

ONDERZOEK
KOST-EFFICIENT, LOW POWER, WIRELESS DISSOLVED OXYGEN
SENSOR VOOR EEN BIOREACTOR
VERTROUWELIJK DOCUMENT

J.H. Elbers
BSc Mechatronica
8 maart 2022

Bedrijfsmentor
A. Kaljouw

Applikon Getinge, Delft

Stagebegeleider
X. van Rijnsoever

De Haagse Hogeschool, Delft

Inleiding

Door de ontwikkeling van netwerk en communicatie technologie wordt het ongemak van kabels belicht. Draadloze netwerk systemen worden steeds meer gebruikt voor zowel de huishoudelijke apparaten als voor de industriële automatisering. Op dit moment word de near field draadloos communicatie technologie op grote schaal gebruikt, denk hierbij aan bijvoorbeeld; Bluetooth, Wifi en Infrarood communicatie.

Geringe Applikon, gelegen in Delft, ontwikkelt en produceert bioreactorsystemen. Deze systemen worden gebruikt om op laboratorium- of productieschaal een cultuur van cellen of micro-organismen te kweken. Om de condities tijdens dit proces te regelen zijn veel sensoren en actuatoren nodig, met als gevolg dat een laboratorium bioreactor veelal uit een grote hoeveelheid kabels, slangen en stekkers bestaat. Om de gebruiksvriendelijkheid van de bioreactorsystemen te verhogen onderzoekt Applikon de mogelijkheid om draadloze systemen toe te passen.

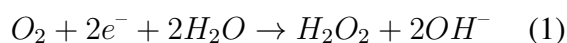
Dit verslag beschrijft het onderzoek voor het uitbreiden van een Dissolved Oxygen probe van Geringe Applikon met een draadloos netwerk systeem. Hierbij worden de huidige hardware onder de loep genomen om een draadloos systeem mogelijk te maken.

1 Polarographic DO Sensor

Een Dissolved Oxygen, DO, metingen worden gedaan aan de hand van een polarographic probe van Metroglass. Polarografische meting met membraan bedekte sondes is op het moment de meest gebruikte methode om zuurstof in een vloeistof te meten. Polarografische DO-sensoren zijn een typen elektrochemische sensoren voor opgeloste zuurstof. In een elektrochemische DO-sensor verspreid de zuurstof uit het monster over een zuurstofdoorlatend membraan in de sensor. Eenmaal in de sensor ondergaat de zuurstof een chemische reductiereactie, die een elektrisch signaal produceert. De gemeten reductiestroom is

evenredig aan de partiële zuurstofdruk in het medium van het membraan. Dit signaal kan worden afgelezen om de opgeloste zuurstof in de vloeistof te bepalen.

Wanneer een negatief elektrisch potentiaal die voldoende hoog is ten opzichte van een referentie-elektrode wordt toegepast op een kathode, wordt opgeloste zuurstof gereduceerd aan het kathodeoppervlak [1]. Voor een probe met een platinaum/zilver elektrode combinatie ligt de polarisatie spanning rond de -800mV en -500mV. De reactie die de kathode aangaat met de zuurstof is te zien in reactievergelijking 1 en 2 [2].



Als gevolg van de reactie tussen de zuurstof en de probe is er een daling van de zuurstofconcentratie rond het membraan in vergelijking met het externe medium. De snelheid van de zuurstofreductie hangt af van de partiële druk door het membraan in de meetkamer van de probe waar de zuurstof gereduceerd wordt tot hydroxide-ionen (OH^-) [3]. De elektronenstroom van de anode naar de kathode vertegenwoordigt het meetsignaal.

Volgens de gaswet van Henry is bij een evenwichtssituatie tussen de vloeistof en het gas, de concentratie van de gasmoleculen in de vloeistof recht evenredig aan de partiële druk. De formule voor de wet van Henry is uitgeschreven in formule 3. In deze formule is C de concentratie van gasmoleculen in de vloeistof, H de Henry-constante en p_g de partiële druk van de gas [4].

$$C = H * p_g \quad (3)$$

De recht evenredigheid tussen de stroom en de partiële zuurstofdruk $p(O_2)$ kan worden gebruikt om een formule op te stellen voor het bepalen van het zuurstofpercentage bij een bepaalde stroom meting.

Voor het uitlezen en verwerken van de polarographic DO-sensor meting is er door Geringe Applikon een systeem ontworpen die de analoge

meetwaardes digitaliseert en verwerkt tot een DO percentage. Dit systeem wordt de smartcable genoemd. De smartcable wordt gemonteerd op de DO-sensor en kan via een kabel worden verbonden met de biocontroller, wat de processen regelt in de bioreactor aan de hand van de sensor data.

De smartcable bevat een processor om de DO-sensor waarde via de ADC te kunnen aflezen en eens in de x seconde door te sturen naar de biocontroller. Op de biocontroller wordt een transceiver geplaatst om te communiceren met de sensor probe.

2 Energie verbruik

Systemen die werken op batterijen hebben een beperkte tijdsduur en wordt verwacht dat de accu worden opgeladen of vervangen zodra ze geen energie meer bevatten. Het streven is om de DO-sensor 28 dagen op een batterij te laten werken, dit is de gemiddelde duur van een test. Om de 28 dagen te kunnen realiseren moet het systeem low power worden gemaakt, waarbij rekening gehouden wordt dat de DO-sensor zelf altijd van spanning voorzien is.

Mocht het onderzoek langer dan 28 dagen duren en het is niet gewenst om tijdens de test de accu te vervangen kan er een optie worden gemaakt om het aan de hand van een kabel te communiceren met de biocontroller of de accu oplaadbaar te maken waarbij de test niet onderbroken hoeft te worden.

In tabel 1 worden vier eenheden met elkaar vergeleken om te kunnen bepalen welke accu geschikt is voor de AGV. Per accu wordt er gekeken naar het vermogen, het vermogen per kilogram, het vermogen met liter en vermogen per euro.

Tabel 1: Accu vergelijking

	Wh	Wh/kg	Wh/L	Wh/€	note
LifePo4	5.4	129.5	160.4	2.4	18650 [5]
NIMH	3	112.2	184.9	0.75	AA [6]
Li-Ion 1	4.7	180.0	226.1	0.7	18350 protected [7]
Li-Ion 2	12.1	285.8	357.1	4.1	18650 not protected [8]
NiZn	2.4	92.3	148.0	0.6	AA [9]

In het overzicht is te zien dat de Li-Ion 2 het meeste vermogen bevat per kilogram en per liter. Naast dat Li-Ion 2 per gewicht en inhoud het meeste vermogen bevat is het ook een van de goedkoopste. Bij Lead-acid krijg je het meeste vermogen voor je geld, het nadeel is echter dat het een erg zware en grootte accu is.

In het power budget, tabel 2, is het verbruik weergegeven van de huidige smartcable. Voor dit ontwerp was het verbruik van het systeem geen ontwerp criterium, omdat het gevoed wordt vanuit de biocontroller die is aangesloten op het lichtnet.

Tabel 2: Power budget van de bioreactor module

Power Budget Components	Maximum Power Consumption		power(Wh) 28 dagen	note
	voltage(V)	current(A)		
DO sensor	2.5	680n	1.14m	100% O2
RGB Led	3.3	20m	1.77 * 2	4% on 2x aanwezig
Microcontroller	3.3	standby - 200µ 80% active - 5m 20%	2.57	ATSAMD21
EEram	3.3	200µ	443.5µ	
Opamp	3.3	1.3m	2.88 * 2	LMP7716 2 channels
ADC	1.82	1m	1.22	
Regulator	3.7	1.6µ	3.98m	
SSN	3.3	1µ	2.22m	
Isolation	3.3			
total			10.22	

Zie in het power budget van de smartcable dat er een aantal componenten zijn die in verhouding tot de rest veel energie verbruiken.

De smartcable bevat verschillende componenten die veel energie verbruiken voor een systeem dat moet gaan werken op een batterij. Voor het draadloze smartcable ontwerp worden de componenten onder de loep genomen om het verbruik omlaag te brengen.

In het power budget zijn er drie componenten waarvan het verbruik ver boven de rest ligt. De componenten waarover gesproken wordt zijn: de RGB-Leds, de microcontroller en de opamps. Het eerste component dat aangepast zal worden zijn de RGB-led's. Het systeem wordt voorzien van low power led's in plaats van twee RGB-led.

Tabel 3: Power budget van de bioreactor module

Power Budget Components	Maximum Power Consumption		power(W) 28 dagen	note
	voltage(V)	current(A)		
DO sensor	2.5	680n	1.14m	100% O2
Led	3.3	2m	177m * 3	4% on 3x aanwezig
Microcontroller	3.3	standby - 200µ 80% active - 5m 20%	2.57	ATSAMD21
EEram	3.3	200µ	443.5µ	
Opamp	3.3	9.5µ	21.1m *2	LMP2232 2 channels
ADC	1.82	1m	1.22	
Regulator	3.7	1.6µ	3.98m	
SSN	3.3	1µ	2.22m	
Isolation	3.3			
total			4.19	

Draadloze communicatie gaat ten koste van een hoger stroomverbruik, voornamelijk vanwege het hoge energieverbruik tijdens gegevensoverdracht.

Het berekenen van de levensduur van de batterij op basis van het gemiddelde stroomverbruik van de sensor is een handige gids, maar het is slechts een deel van het verhaal. De werkelijke levensduur van een knooppcel wordt niet alleen beïnvloed door de grootte van de gemiddelde stroom, maar wordt ook nadelig beïnvloed door piekstroom. Herhaalde stroompieken van meer dan 15 mA verminderen de levensduur van de batterij aanzienlijk.

3 Telemetriesysteem

Om draadloos te kunnen communiceren tussen de bioreactor en de biocontroller is een telemetriesysteem nodig. Om te kunnen bepalen welke technologie het beste past voor het project is er onderzoek gedaan naar de verschillende manieren van draadloze communicatie.

Het telemetriesysteem wordt geïntegreerd in de DO probe om data te kunnen versturen naar een transceiver in de biocontroller. De twee systemen bevinden zich, in een doorsnede opstelling, in een straal 10 meter van elkaar vandaan en de afstand tussen de sensoren is ongeveer 2 centimeter. Ook moet er rekening gehouden worden met de datarate waarmee de sensoren maximaal mee gaan werken. In een lab kamer kunnen meerdere bioreactors en-controllers aanwezig zijn. Er moet rekening gehouden worden dat er sensoren

op het zelfde moment een datapakket kunnen versturen. De biocontrollen wordt voorzien van een transceiver module die de data kan ontvangen van meerdere probes. In een 3L bioreactor kunnen zes sensoren worden geplaatst zoals pH, temperatuur en DO. Tijdens de proof of concept wordt er gebruik gemaakt van de DO probe, zodra er met de DO probe betrouwbaar en veilig draadloos data verstuurd kan worden gevoed op een batterij zullen de andere sensoren ook worden voorzien van draadloze communicatie.

Als aan de probe is gesteld dat het 28 dagen aan moet kunnen staan op een batterij. Het is daarom belangrijk dat het systeem wordt ontworpen met ontwerp criteria low power

Tijdens het onderzoek zal met boven genoemde punten rekening gehouden worden voor het bepalen van de beste communicatie methode.

3.1 Bluetooth / Bluetooth low energy

Bluetooth is een methode om draadloos gegevens uit te wisselen tussen twee of meer apparaten, dit gebeurt met radiogolven bij een frequentie tussen 2.4GHz en 2.483GHz. Deze frequentie-band is een de frequenties die internationaal worden gebruikt voor de in de industrie, scientific en medische systemen(ISM). Aan de hand van dit netwerk kan er in een straal van 10-50 meter gecommuniceerd worden tussen systemen die mee doen in het netwerk. Voor Bluetooth wordt er gebruik gemaakt van IEEE 802.15.1 protocol waar een netwerk kan bestaan uit een Personal Area Network(PAN) of een Piconet. Bij een Piconet netwerk kan zijn er minimaal twee en maximaal acht bluetooth apparaten aanwezig. Elk apparaat biedt een uniek 48-bits adres van de IEEE 802-standaard(Institute of Electrical and Electronic Engineers), waarbij er een point-to-point of multipoint verbinding tot stand wordt gebracht. [10]

Bij het overwegen tussen Bluetooth en Bluetooth Low Energy, is het belangrijk om te praten over stroomverbruik. Bluetooth is oorspronkelijk ont-

worpen voor een continu data stream toepassingen. Dat betekent dat je op korte afstand veel data kunt uitwisselen.

Als we het hebben over Bluetooth Low Energy versus Bluetooth, is het belangrijkste verschil het lage energieverbruik van Bluetooth LE. Met een laag energieverbruik kunnen applicaties langer op een kleine batterij werken. Hoewel dit niet ideaal is om te telefoneren, is het van vitaal belang voor toepassingen die periodiek kleine hoeveelheden gegevens uitwisselen.

40 channels with 2 MHz spacing (3 advertising channels/37 data channels)

3.2 Wi-Fi

WiFi is een directe vervanging voor een bekende Ethernet-kabel en wordt in dezelfde situaties gebruikt om te voorkomen dat overal draden lopen. Het voordeel van WiFi is dat het verbinding kan maken met een bestaande netwerk-hub of router, wat betekent dat er geen pc aan hoeft te staan om toegang te krijgen tot een apparaat via wifi. Voor wifi wordt net als Bluetooth een IEEE 802.11 protocol gebruikt om te communiceren. In theorie kan met Wi-Fi in het 2,4 GHz-netwerk tot 11 Mbit/s worden overgedragen met een maximaal zendvermogen van 20 dBm.

3.3 ZigBee-module

XBee is een door Digi International geproduceerde module die voornamelijk wordt gebruikt als zendontvanger en ontvanger voor radiocommunicatie. Het protocol ondersteunt zowel peer-to-peer als point-to-multipoint netwerkcommunicatie draadloos met een snelheid van 250 kbits/s. XBee is een verzameling van draadloze communicatiemodules die gebruik maken van de IEEE 802.15.4 standaard. Deze modules zijn in staat om onderling een netwerk op te stellen en te communiceren via een routing-methode vergelijkbaar met IP-routers. Een voorbeeld van een XBee module is de XB3-24DMUM-J van Digi International. Deze module heeft met een zendvermogen van 8 dBm een maximaal bereik tot 1200 m in

line-of-sight configuratie en een maximaal bereik tot 60 m in een binnenomgeving. Het maximale stroomverbruik bij het zenden op dit vermogen is 40 mA op 3.3 V.

3.4 2.4 GHz-module

Ook biedt de nRF24L01+ een van de nRF24 modules een functie genaamd Multiceiver. Het is een afkorting voor Multiple Transmitters Single Receiver. De nRF24L01 is een draadloze transceivermodule, de module werkt net als Bluetooth en Wi-Fi bij een frequentie van 2,4 GHz, die onder de ISM-band valt. De modules kunnen bij efficiënt gebruik een afstand van 800 meter overbruggen [11].

nRF24 IC's gebruiken het Enhanced ShockBurst protocol (ESB) van Nordic Semiconductor, dit maakt low power communicatie en hoge prestaties mogelijk. Deze module heeft net als Bluetooth en Wi-Fi een maximaal zendvermogen van 20 dBm en verbruikt met zenden maximaal 12 mA bij een spanning van 3.3 V, en heeft een maximale communicatiesnelheid van 2 Mb/s [12].

3.5 LoRa

LoRa maakt langeafstandstransmissies mogelijk met een laag stroomverbruik. De technologie dekt de fysieke laag, terwijl andere technologieën en protocollen zoals LoRaWAN (Long Range Wide Area Network) de bovenste lagen afdekken. Het kan datasnelheden halen tussen 0,3 kbit/s en 27 kbit/s, In Europa is deze frequentie 868 MHz. Volgens de LoRa Development Portal kan het bereik van LoRa tot drie mijl (vijf kilometer). [13]

3.6 Infra-red

Infraroodcommunicatie is een eenvoudige draadloze communicatiemethoden en is een kosteneffectieve manier om beperkte hoeveelheden gegevens draadloos te verzenden. De golflengte van infrarood licht varieert tussen de 300 tot 430THz. Dit zijn ongeleide optische signalen zoals lasers en zijn unidirectional. IR light-emitting diodes

(LED) worden gebruikt om IR-signalen te verzenden, de LED wordt snel in- en uitgeschakeld voor gegevenscodering [14].

De het licht van de LED worden ontvangen door een Infrared Data Association apparaat, IrDA, dat is uitgerust met een siliciumfotodiode. Deze ontvanger zet de IR-pulsen om in een elektrische stroom voor verwerking. Omdat IR licht van een natuurlijke bron een lagere frequentie heeft dan een snel pulserend IrDA-sigitaal, kan de siliciumfotodiode het IrDA-sigitaal uit omgevings-IR filteren.

Een verbinding vindt altijd één op één plaats, meer dan twee apparaten kunnen niet gelijktijdig communiceren.

3.7 Afweging

Tabel 4: Wireless module afwegingstabel

type	data-rate bit/s	netwerktipe	vermogen sleep W	vermogen transmit W	bereik m
Bluetooth	2M	Point-to-point, Ster	1.5m	50m	100
BLE	1M	Ster, Mesh	6u	15m	100
Wi-Fi	10-100M	Point-to-point, Ster	10u	350m	100
ZigBee	20k	Mesh	5u	75m	50
nRF24	1-2M	Ster, Mesh	3u	25m	800
LoRa	0.3-20k	Ster	165n	100m	5k
Infrared	1-4M	Point-to-point	0.66u	400m	1

Voor het systeem gaan we er vanuit dat een datapakket vanuit de Wisb naar de biocontroller 64 bytes is. Het systeem moet een keer per seconden de mogelijkheid hebben om een meting kunnen uitvoeren en te versturen naar de biocontroller. Er wordt mogelijk een bericht vanuit de biocontroller terug gestuurd naar de Wisb bij het ontvangen van een goedgekeurd bericht, voor dit bericht rekenen we met 32 bytes.

Per seconden wordt er een meting gedaan waarbij er 640 bits verstuurd worden naar en van de biocontroller. Vanuit een transceiver op de biocontroller moeten meerdere sensoren gekoppeld kunnen worden die de zelfde datarate van 640bits/s

hebben. Voor het bepalen van de benodigde datarate wordt er aangenomen dat het er 6 sensoren met de transceiver gekoppeld kunnen worden, dit is de maximale hoeveelheid sensoren die op de topplate van de 3 liter bioreactor geplaatst kunnen worden. Omdat een er met RF en IrDa maar een module per keer uitgelezen kan worden is er een datarate nodig van minimaal 3.9 kbits/s. Mochten er meerdere modules per keer "praten" zal het signaal niet uitgelezen kunnen worden door de receiver.

Tabel 5: Wireless module afwegingstabel

data-rate bit/s	netwerktipe	vermogen W	bereik m
4.0k	Ster, Mesh	1	10

Bluetooth - ζ verbruik te hoog onnodig hoog datarate

BLE - ζ niks aan op te merken

Wi-Fi - ζ te hoog verbruik onnodig hoge datarate niet gemaakt voor low power lastiger te implementeren.

ZigBee - ζ te grote module, smartcable moet uiteindelijk weer compact gemaakt kunnen worden. De grote van de ZigBee modules is een beperking daarvoor.

nRF24 - ζ prima

LoRa - ζ je mag per device maar 1% van de tijd aan staan met een datarate van 10kbit/s kan er dus 100bit/s verstuurd worden per device moet er 640bits/s verstuurd kunnen worden.

infrared - ζ Aangezien Infra-red niet geschikt is voor communicatie op de benodigde afstand en het feit dat het in line-of-sight moet staan wordt deze optie niet gebruikt voor dit project.

Net als bij elke manieren van draadloze communicatie zijn enkele nadelen aan Bluetooth. Het eerste benoemings-waardig punt is dat het batterijvermogen van het systeem afneemt. De technologie in Bluetooth is in de afgelopen jaren sterk verbeterd om het low power te maken. Naarmate de

technologie (en batterijtechnologie) verder verbeterd zal het probleem van battery-drain minder groot worden.

Naast het verbruik van de een Bluetooth module is het bereik van de methode vrij beperkt, meestal is dit rond de 10 meter. Het bereik wordt ook nadelig beïnvloed door obstakels zoals muren, objecten, vloeren of plafonds.

3.8 RF Channel Frequency

Een zendontvangermodule zendt en ontvangt gegevens op een bepaalde frequentie die Channel wordt genoemd. Om twee of meer zendontvangermodules met elkaar te laten communiceren, moeten ze zich ook op hetzelfde kanaal bevinden. Dit kanaal kan elke frequentie in de 2,4 GHz ISM-band zijn of om preciezer te zijn, het kan tussen 2.400 en 2.525 GHz zijn.

Een kanaal van nRF24 neemt een bandbreedte van minder dan 1 MHz in beslag. Dit geeft ons 125 mogelijke kanalen met een tussenruimte van 1 MHz

Voor een BLE is de bandbreedte rond de 2 MHz, dit geeft de mogelijkheid voor 62 kanalen.

4 Signal filtering

In het huidige ontwerp van de smartcable worden er rc-filters toegepast voor een frequency cutoff

van 1.6Hz te maken.

Er zijn een aantal aspecten waar passieve filters aan tekortkomen: ze worden sterk beïnvloed door de parameters van het elektriciteitsnet. De systeemimpedantiewaarde en de hoofdfrequentie van de resonantiefrequentie veranderen vaak met de werkomstandigheden; de frequentieband van de harmonische filtering is ook smal en alleen de hoofdfrequentie kan worden uitgefilterd. Versterk vanwege de parallelle resonantie enkele harmonischen van de orde; coördinatie tussen filtering en blindvermogencompensatie en spanningsregeling is moeilijk; naarmate de stroom die door het filter vloeit stijgt, kan de apparatuur overbelast raken; groot gewicht en volume vereisen meer ruimte; slechte loopstabiliteit en andere tekortkomingen. Dat is de reden waarom actieve filters met betere algehele prestaties steeds meer toepassingen krijgen.

Er wordt onderzocht of een actief filter toegepast kan worden om het DO-signaal te filteren. Vergeleken met passieve filters hebben actieve filters veel voordelen: snelle respons, geluid controleerbare prestaties; adaptieve functie, dynamische trasering en compensatie voor hogere harmonischen van het systeem, hoge stabiliteit, onafhankelijkheid voor de systeemimpedantie-invloed, vermogen om het optreden van resonantie, flikkeronderdrukking en reactieve componenten voor het systeem te voorkomen.

Literatuurlijst

- [1] Hamilton, "Polarographic Dissolved Oxygen Sensors ," 2022. [Online]. Available: <https://www.hamiltoncompany.com/process-analytics/sensors/dissolved-oxygen/polarographic-dissolved-oxygen-sensors>
- [2] V. Linek, "Measurement of oxygen by membrane-covered probes: Guidelines for Applications in Chemical and Biochemical Engineering," 1988.
- [3] Mettler Toledo, "A Guide to Oxygen Measurement, Theory and Practice of Oxygen Applications," 2016.
- [4] Krystianne Yamuni, "Henry's Law ," 2021. [Online]. Available: https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry

- [5] NKON, “JGNE 18650 1800mAh LifePO4.” [Online]. Available: <https://www.nkon.nl/jgne-18650-1800mah-5-4a-lifepo4.html>
- [6] —, “NiMH oplaadbare batterij.” [Online]. Available: <https://www.nkon.nl/4-aa-eneloop-pro-in-sliding-blister-2500.html>
- [7] —, “li-ion EagleTac 18350 1300mAh (protected).” [Online]. Available: <https://www.nkon.nl/rechargeable/li-ion/eagletac-18350-1300mah-protected-10a.html>
- [8] —, “Li-ion no protected circuit.” [Online]. Available: <https://www.nkon.nl/rechargeable/li-ion/18650-size/lg-inr18650-f1l-3350mah-4-8a.html>
- [9] —, “AA Batterij - Alkaline Ansmann NiZn.” [Online]. Available: <https://www.nkon.nl/4aa-anmann-nizn-batteries.html>
- [10] WatElectronics, “Different Types of Wireless Communication Technologies,” 2021. [Online]. Available: <https://www.watelectronics.com/different-types-wireless-communication-technologies/>
- [11] Nordic Semiconductor ASA, “Single chip 2.4 GHz Transceiver nRF24L01,” 2006.
- [12] Digi-Key: Patrick Mannion, “Comparing Low-Power Wireless Technologies,” 2017. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/comparing-low-power-wireless-technologies>
- [13] TechOpedia, “Datasheet: RF LoRa transceiver Mudule RF-LoRa-868-SO,” 2021.
- [14] —, “Infrared (IR),” 2016. [Online]. Available: <https://www.techopedia.com/definition/630/infrared-ir>