contactloze methode het beste gekozen kan worden voor het ontwerp.

Tabel 3.2: De vergelijkingstabel voor de concepten van de conductiviteitsmeting

Criterion	Contact	Contactloos
Kosten	0	+
Betrouwbaarheid	0	++
Bruikbaarheid	0	0
Nauwkeurigheid	0	-
Gebruiksgemak	0	+
Energieverbruik	0	-
Totaal	0	+2

3.6.3. Diepte

Voor de diepte is druk als gemiddelde methode gekozen. In deze paragraaf zal deze methode vergeleken worden met TDR en een capacitieve meting. De twee overige metingen vallen bij voorbaat af, glasvezel omdat deze methode in de literatuur alleen experimenteel beschreven wordt en deze methode daardoor buiten het kader en de tijdsdruk van dit project valt. Resistief valt af vanwege de storingsgevoeligheid en duurzaamheid, een kabel met blootliggend koper zal niet een periode van twee jaar in de waterput blijven functioneren. Daarnaast zijn de kosten van twee extra draden van 60 meter of een glasvezel lijn niet realistisch te verantwoorden gezien het budget. Druksensoren worden veel gebruikt in consumentenproducten en in de industrie. Er zijn net als bij temperatuursensoren veel kant en klare sensoren beschikbaar die met een digitale bus communiceren en beschikbaar zijn in een grote range aan werkdrukken.

Omdat TDR een vrij breed begrip is, zal eerst een specifieke methode gekozen worden om te vergelijken. Als bij TDR gebruik wordt gemaakt van ultrasone geluidsgolven is het werkgebied beperkt, dit is ongeveer 8 meter bij de sensoren die nu op de markt zijn. Volgens het programma van eisen moeten er waterstanden tot 60 meter onder het oppervlak kunnen worden gemeten. Daarom valt deze methode direct af. Bij het gebruik van lucht als propagatiekanaal is er veel verlies en daarom is een relatief hoog vermogen nodig. Gezien dit feit en het feit dat het systeem 2 jaar autonoom moet functioneren, geniet een energiezuinige methode de voorkeur. Daarom zal TDR met de verbinding tussen de module boven en onder als transmissielijn worden besproken. Zoals in de conceptanalyse is besproken, is voor het behalen van de gewenste resolutie een zeer hoge samplerate nodig. Dit betekent dat er zeer kostbare elektronica gebruikt zal moeten worden. Daarom krijgt TDR op het criterium kosten twee minpunten. TDR maakt gebruik van afwijkingen van de eigenschappen van het transmissiekanaal om te meten. Een beschadiging in de kabel of een vreemd voorwerp in de put kunnen de meting beïnvloeden. Daarom krijgt TDR op het gebied van betrouwbaarheid een minpunt. TDR is een bewezen techniek die in de praktijk veel wordt toegepast om fouten in transmissielijnen op te sporen. Voor het gebruik in de context van het eindsysteem is het echter nog nooit bewezen. Daarom krijgt TDR op het gebied van bruikbaarheid een minpunt. De resultaten van een TDR meting zijn voornamelijk afhankelijk van de afstand tot een discontinuïteit in de transmissielijn, in dit geval het wateroppervlak. Kleine veranderingen in de eigenschappen van dit water zijn minder van invloed. Net als bij de drukmeting is de TDR meting dus maar afhankelijk van een natuurlijke grootheid. op het gebied van nauwkeurigheid scoren druk en TDR daarom gelijk. Bij TDR is het belangrijk dat de datakabel tussen boven en beneden niet beschadigd is. Dit vraagt om extra voorzichtigheid van de eindgebruiker. Voor het criterium gebruiksgemak krijgt TDR een minpunt. Het energieverbruik van de TDR meting is vooral afhankelijk van de meetelektronica die gebruikt wordt om de reflectietijd te bepalen. De druksensor werkt op een veel eenvoudiger principe wat efficiënt op een enkele chip kan worden uitgevoerd. Op het gebied van energieverbruik krijgt TDR een minpunt.

In paragraaf 3.6.2 is de keuze gemaakt voor het gebruik van een contactloze meting. Ditzelfde circuit kan worden gebruikt om de capaciteit van de datakabel te bepalen met minimale aanpassingen. Omdat dit het totaalsysteem eenvoudiger maakt en er bijna geen extra kosten zijn voor het toepassen van deze meting, krijgt de capacitieve methode twee pluspunten op het gebied van kosten. De capacitieve meting is net als de TDR meting afhankelijk van de transmissielijn, en krijgt dus ook een minpunt op het gebied van betrouwbaarheid en gebruiksgemak. In de literatuur is veel te vinden over het gebruik van capacitieve sensoren om het gebied van waterdiepte metingen, en wordt ook vaak toegepast in de praktijk, net als druksensoren. Deze methoden scoren daarom op het gebied van bruikbaarheid hetzelfde. De capacitieve meting wordt door veel factoren beïnvloed, voor temperatuur en geleiding van het water kan met behulp van de andere sensoren gecompenseerd worden, maar eventuele invloed door de vorm en het materiaal van de waterput kan niet makkelijk gecompenseerd worden. Daarom krijgt capacitef twee minpunten bij nauwkeurigheid. De besproken druksensoren zijn buitengewoon energiezuinig. Vanwege alle ondersteunende elektronica voor het uitvoeren van een capacitieve meting krijgt capacitef een minpunt voor het criterium energieverbruik.

Alle punten die gegeven zijn voor de verschillende methodes zijn te zien in tabel 3.3 Het wordt al snel duidelijk dat het bepalen van diepte met behulp van druk de voorkeur geniet. Na verder onderzoek is echter gebleken dat druksensoren die voldoen aan de gestelde nauwkeurigheidseisen niet voldoen aan de vereisten op het gebied van kosten. Daarom is besloten om bij de implementatie in hoofdstuk 4 ook de capacitieve methode te ontwikkelen.

Tabel 3.3: De vergelijkingstabel voor de concepten van de diepte-meting

Categorie	Druk	TDR	Capacitef
Kosten	0	–	++
Betrouwbaarheid	0	-	-
Bruikbaarheid	0	-	0
Nauwkeurigheid	0	0	–
Gebruiksgemak	0	-	-
Energieverbruik	0	-	-
Totaal	0	-6	-3

4

Detailontwerp

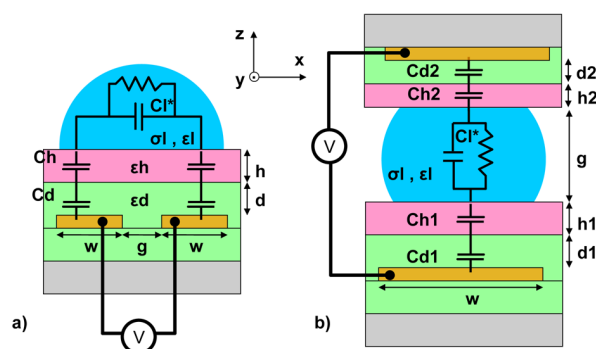
Nu er per onderdeel een concept is gekozen, zal het complete conceptontwerp moeten worden uitgewerkt tot een gedetailleerdontwerp. In dit hoofdstuk zal voor ieder gekozen concept een ontwerp worden gemaakt en beargumenteerd. Bij het maken van ontwerp keuzes zal naast de vereisten van het eindproduct ook rekening gehouden worden met het feit dat er een prototype gebouwd gaat worden. Voor het kiezen van componenten zal dus de voorkeur gegeven worden aan packages en onderdelen die makkelijk bruikbaar zijn in een breadboard.

4.1. Geleiding

In hoofdstuk 3 is de keuze gemaakt voor een contactloze meting. In deze paragraaf zal er verder op in worden gegaan hoe de elektroden worden geconfigureerd, hoe de elektroden worden aangestuurd en hoe deze worden uitgelezen. Uiteindelijk zal er een circuit worden gepresenteerd voor de gehele sensor inclusief randcomponenten.

4.1.1. Equivalent circuit

Voor het contactloos meten aan een vloeistof zijn er twee gebruikelijke topologiën. Men kan twee parallelle tegenover elkaar staande elektroden gebruiken of twee elektroden in hetzelfde vlak, zie ook figuur 4.1. Voor beide topologiën is te zien dat het equivalente circuit gelijk is. Er wordt een wisselspanning op één van de elektroden aangebracht en die gaat via één of twee koppelcapaciteiten naar de vloeistof en met gelijke capaciteiten daarna terug naar de andere elektroden. Het aantal koppelcapaciteiten hangt af van of er aan de buitenkant van de behuizing nog een waterafstotende laag aanwezig is. In dit ontwerp is van een situatie met één koppelcapaciteit per elektrode uitgegaan, aangezien een plastic (Polyethyleen of Polypropyleen) behuizing voor de hand ligt en daar geen waterafstotende laag nodig is, wat de berekeningen vergemakkelijkt.



Figuur 4.1: Een overzicht van de twee mogelijke topologiën voor een contactloze meting en de bijbehorende equivalente circuits exclusief parasitaire capaciteiten. Bron:[4]

De vloeistof wordt hier gemodelleerd als een weerstand en een capaciteit parallel aan elkaar. In werkelijk staat in serie met de weerstand ook een inductief element (spoel), maar in de literatuur wordt deze vaak

weggelaten bij vergelijkbare capacitieve contactloze sensoren [4, 12, 20, 21]. Wanneer men de equivalente impedantie van dit circuit gaat bekijken dan blijkt dat het enige element dat voor het reële deel van de impedantie zorgt de weerstand van de vloeistof is wanneer de permittiviteit voor constant wordt aangenomen. De equivalente impedantie van het circuit is te vinden in vergelijking 4.1. Wanneer men dus de absolute waarde van de impedantie weet en de fasedraaiing tussen het signaal op de ingaande en de uitgaande elektrode kan men ook de weerstand van het water bepalen.

$$Z_{eq} = 2 \cdot Z_{cd} + Z_{rl} // Z_{cl} \quad (4.1)$$

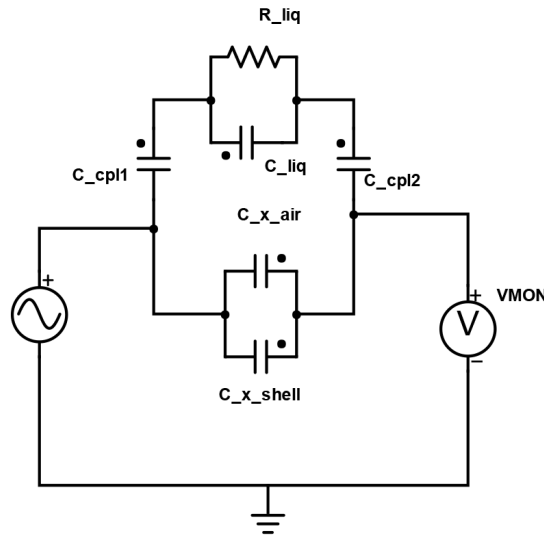
$$= -2 \cdot j\omega C_d + \frac{-R_l j\omega C_l}{R_l - j\omega C_l} \quad (4.2)$$

$$= -2 \cdot j\omega C_d + \frac{-R_l j\omega C_l (R_l + j\omega C_l)}{R_l^2 + \omega^2 C_l^2} \quad (4.3)$$

$$= \frac{R_l \omega^2 C_l^2}{R_l^2 + \omega^2 C_l^2} - j \left(2\omega C_d + \frac{R_l^2 \omega C_l}{R_l^2 + \omega^2 C_l^2} \right) \quad (4.4)$$

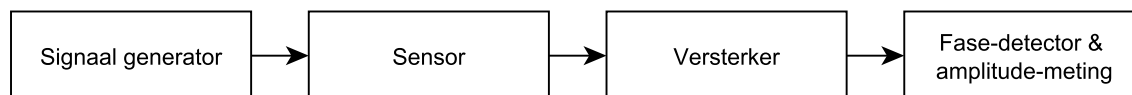
Ofwel, als we aannemen dat C_l constant blijft kan vanuit de fasedraaiing de hoek van Z_{eq} worden bepaald waarna simpel ook het reële deel van Z_{eq} kan worden bepaald. In werkelijkheid zal de C_l ook variëren door de temperatuur en de zoutconcentratie, maar in veel mindere mate dan de weerstand. Daarnaast is er ook nog een verliescapaciteit C_x direct tussen de twee elektroden door de behuizing wanneer optie a) wordt gekozen in figuur 4.1. Deze is parallel geschakeld aan de zojuist berekende Z_{eq} . Hierdoor ontstaat het uiteindelijke circuit dat is weergegeven in figuur 4.2

$$\text{Re}(Z_{eq}) = \cos(\phi) |Z| \quad (4.5)$$



Figuur 4.2: Het totale equivalente circuit voor de sensor bestaande uit de verliescapaciteit C_x met daaraan parallel de uitgeschreven Z_{eq} . De verliescapaciteit is uitgesplitst in twee capaciteiten, hier wordt in paragraaf 4.1.3 meer aandacht aan besteed.

Het gehele meetsysteem voor de geleiding van het water is samengevat in figuur 4.3. Er moet een signaal worden gegenereerd, dat wordt op de sensor aangesloten, de stroom die uit de andere elektrode komt moet worden versterkt en vervolgens moet uit het verschil tussen het ingangs- en uitgangssignaal een impedantie worden bepaald.



Figuur 4.3: Een blokdiagram van de vier onderdelen van het meetsysteem voor de geleiding.

Daarna is voor ieder blok gekeken welke concepten er het beste aan de vooraf gestelde eisen voldoen met daarna criteria als eenvoud en gangbaarheid als doorslaggevende factor. Allereerst zal gekeken worden naar de signaalgenerator.

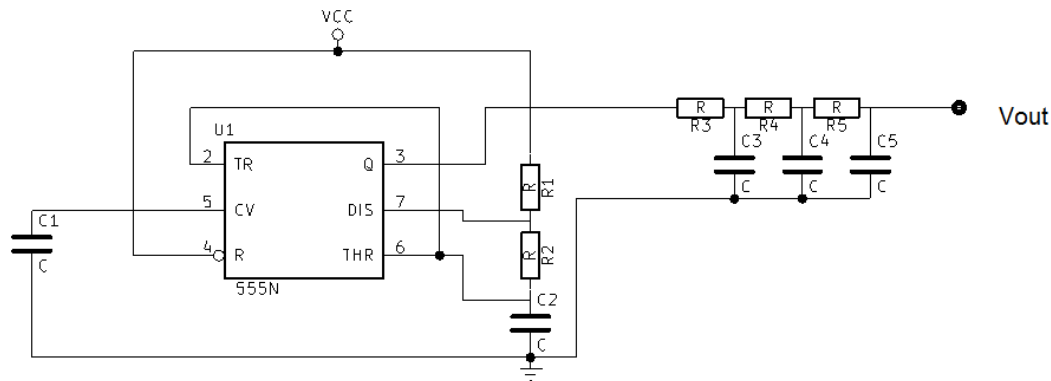
4.1.2. Signaalgenerator

Voor het bepalen van de impedantie van het circuit zal gebruik gemaakt worden van een frequentieresponsie, omdat de behuizing van het systeem gedraagt als capaciteit, en een capaciteit ondoordringbaar is voor een gelijkspanning. Er zal dus een wisselspanningssignaal gegenereerd moeten worden om deze responsie te kunnen bepalen. Dit signaal wordt de testfunctie genoemd. Er zijn verschillende methodes om dit signaal te generen. Welke methode het meest wenselijk is, hangt af van een aantal factoren. Belangrijk is de beoogde frequentie en hoe goed het uiteindelijke signaal op het beoogde theoretische signaal moet lijken. Vervorming treedt vaak op in oscillatoren door het introduceren van hogere orde harmonischen, wat de frequentieresponsie niet bevordert. Voor het beoogde doel is het wenselijk om twee signalen te genereren met dezelfde frequentie en amplitude, waarvan een van de signalen $+90^\circ$ gedraaid is. Waarom dit wenselijk is wordt later in dit hoofdstuk uitgelegd.

Er is gekozen om de signaalgenerator een sinus te laten genereren. Bij het detecteren van een capaciteit kan gebruik worden gemaakt van synchrone detectors, waarbij het heel erg helpt als het oorspronkelijke signaal slechts één frequentie bevat. Allereerst kan gebruik worden gemaakt van de analoge uitgang van de microcontroller om een sinusvormig signaal te genereren. Omdat de gebruikte microcontroller (NXP LPC1768) maar één kern heeft kan tijdens het genereren van dit signaal geen andere code worden uitgevoerd. Dit is problematisch omdat tijdens het genereren van de testfunctie ook door de ADC het resultaat van deze testfunctie moet worden uitgelezen.

Een veel voorkomende methode is het gebruik van kristal-oscillatoren. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een kristal met een vaste resonantie frequentie en actieve componenten. Deze oscillatoren zijn voordelig in situaties waar een bepaalde frequentie zeer nauwkeurig moet worden weergegeven, zoals in klokken. De frequentie van kristal oscillatoren ligt meestal tussen 10^4 en 10^9 Hz. De frequentie hangt af van de manier waarop het kristal geslepen is. De frequentie van de oscillator kan niet makkelijk veranderd worden, dan zal het kristal vervangen moeten worden. Dit is met testen minder praktisch, aangezien daar misschien de frequentie nog bijgesteld moet kunnen worden[22]. Naast de kristal oscillatoren bestaan er nog twee soorten oscillatoren, namelijk sinus-oscillatoren en relaxatie-oscillatoren. Relaxatie-oscillatoren produceren een signaal dat niet sinusvormig is. Ze werken meestal door het laden en ontladen van capaciteit of een spoel. Sinus-oscillatoren maken gebruik van resonantie om hun signaal te produceren, net als kristal-oscillatoren. Voor het beoogde doel is een sinusvormig signaal het meest wenselijk. Daarom valt de keuze al snel op een sinus oscillator.

Echter kan een relaxatie-oscillator gefilterd worden zodat deze een sinusvormig signaal benadert. Een voorbeeld van een relaxatie oscillator is een LM555 timer chip in astabiele modus. Deze genereert een blok golf waarvan de frequentie en duty cycle afhankelijk zijn van twee weerstanden en een capaciteit[23]. In combinatie met een derde orde laagdoorlaatfilter kan zo een signaal dat een sinus benaderd worden gegenereerd. In afbeelding 4.4 is schematische weergave van een circuit op basis van dit concept te zien. De frequentie van dit circuit wordt bepaald door R_1 , R_2 en C_2 met de formule $T = 0.693(R_1 + 2R_2) * C_2$. C_1 is een ont koppelcapaciteit. R_3 tot R_5 en C_3 tot C_5 zijn een laagdoorlaat circuit om het circuit meer sinusvormig te maken. Als de kantelfrequentie wordt gekozen op de oscillatiefrequentie kan het signaal na de eerste trap gebruikt worden als de kwadratuur ($+90^\circ$) golf van de uitgang. Er is dan wel veel verlies in het circuit en dus zal het signaal versterkt moeten worden voordat het bruikbaar is. Daarnaast verschillen de twee signalen nu redelijk van vorm, dit is de grootste tekortkoming van deze methode.



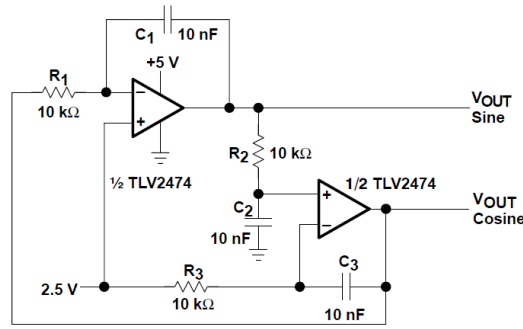
Figuur 4.4: Voorbeeld van een relaxatie-oscillator op basis van LM555. De LM555 produceert een blok golf die met een derde orde filter RC.

Er zijn veel verschillende implementaties van sinus oscillatoren. Voor deze thesis is gekozen om te concentreren op oscillatoren op basis van opamps, omdat deze eenvoudig te begrijpen en te produceren zijn. Bij het kiezen van een topologie is vooral rekening gehouden met produceren van een kwadratuur golf. Naast opamps wordt gebruik gemaakt van passieve componenten, namelijk weerstanden en capaciteiten. Spoelen zullen niet gebruikt worden omdat die duur zijn en veel energie gebruiken. Deze oscillatoren maken gebruik van fase draaiing van 180 graden en een gesloten lusversterking van -1 om oscillaties tot stand te brengen. In afbeelding 4.5 is een kwadratuur oscillator weergegeven. Deze oscillator heeft twee integrerende opamps, waarvan een inverterend. Gezien het feit dat de tweede integraal van een sinus ook een sinus is, maar 180 graden gedraaid, zal het gebruik van deze uitgang als feedback dus tot oscillatie leiden. De frequentie van de oscillator kan worden ingesteld door het aanpassen van de R en C waarden, deze kunnen worden bepaald aan de hand van formule 4.6. Deze oscillator heeft als grote voordeel dat de fase draaiing tussen de twee uitgangen precies 90 graden is en de twee signalen zeer veel op elkaar lijken[24].

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.6)$$

Er is gekozen om de kwadratuuroscillator te implementeren. voor de frequentie is 100kHz gekozen. Deze keuze zal worden uitgelegd in paragraaf 4.1.3. Voor de capaciteiten is een waarde van 15nF gekozen. Als dan met formule 4.6 de waarde voor de weerstanden wordt bepaald komen deze uit op 1MΩ als dichtstbijzijnde weerstand in de E12 serie. Voor het kiezen van de opamps zijn een aantal criteria van belang. Ze moeten asymmetrisch gevoed kunnen worden met de spanning als gedefinieerd in appendix A. Daarnaast moet de slew rate en de gain bandwidth product voldoende zijn voor de gekozen frequentie, en moet de opamp zijn volledige voedingsspanning als uitgangsbereik hebben. Hierbij is besloten dat de testfrequentie makkelijk aangepast moet kunnen worden naar een hogere frequentie. Deze frequentie is ruim gekozen op 100kHz. Boven deze frequentie is de permittiviteit van water niet meer constant. De vuistregel voor het gain bandwidth product is 10 keer de gewenste frequentie, dus 1 MHz. De slew rate is de reactie van de opamp op een stapfunctie aan de ingang, en zegt dus eigenlijk hoe snel de opamp op een verandering aan de ingang reageert. De slewrate moet voldoen aan formule 4.7. Hierin is V_P de maximale spanning en f de frequentie van oscillatie. Invullen van de vereisten geeft een slew rate van 3.1 V/μs. Met deze waarden is gezocht naar een geschikte opamp. De TLC227ACN is een viervoudige opamp, voor een gebufferde uitvoering van de oscillator is één dus voldoende. Bij de oplage zoals gespecificeerd kost deze 66 eurocent.[25] Voor het prototype is echter een andere opamp gekozen, omdat de eisen voor een ander deel van het sensorsysteem zwaarder waren, en gekozen is om voor alle delen dezelfde opamps te gebruiken. Dit is de OPA350, deze heeft een veel hogere bandbreedte van 38MHz en slew rate van 22V/μs, wat het systeem robuuster maakt. Als nadeel is deze opamp wel duurder (€1,37 voor 1 OPA350 vs €0,66 voor een TLC227ACN met vier opamps aan boord).

$$SR = 2\pi V_P f \quad (4.7)$$



Figuur 4.5: De gekozen kwadratuur-oscillator zoals beschreven in [24]. Bron:[24]

4.1.3. Sensorconfiguratie

De elektroden kunnen in twee verschillende opstellingen worden gekozen. Allereerst zijn in beide opstelling de elektroden parallel aan elkaar, om zo rekenen en bepalen van de geleiding makkelijker te maken. Zoals ook in paragraaf 4.1.1 is besproken kunnen de elektroden vervolgens tegenover elkaar worden geplaatst of in hetzelfde vlak. Het voordeel van twee platen parallel tegenover elkaar is dat het rekenen eraan simpel is en er geen verliescapaciteit C_x tussen de elektroden optreedt. De capaciteit van twee parallelle platen is uit te rekenen met formule 4.8. ϵ_r staat hier voor de relatieve permittiviteit van het diëlektricum, A voor de oppervlakte van de elektroden en d voor de afstand tussen de elektroden.

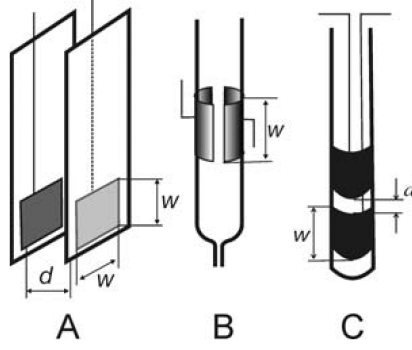
$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (4.8)$$

Vergelijking 4.8 kan gebruikt worden om zowel de koppelcapaciteiten als de capaciteit van het water te berekenen. Voor het resistieve deel van de impedantie van de vloeistof is vergelijking 4.9 van toepassing. Hierbij is A weer de oppervlakte, l de lengte van de geleider, in dit geval de afstand tussen de platen d en is σ de soortelijke geleiding, de grootte die we uiteindelijk zoeken.

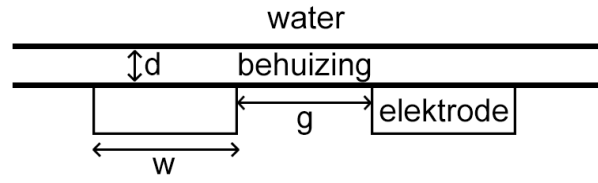
$$R = \frac{A}{l\sigma} \quad (4.9)$$

Een voorbeeld van een implementatie met parallelle platen is een opstelling met twee kleine plaatjes die gecoat zijn met een dun laagje plastic om tegen corrosie te beschermen (bijvoorbeeld kapton), zie ook figuur 4.6 configuratie A. Het nadeel van de parallelle platen is dat dit ontwerp minder robuust is. De plaatjes die in het water steken kunnen verbuigen of gekrast raken.

Bij de andere optie, de platen die wel in hetzelfde vlak liggen, wordt vaak een cilindrisch ontwerp toegepast, zie figuur 4.6 configuratie B & C. Bij beide de topologiën mag het water zich zowel binnen als buiten de buis bevinden. Door de elektroden aan de binnenkant van de behuizing te plaatsen is een robuuster ontwerp mogelijk. Het rekenen hieraan is lastiger en er moeten meer vereenvoudigingen en benaderingen worden gedaan, maar als alternatief hiervoor kan naast het simuleren van de sensor ook meer aandacht besteed worden aan het ijken van de sensor om zo op een empirische manier toch een nauwkeurige waarde voor de geleiding te krijgen.

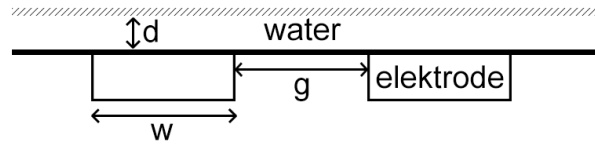


Figuur 4.6: Drie veelgebruikte configuraties voor de elektroden. A is een opstelling met parallelle platen. B & C zijn platen in hetzelfde vlak. Bron: [4]



Figuur 4.7: De gebruikte vereenvoudiging voor de topologie met twee elektroden in hetzelfde vlak. De elektroden worden hier als rechthoekige transmissielijnen tegen een substraat aan gezien.

Om toch te rekenen aan deze topologie wordt de cilindrische sensor uitgevouwen tot een platte sensor die maar over 2 assen varieëert, zie figuur 4.7. Allereerst kunnen de koppelcapaciteiten tussen de elektroden en het water op eenzelfde manier worden berekend als bij topologie A, waardoor formule 4.8 weer van toepassing is. Doordat we de koppelcapaciteiten nu weten kunnen we de sensor reduceren tot twee elektroden die in contact staan met water, zie figuur 4.8. De gevonden capaciteit en weerstand van het water staan vervolgens parallel aan elkaar en in serie met de twee koppelcapaciteiten. De capaciteit door het water is lastiger te bereken. Gelukkig hebben Kricheskii en Protopopov [26] hier een formule voor afgeleid. Om tot een capaciteit en een weerstand te komen definiëren we eerst volledige elliptische integraal van de eerste orde:



Figuur 4.8: De vereenvoudiging die mogelijk is na het berekenen van de koppelcapaciteiten voor de sensor met twee parallelle elektroden in hetzelfde vlak.

$$K(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dz}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2(z)}} \quad (4.10)$$

Waarbij k de modulus is, gedefinieerd als [12]:

$$k = \frac{\tanh\left(\frac{\pi(g+w)}{4d}\right)}{\tanh\left(\frac{\pi(w+(g+w)/2)}{2d}\right)} \quad (4.11)$$

Wanneer we aannemen dat d naar ∞ gaat, vereenvoudigd de modulus naar een simpele breuk:

$$k = \frac{(g+w)}{(g+w)+2w} = \frac{g+w}{g+3w} \quad (4.12)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2} \quad (4.13)$$

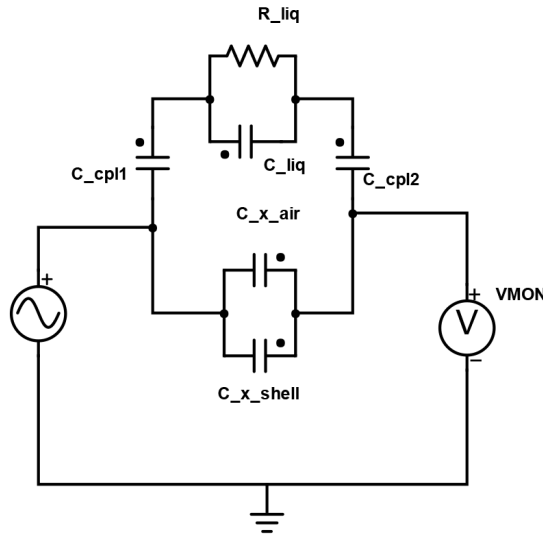
De capaciteit en weerstand tussen twee rechthoekige elektroden in hetzelfde vlak is dan te definiëren als:

$$C_l = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r K(k'^2) l}{2K(k^2)} \quad (4.14)$$

$$R_l = \frac{K(k'^2) l}{\sigma 2K(k^2)} \quad (4.15)$$

Waarbij l de lengte van de uitgerolde elektroden is. Hiermee zijn de eigenschappen van het water te berekenen. De verliescapaciteit C_x loopt voor een deel door de behuizing en voor een deel door de lucht. Dit is te modelleren als twee aan elkaar parallel geschakelde verliescapaciteit. Voor deze twee capaciteiten kunnen vergelijkingen 4.10, 4.11 en 4.14 gebruikt worden aangezien de dikte van het diëlektricum hier niet naar oneindig gaat.

Aangezien met simulatiesoftware als Matlab deze formules goed door te rekenen zijn en de elektroden aan de binnenkant van de behuizing geplaatst kunnen worden is gekozen voor topologie C. Vervolgens is er een model geschreven wat voor de dimensies van de behuizing, elektroden, eigenschappen van de wisselspanning en watereigenschappen de amplitude en fase van het uitgangssignaal plot. Het circuit wat wordt gesimuleerd is weergegeven in 4.9.

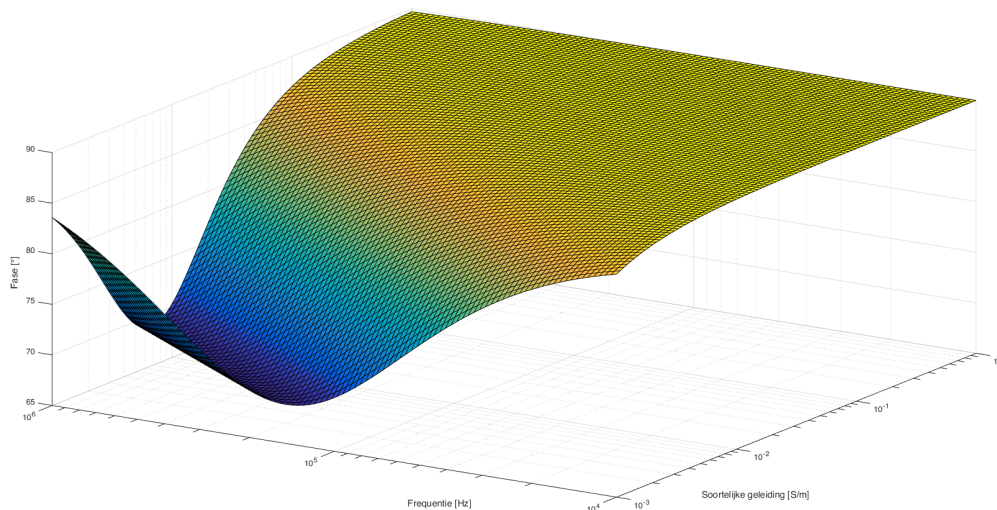


Figuur 4.9: Het circuit wat met een discrete simulatie in matlab is doorerekend om de dimensies van de elektroden te verifiëren. De polariteit van de capaciteiten kan genegeerd worden.

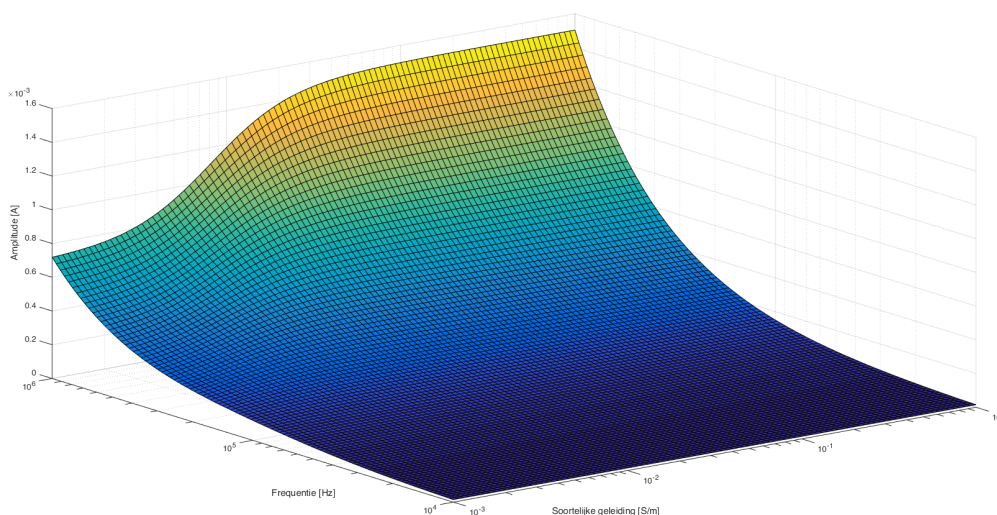
De volledige matlabcode is weergegeven in appendix B. De simulatie rekent voor een frequentie bereik van 10 kHz tot 1 MHz en een soortelijke geleiding van 10 tot 10.000 uS/cm ($=10 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^0$ S/m). De overige gegevens waarmee gerekend is:

- Behuizing is een ABS buis van 21mm in diameter met een wand van 1.8mm dik. ABS heeft een ϵ_r van 3.2 F/m.
- De elektroden zijn ringen van 50mm hoog en zijn aan de binnenkant van de behuizing geplaatst met een ruimte van 5mm tussen de ringen.
- Het water is 15 °Celsius en heeft een ϵ_r van 82.
- De ingaande spanning is 5V en er wordt van uitgegaan dat de uitgaande stroom ideaal wordt omgezet naar een spanning (ingangsweerstand van de transimpedantieverstker is 0).

Vervolgens is de fase van het uitgaande signaal en de amplitude als functie van de frequentie en geleiding in een oppervlakteplot gevisualiseerd.



Figuur 4.10: De fase van de stroom die uit de tweede elektrode komt uitgezet tegenover frequentie van het testsignaal en soortelijke geleiding.



Figuur 4.11: De amplitude van de stroom die uit de tweede elektrode komt uitgezet tegenover frequentie van het testsignaal en soortelijke geleiding.

Uit de simulaties komen ten eerste een aantal positieve resultaten naar voren. De fase draait over een bereik van 25 graden en de amplitude varieert tussen de $50 \mu\text{A}$ en 1 mA . De frequentie van de sensor is op 100 kHz gekozen. De fasedraaiing maximale ligt daar op 20 graden bij de kleinste soortelijke geleiding en de stroom varieert tussen de 100 en $150 \mu\text{A}$. Na 100 kHz mag onder andere de permittiviteit van water niet meer als constant worden aangenomen, maar afhankelijk van de frequentie, en wordt het lastiger om de oscillator met opamps voor een laag bedrag te realiseren. Ook is vanaf 150 kHz het oppervlak niet langer convex, waardoor 1 gemeten hoek niet langer overeenkomt met één unieke waarde soortelijke geleiding binnen het gezochte bereik. De stroom bij deze frequentie varieert van 70 tot $75 \mu\text{A}$. De waarden van de componenten in het equivalente circuit zijn te vinden in tabel 4.1.

Tabel 4.1: De (minimale en maximale) waarde voor ieder component uit figuur 4.2 bij een frequentie van 100 kHz

Component	Waarde
C_{cpl}	43.0 pF
C_{liq}	19.7 pF
R_{liq}	36.7 Ω - 36.7 k Ω
$C_{x,air}$	0.24 pF
$C_{x,shell}$	0.77 pF

De totale fasedraaiing kan nog verder worden geoptimaliseerd door te variëren met de parameters van het model. Het belangrijkste hierbij is het vergroten van de koppelcapaciteiten C_{cpl} ten opzichte van de capaciteit en weerstand van het water. Dit kan bijvoorbeeld door de wand van de behuizing dunner te maken, door een behuizing te kiezen met een hogere permittiviteit of door de elektroden hoger te maken. Voor nu is gekozen om de parameters uit het model aan te houden en een prototype te gaan realiseren.

4.1.4. Versterkers

Het signaal uit de sensor zal versterkt moeten worden voordat het naar de mixers gestuurd kan worden. Dit zal gebeuren in twee trappen, bestaande uit een transimpedantieversteker en een inverterende spanningsversteker. Beide uitgevoerd met dezelfde opamp.

Transimpedantieversteker vanwege het capacitieve karakter van de sensor, is het uitgangssignaal van de sensor een stroom. Deze zal omgezet moeten worden naar een spanning. hiervoor wordt een transimpedantie versteker gebruikt. Deze versteker is schematisch weergegeven in afbeelding 4.12 De versterking van dit circuit wordt bepaald door R_2 . Om de fout door de biasstroom van de opamp te beperken wordt een gelijkwaardige weerstand aangebracht tussen de niet inverterende input en de ground [27]. De output van de versteker is te bepalen aan de hand van formule 4.16. De ingangsimpedantie van de versteker moet zo laag mogelijk zijn om een zo klein mogelijke fout op de meting te veroorzaken. Deze impedantie kan bepaald worden aan de hand van formule 4.17. Waar f de ingangsfrequentie is en GBP het Gain Bandwidth Product, een eigenschap van de opamp. Er is gekozen voor een maximaal toelaatbare ingangsimpedantie van 1 Ω . Bij de opamp die gekozen is voor de oscillator betekend dat een maximale versterkingsweerstand van 15 Ω . Aangezien dit erg laag is, is gezocht naar een opamp met een hogere bandbreedte. De gekozen opamp is de OPA350. Deze heeft een GBP van 38MHz wat een versterkingsweerstand van 380 Ω mogelijk maakt. De dichtstbijzijnde beschikbare waarde is dan 390 Ω in de E12 reeks.

$$V_{out} = -I_{in}R_2 \quad (4.16)$$

$$R_{in} = \frac{R_2 f}{GBP} \quad (4.17)$$

Naversterker In paragraaf 4.1.3 is de verwachte uitgangsstroom van de sensor bepaald. Deze wordt door de transimpedantieversteker omgezet naar een spanning. Deze versteker is echter wel inverterend, daarom wordt de naversterker ook inverterend, zodat de originele polariteit teruggekregen wordt. De uitgangsstroom heeft een amplitudue tussen de $1.00 \cdot 10^{-4}$ en $1.50 \cdot 10^{-4}$ A. Na het versterken door de transimpedantieversteker is de maximale amplitude:

$$V_{out} = -I_{in}R_2 = -1.5 \cdot 10^{-4} \cdot 390 = 58.5mV \quad (4.18)$$

V_{out} zal dus nog versterkt moeten worden om op 160 mV top tot top spanning uit te komen, wat een eis is die in paragraaf 4.1.5 verder besproken wordt. Hiervoor moet het signaal nog een factor 3 versterkt worden. Daarvoor worden R_3 en R_4 respectievelijk op 1k en 3k gezet. De volledige opstelling is te zien in afbeelding 4.13.

Vervolgens vermenigvuldigen we dit signaal met het oorspronkelijke signaal in de ene mixer en met het 90 graden gedraaide signaal in de andere mixer:

$$V_i(t) = A_0 \sin(\omega_c t + \phi) \cdot A_c \sin(\omega_c t) = \frac{1}{2} A_0 A_c [\cos(\phi) - \cos(2\omega_c t + \phi)] \quad (4.22)$$

$$V_q(t) = A_0 \sin(\omega_c t + \phi) \cdot A_c \cos(\omega_c t) = \frac{1}{2} A_0 A_c [\sin(2\omega_c t + \phi) + \sin(\phi)] \quad (4.23)$$

Wanneer na het vermenigvuldigen een lowpass filter wordt toegepast met een voldoende lage kantelfrequentie (minstens een decade voor $2\omega_c$ blijft alleen de gelijkspanningscomponent over in het signaal [28]). Dit is een gelijkspanning die direct gekoppeld is aan het faseverschil ϕ , dit komt door de deling van fasoren die in de sensor plaatsvindt. We kunnen schrijven:

$$\mathbf{I} = \frac{V_0 \angle 0^\circ}{Z_0 \angle \phi} = \frac{V_0}{Z_0} \angle -\phi \quad (4.24)$$

De versterkte spanning zal dezelfde fase hebben als de stroom uit de elektrode, aangezien het versterker-circuit het signaal twee maal 180 °draait. Voor de in-fase component $V_i(t)$ zal dit niet uitmaken, aangezien $\cos(-\phi) = \cos(\phi)$. Deze zal dus tussen de virtual ground, 2.5V en de maximale spanning van 5V variëren. De quadratuur component $V_c(t)$ zal tussen 0 en 2.5V variëren. Wanneer men de modulus neemt van de som van de gefilterde in-fase en de quadratuur component ontstaat:

$$|V| = \sqrt{\frac{1}{4} A_0^2 A_c^2 (\cos^2(\phi) + \sin^2(\phi))} = \frac{1}{2} A_0 A_c \quad (4.25)$$

Doordat hiermee de waarde van $\frac{1}{2} A_0 A_c$ kan uit de gemeten gelijkstroom $\cos(\phi)$ dan wel $\sin(\phi)$ geïsoleerd worden en kan de fasedraaiing berekend worden. Met de vergelijkingen uit paragrafen 4.1.1 en 4.1.3 kan vervolgens de soortelijke geleiding σ worden gevonden waarnaar men op zoek is.

Tenslotte is ook nog gekeken naar het combineren van een losse topdetector en een nuldetector. De eerste meet de amplitude van de versterke golf die uit de elektrode komt en de twee meet wanneer het oorspronkelijke signaal en het signaal uit de elektrode een nuldoorgang hebben. Het principe achter het combineren van deze twee methoden is dus nagenoeg hetzelfde als bij de hierboven genoemde RF mixers. Het voordeel van die methode is dat een RF mixer bestaat uit één kant en klare chip en uit de reeds ontworpen zowel het oorspronkelijke signaal als de +90°gedraaide variant gehaald kan worden. Daarom is na het uitzoeken van de RF mixer direct gekozen voor deze aanpak omwille van tijd en eenvoud van het ontwerp. De keuze is gevallen op tweemaal de SA602A van NXP [29]. Deze mixer voldoet aan de specificaties van bandbreedte, voedingsspanning en kosten. Bij een oplage van 10.000 stuks kosten deze mixers €1.32 per stuk. Voor het lowpass filter is gekozen voor een eerste orde RC filter met een kantelfrequentie van -3dB op 10Hz, aangezien de geleiding niet snel zal veranderen, en met een afrol van 20dB/decade zodat de amplitude van de $2\omega_c$ component voldoende verzwakt zal zijn in het uitgangssignaal. Uit [30] blijkt dat de aan te raden V_{pp} voor de input van de mixer maximaal 160 mV is. De amplitude van het referentie signaal is 5V. De V_{pp} van de uitgangsspanning wordt dan volgens vergelijkingen 4.22 en 4.23 0.4387 V. De in-fase gelijkstroom zal lopen van 2.5V (evenwichtsstand) tot 2.7194V en de quadratuur van 2.2807V tot 2.5V. Na de mixer en het low-pass filter zal dus nog eenmaal een niet-inverterende versterker geplaatst moeten worden met een gain van:

$$A = \frac{V_{max,adc}}{V_{pp,mixer}} = \frac{3.3}{0.2194} = 12.12 \quad (4.26)$$

Om deze gain te realiseren zijn weerstanden van 39 kΩ en 3.3 kΩ uit de E12 serie gekozen. De eerste van de twee zit tussen de inverterende ingang en de uitgang van de opamp en de tweede tussen de inverterende ingang en de ground. Het definitieve ontwerp is te vinden in paragraaf C.1. Verder zijn er bij de SA602 nog enkele ontkoppel capaciteiten geplaatst zoals in overeenstemming met de datasheet.

4.1.6. Definitief circuit

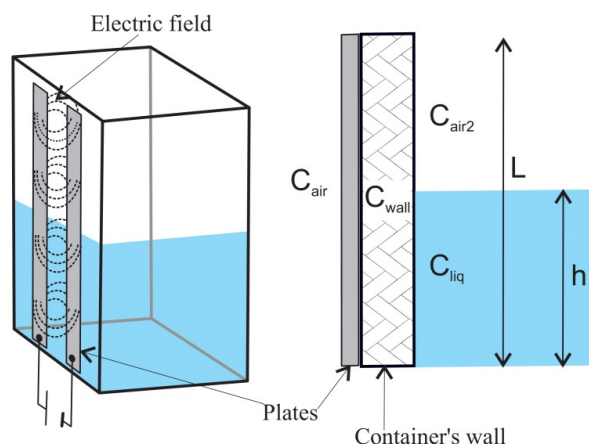
Nadat in de voorgaande paragrafen per subonderdeel de IC's en randcomponenten zijn gekozen is er één definitief circuit gemaakt. Dit is weergegeven in appendix C, figuur C.1. Hierin is U1 de buffer voor het maken van de halve voedingsspanning, deze halve voedingsspanning heeft het label 0.5Sup en is verbonden met alle andere 0.5Sup labels. Deze halve voedingsspanning worden gebruikt als bias voor de versterkers en filters. U2

en U3 zijn de opamps voor de oscillator. De signalen die door de oscillator worden gegenereerd worden door U4 en U5 gebufferd. Het signaal gaat vervolgens bij P3 de sensor in, en komt bij P4 de sensor weer uit. U6 en U7 zijn de transimpedantieversteker en naversterker zoals besproken in paragraaf 4.1.4. Het versterkte signaal gaan vervolgens naar de mixers. Deze zijn aangesloten zoals aangegeven in de datasheet. Na de mixers worden de quadratuur en in fase signalen gefilterd, en door een opamp gebiased en versterkt. P6 en P7 moeten worden aangesloten op de ADC van de microcontroller. In dit schema zijn de ontkoppelcapaciteiten niet weergegeven om het schema duidelijker te maken. Bij iedere opamp is aan pin 7 een capaciteit verbonden die naar de aarde gaat. Deze capaciteit heeft een waarde van $0.1\mu\text{F}$.

4.2. Diepte

In eerste instantie zou diepte met een druksensor gerealiseerd worden. De druksensor zou een maximale absolute druk van 3 bar aan moeten kunnen en middels i^2c worden uitgelezen. Bijvoorbeeld de MS58370-30BA [10]. De sensor compenseert zelf voor drukverschillen door temperatuur en is slechts $3\times 3\text{mm}$. Helaas kost deze €9,- en daarom is ook naar een andere methode gekeken. Deze is pas uitgewerkt nadat de andere twee sensoren (conductiviteit en temperatuur) volledig ontworpen waren, omdat er reeds een werkende oplossing lag. Daarom zal nu de theorie achter het ontwerp worden besproken en de theoretische waarden ervoor, maar zullen er geen metingen worden gedaan. In de conclusie zal erop terug worden gekomen waarom dit besluit genomen is.

Verschillende artikelen [12, 31] bespreken een aanpak waarbij twee parallelle transmissielijnen die in hetzelfde vlak liggen langs een vloeistof het niveau van de vloeistof kunnen meten. Door op de ene draad een signaal te zetten en op de tweede draad te stroom te meten kan weer de impedantie van de transmissielijn worden bepaald, zie ook figuur 4.14. De impedantie van de transmissielijn hangt af van hoeveel van de trans-



Figuur 4.14: De voorgestelde dieptemeter van Otero *et al.*. De capaciteit tussen de twee geleiders hangt af van de hoogte van de vloeistof. Bron: [12].

missielijn aan water grenst en hoeveel aan lucht. Water heeft een permittiviteit die 80 maal hoger ligt dan die van water, waardoor een hogere waterstand ook een hogere capaciteit tussen de twee draden als gevolg heeft. Door achteraf de capaciteit te bepalen en een nulmeting te doen om de parasitaire capaciteiten van het systeem te bepalen kan zo een diepte worden bepaald. Zoals Otero *et al.* beschrijven in [12] kan de hoogte uiteindelijk worden berekend door de verhouding van de gemeten capaciteit, de capaciteit als de sensor zich buiten het water bevindt en als de sensor zich geheel in het water bevindt:

$$h_{\text{vloeistof}} = \frac{C_{\text{gemeten}} - C_{\text{leeg}}}{C_{\text{vol}} - C_{\text{leeg}}} l_{\text{sensor}} \quad (4.27)$$

De totale capaciteit kan met hetzelfde circuit gemeten worden als bij de geleiding. Uit de gelijkspanningen van de SA602A mixers kan het capacitieve gedeelte van de impedantie bepaald worden die met vergelijking 4.27 vervolgens omgezet kan worden in een hoogte. De versterking van sommige opamps zal moeten worden aangepast, wat met een multiplexer gedaan kan worden die tussen verschillende weerstanden schakelt. Hiervoor is de CD74HC4052E van Texas Instruments bijvoorbeeld geschikt. Dit is een 3-bits multiplexer met

een weerstand van $7\ \Omega$ per kanaal, zodat zelfs nog verschillende versterkingen te selecteren zijn, bijvoorbeeld als men een laag bereik nauwkeuriger wil meten.

4.3. Temperatuur

In hoofdstuk 4 is de keuze gemaakt voor het implementeren van een digitale temperatuursensor. De eisen waar deze sensor aan moet voldoen zijn gesteld in paragraaf 3.2. Voor het prototypeontwerp gelden andere eisen dan voor het eindontwerp. Voor het prototype zal een sensorbehuizing worden gekozen die makkelijk gebruikt kan worden in combinatie met een breadboard. Het zal dus een DIP of een TO behuizing betreffen, aangezien dit through-hole componenten zijn. Voor het eindontwerp is deze eis niet van belang en zal alleen naar de eisen worden bekeken zoals beschreven in paragraaf 3.2. Voor het eindontwerp is gekozen voor de MCP9801-M/MS. Dit is een temperatuursensor die voldoet aan alle eisen die bij de gespecificeerde oplage minder dan 77 cent kost. De behuizing is echter niet praktisch voor het prototype, namelijk 8 pin MSOP. De afmetingen zijn 3 bij 3 mm (inclusief pins 3 bij 5 mm). Voor een geautomatiseerd productieproces is het gebruik van deze componenten geen probleem. Voor het prototype is daarom gekozen om gebruik te maken van een andere temperatuursensor. Hier is de keuze gevallen op de DS18B20+ in een 3-pins TO92 behuizing. Deze kan makkelijk gebruikt worden, en heeft alleen één pull-up weerstand van $47\text{k}\Omega$ nodig van de datapin naar de voedingspin. Met het 1Wire protocol kan op deze datapin de temperatuur met 12 bits precisie worden uitgelezen. Dit geeft een resolutie van 0.0625°C . De resolutie van de ADC kan worden verlaagd om energie te besparen tot een resolutie van 0.5°C (9 bits). De gebruikte IDE voor de microcontroller code beschikt over standaardcode om 1Wire modules uit te lezen. De Temperatuur wordt opgeslagen in de eerste twee adressen van de sensor in two's complement notatie [14, 32].

5

Resultaten

In dit hoofdstuk zullen de resultaten van het gemaakte prototype besproken worden. Het prototype is gebouwd naar circuit dat is weergegeven in figuur C.1. Deze is vervolgens gebouwd op een breadboard. Voor het testen is gewerkt met een Delta E060-06 voeding (0-50V, 0-0.6A) en een Tectronix TDS 210 oscilloscoop. De resultaten zullen objectief behandeld worden, onderverdeeld per sensor. Deze resultaten zullen verder besproken en geïnterpreteerd worden in hoofdstuk 6.

5.1. Geleiding

Het eerste onderdeel van het conductiviteitssensorsysteem dat gebouwd en getest is, is de oscillator. Deze is gerealiseerd op een frequentie van 100 kHz. In eerste instantie gaf de oscillator een signaal dat te zien is in figuur 5.1. Zoals in deze figuur te zien is verzadigt het signaal bij de toppen. Om dit aan te pakken zijn de weerstanden in de oscillator verhoogd van 100 Ω naar 1.5 k Ω en de capaciteiten van 16nF naar 1nF. Hiermee blijft de oscillatie frequentie gelijk maar daalt de stroom die uit de oscillator komt en zal deze niet verzadigen. De oscillatie die nu bereikt wordt is te zien in figuur 5.2.

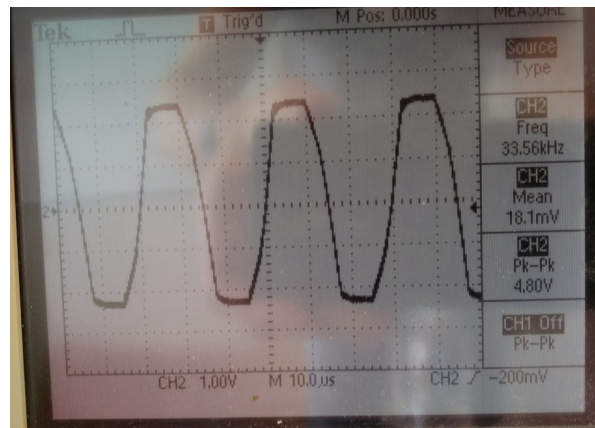
Vervolgens is de uitgang van de oscillator verbonden met de sensor, waarvan de opstelling is weergegeven in figuur 5.4. Deze opstelling bestaat uit een 30cl fles van PET (Polyethyleen) met daarop twee ringen van aluminiumfolie van 2.5cm met 5mm ruimte tussen deze ringen. Vervolgens zijn er verschillende concentraties zoutoplossing gemaakt en deze zijn getest. Steeds is iedere fles inclusief dop voorgespoeld met kraanwater en daarna gevuld met gedemineraliseerd water en keukenzout (NaCl). De gebruikte concentraties zijn:

Tabel 5.1: De gebruikte hoeveelheden zout en de daarbij behorende concentraties wanneer de fles gevuld is met 30 cL gedemineraliseerd water.

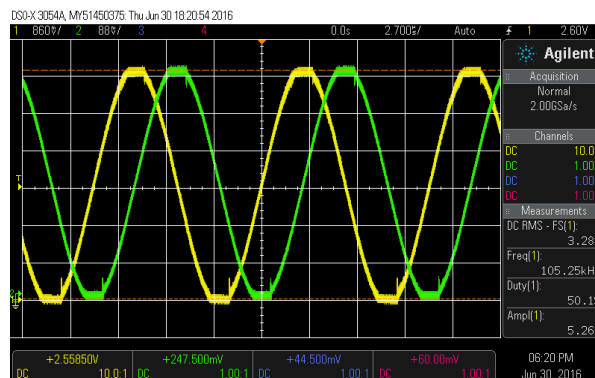
Zout [mg]	Concentratie [mg/L]
0	0
10	33,3
20	66,7
30	100
45	150
60	200
90	300
135	450
150	500

De uitgang van deze opstelling is aangesloten op de versterker die gebouwd is naar het ontwerp in figuur 4.12. De stroom uit de sensor bleek zo groot dat de versterking van de transimpedantieverstrekter terug is gezet naar 190, door weerstand R9 aan te passen naar 190 Ω . Uit deze versterker komt het signaal dat te zien is in figuur 5.3. Dit signaal lijkt nog steeds enigszins op de sinus die erin is gestopt. Wanneer de oscillator niet een goede sinus uitstuurt is opgemerkt dat het signaal uit de sensor ernstig vervormt. Het systeem werd

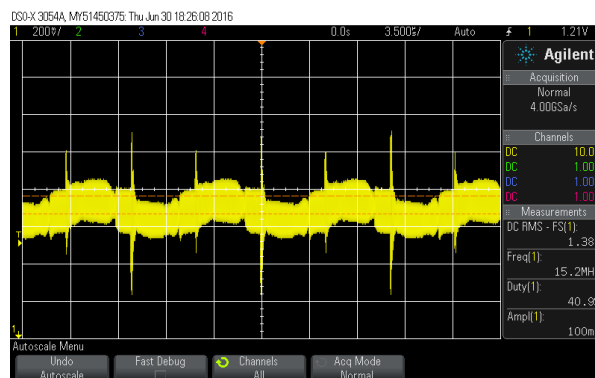
daarna verhuist van een breadboard naar een experimenteerprint. Dit om storing te verminderen en een testen te vergemakkelijken. Hier zijn ook de naversterkers en de mixers op geïmplementeerd.



Figuur 5.1: Uitgangssignaal van de oscillator als deze ingesteld is met 100Ω en 16nF



Figuur 5.2: Uitgang van de oscillator als deze ingesteld is met $1.5\text{k}\Omega$ en 1nF



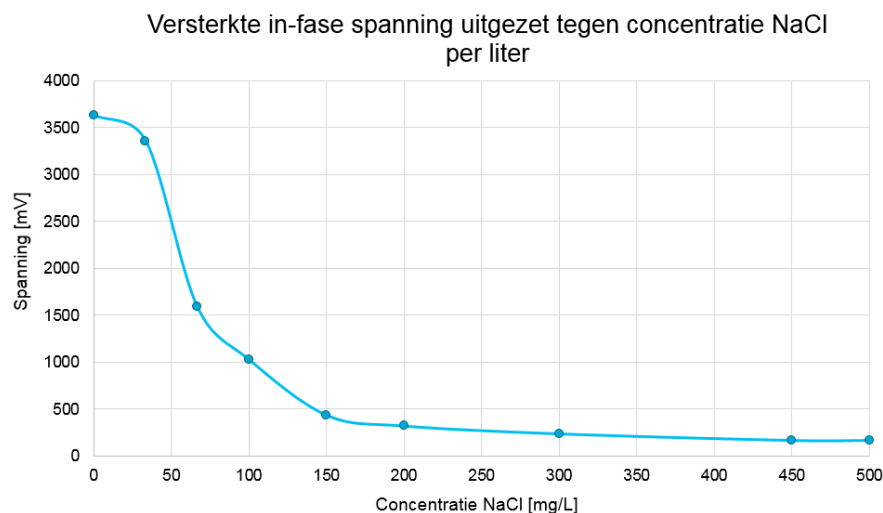
Figuur 5.3: Uitgang van de transimpedantieversteker bij een geleiding van $300\mu\text{S}/\text{cm}$ en een ingangssignaal van 105kHz

De spanning die uit de transimpedantieversteker is verkregen wordt vervolgens in de mixer gemixt met de oorspronkelijke draaggolf en de $+90^\circ$ gedraaide versie daarvan. De spanningen die uit de mixer werden verkregen zijn vervolgens gefilterd en daarna is naar de gelijkspanningen gekeken. Voor de in fase component varieerde deze van 3.65 tot 3.70 V en voor de quadratuur component van 3.39 tot 3.41 V. Er is daarna voor gekozen om de in fase component verder te versterken door de spanning eerst te bufferen, daarna er 3.65 V vanaf te trekken en dit bereik van 0 tot 0.05 V te versterken naar 0 tot 3.3 V. Deze drie extra opamps zijn ook weergegeven in circuit C.1. Tenslotte wordt er aan het einde van de opamps nog een keer gefilterd met een



Figuur 5.4: Experimentele conductiviteitsensor opstelling met 25cl PET fles en aluminium ringen

eerste orde RC waarvan de -3dB frequentie 10 Hz is. De spanningen die daaruit zijn verkregen zijn weergegeven in figuur 5.5 en uitgezet tegen de gebruikte concentraties.



Figuur 5.5: De gelijkspanningen verkregen bij de verschillende concentraties zoutoplossing met het prototype waarbij de 30 cL petfles als sensor werd gebruikt

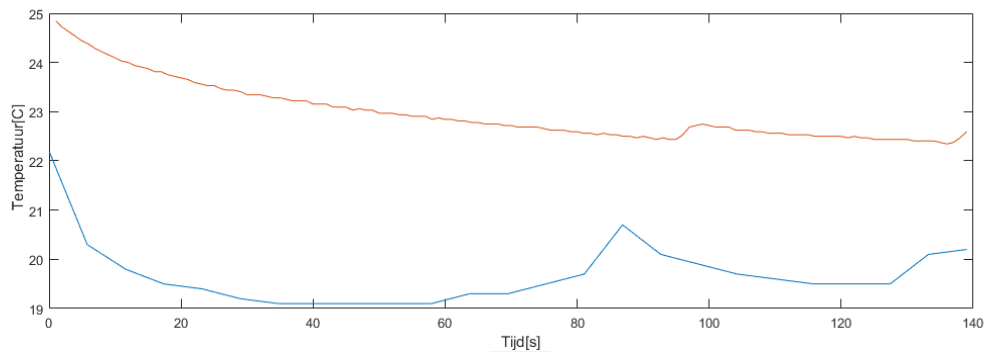
5.2. Diepte

Voor de dieptesensor zijn geen experimenten uitgevoerd, of ontwerpen geïmplementeerd voor de capacitieve methode.

5.3. Temperatuur

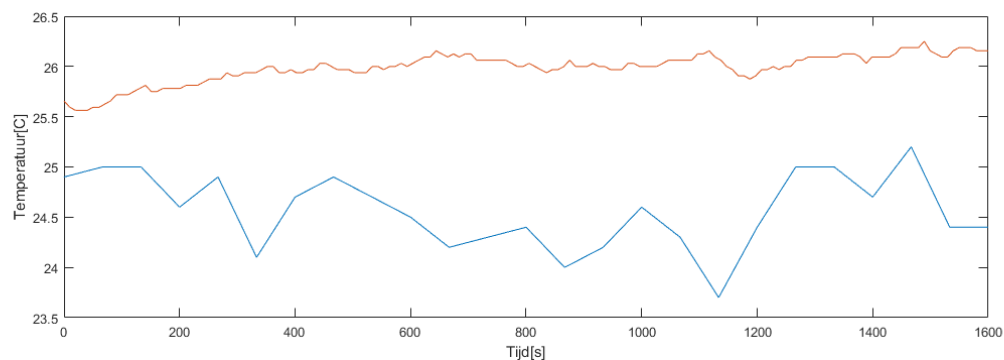
Om de temperatuursensor te testen is deze verbonden met de microcontroller. Dit deel van het systeem is niet weergegeven in de schematische weergave van het prototype. Een simpel programma leest de waarde van de sensor uit en zet deze om in graden celcius. Deze waarde wordt vervolgens naar de terminal op een pc geschreven. Deze waarden zijn geplott in matlab en vergeleken met waarden die gegenereerd zijn door een DaqPRO 5300 datalogger met daarop een K type thermokoppel aangesloten. Er zijn twee metingen uitgevoerd. Bij een meting werd de sensor tegen een fles water aangehouden, net als de thermokoppel. hierbij werd een meetfrequentie van 1 seconde gehanteerd voor de sensor, en 5 seconden voor de thermokoppel. Bij de tweede meting werden beide in een omgeving geplaatst op kamertemperatuur. Hierbij werd gemeten met een periode van 10 seconden met de sensor een periode van 1 minuut. De plot van de eerste meting is te zien in afbeelding 5.6. De temperatuursensor is weergegeven in rood (bovenste lijn), de thermokoppel in het

blauw (onderste lijn). Er is te zien dat de thermokoppel veel sneller reageert op de temperatuurverandering



Figuur 5.6: Temperatuur van sensor en thermokoppel met de tijd in contact met koud object. De temperatuursensor is weergegeven in rood (bovenste lijn), de thermokoppel in het blauw (onderste lijn).

dan de temperatuursensor. Rond 90 seconden is de fles water iets verplaatst.



Figuur 5.7: Temperatuur van sensor en thermokoppel met de tijd op kamertemperatuur. De temperatuursensor is weergegeven in rood (bovenste lijn), de thermokoppel in het blauw (onderste lijn).

Als de temperatuursensor nu voor langere tijd in kamertemperatuur wordt geplaatst, net als de thermokoppel, is weer te zien dat temperatuursensor consistent een hogere meting aangeeft dan de thermokoppel. Dit is te zien in figuur 5.7. Net als in de vorige afbeelding is de temperatuursensor weergegeven in rood (bovenste lijn), en de thermokoppel in het blauw (onderste lijn). Daarnaast is te zien dat de temperatuursensor veel constantere meetwaardes geeft, waar de thermokoppel redelijk varieert. In listing 5.1 staat de code die gebruikt is voor het uitlezen van de temperatuursensor.

```

1 #include "mbed.h"
2 #include "DS18B20.h"
3
4 DS18B20 probe(p8);
5
6 int main() {
7     while(1) {
8         probe.convertTemperature(true, DS18B20::all_devices);           //Start temperature conversion, wait
9         printf("%3.5f\r\n", probe.temperature());                       until ready
10        wait(1);
11    }
12 }
```

Listing 5.1: Code voor het uitlezen van de DS18B20 temperatuursensor en het printen naar de PC terminal

Tabel 5.2: De kosten per component voor het gehele sensorsysteem

Item	Prijs/eenheid	Aantal	Subtotaal
MCP9801-M/MS temperatuursensor	€0.77	1	€0.77
TLC227ACN opamp	€0.66	2	€1.32
SA602 mixer	€1.32	2	€2.64
CD74HC4052E multiplexer	€0.40	2	€0.80
Condensatoren, weerstanden, etc.	€0.01	37	€0.37
Montage materiaal	€1.00	1	€1.00
OPA350 opamp	€1.26	1	€1.26
Totaal:			€8.16

5.4. Energie

Het prototype voor het meten van de conductiviteit gebruikt op een experimenteerprint 35 mA bij 5 volt voedingsspanning. De specificaties van de fabrikant van de temperatuursensor geven aan dat deze $200\mu\text{A}$ gebruikt bij 5 volt voedingsspanning.

5.5. Kosten

In tabel 5.2 zijn de totaalkosten van het sensorsysteem te zien. Alle prijzen zijn bij een oplage van 10.000. Voor het eindontwerp zijn alle opamps in het schema in bijlage C vervangen door de TLC227ACN, behalve die van de transimpedantieverststerker omdat deze een hogere bandbreedte nodig heeft. Dit maakt het ontwerp aanzienlijk goedkoper dan als voor het eindontwerp alleen OPA350 opamps gebruikt zouden worden. onder montagemateriaal valt alles wat tot nu toe niet is meegenomen. Het bevat de printplaat, metalen ringen, en draden om deze ringen aan de plaat te verbinden. Het budget voor het sensorsysteem is €12,50. De onderdelen voor het sensorsysteem vallen dus een stuk goedkoper uit dan begroot. De rest van het budget kan gebruikt worden voor onvoorziene kosten, de montage, en om extra winst te maken.

6

Discussie

In dit hoofdstuk zullen de behaalde resultaten, die in hoofdstuk 5 beschreven zijn, besproken worden. De meetresultaten zullen vergeleken worden met de eisen die zijn gesteld in hoofdstuk 3. Uit deze vergelijking zullen conclusies over het succes van het ontwerp getrokken worden, en aan de hand van deze conclusies zullen er in hoofdstuk 7 aanbevelingen gedaan worden voor de verdere ontwikkeling van het sensorsysteem. Hoofdstuk 6 en 7 vormen samen de conclusie van deze thesis. Daarnaast zal het ontwerpproces dat tijdens het tot stand komen van deze thesis doorlopen is worden geëvalueerd.

Omdat het dieptesysteem nog niet compleet is, kunnen nog geen uitspraken worden gedaan over het behalen van de eisen met betrekking tot meetnauwkeurigheid van de dieptesensor.

Over de conductiviteitsensor kan gezegd worden dat de huidige oscillator toereikend is. De naversterkers en de mixers doen hun werk om een bruikbaar signaal voor de conductiviteit te genereren voor de ADC. Het systeem voldoet aan de eisen voor resolutie tot $750\mu\text{S}/\text{cm}$.

Uit de resultaten van de temperatuursensor valt op te maken dat deze continu hogere meetwaarden geeft dan de thermokoppel. Omdat het meten met een thermokoppel een meting is die gebruik maakt temperatuurverschillen kan het zijn dat dit het gevolg is van onkundig gebruik. Als na vervolgonderzoek blijkt dat dit niet het geval is, zou de temperatuursensor digitaal gecompenseerd kunnen worden om een zo nauwkeurig mogelijke meting te krijgen. Er kan geconcludeerd worden dat de sensor op dit moment niet voldoet aan de eisen zoals gesteld in hoofdstuk 3, als verondersteld wordt dat de metingen die genomen zijn met de thermokoppel juist zijn. Er kan met het aanbrengen van een compensatie echter gezorgd worden dat de temperatuurmeting wel voldoet aan de eisen.

Op het gebied van energieverbruik kan een voorzichtige aanname gedaan worden dat in het totaalsysteem de eisen gehaald worden. Het deel van het meetsysteem dat nu geïmplementeerd is komt tot een kwart van de eis, terwijl het al meer dan driekwart van de onderdelen bevat. Als gekeken wordt naar het specificerde verbruik van de onderdelen die nog niet geïmplementeerd zijn blijft deze aanname geldig. Omdat alle onderdelen van het totaalsysteem bekend zijn kan een conclusie getrokken worden over de eis die gesteld is met betrekking tot het budget. Er kan geconcludeerd worden dat het ontwerp ruim binnen het budget valt.

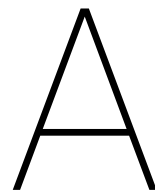
Tenslotte zijn er een aantal dingen aan te merken op het ontwerpproces. In de conceptfase is een lange tijd onderzoek gedaan naar druksensoren. Uiteindelijk werd in week 6 duidelijk dat druksensoren die voldeden aan de eisen met betrekking tot nauwkeurigheid en duurzaamheid niet voldeden aan de eisen die gesteld waren op het gebied van kosten. Zo is erg veel tijd verloren gegaan met onderzoek naar niet levensvatbare concepten. Was deze conclusie eerder getrokken, dan zou er meer tijd zijn geweest voor het ontwikkelen van een alternatief concept. Ook kan worden opgemerkt dat de verdeling van tijd tussen de sensoren niet helemaal evenredig is, het grootste deel van de tijd is besteed aan het ontwerp van de conductiviteitssensor.

7

Aanbevelingen

Naar aanleiding van de conclusies die in het vorige hoofdstuk zijn getrokken, zullen nu aanbevelingen worden gedaan voor de verdere ontwikkelingen van het sensorsysteem.

- In de eerste plaats wordt aangeraden het budget voor het systeem te verhogen zodat het mogelijk wordt om een druksensor te implementeren voor de dieptemeting. Van het budget is nog €4.36 over. Bij een verhoging van het budget met minder dan €5 wordt dit mogelijk. De druksensor die besproken is in hoofdstuk 4 is namelijk ongeveer €9 euro bij een oplage van 10.000 stuks. Hiermee neemt de verwachte nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van het systeem enorm toe.
- Daarnaast wordt aangeraden de temperatuursensor opnieuw te testen met een geijkte thermometer als referentie en aan de hand van de resultaten van deze vergelijking de sensor een digitale compensatie te geven.
- Wat betreft de conductiviteitsensor wordt aangeraden om het naversterkerkit ook te bouwen voor het kwadratuur signaal. Hierna kan geëvalueerd worden of dit signaal nuttig is voor het bepalen van de zoutconcentratie. Ook kan er een conversietabel gemaakt worden om de zoutconcentratie aan de hand van de conductiviteit te bepalen.
- Tenslotte wordt aangeraden om voor het naversterken van het systeem (na de mixers) gebruik te maken van multiplexers om voor de drie aangewezen bereiken optimaal gebruik te kunnen maken van het bereik van de ADC.



Systemeisen

A.1. Functionele eisen

1. Het product moet het waterniveau ten opzichte van het maaiveld, conductiviteit en temperatuur meten van het water in een waterput.
2. De verkregen data moet verstuurd worden naar de SkyDowser data servers.
3. Het product zal in eerste instantie de markt van boeren in Kenia en Tanzania gaan bedienen.

A.2. Non-functionele eisen

A.2.1. Producteisen

4. De data-update frequentie van het product moet op afstand kunnen worden ingesteld, dus via de server.
5. Het product moet plug&play zijn. Dat wil zeggen: apparaat uit de doos halen, aanzetten en direct werken.
6. Gebruiker kan door middel van één unieke productcode zijn meetdata inzien via de diensten van SkyDowser.
7. Het moet toegankelijk zijn voor de gebruiker om andere sensoren van SkyDowser aan de sonde toe te voegen.
8. De kostprijs voor onderdelen, exclusief assemblage, bedraagt maximaal 50 euro, bij een oplage van 10000.
9. De jaarlijkse gebruikskosten mogen maximaal 10 euro per jaar zijn.

Prestaties

10. De gemeten data moet maximaal 1x per half uur verstuurd kunnen worden naar de SkyDowser server.
11. De gemeten data moet gelabeld worden met de tijd op 1 seconde nauwkeurig. Deze tijd wordt weergegeven in UTC.
12. De locatie van één subdowser moet minstens een maal doorgegeven worden aan de server, op 100 m nauwkeurig.
13. Alle data moet aan het einde van een transmissie correct op de server van SkyDowser staan.
14. Het product moet operationeel kunnen zijn in heuvelachtig gebied (0-1000m).
15. Het product moet 2 jaar lang autonoom kunnen werken voordat onderhoud nodig is. Productiefouten vallen hierbuiten.

16. Het product moet defecten in sensoren kunnen herkennen en doorgeven aan de servers van SkyDowser.
17. De conductiviteit moet over een bereik van 0 tot 15000 uS/cm met een resolutie van 1 uS/cm en maximale afwijking van +/-1.5
18. De temperatuur van het water in de put moet over een bereik van 5-20 °C worden bepaald met een maximale afwijking van ± 1 °C en resolutie van 0.5 °C.
19. De waterstand van de waterput moet over een bereik van 0-60 m worden bepaald met maximale waterkolom van 20 m en een nauwkeurigheid van ± 5 cm en resolutie van 1 cm.

Dimensies

20. De sonde moet in een buis met een diagonaal van 6 cm passen.
21. De sondes hebben een gemiddelde dichtheid van 2-3 sondes per km².
22. De gemiddelde afstand tussen twee sondes in een werkgebied is 1 kilometer.

Veiligheid

23. Het product moet voldoen aan de Europese wetgeving voor product veiligheid, De General Product Safety Directive 2001/95/EC
24. De data mag niet makkelijk in handen kunnen vallen van andere partijen tijdens het verzenden.
25. Het product bovengronds moet bestand zijn tegen een maximale temperatuur van 70 °Celsius.
26. Het product ondergronds moet bestand zijn tegen een maximale temperatuur van 30 °Celsius als deze operationeel is.
27. Indien een deel van de sonde zich ondergronds en onderwater bevindt moet voor dat deel voldaan worden aan de IP-68 tot 30m waterkolom boven de sonde.
28. Indien een deel van de sonde zich bovengronds bevindt moet voor dat deel voldaan worden aan de IP-64 codering.
29. Het product bovengronds moet bestand zijn tegen normale mechanische impact, minimaal IK-07.
30. Het product ondergronds moet bestand zijn tegen redelijke mechanische impact, minimaal IK-05.

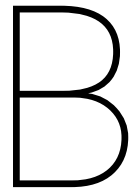
A.2.2. Organisatorische eisen

Operationeel

31. Het product moet makkelijk te gebruiken zijn door de eindgebruiker.
32. Het product moet zonder hulp van het bedrijf (SkyDowser) operationeel gemaakt kunnen worden door de eindgebruiker zelf.

Milieu

33. Het product mag het grondwater niet verontreinigen zoals gespecificeerd in de wetgeving die betrekking heeft op het grondwater van de Europese unie.



Simulatie

```
%Conductivity sensor simulation by BAP Group K "Keeping Water under
2 % Surveillince" 2016 - Ruben van Beelen & Sjoerd de Groot 15-6-2016

4 close all;
  clear all;

6   e_0=8.8541878e-12; %permittivity of vacuum
8   e_r_water=82;      %relative permittivity of water

10  v_in=5;            %Peak to peak voltage

12  d_shell=1.8e-3;    %thickness of tube [m]
    e_r_shell=3.2;    %relative permittivity of ABS [F/m]
14  r_shell=1.05e-2;   %radius of tube

16  h_ring=5e-2;      %height per ring [m]
    s_ring=5e-3;      %spacing between rings;

18
20  N=100;             %number of steps in x dimension
    M=100;             %number of steps in y dimension

22  sigma_water=logspace(-3,0,N) %l uS/cm = 1 *10^-4 S/m, 10-10000 uS/cm
    f=logspace(4,6,M);          %simulate from 10kHz to 1000 kHz

24
    d=s_ring+h_ring;           %distance between center of electrodes
26  s=d_shell;              %thickness of the shell
    w=h_ring;                  %width of one electrode
28  L=2*pi*(r_shell-d_shell); %length of electrodes = inner diamter * pi

30  k_water=d/(w+d/2)         %modulus
    k_water_inv=sqrt(1-k_water^2); %modulus inverse

32
    %k_shell=tanh((pi*d)/(4*s))/tanh((pi*(w+d/2))/(2*s)); %optional modulus
34  k_shell=k_water;          %modulus voor bigger ranges
    %for small ranges
36  k_shell_inv=sqrt(1-k_shell^2); %modulus inverse

38  k_air=k_water;            %modulus for bigger ranges
    k_air_inv=sqrt(1-k_air^2); %modulus inverse

40
    %calculate elliptical ingetrals using ellipke command
42  K_k_water=ellipke(k_water^2);
    K_k_water_inv=ellipke(k_water_inv^2);

44
    K_k_shell=ellipke(k_shell^2);
46  K_k_shell_inv=ellipke(k_shell_inv^2);

48  K_k_air=ellipke(k_air^2);
    K_k_air_inv=ellipke(k_air_inv^2);
```

```

50 %calculate appropriate capacities
52 C_cpl=e_0*e_r_shell*w*L/d_shell;
   C_water=e_0*e_r_water*L*K_k_water_inv/(2*K_k_water);
54 C_x_shell=e_0*e_r_shell*L*K_k_shell_inv/(2*K_k_shell);
   C_x_air=e_0*L*K_k_air_inv/(2*K_k_air);
56
58 %calculate conductance of the water
   g_water=sigma_water*L*K_k_water_inv/(2*K_k_water);

60
62 %create iteration vector
   i_out=zeros(M,N);
   for i=1:M
64
66       omega=2*pi*f(i);           %omega = 2*pi*f
       Z_cpl=1/(j*omega*C_cpl);     %Z_c=1/(j*omega*C)=-j*omega*C
       Z_c_water=1/(j*omega*C_water);
68       Z_r_water=1./g_water;       %Z_r=1/g;

70       %Calculate equivalent impedance
       Z_eq=Z_cpl+((Z_c_water.*Z_r_water)./(Z_c_water+Z_r_water))+Z_cpl;

72
       %Calculate equivalent parasitic resistance
74       Z_x=1/(1/(1/(j*omega*C_x_shell))+1/(1/(j*omega*C_x_air)));
       Z_tot=(Z_eq.*Z_x)./(Z_eq+Z_x);
76       %Calculate output current
       i_out(i,:)=5./Z_tot;

78   end

80 %Calculate phase and amplitude
82 i_out_abs=abs(i_out);
   phi_out=radtodeg(angle(i_out));

84
86 %Decide between phase or impedance plot
   surf(sigma_water,f,radtodeg(angle(i_out)))
   %surf(sigma_water,f,abs(i_out))

88
89 %Set axis labels
90 set(gca, 'XScale', 'log')
   set(gca, 'YScale', 'log')
92 xlabel('Soortelijke geleiding [S/m]')
   ylabel('Frequentie [Hz]')
94 %zlabel('Amplitude [A]')
   zlabel('Fase []')

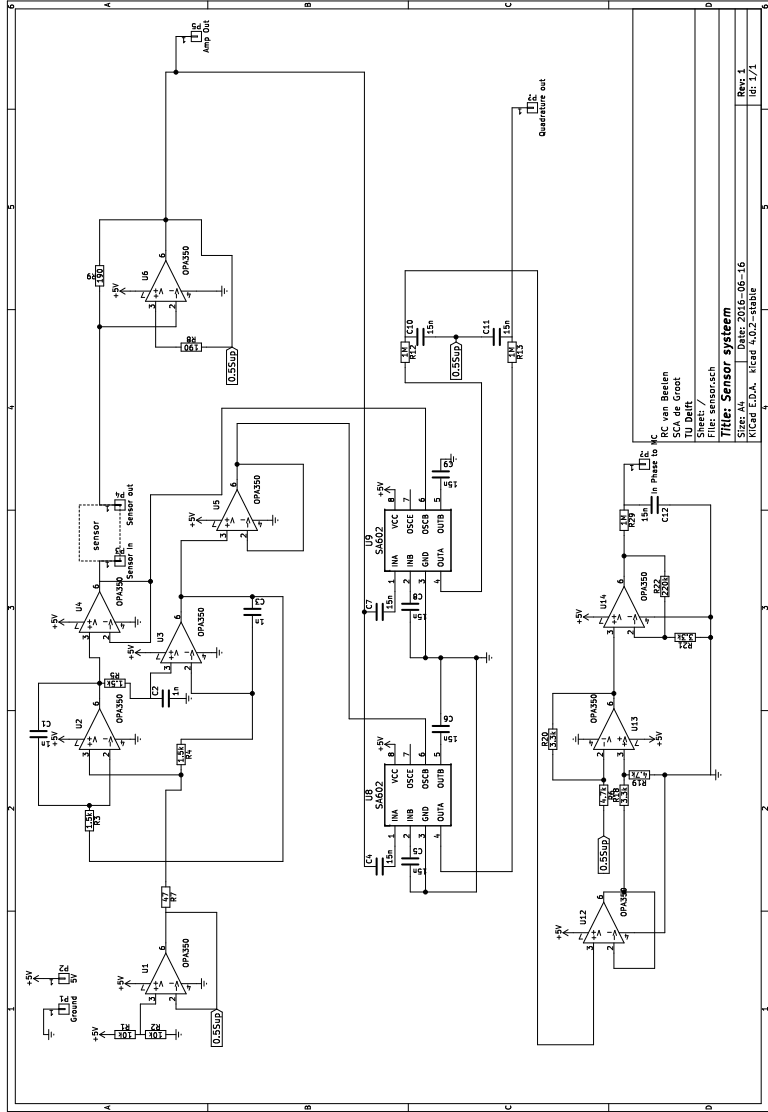
```

code/clsensor_sim1.m

C

Circuits

C.1. Circuit geleidingssensor



Figuur C.1: Het definitieve circuit voor de sensor die de soortelijke geleiding moet meten

Bibliografie

- [1] “Temperatuur kenia,” <http://www.wolframalpha.com/input/?i=kenya+temperature>, 2015, [Online; bekeken op 6 juni 2016].
- [2] “Determinants of a digital divide in sub-saharan africa: A spatial econometric analysis of cell phone coverage,” *World Development*, vol. 37, no. 9, pp. 1494 – 1505, 2009.
- [3] G. Fipps, “Irrigation water quality standards and salinity management strategies,” Texas A&M System, College Station, Tech. Rep., 2009.
- [4] R. Renaudot *et al.*, “Optimization of liquid dielectrophoresis (ldep) digital microfluidic transduction for biomedical applications,” *Micromachines*, vol. 2(2), pp. 258–273, 2011.
- [5] J. J. Barron and C. Ashton, “The effect of temperature on conductivity measurement,” *TSP*, vol. 3, 2007.
- [6] T. S. Light, “Temperature dependance and measurement of resistivity of pure water,” *Analytical Chemistry*, vol. 56, p. 1138, 1984.
- [7] D. Gadani, V. Rana, S. Bhatnagar, and A. Vyas, “Effects of salinity on the dielectric properties of water,” *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, vol. 50, pp. 405–410, 2012.
- [8] P. Regtien, *Electronic Instrumentation*, 2nd ed. VSSD, 2005.
- [9] *MS5803-14BA Miniature 14 bar Module*, Measurement Specialities, 3 2013.
- [10] *MS5837-30BA Ultra Small Gel Filled Pressure Sensor*, Measurement Specialities, 11 2015.
- [11] S. B. Jones, J. M. J Wraith, and D. Or, “Time domain reflectometry measurement principles and applications,” *Hydrological Processes*, vol. 16, pp. 141–153, 2002.
- [12] A. Otero, R. Fernández, A. Apalkov, and M. Armada, “An automatic critical care urine meter,” *Sensors*, vol. 12 (10), 2012.
- [13] W. Kester, J. Bryant, and W. Jung, “Temperature sensors chapter 7,” *Analog Devices training seminar*, 2008.
- [14] *DS18B20+ rev 4 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*, Maxim Integrated, 1 2015.
- [15] *TMP36 Temperature Sensor Rev H*, Analog Devices, 11 2015.
- [16] J. Wilson, “Building and calibrating an affordable salinity sensor,” *Brigham Young University, Instrumentation Final Project*, 2016.
- [17] S. Bhat, “Salinity (conductivity) sensor based on parallel plate capacitors,” Ph.D. dissertation, University of South Florida, 10 2005.
- [18] F. M. v. d. Goes and G. Meijer, “A novel low-cost capacitive-sensor interface,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 45.2, pp. 536–540, 1996.
- [19] T. Ungaretti and E. Lasalandra, “Device and method for reading a capacitive sensor, in particular of a micro metromechanical type,” 06 2006.
- [20] F. Opekar, P. Tůma, and K. Štulík, “Contactless impedance sensors and their application to flow measurements,” *Sensors*, vol. 13(3), pp. 2786–2801, 2013.
- [21] R. Remis, “Quasistatic electromagnetic fields,” Delft University of Technology, Tech. Rep., december 2006.

- [22] T. Jones, "Fundamentals of crystal oscillator design," *Electronic Design, Maxim Integrated*, 2012.
- [23] *LM555 Timer*, Texas Instruments, 1 2015.
- [24] R. Mancini and R. Palmer, "Sine-wave oscillator," Texas Instruments, Tech. Rep. SLOA060, March 2001.
- [25] *TLC227ACN Rail To Rail Precision Operational Amplifier*, Texas Instruments, 5 2004.
- [26] E. S. Krichevskii and O. S. Protopopov, "Nomographs for finding the capacitance of coplanar-plate capacitors," *Measurement Techniques*, vol. 29, no. 5, pp. 437–439, 1986.
- [27] "An-31 op amp circuit collection," Texas Instruments, Tech. Rep. SNLA140B, May 2013.
- [28] L. W. Couch II, *Digital and Analog Communication Systems*, 8th ed. Pearson, 2013.
- [29] *SA602A Double Balanced Mixer and Oscillator*, NXP, 5 2014.
- [30] J. J. Carr, "Ne602 primer," Elektor Electronics, Tech. Rep., january 1992.
- [31] L. K. Baxter, *Capacitive Sensors - Design and Application*, 1st ed. John Wiley & Sons, 1997.
- [32] *MCP9801-M/MS 2-Wire High-Accuracy Temperature Sensor*, Maxim Integrated, 1 2010.