



HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

FACULTEIT WETENSCHAPPEN

Constructie en kalibratie van een toestel voor het meten van de luchtkwaliteit aan boord van zeeschepen

Lukas Van der Borgh

Scriptie voorgedragen tot het behalen
van de graad van
Master in de Nautische Wetenschappen

Promotor: Kapt. dr. W. Jacobs
Co-promotor: dr. O. Schalm
academiejaar: 2019 – 2020

WOORD VOORAF

Deze thesis behandelt het bouwen van een gasmeetinstrument en de volledige kalibratie hiervan. De gassen die ik meet zijn: zwaveldioxide, stikstofdioxide, ozon en ten slotte koolstofmonoxide. Het onderwerp boeit me sterk wegens de opkomende aandacht die luchtkwaliteit krijgt en wegens de technische aspecten ervan. Het moeilijkste in dit project was voor mij persoonlijk het pure programmeerwerk. Ik heb nooit les gehad over programmeren in Python en heb hier veel moeite en tijd in gestoken, alvorens ik metingen kon uitvoeren. Voor de programmering bedank ik mijn kotgenoot Lode Stryckers om de vele vragen bij Python steeds met veel detail te beantwoorden. Voor de dataverwerking van al de gemeten signalen kon ik rekenen op de ruime inzichten van dr. Schalm. Voor de coördinering van het geheel en om alles in perspectief te blijven zien, wil ik graag kapt. dr. Jacobs via deze weg bedanken.

Ten slotte bedank ik mijn ouders om mij tijdens deze intense studieperiode altijd te hebben gesteund.

SAMENVATTING

In deze thesis wordt de constructie alsook de kalibratie van een luchtkwaliteitsmeter weergegeven en toegepast. De constructie gebeurt in grote lijnen via een metalen kast, een Raspberry Pi, een sensorbord met sensoren en een gereguleerde voeding. De luchtkwaliteitsmeter heeft de naam Seacanairy gekregen. Deze naam verwijst via 'sea' naar de zee, daar het gemaakt is om aan boord van zeeschepen te gebruiken. De 'canairy' verwijst naar een kanarie en naar lucht. Kanaries waren de eerste luchtkwaliteitsmeters van de mensheid in mijnen. De 'air' verduidelijkt nog eens extra dat het om luchtkwaliteit gaat. Eens de Seacanairy gebouwd was, moest deze gekalibreerd worden. De omzetting van de gemeten voltages naar de gasconcentraties in ppb wordt volledig weergegeven. Daar alleen de kalibratie van de producent niet voldoende toereikend was, zijn de kalibratie-algoritmen bewerkt zodat deze realistischer zijn. De volledige uitwerking van de kalibratie is ten slotte in een kalibratiedocument verwerkt in Excel. Via dit bestand is het mogelijk een snelle en accurate kalibratie uit te voeren en de meetresultaten te analyseren.

ABSTRACT

In this thesis the construction and calibration of an air quality measurement system is described and explained. The construction happens broadly via a metal box, a Raspberry Pi, a sensor board with sensors and a regulated power supply. The air quality measurement system has been named Seacanairy. The name refers to the sea, since it is specifically built to operate on board of seagoing ships. 'Canairy' refers to a canary and to air. Canaries were in fact the first air quality measuring devices used by mankind in the mining industry. The 'air' emphasizes it is about air quality. Once the Seacanairy was completely built, it had to be calibrated. The conversion of measured voltages to gas concentrations in ppb is fully explained. Since only the producer's calibration was not sufficient, the calibration algorithms have been modified to be more realistic. The complete elaboration of the calibration is included in an Excel file. Through this file it is possible to execute a fast and accurate calibration on the measurement results.

INHOUDSTAFEL

<i>Woord vooraf</i>	<i>ii</i>
<i>Samenvatting</i>	<i>iv</i>
<i>Abstract</i>	<i>vi</i>
<i>Lijst van figuren</i>	<i>xiv</i>
<i>Lijst van tabellen</i>	<i>xviii</i>
<i>Lijst van afkortingen</i>	<i>xx</i>
<i>Verklarende woordenlijst</i>	<i>xxii</i>
<i>Inleiding</i>	<i>1</i>
1 Achtergrond	3
1.1 Stikstofdioxide	3
1.2 Ozon	5
1.3 Zwaveldioxide	7
1.4 Koolstofmonoxide	9
1.5 Tabel met maximale concentraties van de 4 gassen	11
1.6 Elektrochemische sensor	12
1.6.1 Introductie	12
1.6.2 Constructie	13
1.7 Gereguleerde voeding	16
1.8 Analooq Digitaal Converter	19

2	<i>Constructiemethode: hardware</i>	21
2.1	De Seacanairy	21
2.2	Metalen kast	24
2.3	Schermbord	28
2.4	Dominostekker	30
2.5	Sensorvoeding	32
2.6	Bedrading	34
2.6.1	Aansluitingen	37
2.7	Raspberry Pi	38
2.8	Analoog digitaal convertor	40
2.8.1	Specificaties	40
2.9	NO2-A43F	42
2.10	OX-A431	44
2.10.1	Eigenschappen	45
2.11	SO2-A4	46
2.11.1	Eigenschappen	47
2.12	CO-A4	48
2.13	Sensorbord	50
2.13.1	Temperatuursensor	52
3	<i>Constructiemethode: software</i>	53
3.1	Pythoncode voor meting	53
3.1.1	Programma starten	57
3.2	Code voor extern beeldscherm	58
3.3	Teamviewer	59
3.3.1	Stappenplan	60
3.4	Google drive	63
3.4.1	Stappenplan data opslaan in google drive als Excel bestand	63
3.5	Schermbord van de Seacanairy vergrendelen	67

4	Algemene Kalibratie.....	69
4.1	Gassensoren	70
4.1.1	Bepaling van de parameters	71
4.1.2	Verantwoording algoritmes	78
4.2	Kalibratie temperatuursensor	81
5	Eerste kalibratie	83
5.1	NO₂-A43F.....	83
5.1.1	Bepaling electronic offset WE en AE.....	83
5.1.2	Bepaling sensor zero air en sensitiviteit (WE ₀ , AE ₀ en S)	85
5.1.3	Berekening	85
5.1.4	Voorbeeld	86
5.2	OX-A431	88
5.2.1	Bepaling electronic offset WE en AE.....	88
5.2.2	Bepaling sensor zero air en sensitiviteit (WE ₀ , AE ₀ en S)	89
5.2.3	Berekening	90
5.2.4	Voorbeeld	91
5.3	SO₂-A4	93
5.3.1	Bepaling electronic offset WE en AE.....	93
5.3.2	Bepaling sensor zero air en sensitiviteit (WE ₀ , AE ₀ en S)	95
5.3.3	Berekening	95
5.3.4	Voorbeeld	96
5.4	CO-A4	98
5.4.1	Bepaling electronic offset WE en AE.....	98
5.4.2	Bepaling sensor zero air en sensitiviteit (WE ₀ , AE ₀ en S)	100
5.4.3	berekening	100
5.4.4	Voorbeeld	101

6	<i>Tweede kalibratie</i>	103
6.1	NO₂-A43F	104
6.1.1	Referentieconcentratie	104
6.1.2	Metingen	105
6.2	OX-A431	109
6.2.1	Referentieconcentratie	109
6.2.2	Metingen	110
6.3	SO₂-A4	114
6.3.1	Referentieconcentratie	114
6.3.2	Metingen	115
6.4	CO-A4	121
6.4.1	Referentieconcentratie	121
6.4.2	Metingen	122
7	<i>Volledige kalibratie</i>	127
7.1	NO₂-sensor	127
7.1.1	Algoritme 1 (aangeraden)	127
7.1.2	Algoritme 3 (alternatief)	127
7.2	OX-sensor	128
7.2.1	Algoritme 1 (alternatief)	128
7.2.2	Algoritme 3 (aangeraden)	128
7.3	SO₂-sensor	129
7.3.1	Algoritme 1 (alternatief)	129
7.3.2	Algoritme 3 (alternatief)	129
7.3.3	Algoritme 4 (aangeraden)	129
7.4	CO-sensor	130
7.4.1	Algoritme 1 (aangeraden)	130
7.4.2	Algoritme 4 (alternatief)	130
7.5	Kalibratiedocument Excel	131

8	Meetresultaten	133
8.1	Temperatuur	134
8.2	Stikstofdioxide	135
8.3	Ozon.....	137
8.4	Zwavedioxide	138
8.5	Koolstofmonoxide	139
8.6	Discussie.....	140
9	Betrouwbaarheid van het systeem	141
9.1	Correlatie tussen de Algoritmen	141
9.1.1	Stikstofdioxide	142
9.1.2	Ozon.....	143
9.1.3	Zwavedioxide	144
9.1.4	Koolstofmonoxide.....	146
9.2	Ijking	147
10	Besluit	149
11	Bibliografie.....	151
	Lijst van bijlagen.....	157
	Bijlage A	159

LIJST VAN FIGUREN

Figuur 1: Stikstofdioxide molecule	3
Figuur 2: Ozon molecule	5
Figuur 3: Zwaveldioxidemolecule	7
Figuur 4 : Koolstofmonoxide molecule	10
Figuur 5: Elektrochemische gas sensor	15
Figuur 6: Schema van gereguleerde voeding	16
Figuur 7: Afbeelding van een transformator	17
Figuur 8: ADC schema	19
Figuur 9: ADC grafiek	19
Figuur 10: Foto van de Seacanairy	22
Figuur 11: Foto van de Seacanairy	23
Figuur 12: Foto van opening voor dominostekker	25
Figuur 13: Foto van opening voor sensoren	26
Figuur 14: Tekening metalen kast in Autocad	27
Figuur 15: Foto van scherm	28
Figuur 16: Foto van de dominostekker	30
Figuur 17: Foto van sensorvoeding	32
Figuur 18: Bedradingsschema	35
Figuur 19: Bedrading van de opstelling	36
Figuur 20: Raspberry Pi	38
Figuur 21: Pindigram RPi 3B+	39
Figuur 22: Pi-16ADC	40
Figuur 23: Afmetingen NO ₂ -sensor	42
Figuur 24: Afmetingen O ₃ -sensor	44
Figuur 25: Afmetingen O ₃ -sensor	46
Figuur 26: Afmetingen CO-sensor	48
Figuur 27: Afmetingen sensorbord	50
Figuur 28: Temperatuursensor locatie	50
Figuur 29: Temperatuursensor	52

Figuur 30: Code deel 1	54
Figuur 31: Code deel 2	55
Figuur 32: Code deel 3	56
Figuur 33: Schermafbeelding programma starten stap 1	57
Figuur 34: schermafbeelding programma starten stap 2	57
Figuur 35: Code voor scherm	58
Figuur 36: Schermafbeelding teamviewer stap 1	60
Figuur 37: Schermafbeelding teamviewer stap 2	61
Figuur 38: Schermafbeelding teamviewer stap 3	61
Figuur 39: Schermafbeelding teamviewer stap 4	62
Figuur 40: Schermafbeelding data opslaan stap 1	63
Figuur 41: Schermafbeelding data opslaan stap 2	64
Figuur 42: Schermafbeelding data opslaan stap 3	64
Figuur 43: Schermafbeelding data opslaan stap 4	65
Figuur 44: Terminalscherf vergrendel commando	68
Figuur 45: Vergrendelfunctie Pi	68
Figuur 46: Schema van parameters	71
Figuur 47: Multimeter probe aan een sensorkabel	72
Figuur 48: Multimeter probe aan aarding	72
Figuur 49: Uitlezing op multimeter	73
Figuur 50: Verstoord elektronisch signaal	74
Figuur 51: 4 algoritmes tabel 1 van producent	78
Figuur 52: NO ₂ -sensor WE electronic offset	84
Figuur 53: NO ₂ -sensor AE electronic offset	84
Figuur 54: OX-sensor WE electronic offset	88
Figuur 55: OX-sensor AE electronic offset	89
Figuur 56: SO ₂ -sensor WE electronic offset	93
Figuur 57: SO ₂ -sensor AE electronic offset	94
Figuur 58: CO-sensor WE electronic offset	98
Figuur 59: CO-sensor AE electronic offset	99
Figuur 60: NO ₂ -concentratie	104
Figuur 61: Grafiek metingen NO ₂ (1)	105

Figuur 62: Grafiek metingen NO ₂ (1) gecorrigeerd	106
Figuur 63: Grafiek metingen NO ₂ (3)	107
Figuur 64: Grafiek metingen NO ₂ (3) gecorrigeerd	108
Figuur 65: O ₃ -concentratie	109
Figuur 66: Grafiek metingen O ₃ (1)	110
Figuur 67: Grafiek metingen O ₃ (1) gecorrigeerd	111
Figuur 68: Grafiek metingen O ₃ (3)	112
Figuur 69: Grafiek metingen O ₃ (3) gecorrigeerd	113
Figuur 70: SO ₂ -concentratie	114
Figuur 71: Grafiek metingen SO ₂ (1)	115
Figuur 72: Grafiek metingen SO ₂ (1) gecorrigeerd	116
Figuur 73: Grafiek metingen SO ₂ (3)	117
Figuur 74: Grafiek metingen SO ₂ (3) gecorrigeerd	118
Figuur 75: Grafiek metingen SO ₂ (4)	119
Figuur 76: Grafiek metingen SO ₂ (4) gecorrigeerd	120
Figuur 77: CO-concentratie	121
Figuur 78: Grafiek metingen CO (1)	122
Figuur 79: Grafiek metingen CO (1) gecorrigeerd	123
Figuur 80: Grafiek metingen CO (4)	124
Figuur 81: Grafiek metingen CO (4) gecorrigeerd	125
Figuur 82: Voorbeeld gasconcentratiegrafiek	131
Figuur 83: Voorbeeld kalibratiedocument	132
Figuur 84: Grafiek temperatuur	134
Figuur 85: Grafiek stikstofdioxide	136
Figuur 86: Grafiek ozon	137
Figuur 87: Grafiek zwaveldioxide	138
Figuur 88: Grafiek koolstofmonoxide	139
Figuur 89: Grafiek correlatie algoritme 1 en 3	142
Figuur 90: Grafiek correlatie algoritme 1 en 3	143
Figuur 91: Grafiek correlatie algoritme 1 en 3	144
Figuur 92: Grafiek correlatie algoritme 1 en 4	145
Figuur 93: Grafiek correlatie algoritme 1 en 4	146

LIJST VAN TABELLEN

Tabel 1: Grens- en advieswaarden volgens WGO	11
Tabel 2: Grens- en advieswaarden WGO in ppm en ppb	11
Tabel 3: Aansluitingen	37
Tabel 4: Specificaties ADC	41
Tabel 5: Eigenschappen NO ₂ -sensor	43
Tabel 6: Eigenschappen O ₃ -sensor	45
Tabel 7: Eigenschappen SO ₂ -sensor	47
Tabel 8: Eigenschappen CO-sensor	49
Tabel 9: Geschikte sensorplaatsen op bord	51
Tabel 10: Algemene parameters sensoren	70
Tabel 11: Metingen electronic offset multimeter	75
Tabel 12: Kalibratiedocument sensor	76
Tabel 13: Gainwaarden	77
Tabel 14: Algoritme tabel 2 van producent	79
Tabel 15: Correctiefactoren tabel 3 van producent	80
Tabel 16: Kalibratie temperatuursensor	81
Tabel 17: NO ₂ -sensor kalibratie document	85
Tabel 18: Voorbeeldwaarden NO ₂ -sensor	86
Tabel 19: OX-sensor kalibratie document	89
Tabel 20: Voorbeeldwaarden OX-sensor	91
Tabel 21: SO ₂ -sensor kalibratie document	95
Tabel 22: Voorbeeldwaarden SO ₂ -sensor	96
Tabel 23: CO-sensor kalibratie document	100
Tabel 24: Voorbeeldwaarden CO-sensor	101
Tabel 25: Metadata tweede kalibratie	133

LIJST VAN AFKORTINGEN

- ADC= Analooq Digitaal Convertor
- AE= Auxiliary Electrode
- $AE_e = AE_{0,e}$ Elektronische offset van de AE
- AE_u =Raw data van de AE
- $AE_0 = AE_{0,s}$ Offset van de sensor in zuivere lucht op de AE
- CSV= Comma-separated values
- GND= Aarding
- MIPI CSI= Mobile Industry Processor Interface Camera Serial Interface
- MIPI DSI= Mobile Industry Processor Interface Display Serial Interface
- mm= millimeter
- mV= millivolt
- ppm= parts per million =deeltjes per miljoen deeltjes
- ppb= parts per billion = deeltjes per miljard deeltjes
- SN= Signaal
- V= Volt
- VIN= Ingaande voedingsspanning
- VMM= Vlaamse Milieumaatschappij
- WE= Working Electrode
- WE_c = Gecorrigeerde waarde van de WE
- $WE_e = WE_{0,e}$ Elektronische offset van de WE
- $WE_0 = WE_{0,s}$ Offset van de sensor in zuivere lucht op de WE
- WGO= Wereld Gezondheidsorganisatie

VERKLARENDE WOORDENLIJST

- Drift=

Verschuiving van het elektronisch signaal bij een bepaalde concentratie doorheen de jaren.

- Hydrofoob=

Waterafstotend.

- Kruissensitiviteit=

Proces waarbij een gassensor gevoelig is voor meerdere gassen buiten het doelgas.

- Moving Average=

Berekening waarbij van een bepaalde hoeveelheid parameters het gemiddelde genomen wordt. Deze groep parameters schuift altijd verder op.

- Nul drift=

Hoeveel de elektronische nulwaarde verschuift doorheen de jaren.

- Poreus=

De mate waarin iets lucht- of water doorlaatbaar is.

- Respiratoir=

Met betrekking tot de ademhaling.

- Responstijd=

Tijd nodig om een verandering in concentratie waar te nemen.

- Sensitiviteit=

Minimumwaarde waarbij een verandering in gasconcentratie wordt weergegeven.

INLEIDING

De scheepvaart is de ruggengraat van onze economie en is het antwoord om een globale economie te kunnen ondersteunen. Zelfs in tijden van corona is deze sector nauwelijks afgezwakt en gezapig blijven doorgaan. De scheepvaart heeft in se zeer veel positieve aspecten en ons leven zou er heel wat anders uitzien moest dit wegvallen. Aan deze medaille is echter wel een keerzijde die iets donkerder is en dewelke bij het grote publiek minder gekend is. Een groot containerschip van 400m lang en 60m breed verbruikt ongeveer 150 ton aan brandstof per dag. Om een beeld te scheppen bij wat 150 ton is, een grote tanktrailer die men regelmatig op de snelweg ziet rijden, kan 30 ton brandstof vervoeren. Dit betekent dat per dag dat dergelijk containerschip vaart de volledige inhoud van 5 tanktrailers verbrand worden door de hoofdmotor. Met de kennis dat deeltjes nooit verloren gaan maar enkel omgezet worden naar een andere vorm redeneert men verder. Al de vloeibare brandstof die door de verbrandingsmotor gaat verdwijnt niet plotseling. Deze brandstof wordt voor het grootste deel in gas omgezet. Dat wil zeggen dat er per dag ongeveer 150 ton aan verbrandingsgassen worden uitgestoten door zo een groot containerschip. Tot op heden is het onderzoek naar de luchtkwaliteit binnen en rondom de accommodatie van een zeegaand schip schaars. Dit komt enerzijds door het feit dat schepen de hele wereld afreizen en men de meetinstallatie misschien pas na een jaar terug kan ophalen op de locatie waar men ze aan boord gezet heeft. Hierbij weet men nadien pas of de metingen succesvol waren. Anderzijds is een schip een dynamisch gegeven en moet dergelijke gevoelige apparatuur veilig kunnen worden opgeborgen en vastgemaakt. De meetomstandigheden verschillen doorheen de tijd, daar een schip vandaag in Alaska kan vertrekken bij -10°C en volgende week al ten anker liggen voor Panama bij een temperatuur van 30°C en een hoge luchtvochtigheid.

Het onderzoeken van de luchtkwaliteit aan boord van een zeeschip is een zeer complex gegeven door de grote dynamica in het leven van een schip. De centrale onderzoeksvraag in deze thesis luidt als volgt:

- Hoe bouwt men een luchtkwaliteitsmeter voor gebruik aan boord van zeeschepen?

Enkele deelonderzoeksvragen die de hoofdonderzoeksvraag helpen beantwoorden:

- Hoe kan men vanop afstand controleren of het toestel nog goed werkt?
- Hoe verloopt de kalibratie van dit systeem?
- Hoe maakt men het meettoestel zeewaardig?

Het onderzoek heeft vooral een empirische vorm gekregen met veel vallen en opstaan. In de thesis wordt gestart met de doelgassen die gemeten worden te beschrijven, alsook de werkingsprincipes van de elektronische componenten. Daarna volgt een complete beschrijving van de constructiemethode. De constructie wordt volledig ontbonden per component en iedere component wordt apart beschreven. De werkingsprincipes en specificaties worden ook meegegeven. Daarop volgt de kalibratie van de Seacanairy. Deze is zeer complex en uniek per opstelling. De specifieke algoritmen worden beschreven en uitgelegd. De constanten en variabelen die men in de algoritmen moet gebruiken, worden bepaald. Vervolgens wordt verwezen naar het kalibratiedocument waar de volledige kalibratie geprogrammeerd staat via formules. Daarna worden de meetresultaten die gemeten werden tijdens een experiment beschreven en besproken. Ten slotte wordt de betrouwbaarheid van het toestel onderzocht.

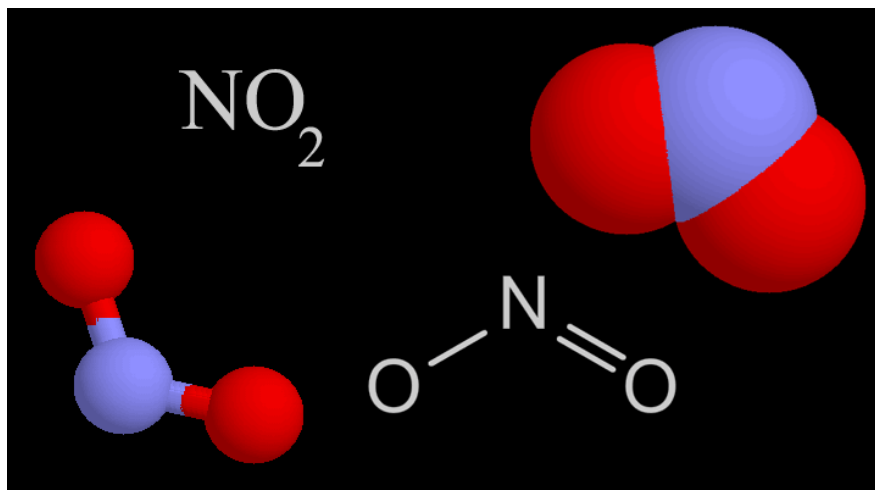
1 ACHTERGROND

Lucht is een mengsel van vele gassoorten. Een aantal van deze gassen hebben een nefast effect op de menselijke gezondheid. Het zijn deze gassen die de luchtkwaliteit bepalen. Om deze luchtkwaliteit te kunnen inschatten, werd er gekozen om de concentratie van 4 gassen te meten: zwaveldioxide, ozon, stikstofdioxide en koolstofmonoxide. Deze gassen kan men verwachten in de omgeving van een verbrandingsmotor of in de buurt van een slecht geventileerde ruimte. (VMM, z.d.-a)

In dit hoofdstuk worden de werkingsprincipes van de ADC, gereguleerde voeding en de elektrochemische sensoren eveneens besproken.

1.1 STIKSTOFDIOXIDE

Stikstofdioxide is een bruinrood gas dat toxische eigenschappen heeft en een sterke geur begrijpt. Op figuur 1 kan men de molecule ervan aanschouwen. De rode bollen vormen de zuurstofatomen en de blauwe bol het stikstofatoom.



Bron: UCAR centre for science education (UCAR, z.d.)

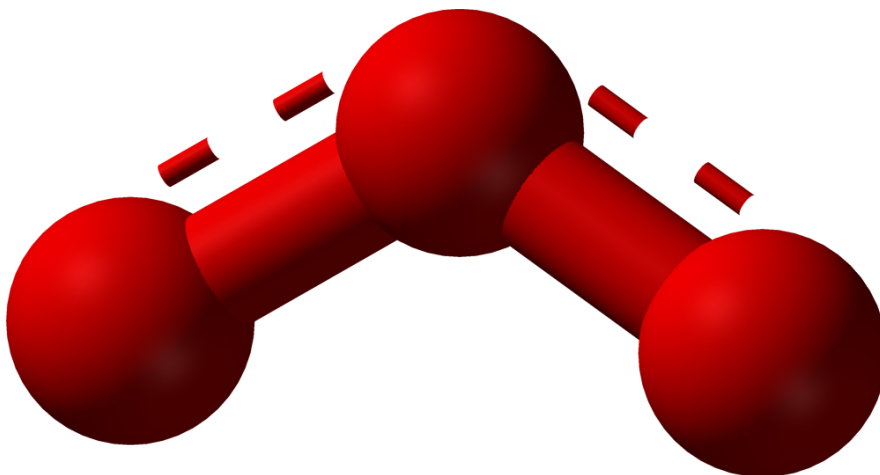
FIGUUR 1: STIKSTOFDIOXIDE MOLECULE

Stikstofdioxide ontstaat vooral uit stikstofmonoxide (NO). NO wordt voornamelijk gevormd bij de verbranding van fossiele brandstoffen op hoge druk en hoge temperatuur. Bij deze beschrijving kan men onmiddellijk aan scheepsmotoren denken daar dit een plaats is waar fossiele brandstoffen op hoge temperatuur worden verbrand. Dit stikstofmonoxide is een kleurloos en geurloos gas dat bijna geen schadelijke gevolgen heeft voor de mens.

Het probleem is echter, dat stikstofmonoxide na zijn ontstaan wordt omgevormd via chemische reacties met ozon en zuurstof tot stikstofdioxide. Het onschadelijke monoxide wordt dus vrij snel omgezet naar het toxische dioxide (VMM, 2017). De gevolgen van dit gas op de menselijke gezondheid zijn vooral op respiratoir niveau. Zo zal dit gas bij verhoogde concentraties ontstekingen veroorzaken op de luchtwegen en symptomen zoals verkoudheden, longontsteking, hoesten en verminderde immuniteit vertonen. Mensen die leiden aan astma zijn gevoeliger voor dit gas en kunnen frequentere, alsook hevigere aanvallen krijgen bij aanhoudende verhoogde concentraties. Het kan voorvallen dat een persoon geen symptomen vertoont maar dan nog zal deze sinds de blootstelling aan de hogere concentratie een verhoogde kans hebben op respiratoire aandoeningen (Australian Government Department of the environment and energy, 2005; United States Environmental Protection Agency, 2016). De advieswaarden van de Wereld Gezondheidsorganisatie (WGO) bedragen voor één jaar continue blootstelling maximaal $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ofwel 0,021 ppm. De maximale toegelaten waarde voor één uur bedraagt $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ofwel 0,105 ppm (VMM, z.d.-b)(Ricardo, 2014). Bij de keuze van sensoren moet gelet worden dat het meetbereik minstens start aan 0,105 ppm en liefst lager. Stikstofdioxide oefent niet alleen een negatieve invloed uit op de mens maar ook op de natuur. Zo vormt dit gas een belangrijk onderdeel van zure regen. Zure regen tast vegetatie, gebouwen alsook monumenten aan en kan hierbij voor grote schade zorgen (United States Environmental Protection Agency, 2017).

1.2 OZON

Ozon is een enkelvoudig gas gemaakt van het element zuurstof. In vergelijking met zuurstofgas bestaat het uit drie zuurstofatomen in plaats van twee (figuur 2). Ozon is een gas met lichtblauwe kleur en heeft een typische, stekende geur.



FIGUUR 2: OZON MOLECULE

Bron: (Wikipedia, z.d.)

Ozon is geen rechtstreeks product uit de verbranding van stookolie. Het is een gas dat ontstaat door te reageren met stikstofoxiden. Deze oxiden vormen wel een product uit de verbranding van stookolie aan boord van schepen en in de industrie (Zhang, Lei, Tie, & Hess, 2004). De transportsector is verantwoordelijk voor 5% van de hoeveelheid ozon over het Europese vasteland en zelfs tot 30% boven de Middellandse Zee. De scheepvaart is verantwoordelijk voor 95% van alle transportgerelateerde ozon (Tagaris, Stergiou, & Sotiropoulou, 2017).

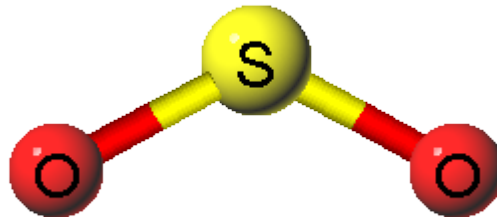
Astmapatiënten, mensen die buitenwerken (zoals zeevarenden), kinderen en bejaarden lopen het meeste risico op gevolgen na het inhaleren van ozon.

Ozon kan de longspieren van luchtwegen doen samenknijpen, waardoor het moeilijk wordt om diep in en uit te ademen. Als een persoon dit gas heeft ingeademd, zal deze een pijnlijke keel krijgen. Ozon zal ziektes zoals astma, chronische bronchitis en longemfyseem erger maken. Zelfs als de symptomen verdwijnen, kunnen er blijvende gevolgen zijn zoals COPD (US EPA, 2015). Ozon heeft dus enkel respiratoire aandoeningen tot gevolg.

De maximale concentratie waarmee een persoon in contact mag komen gedurende 8 uur per dag is $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ of 0,05 ppm (VMM, z.d.-c)(Ricardo, 2014). Op het moment dat een persoon in contact gekomen is met meer dan 5 ppm ozon, bevindt deze zich in levensgevaar ("TLV and IDHL", 2019). Dat wilt zeggen dat een ozon sensor minimaal 0,05 ppm moet kunnen meten, om van nut te zijn aan boord van schepen.

1.3 ZWAVELDIOXIDE

Zwavedioxide (SO_2) is een kleurloos gas met een specifieke geur. Het ruikt namelijk naar een aangestoken lucifer. Zwavedioxide bestaat uit twee zuurstofatomen en één zwavelatoom (figuur 3).



FIGUUR 3: ZWAVELDIOXIDEMOLECULE

Bron: (Madhusha, z.d.)

Bijna twee procent van de massa van ruwe aardolie bestaat uit zwavel (Smith e.a., 2011). Wanneer deze ruwe aardolie wordt gedistilleerd, dan zal het grootste deel van deze hoeveelheid zwavel achterblijven in stookolie. Als deze stookolie wordt verstoekt, dan komt er zwavedioxide vrij in de lucht. Zwavedioxide is dan ook een belangrijk bestandsdeel in de uitlaatgassen van schepen (Liu, Sheu, & Tsai, 2014). Als zwavedioxide in de lucht vrijkomt, kan het zich omzetten in sulfiden, met name zwaveltrioxide. Deze sulfiden hebben zowel voor- als nadelen voor het milieu. Sulfiden reflecteren licht afkomstig van de zon terug de ruimte in. Ze vormen zeer goede condensatiekernen (Smith e.a., 2011). Condensatiekernen zijn kleine stofdeeltjes waarrond water zich condenseert en die uiteindelijk samen wolken vormen (Northern Vermont University, z.d.). Het uitstoten van zwavedioxide werkt rechtstreeks tegen het broeikaseffect in (Sipila e.a., 2010) (Smith e.a., 2011).

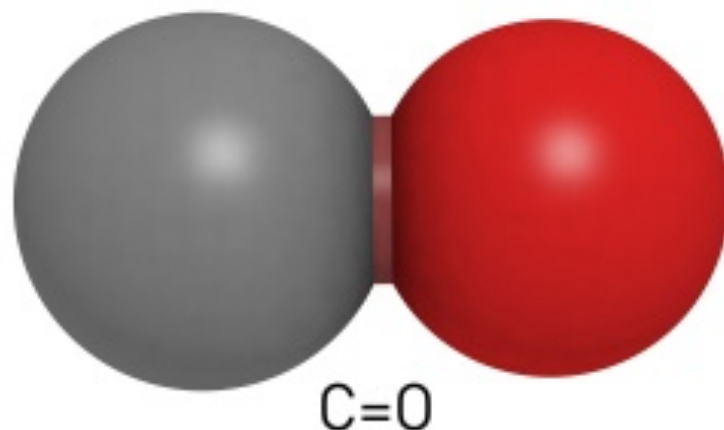
Dit voordeel weegt echter niet op tegen de nadelen. Ten eerste zullen de sulfiden in de buurt van water zich omvormen tot zwavelzuur. Dit zuur heeft een rechtstreeks gevolg op ecosystemen en het tast zowel aquatische als continentale levensvormen aan (Smith e.a., 2011). Ten tweede heeft zwaveldioxide zowel een rechtstreeks als een onrechtstreeks effect op de gezondheid van de mens. Als de mens in contact komt met zwaveldioxide, zullen de neus en luchtkanalen geïrriteerd raken.

Bij blijvend contact met dit gas zal er een zuurstoftekort optreden en zal de luchtpijp vernauwen wat de ademhaling bemoeilijkt. Mensen met astma kunnen een agressieve reactie krijgen door zwaveldioxide, met mogelijks de dood tot gevolg (Chen, Kushner, Gokhale, & Shofer, 2007; Kampa & Castanas, 2008).

Volgens Koken e.a. (2003) is er een relatie tussen blootstelling aan zwaveldioxide en hartritmestoornissen bij mannen ouder dan 65 jaar. Volgens de WGO is de grenswaarde waaraan iemand gedurende een hele dag mag blootgesteld worden $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ of 0,008 ppm. De maximale toegestane waarde in 10 minuten bedraagt dan weer $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ofwel 0,192 ppm (VMM, z.d.-d)(Ricardo, 2014). Met deze grenswaarden in het achterhoofd was de minimumvereiste bij de selectie van de sensoren dat het meetbereik aan 0,008 ppm startte en indien mogelijk nog lager.

1.4 KOOLSTOFMONOXIDE

Het gas koolstofmonoxide (CO) komt voornamelijk vrij bij onvolledige verbrandingen. De kans dat je te hoge concentraties inademt in de open buitenlucht is vrijwel klein doordat het gas zich nergens kan opstapelen en zo een giftige concentratie bereiken. Dit is dus een gas dat gevaarlijk kan worden in afgesloten of slecht geventileerde ruimtes. Koolstofmonoxide kan met zekerheid teruggevonden worden in de uitlaatgassen van iedere verbrandingsmotor. Vandaar de keuze om dit ook te gaan meten. De invloed van koolstofmonoxide op het menselijk lichaam kan zeer groot zijn en leiden tot de dood. Koolstofmonoxide heeft namelijk de capaciteit om rode bloedcellen te bevangen. Deze rode bloedcellen zijn normaal gezien de dragers van zuurstof in ons bloed en voorzien ons lichaam van zuurstof. Doordat deze rode bloedcellen reeds vol zitten met koolstofmonoxide, komt er geen zuurstof meer in onze bloedbaan terecht. Op die manier wordt het menselijk lichaam verstikt van binnenuit. De symptomen van een koolstofvergiftiging beginnen mild en worden meestal niet waargenomen door het slachtoffer. De eerste symptomen bij een kortstondige blootstelling zijn duizeligheid, hoofdpijn en vermoeidheid. Bij een langdurige blootstelling of een blootstelling van korte duur maar wel met grote concentratie kan het slachtoffer het bewustzijn verliezen. Het eerste wat men moet doen bij een vermoeden van een CO-vergiftiging is zo snel mogelijk een raam openzetten en naar buiten gaan, zodat er opnieuw zuurstof in de bloedbaan kan komen. De advieswaarden van het WGO zijn 100 mg/m³ ofwel 87 ppm voor een blootstelling van 15 minuten. 60 mg/m³ ofwel 52 ppm voor een blootstelling van 30 minuten, 30 mg/m³ of 26 ppm voor een blootstelling van 1 uur en per slot 10 mg /m³ of 9 ppm voor een blootstelling van 8 uur. (VMM, 2020)(Ricardo, 2014)



FIGUUR 4 : KOOLSTOFMONOXIDE MOLECULE

Bron: (Antigifcentrum, z.d.-a)

Op figuur 4 kan men de chemische structuur zien van het gas. CO is zeer gevaarlijk omdat het kleurloos en geurloos is. Men kan dit met menselijke zintuigen niet detecteren. Wanneer men het begint te merken via hoofdpijn en duizeligheid is het veelal te laat. Koolstofmonoxide is iets lichter dan lucht waardoor het de neiging heeft te stijgen, maar omdat het dichtheidsverschil zo klein is zal het gas zich praktisch volledig vermengen met de normale lucht. Bovendien heeft CO nog een bijkomend gevaar bij brand. Wanneer het in de juiste concentratie voorkomt in lucht is dit een zeer explosief mengsel. De concentraties waartussen het explosief is bedragen respectievelijk 12,5 en 74,2%. Deze concentraties liggen al ver boven de dodelijke dosis. Een bijkomende eigenschap van CO is dat het zeer lang in een mengsel met lucht zal aanwezig blijven. Bovendien gaat CO niet spontaan afbreken. De enige manier om CO uit een afgesloten ruimte te krijgen is door overvloedig te ventileren (Antigifcentrum, z.d.-b).

1.5 TABEL MET MAXIMALE CONCENTRATIES VAN DE 4 GASSEN

TABEL 1: GRENS- EN ADVIESWAARDEN VOLGENS WGO

Bron: bewerkt van VMM (z.d.-d)

Grens- en advieswaarden volgens WGO				
periode	Stikstofdioxide	Ozon	Zwaveldioxide	Koolstofmonoxide
10 min			500 µg/m ³	
15 min				100 mg/m ³
30 min				60 mg/m ³
1 uur	200 µg/m ³			30 mg/m ³
8 uur gemiddelde		100 µg/m ³		10 mg/m ³
1 dag			20 µg/m ³	
1 jaar	40 µg/m ³			

Tabel 1 geeft de maximale waarden weer per gas en per opdeling van tijd. De opdeling in tijd is bij elk gas bijna verschillend en hier is niet echt een constante lijn in getrokken. Dit is natuurlijk een belangrijke tabel daar we misschien wel waarden kunnen meten, maar deze zeggen niets zonder de grenswaarden ervan te kennen.

Tabel 2 toont aan dat men dezelfde grenswaarden kan zien, maar dan wel uitgedrukt in ppb. De tabel staat in deze thesis omdat de volledige kalibratie verderop gebeurt naar ppm en ppb concentraties. Hierdoor is de bovenstaande tabel niet bruikbaar gedurende de kalibratie. 1 ppm is gelijk aan 1000 ppb.

TABEL 2: GRENS- EN ADVIESWAARDEN WGO IN PPM EN PPB

Bron: bewerkt van VMM (z.d.-d)

Grens- en advieswaarden volgens WGO				
periode	Stikstofdioxide	Ozon	Zwaveldioxide	Koolstofmonoxide
10 min			192 ppb	
15 min				87 ppm
30 min				52 ppm
1 uur	105 ppb			26 ppm
8 uur gemiddelde		50 ppb		9 ppm
1 dag			8 ppb	
1 jaar	21 ppb			

1.6 ELEKTROCHEMISCHE SENSOR

1.6.1 INTRODUCTIE

De elektrochemische sensor is bijzonder in zijn segment doordat hij zelf elektrische stroom genereert. Deze stroom ontstaat door oxidatie of reductie van het doelgas aan een elektrode. Deze methode van gasmeting is ontstaan in de jaren '50 en is sindsdien alleen maar verbeterd en compacter geworden.

Het basisprincipe van dit type sensor gaat als volgt. Het gas dat men wil meten, zorgt voor een elektrochemische reactie binnen de sensor. Vervolgens wordt er een elektrische spanning gemeten die veroorzaakt wordt door de chemische reactie met het doelgas. Deze spanning is proportioneel met de hoeveelheid gas dat zich in de lucht bevindt en zo kan men via deze spanningen een gasconcentratie bepalen. Doordat deze sensor zelf elektriciteit opwekt is dit het type sensor die het minste stroom vereist om metingen uit te voeren.

Het gas gaat binnen via het hydrofoob membraan waarbij het eventueel via een filter gescheiden wordt van andere gassen die een hoge kruissensitiviteit geven. Hoe poreuzer dit membraan is, hoe gevoeliger de sensor is. Dit komt doordat het gas dan sneller de sensor binnendringt via de grotere poriën. Het nadeel hiervan is dat bij een zeer poreus membraan het elektrolyt sneller zal verdampen en als gevolg hiervan de levensduur van de sensor drastisch verlaagt. Afhankelijk van het doel van de sensor moet dit in acht genomen worden.

Nadat het gas door het membraan gaat, reageert het met de elektrolyt en elektroden. De twee elektroden zijn verbonden met elkaar via een weerstand waar een stroom door loopt, indien er een chemische reactie plaatsvindt. Door deze stroom te meten kan men de hoeveelheid gas bepalen. De ene elektrode fungeert als kathode en de andere als anode.

Tijdens oxidatie of reductie van een van de elektroden komt een elektrisch potentiaal vrij ter hoogte van beide elektroden. De anode zal oxideren en een positiever elektropotentiaal creëren dan de kathode. De kathode daarentegen zal reduceren en hierdoor een negatiever elektropotentiaal creëren dan de anode. Door dit potentiaalverschil is het niet moeilijk een stroom te creëren door een weerstand tussen de anode en de kathode te plaatsen (Potters, 2018) (Chou, 2000).

1.6.2 CONSTRUCTIE

Een elektrochemische sensor is in feite een elektrodencel bestaande uit een werkelektrode (voelende elektrode), de tegenelektrode en een referentie-elektrode. De sensor zal steeds een constante spanning genereren ten opzichte van de elektrolytoplossing waar deze zich in bevindt. Het gas diffundeert naar de werkelektrode waar het een oxidatie of reductiereactie ondergaat. Aan de tegenelektrode gaat op dat ogenblik eveneens een reactie door het systeem.

De elektrochemische sensor bestaat uit volgende belangrijke hoofdonderdelen:

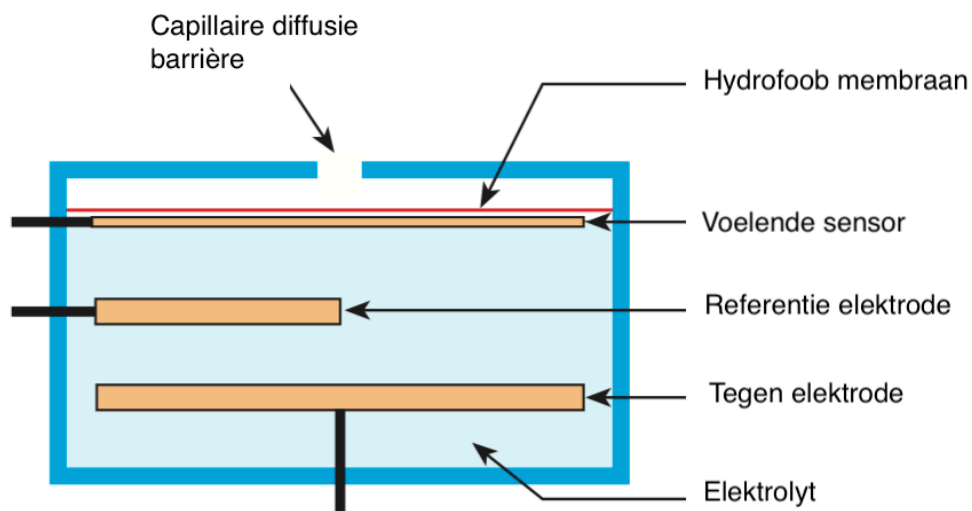
- Hydrofoob membraan
- Elektroden
- Elektrolyt
- Filter

Het hydrofoob membraan bestaat uit een poreuze laag, meestal teflon. Dit membraan zorgt dat fijn stof geen contact met de sensor kan maken terwijl deze wel gassen doorlaat.

Een andere belangrijke functie is het minimaliseren van elektrolytverlies. Bij een lage relatieve luchtvochtigheid kunnen bepaalde elektrolytoplossingen verdampen en zo de levensduur van de sensor verkorten.

Er zijn twee of drie elektroden aanwezig in een sensor. Op iedere sensor staat minstens twee elektroden, een anode of voelende elektrode en een kathode of tegenelektrode. Bij sommige sensoren is nog een derde elektrode terug te vinden. Deze noemt men de referentie-elektrode en zorgt in principe voor een constante potentiaalwaarde ten opzichte van de elektrolytoplossing. Wanneer er geen reactie plaatsvindt binnenin de sensor zou de potentiaal in theorie steeds stabiel moeten zijn. In praktijk is dit echter niet zo en treden er fluctuaties op. De referentie-elektrode geeft steeds de actuele waarde van de potentiaal binnenin de sensor weer om zo een correcte weergave van het potentiaalverschil bij een meting te garanderen. De elektrolyt is een oplossing die zich binnenin de sensor bevindt. De voornaamste taak van dit medium is om de mobiliteit van ionen tussen de elektroden te garanderen. Een tweede belangrijke taak is een zo stabiel mogelijk potentiaal te bieden voor wanneer er geen stroom tussen de anode en de kathode loopt. De elektrolyt moet de eigenschap hebben om niet vluchtig te zijn, indien deze ontbreekt zal de sensor een korte levensduur hebben en zal het geproduceerde elektrisch signaal snel verstoord zijn.

De filter vindt men op vele sensoren terug maar zeker niet op elke sensor. Indien de filter aanwezig is, bevindt deze zich aan de ingang van de sensor bovenop het hydrofoob membraan. Het doel van deze filter is om bepaalde gassen die een negatieve invloed hebben op de goede werking van de sensor tegen te houden. Het kan namelijk gebeuren dat meerdere gassen bij de voelende elektrode een reactie creëren. Hierdoor meet men de som van de gassen en niet enkel het doelgas. Het kiezen van de juiste filter kan een grote invloed hebben op de kruissensitiviteit van de sensor en zo de nauwkeurigheid ervan aanzienlijk verhogen. De ingang van de sensor is zeer klein en vormt zo een capillaire diffusiebarrière. Op figuur 5 is een voorbeeld van een elektrochemische sensor terug te vinden (Chou, 2000).



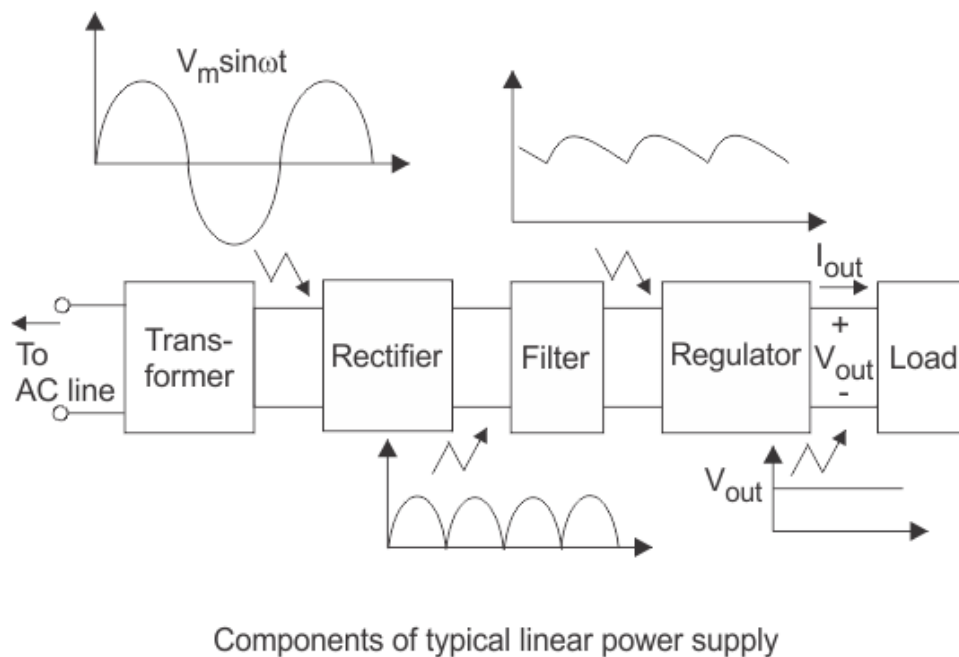
Bron: bewerkt van (Chou, 2000)

FIGUUR 5: ELEKTROCHEMISCHE GAS SENSOR

1.7 GEREGULEERDE VOEDING

Het uiteindelijke doel van deze gereguleerde voeding is om een onregelmatige wisselspanning om te zetten in een constante gelijkspanning. De wisselspanning aan boord is onregelmatig door de soms wisselende belasting (pompen bijzetten, hydraulische machines, ventilaties, boegschroef, ...) van de motor, waardoor de wisselstroomgenerator sneller of trager draait en de governor (regelt frequentie en amplitude) wat naijlt op deze toerentalwijzigingen door de wisselende belasting.

Dit gebeurt respectievelijk via een transformator, een gelijkrichter, een gelijkspanningsfilter en als laatste in de keten: de regelaar. Op figuur 6 kan men hiervan een schema terugvinden.

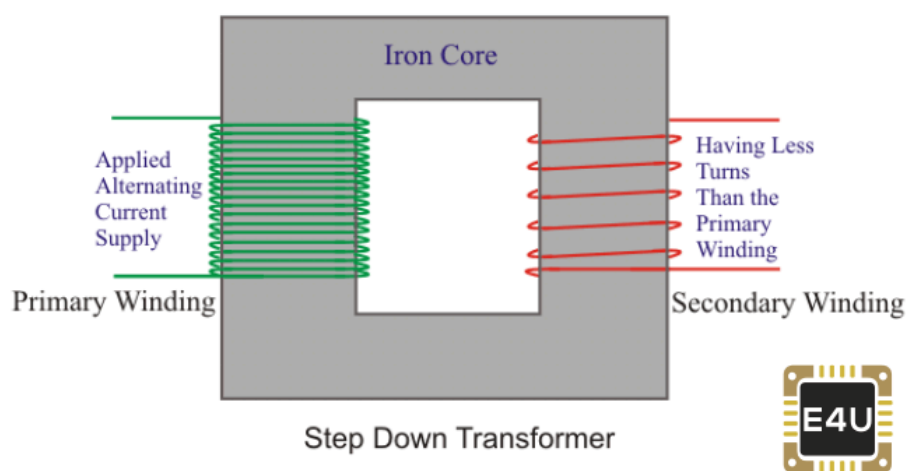


FIGUUR 6: SCHEMA VAN GEREGULEERDE VOEDING

Bron: (E4U, 2019a)

De eerste bewerking die de onregelmatige wisselspanning ondergaat, vindt plaats in de transformator. Hier wordt de 240 VAC in wisselspanning omgezet naar de vereiste 5VAC.

De verlaging in spanning gebeurt aan de hand van 2 spoelen die met een ijzeren kern aan elkaar verbonden zijn. De ene spoel aan de kant van de hogere spanning heeft meer wikkelingen dan de spoel aan de kant van de lagere spanning. Volgens de wet van Faraday over elektromagnetische inductie zal de hogere elektrische spanning omgezet worden in een magnetisch veld. Dit veld zal dan weer inwerken op de spoel met minder windingen. Doordat er een magnetisch veld inwerkt op die spoel ontstaat er in de spoel een spanning. Omdat deze spoel echter minder wikkelingen heeft, ligt deze spanning bijgevolg lager. De ratio tussen beide wikkelingen zal een invloed hebben op de uitgangsspanning. Op Figuur 7 wordt dit nogmaals verduidelijkt.



FIGUUR 7: AFBEELDING VAN EEN TRANSFORMATOR

Bron: (E4U, 2020)

De volgende stap is om de onregelmatige wisselspanning in gelijkspanning om te zetten. Dit gebeurt via een gelijkrichter. Deze zorgt ervoor dat enkel de positieve spanning van de sinusoidale beweging wordt doorgelaten. Op die manier krijgt men nog steeds een pulserende spanning, maar wel op een unidirectionele wijze.

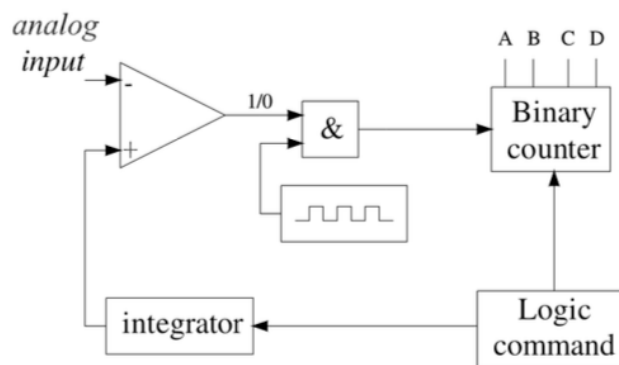
Deze wijze zorgt ervoor dat de spanning vanaf nu een gelijkspanning is, omdat het teken niet meer wijzigt.

De volgende stap in dit proces is de gelijkstroomfilter. Het doel hiervan is om de pulserende gelijkspanning om te zetten naar een non-pulserende gelijkspanning. Men wil een zo vlak mogelijke spanningslijn bekomen van 5 V. Op het schema van de gereguleerde voeding kan men zien dat de puls eruit wordt gefilterd en de pulsatie afgevlakt wordt.

De laatste stap is de regelaar. Deze heeft als functie om veranderingen in de omgeving te compenseren. Wanneer bijvoorbeeld de ingangsspanning daalt of stijgt, zal deze die verandering tegengaan. Bovendien zal deze verhinderen dat de sensoren blootgesteld worden aan te hoge spanningspieken door deze weg te filteren. Bij een extreem hoge spanningspiek zal de gereguleerde voeding zelf eerst doorbranden en zal deze spanning nooit de sensoren zelf kunnen bereiken. (E4U, 2019a)(E4U, 2019b)

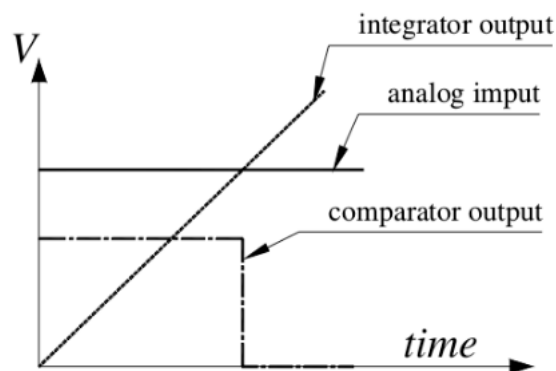
De uitgangsspanning die we op het einde bereiken zal constant 5 V zijn, wat de sensoren nodig hebben. Deze 5 V komt later terug in de programmering van de Pi.

1.8 ANALOOG DIGITAAL CONVERTOR



FIGUUR 8: ADC SCHEMA

Bron: (Geerts, 2018)



FIGUUR 9: ADC GRAFIEK

Bron: (Geerts, 2018)

De comparator bevindt zich links bovenaan in het schema (driehoek) op figuur 8. Deze zal het signaal afkomstig van de integrator vergelijken met het signaal afkomstig van de input, wat hier een sensorelektrode is.

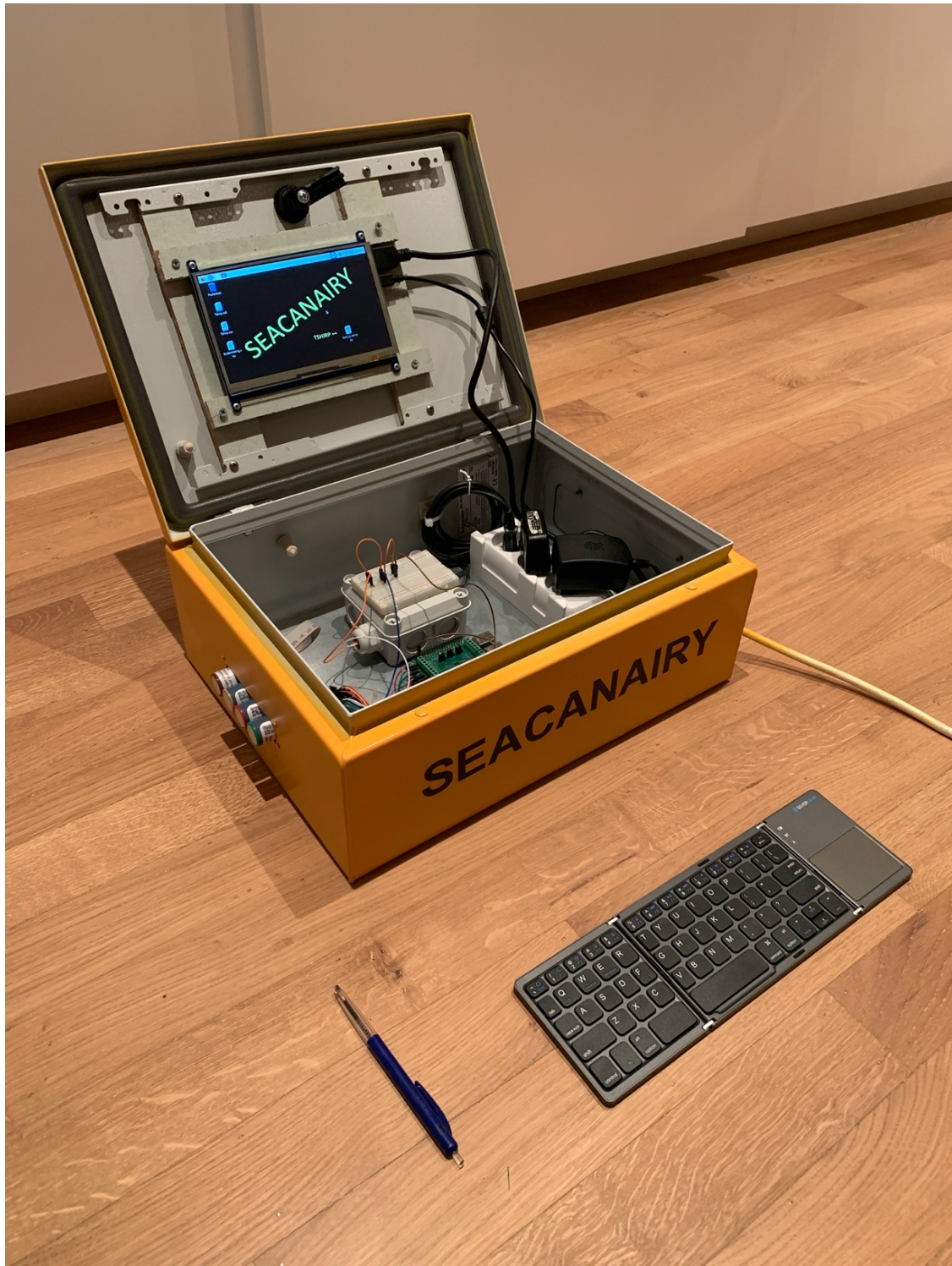
De integrator is een element in de ADC dat een lineair stijgende spanning creëert zoals op figuur 9 afgelezen kan worden. Zolang het analoge ingangssignaal van de sensor kleiner is dan het lineair stijgende uitgangssignaal van de integrator, zal de comparator het signaal 1 blijven uitsturen.

Van zodra het analoge ingangssignaal groter wordt dan die van de integrator, verandert het signaal van de comparator naar 0. Zolang het uitgangssignaal van de comparator 1 is, blijft dit doorgaan naar de AND-poort samen met het signaal van een pulsgenerator. De AND-poort heeft als eigenschap enkel een outputsignaal te geven wanneer de twee ingangssignalen gelijk zijn aan 1. Het outputsignaal van deze poort heeft een pulserende vorm die tussen 0 en 1 alterneert. Deze pulsen worden geteld door de binaire teller. In de binaire teller verandert het signaal van een analoge naar een digitale vorm. Hoe groter het analoge signaal, hoe langer de binaire teller blijft tellen en hoe groter de binaire waarde wordt. Van zodra de binaire teller geen nieuwe pulsen meer ontvangt, stuurt deze zijn waarde door naar de Pi. Het commandosysteem (rechtsonder op het schema) zet – wanneer het analoge signaal groter is geworden dan dat van de integrator – de teller terug op nul en vanaf dat moment kan er opnieuw een nieuwe meting starten. -

2 CONSTRUCTIEMETHODE: HARDWARE

2.1 DE SEACANAIRY

De volgende twee afbeeldingen geven een voorstelling van de Seacanairy. Iedere component zal apart beschreven worden, van buiten naar binnen toe. Alles bevindt zich in een metalen kast die specifiek gemaakt is voor het opbergen en beschermen van elektronische installaties. Wanneer de kast toe is, kunnen enkel de 4 gassensoren gezien worden met in het midden de kleine temperatuursensor. Aan de onderkant zien we de algemene voedingskabel van de dominostekker waar alle componenten op zijn aangesloten. Eens de kist geopend wordt, ziet men in de deur van de kast het scherm gemonteerd op de draagconstructie ervan. In de kast zelf ziet men aan de rechterkant de dominostekker met alle adapters van de componenten erin. Linksboven in de kleine grijze doos vindt men de sensorvoeding terug. Op de voeding van de sensoren zit een *breadboard* vastgemaakt. Onder de sensorvoeding zit de ADC en de Raspberry Pi die via elektrische kabels verbonden zijn met het sensorbord waar de sensoren op staan. Aan de rand van de kast staat het draadloze toetsenbord-en-muis-in-1. In de volgende secties worden deze componenten beschreven. De totale prijs voor al het nodige materiaal bedraagt 657 euro.



FIGUUR 10: FOTO VAN DE SEACANAIRY

Bron: eigen werk



FIGUUR 11: FOTO VAN DE SEACANAIRY

Bron: eigen werk

2.2 METALEN KAST

De metalen kast heeft als belangrijkste functie het beschermen van de gehele opstelling. Die is in se zeer fragiel en kan niet zomaar los aan boord gezet worden. In de kast is eveneens een zwevende metalen plaat gemonteerd waarop de Pi, een ADC, een dominostekker en de gereguleerde voeding op vastgeschroefd zijn. De kast heeft als tweede belangrijke functie het geheel mobiel te maken. Doordat men alles vast kan maken binnenin de kast gaat men eigenlijk van verschillende losse componenten naar 1 groter solide object dat overal zonder risico naartoe kan genomen worden. Een derde belangrijke functie is de opstelling te beschermen tegen elektromagnetische stralingen afkomstig van de nautische apparatuur. De sensoren alsook de draden zijn zeer gevoelig aan spanningsveranderingen en zullen hierdoor direct de meetwaarden beïnvloeden. Door te opteren voor een metalen kast wordt een kooi van Faraday gemaakt waarmee we de invloed van elektromagnetische stralingen neutraliseren. Daarom is het van uiterst belang dat de kast van metaal is en niet van plastic. De kast die gebruikt wordt, komt van de firma Schneider Electric, die gespecialiseerd zijn in het bouwen van elektrische kasten. De hoogte van de kast bedraagt 400mm, de breedte 300mm en de diepte 150mm. Het totale gewicht van de lege kast bedraagt 6,08kg. De kast bevat een behuizing, montageplaat, kabelkwartelplaat en ten slotte ook nog een deur met slot op. De kast heeft bovendien een IP-beschermingsgraad van IP66. Dit wil zeggen dat de kast aanrakingsveilig is door de geheel gesloten behuizing. Bovendien gaat deze de opstelling volledig stofvrij houden. Er zal ook geen water binnenstromen zolang de hoeveelheid water minder blijft dan 100 liter per minuut. Met andere woorden deze kast is ook bruikbaar voor metingen in de buitenlucht. De prijs van de doos bedraagt 70 euro. (Schneider electronics, 2020)(Quantum Universe, 2019)

Wegens aanpassingen aan de buitenkant van de kast – zoals weergegeven in de 2 onderstaande foto's – is de integriteit wel verminderd. Er is namelijk een opening voor de sensoren gemaakt en ook voor de voedingskabel. Toch zal de impact hiervan niet zo groot zijn daar de openingen minimaal zijn. Deze aanpassingen zijn nodig omdat de voeding langs ergens moet binnenkomen en de sensoren ergens in contact moeten kunnen staan met de buitenlucht. Een kwartel biedt hier geen oplossing daar het hoofd van de stekker nooit door de kwartel past, tenzij de opening van de kwartel zeer groot is. Hierdoor is gekozen om het op onderstaande manier te doen, omdat dit de kleinste opening als eindresultaat heeft.



FIGUUR 12: FOTO VAN OPENING VOOR DOMINOSTEKKER

Bron: eigen werk

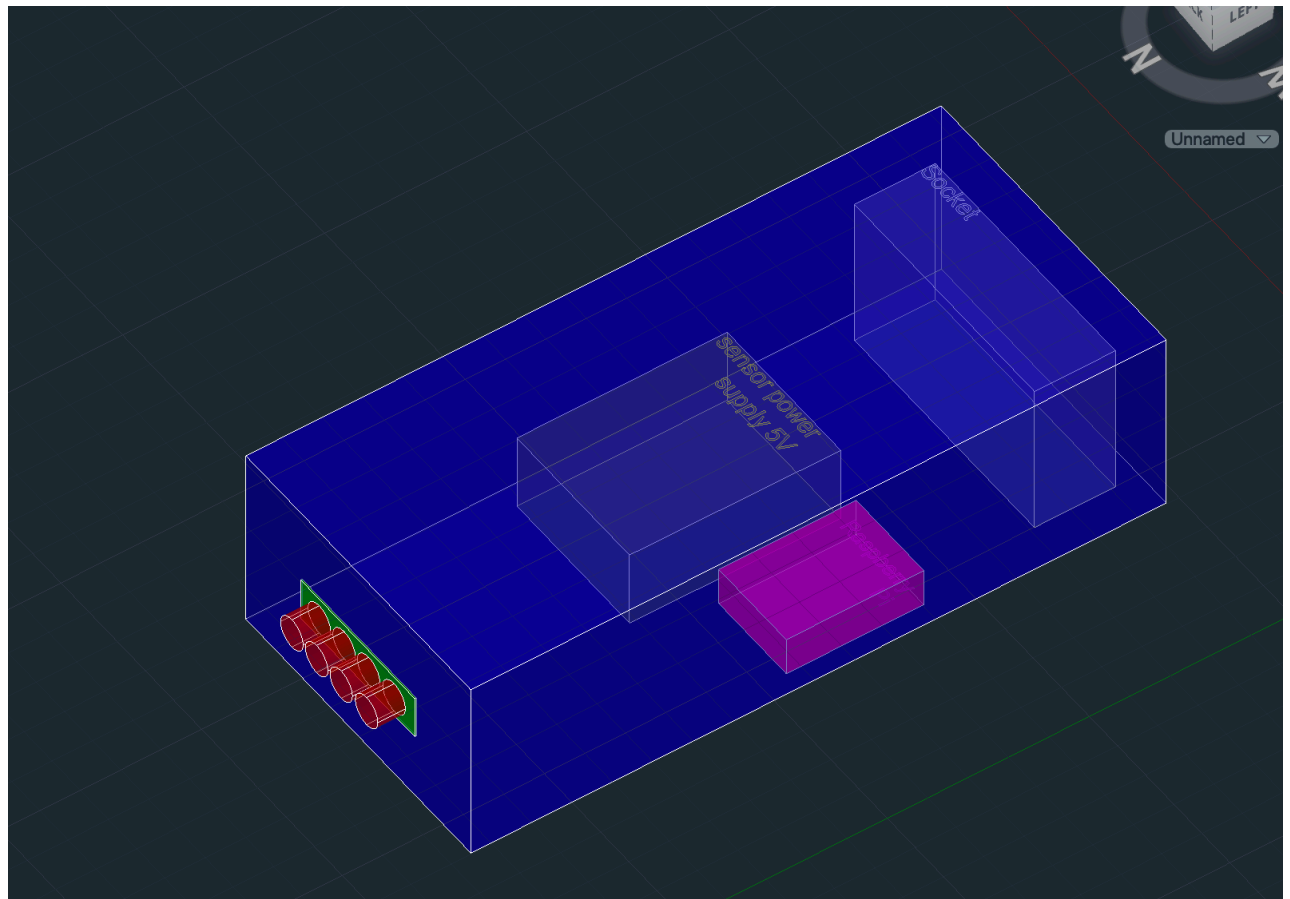


FIGUUR 13: FOTO VAN OPENING VOOR SENSOREN

Bron: eigen werk

Zoals op beide foto's te zien is, zijn de openingen minimaal. Dit komt doordat ze allemaal op maat gezaagd zijn voor hun doel. Het zagen van de holtes is gedaan via een decoupeerzaag. Voor de opening van de sensoren moest eerst een gat geboord worden met een metaalboor in de hoek van het te verwijderen plaatje. Zonder dit gat eerst te boren is het echter niet mogelijk de oppervlakte uit te zagen met de decoupeerzaag. Bij de opening van de dominostekker was dit niet nodig omdat deze plaat er afgeschroefd kon worden en men zo langs de zijkant kon beginnen zagen. Eens de oppervlaktes eruit waren is alles gevijld zodat er nergens scherpe randen zouden zijn. Dit is belangrijk bij de kabel van de dominostekker, daar deze veel beweegt langs de uitgezaagde randen.

Vooraleer de kast gekocht werd, is er een driedimensionaal digitaal plan gemaakt van hoe de metalen kist er moest uitzien en aan welke afmetingen deze minimaal moest voldoen. Dit plan werd getekend in Autocad en kan op figuur 14 teruggevonden worden.



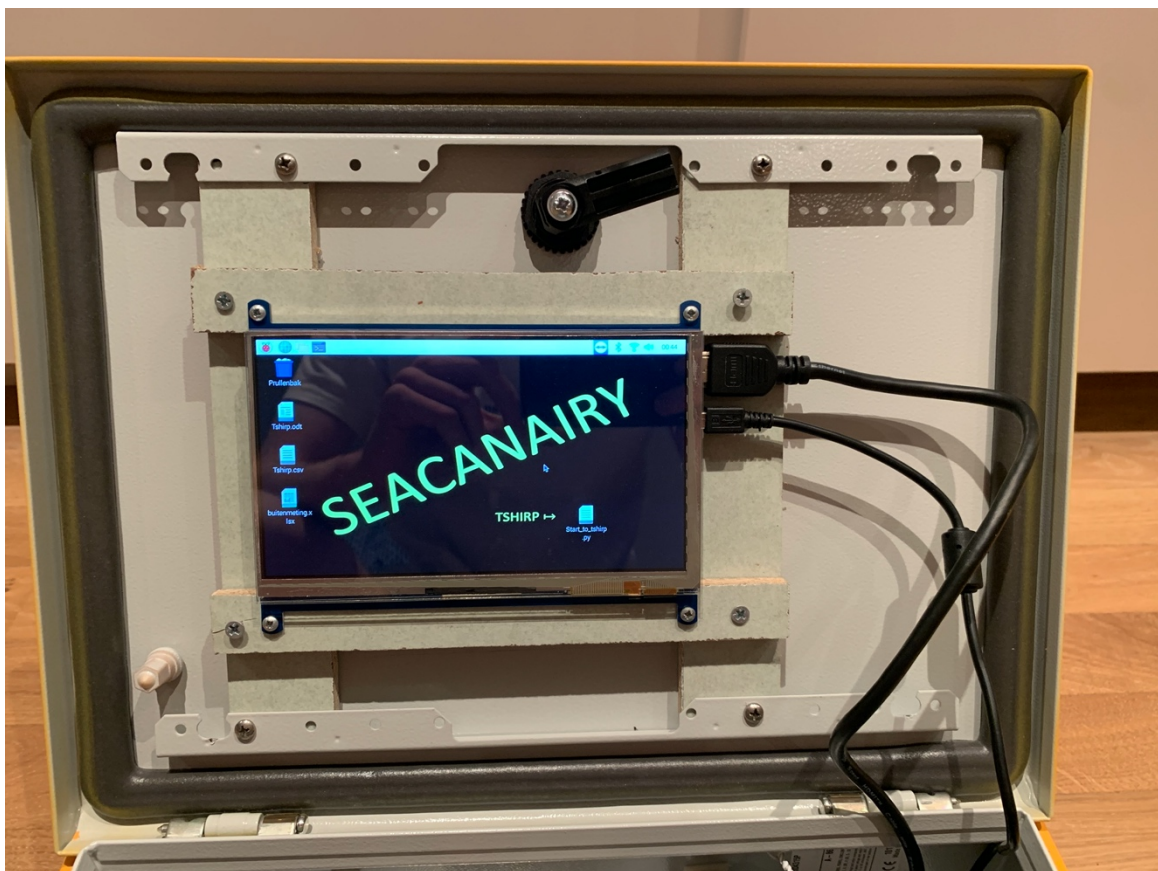
FIGUUR 14: TEKENING METALEN KAST IN AUTOCAD

Bron eigen werk

Via dit plan kon gemakkelijk een metalen kist gekozen worden met onmiddellijk de juiste afmetingen, zodat de opstelling er goed in past. De kast werd volledig in het kanariegeel gespoten en versiert met 2 stickers waarop Seacanairy staat.

2.3 SCHERM

Eens men de deur van de metalen kast opendoet ziet men het scherm. Het scherm is van de fabrikant Waveshare en draagt de naam 7 inch HDMI LCD (C). Het scherm kan zowel als monitor alleen fungeren maar ook als een capacitief touchscreen, dit werkt dan exact zoals een *smartphone*. Het scherm is uitgerust met een resolutie van 1024 x 600 pixels. De schermdiagonaal bedraagt 7 inch.



FIGUUR 15: FOTO VAN SCHERM

Bron: eigen werk

Het scherm is aangesloten via een HDMI-kabel aan de Raspberry Pi. De voeding gebeurt via een adapter met USB type A aansluiting. De voedingsaansluiting aan het scherm zelf is een micro USB-B poort. Men kan de voeding van het scherm laten gebeuren via een USB-aansluiting op de Pi.

De reden om de voeding van het scherm niet via de Raspberry Pi te verlopen is om de Pi zo weinig mogelijk te belasten met andere zaken. Het is echter niet de bedoeling dat de Pi nog een hele resem aan andere componenten moet gaan voeden en regelen. Dit zou tevens de kans vergroten op een systeemfout. Door ervoor te opteren om het scherm niet te voeden via de Pi verliezen we wel de mogelijkheid om het scherm als touchscreen te gebruiken. Dit probleem wordt opgelost door een mobiel klavier en touchpad toe te voegen. Het scherm zelf moet ook geprogrammeerd worden om correct uitgelezen te worden door de Pi. Deze code kan verder in de thesis teruggevonden worden. Het scherm is bevestigd via een houten constructie in de deur.

De prijs van het scherm bedraagt 77 euro en de prijs van de draagconstructie 5 euro.

2.4 DOMINOSTEKKER

Op onderstaande afbeelding (figuur 16) kan de dominostekker die drie verschillende componenten voedt teruggevonden worden. De rechtse is de adapter van de Raspberry Pi, de middelste die van het scherm en ten slotte nog die van de sensorvoeding helemaal links op figuur 16.



FIGUUR 16: FOTO VAN DE DOMINOSTEKKER

Bron: eigen werk

Het grote voordeel van de dominostekker is vooral praktisch van aard. Zonder deze zouden er 3 aparte kabels uit de kast moeten komen wat zowel de mobiliteit als de rigiditeit niet ten goede komt. Een andere reden is uit veiligheidsoverweging: indien de voedingskabel een ruk zou krijgen, dan zal dit geen schade aanrichten aan een van de fragiele componenten maar enkel aan de stekker. Indien bijvoorbeeld de adapter van de Raspberry Pi rechtstreeks uit de kast zou komen en deze een snok krijgt, dan bestaat de kans dat de Pi wordt beschadigd. Het nadeel van de dominostekker is wel dat dit de opstelling ongeveer 15cm hoger maakt, maar dit weegt niet op tegen de nadelen ervan zonder de stekker.

De dominostekker is bevestigd op de montageplaat via een muurbevestiging die specifiek hiervoor gemaakt is. Deze zit gekneld tussen de muurbevestiging, zodat deze niet kan bewegen. De prijs van de dominostekker en muurbevestiging samen bedraagt 9 euro.

2.5 SENSORVOEDING

Daar de spanning aan boord van een schip belangrijke fluctuaties kan ondervinden, heeft dit gevolgen op de meetresultaten van de sensoren die aangesloten zijn op het net. Om dit probleem te omzeilen, zijn de sensoren aangesloten op een gereguleerde voeding. Deze zorgt ervoor dat eventuele spanningsverschillen weg gefilterd worden en de sensoren een continue 5V gelijkspanning zullen ontvangen. De gebruikte gereguleerde voeding kan teruggevonden worden op figuur 17.



FIGUUR 17: FOTO VAN SENSORVOEDING

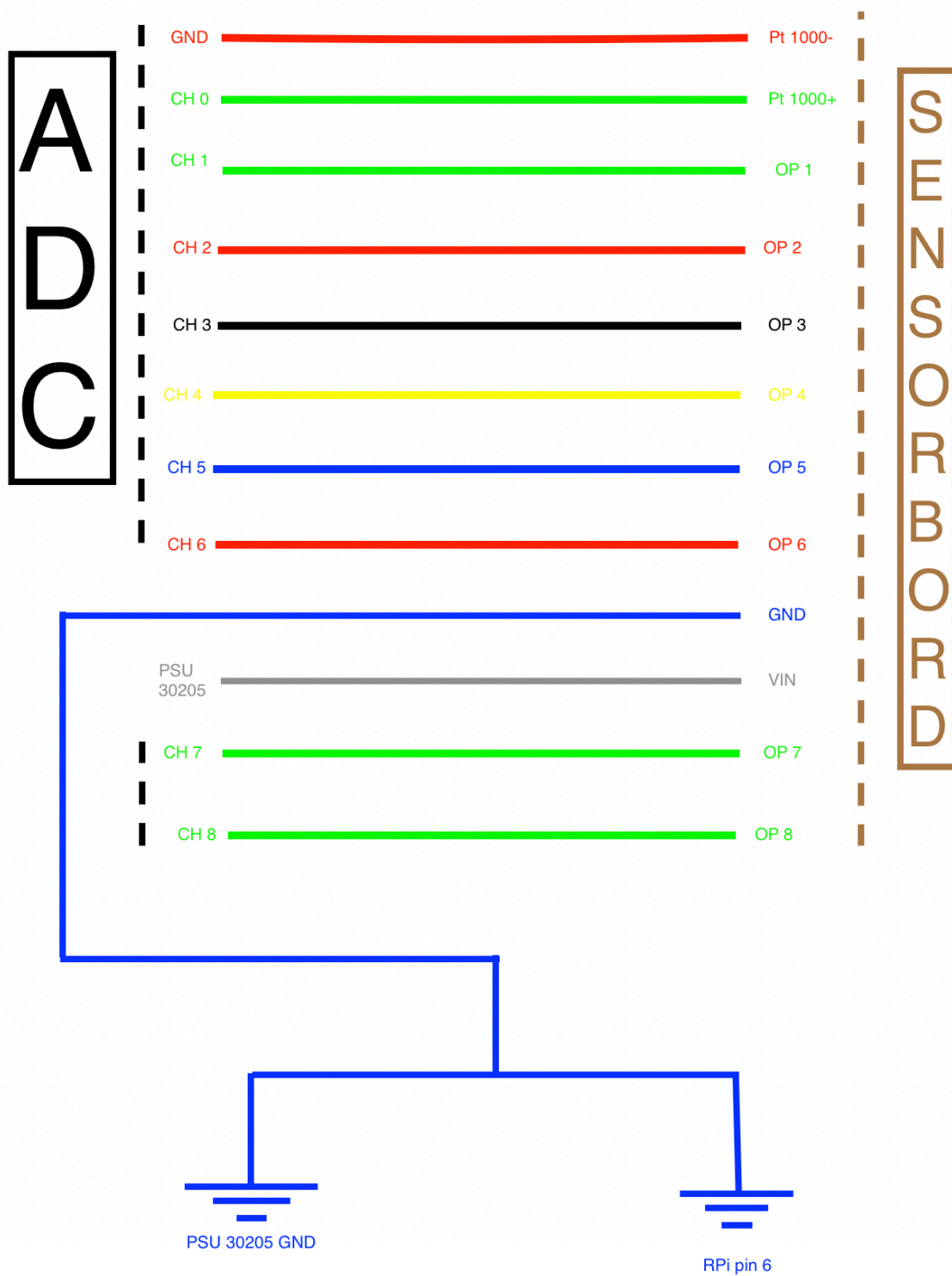
Bron: eigen werk

Men kan in principe zonder problemen de sensoren voeden via de Raspberry, maar daar deze luchtkwaliteitsmeter gebouwd is om aan boord van een schip te plaatsen, moet deze tussenstap wel genomen worden. Zonder deze voeding bestaat de kans om pieken en dalen te creëren in gasconcentraties, die het gevolg zijn van spanningspieken en -dalen in het scheepsnetwerk(Mathiesen, 2012). De gereguleerde spanningsbron is van de producent Lascar en draagt de naam PSU30205. Deze voeding zet de ingangsspanning van 240V wisselspanning om naar een constante 5V gelijkspanning. Deze uitgangsspanning is de spanning die nodig is voor het bord en de sensoren. De prijs hiervan bedraagt 40 euro.

2.6 BEDRADING

Bovenop de sensorvoeding werd een *breadboard* geplaatst. Deze heeft als functie een gemeenschappelijke aarding tussen zowel de Pi, sensorbord en de gereguleerde voeding te voorzien. Indien men de aardingen apart maakt, is er geen vast referentiepunt in de opstelling, wat zal resulteren in foutieve meetwaarden.

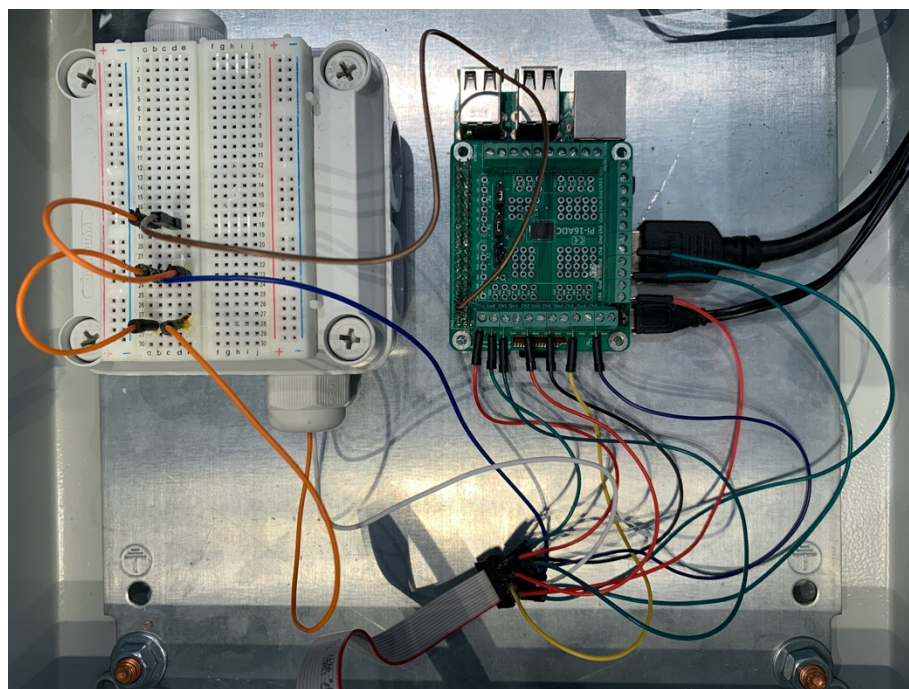
Figuur 18 geeft een plan weer van hoe alle elektrische kabels de verschillende componenten verbinden. De gebruikte kleuren in het plan komen overeen met de kleuren van de kabels in de opstelling. Rechts bovenaan zit de Pt 1000-. Dit is de negatieve aansluiting van de temperatuursensor. Daaronder de positieve aansluiting hiervan genaamd Pt1000+. De temperatuursensor is enkel aangesloten op kanaal 0 van de ADC op de Raspberry Pi. Vervolgens komt OP 1 en OP 2, deze zijn respectievelijk aangesloten op CH 1 en CH 2 van de ADC. OP 1 en OP 2 geven het signaal door van SN 1 (sensor 1) op het sensorbord. Op sensor 1 staat de stikstofdioxidesensor gemonteerd. Nadien volgt OP 3 en OP 4, deze zijn verbonden met CH 3 en CH 4. De 2 kanalen geven het signaal weer van SN 2. Op de plaats van SN 2 staat de ozon + stikstofdioxide sensor gemonteerd. Vervolgens volgt OP 5 en OP 6, deze zijn aangesloten op CH 5 en CH 6. OP 5 en OP 6 vertegenwoordigen samen de zwaveldioxidesensor. Ten slotte komen OP 7 en OP 8 om de sensoren af te kunnen werken. Deze twee zijn respectievelijk verbonden met CH 7 en CH 8. Deze kanalen geven de spanning weer van de koolstofmonoxide sensor. De aarding komende van het sensorbord (GND) gaat zowel naar de gereguleerde voeding terug als naar de Raspberry Pi. Dit met het doel om een gemeenschappelijke aarding te creëren zoals reeds besproken. Ten slotte is de VIN rechtstreeks verbonden met de gereguleerde voeding onder een constante spanning van 5V komende van de PSU 30205.



FIGUUR 18: BEDRADINGSCHEMA

Bron: eigen werk

In onderstaande afbeelding kunnen de verbindingen teruggevonden worden en hoe ze in de opstelling zelf tot stand gebracht zijn.



FIGUUR 19: BEDRADING VAN DE OPSTELLING

Bron: eigen werk

De verbindingen op het schema ter hoogte van het *breadboard* zijn eenvoudiger voorgesteld dan ze in realiteit zijn. Ze komen echter wel op hetzelfde neer. Wanneer men weet dat de kabels die horizontaal en op dezelfde hoogte zitten met elkaar verbonden zijn, kan gezien worden dat de aardingen op die wijze gemeenschappelijk zijn. De ADC is een HAT (Hardware On Top) en wordt dus als het ware op de Pi gemonteerd over alle pinnen heen.

2.6.1 AANSLUITINGEN

TABEL 3: AANSLUITINGEN

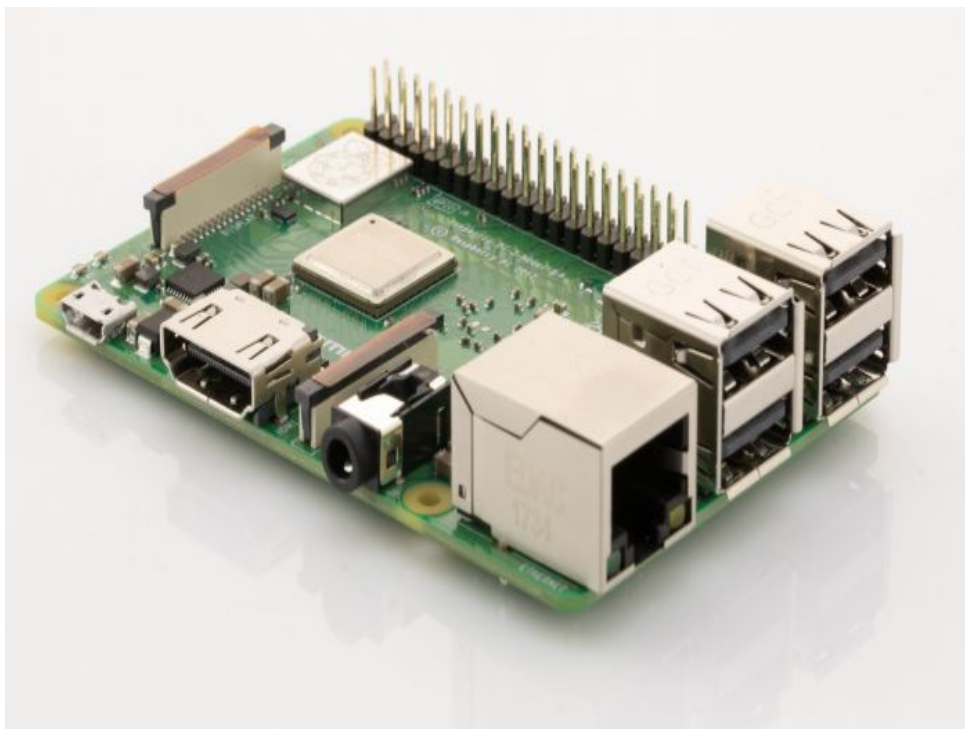
Bron: eigen werk

Aansluitingen										
ADC aansluiting	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH0	CH0 GND
Sensorbordaansluiting	OP1	OP2	OP3	OP4	OP5	OP6	OP7	OP8	Pt 1000+	Pt 1000-
Sensornummer	SN1		SN2		SN3		SN4		/	/
verdeling WE/AE	WE	AE	WE	AE	WE	AE	WE	AE	/	/
Gemeten	Stikstofdioxide		Ozon + stikstofdioxide		Zwavel dioxide		Koolstofmonoxide		Temperatuur	
Naam specifieke gassensor	NO2-A43F 212870427		OX- A431 214810129		SO2-A4 134330003		CO-A4 132330502		/	

Op bovenstaande tabel kunnen overzichtelijk alle aansluitingen teruggevonden worden. In de bovenste rij vindt men de naam van alle kanalen terug op de ADC. Deze kanalen zijn via kabels verbonden met het sensorbord. Iedere gassensor geeft twee belangrijke parameters die nodig zijn om de concentratie te kunnen berekenen.

2.7 RASPBERRY PI

Om de software op te laten lopen wordt gebruik gemaakt van een Raspberry Pi 3b+. Een Raspberry Pi kan gezien worden als een soort van minicomputer die op Linux draait. Om het geheel beter te kunnen voorstellen kan hieronder een afbeelding teruggevonden worden van dit toestel.

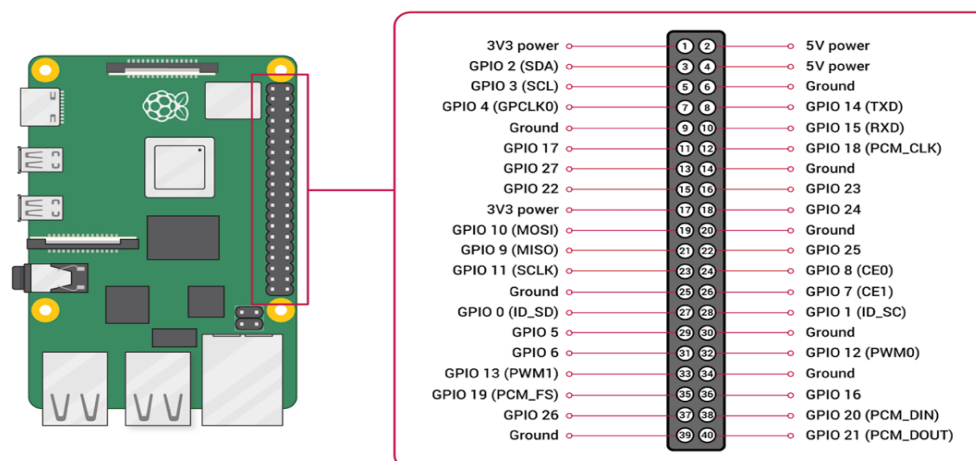


FIGUUR 20: RASPBERRY PI

Bron: (Sossolutions, 2020)

Deze singleboardcomputer is de laatste nieuwe van de 3 reeks die het bedrijf uitbracht en tegelijkertijd de meest krachtige in zijn segment. Deze heeft een 64-bit vier kern processor met een kloksnelheid van 1,4 GHz. Hij is uitgerust met Wi-Fi, wat zeer handig is om steeds de juiste tijd te kunnen garanderen in de timestamp. De Raspberry Pi haalt op die manier gewoon het tijdstip van het internet in plaats van met een real time clock te moeten werken zoals op een Arduino.

De reden waarom er gekozen werd voor een Pi in plaats van een Arduino is omdat de Pi meer communicatiemogelijkheden heeft. Op een Pi kan men makkelijk applicaties downloaden die niet mogelijk zijn op een Arduino. Indien er geen Wi-Fi aanwezig is, heeft men nog steeds de mogelijkheid om de ethernet aansluiting te gebruiken. Bovendien is de Pi uitgerust met bluetooth 4.2 waardoor men op een draadloze manier een klavier, muis, etc. kan aansluiten. Verder is de Pi uitgerust met 4 USB 2.0 poorten waarmee nog een overschot aan USB-ingangen aanwezig is. Een monitor kan aangesloten worden via een HDMI-poort aan de zijkant van de Pi. Indien er nog andere beeld- en geluidtoepassingen aangesloten moeten worden, zijn hiervoor nog een MIPI DSI display poort, MIPI CSI camera poort en een 4-polige stereo uitgang en samengestelde videopoort voorzien. Qua voeding heeft de Raspberry 5V, 2,5A gelijkstroom nodig. Deze voeding kan op drie manieren voorzien worden. De eerste manier is de meest voor de hand liggende via de daarvoor voorziene plug en adapter. De 2 resterende manieren zijn ofwel via de ethernetkabel of via de pinnen op het bord van de Pi. Het pinnenschema kan hieronder teruggevonden worden. De voeding die gekozen werd is degene met de plug en de adapter. De enige pin die op de Seacanairy gebruikt wordt is nummer 6, die fungeert als aarding. De prijs van de Pi bedraagt 50 euro.

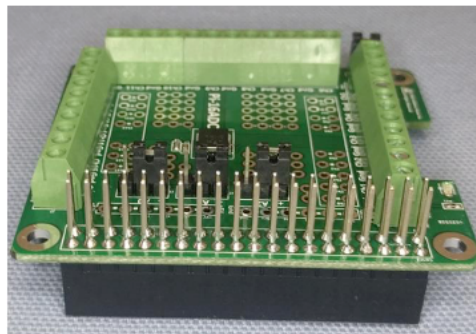


FIGUUR 21: PINDIAGRAM RPi 3B+

Bron: (Raspberry, z.d.)

2.8 ANALOOG DIGITAAL CONVERTOR

Daar de sensoren op het sensorbord enkel en alleen analoge signalen geven (voltages) en geen digitale (bits) is er een communicatieprobleem tussen het bord en de Pi. De Pi kan namelijk enkel en alleen digitale signalen ontvangen. Dit probleem wordt opgelost door gebruik te maken van een analoog-naar-digitaal-converter, ook wel ADC genoemd. De ADC die hier gebruikt wordt is van de producent Alchemypower die hierin gespecialiseerd is. De ADC draagt de naam Pi16-ADC en is speciaal gemaakt om te gebruiken op een Raspberry Pi. De ADC kan op figuur 22 teruggevonden worden.



FIGUUR 22: PI-16ADC

Bron: (Alchemy Power, z.d.)

2.8.1 SPECIFICATIES

De ADC heeft in totaal 16 kanalen die gebruikt kunnen worden om een analoog signaal om te zetten naar een digitaal. De maximale analoge spanning dat 1 kanaal kan ontvangen is +2,5V en -2,5V. Dit is dus een zeer belangrijke en limiterende factor in dit project. De sensoren kunnen hogere spanningen genereren dan 2,5V en hierdoor wordt de maximale gasconcentratie die gemeten kan worden niet bepaald door de limieten van de sensoren, maar wel door die van de ADC. De resolutie bedraagt 16 bits wat ongeveer overeenkomt met 39 microvolt. Resolutie is de maximale verdeling van stroom, dus in hoeveel stapjes de ADC kan meten.

We hebben een 16bits ADC, dus 2^{16} is 65536 en het maximale voltage is 2,5 volt. De resolutie is dan $2,5 / 65536 = 3,9$ microvolt. De ADC kan dus "stapjes" maken met een hoogte van 3,9 microvolt. Het bereik van temperatuur waarin de ADC nog blijft functioneren ligt tussen de 0°C en 70°C.

De opstelling is hierdoor niet meer geschikt om te gebruiken bij een negatieve temperatuur. Het bereik van de relatieve luchtvochtigheid ligt tussen de 10% en 80%. De component is bovendien ook Ro-HS compatibel. De prijs van de ADC bedraagt 50 euro. De specificaties kunnen in onderstaande tabel overzichtelijk teruggevonden worden.

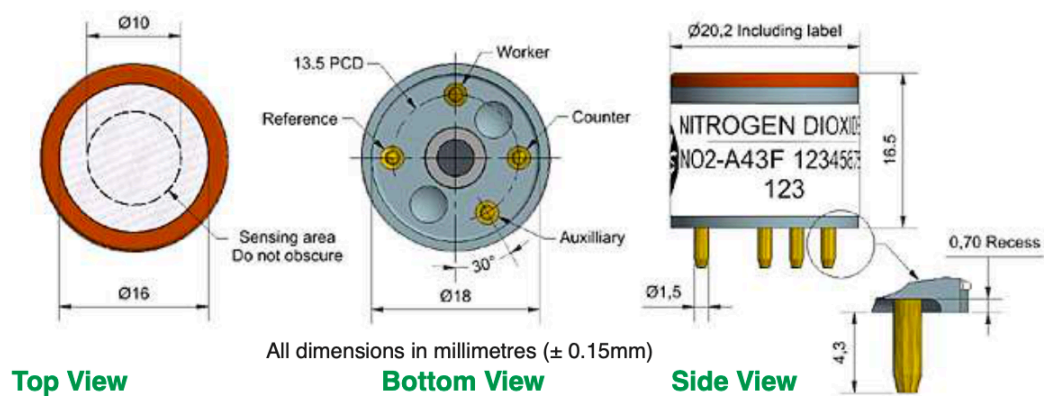
TABEL 4: SPECIFICATIES ADC

Bron: eigen werk

ADC	
Maximale spanning (V)	-2,5 tot +2,5
Bereik luchtvochtigheid (%)	10 tot 80
Bereik temperatuur (°C)	0 tot 70
Resolutie (microvolt)	3,9
Gewicht (g)	30
Vermogen (mW)	0,5
Aantal kanalen	16

2.9 NO₂-A43F

Op onderstaande afbeelding kunnen de afmetingen van de NO₂-sensor teruggevonden worden. Alle afmetingen zijn in millimeters gegeven. In tabel 5 worden de eigenschappen van de sensor samengevat.



FIGUUR 23: AFMETINGEN NO₂-SENSOR

Bron: (Alphasense, 2019a)

TABEL 5: EIGENSCHAPPEN NO₂-SENSOR

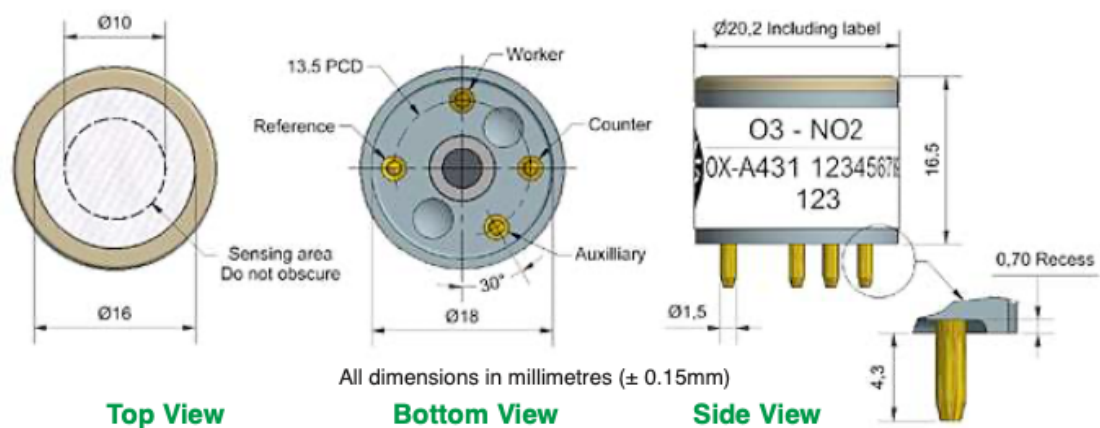
Bron: bewerkt van Alphasense, 2019a

Sensorwaarden NO2-A43F		
Prestaties		
Sensitiviteit	nA/ppm bij 2 ppm NO2	-175 tot -500
Respons tijd	Van nul naar 2 ppm NO2	< 80
Nul stroom	nA in zuivere lucht bij 20°C	-70 tot +70
Ruis	afwijking van signaal (in ppb)	15
Bereik	ppm NO2 grens voor goede resultaten	20
Lineariteit	ppm fout op volledige schaal, lineair op 0 en 20 ppm NO2	< 0,5
Overgas limiet	Maximale ppm om nog een stabiele respons te geven op gas concentratie	50
Levensduur		
Nul drift	In ppb, verandering per jaar in labolucht	0 tot 20
Sensitiviteit drift	in %, verandering per jaar	< -20 tot -40
Levensduur	# maanden tot signaal 50% is van originele signaal	> 24
Kruissensitiviteit		
O3	Filter capaciteit (ppm/u) @ 2ppm O3	>500
H2S	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm H2S	<-80
NO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm NO	<5
Cl2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm Cl2	<100
SO2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm SO2	<-3
CO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm CO	<-3
C2H4	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm C2H4	<1
NH3	Sensitiviteit % gemeten gas @ 20 ppm NH3	<0,2
H2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm H2	<0,1
CO2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5% Vol CO2	<0,1
Belangrijke specificaties		
Temperatuur bereik	°C	-30 tot 40
Druk bereik	kPa	80 tot 120
Luchtvochtigheid bereik	% relatieve luchtvochtigheid (continu)	15 tot 85
Opslagperiode	# maanden bij 3 tot 20°C	6
Belastingsweerstand	Ohm (aangeraden op AFE te gebruiken)	33 tot 100
Gewicht	g	<6

De prijs van deze sensor bedraagt 48 euro.

2.10 OX-A431

Op onderstaande afbeelding kunnen de afmetingen van de O₃-sensor teruggevonden worden. Alle afmetingen zijn in millimeters gegeven. In tabel 6 worden de eigenschappen van de sensor samengevat.



FIGUUR 24: AFMETINGEN O₃-SENSOR

Bron: (Alphasense, 2019b)

2.10.1 EIGENSCHAPPEN

TABEL 6: EIGENSCHAPPEN O₃-SENSOR

Bron: bewerkt van (Alphasense, 2019b)

Sensorwaarden OX-A431		
Prestaties		
Sensitiviteit	nA/ppm bij 2 ppm O ₃	-200 tot -650
Respons tijd	Van nul naar 2 ppm O ₃	< 80
Nul stroom	nA in zuivere lucht bij 20°C	-70 tot +70
Ruis	afwijking van signaal (in ppb)	15
Bereik	ppm O ₃ grens voor goede resultaten	20
Lineariteit	ppm fout op volledige schaal, lineair op 0 en 20 ppm O ₃	< 0,5
Overgas limiet	Maximale ppm om nog een stabiele respons te geven op gas concentratie	50
Levensduur		
Nul drift	In ppb, verandering per jaar in labolucht	0 tot 20
Sensitiviteit drift	in %, verandering per jaar	< -20 tot -40
Levensduur	# maanden tot signaal 50% is van originele signaal	> 24
Kruissensitiviteit		
H ₂ S	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm H ₂ S	<-80
NO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm NO	<5
Cl ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm Cl ₂	<100
SO ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm SO ₂	<-3
CO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm CO	<-3
C ₂ H ₄	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm C ₂ H ₄	<0,1
NH ₃	Sensitiviteit % gemeten gas @ 20 ppm NH ₃	<0,1
H ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm H ₂	<0,1
CO ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5% Vol CO ₂	<0,1
Belangrijke specificaties		
Temperatuur bereik	°C	-30 tot 40
Druk bereik	kPa	80 tot 120
Luchtvochtigheid bereik	% relatieve luchtvochtigheid (continu)	15 tot 85
Opslagperiode	# maanden bij 3 tot 20°C	6
Belastingsweerstand	Ohm (aangeraden op AFE te gebruiken)	33 tot 100
Gewicht	g	<6

De prijs van deze sensor bedraagt 50 euro.

2.11 SO2-A4

Op onderstaande afbeelding kunnen de afmetingen van de SO₂-sensor teruggevonden worden. Alle afmetingen zijn in millimeters gegeven. In tabel 7 worden de eigenschappen van de sensor samengevat.



FIGUUR 25: AFMETINGEN O₃-SENSOR

Bron: (Alphasense, 2018)

2.11.1 EIGENSCHAPPEN

TABEL 7: EIGENSCHAPPEN SO₂-SENSOR

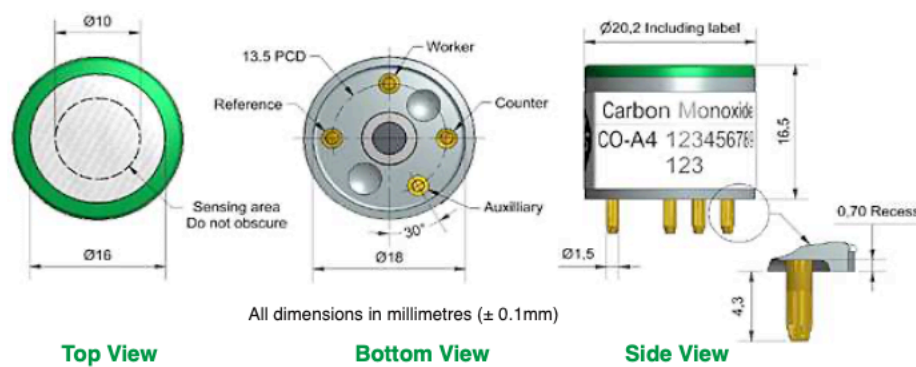
Bron: bewerkt van Alphasense, 2018

Sensorwaarden SO2-A4		
Prestaties		
Sensitiviteit	nA/ppm bij 2 ppm SO ₂	320 tot 500
Respons tijd	Van nul naar 2 ppm SO ₂	< 20
Nul stroom	nA in zuivere lucht bij 20°C	-80 tot +80
Ruis	afwijking van signaal (in ppb)	15
Bereik	ppm O ₃ grens voor goede resultaten	50
Lineariteit	ppm fout op volledige schaal, lineair op 0 en 20 ppm SO ₂	0 tot -5
Overgas limiet	Maximale ppm om nog een stabiele respons te geven op gas concentratie	100
Levensduur		
Nul drift	In ppb, verandering per jaar in labolucht	<20
Sensitiviteit drift	in %, verandering per jaar	< 15
Levensduur	# maanden tot signaal 50% is van originele signaal	> 36
Kruissensitiviteit		
Filter capaciteit	ppm u	450
H ₂ S	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm H ₂ S	<2
NO ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm NO ₂	<-120
Cl ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm Cl ₂	<-80
NO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm SO ₂	<4
CO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm CO	<3
C ₂ H ₄	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm C ₂ H ₄	<1
NH ₃	Sensitiviteit % gemeten gas @ 20 ppm NH ₃	<0,1
H ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm H ₂	<1
CO ₂	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5% Vol CO ₂	<0,1
O ₃	Sensitiviteit % gemeten gas @ 0,5 ppm O ₃	<-120
Belangrijke specificaties		
Temperatuur bereik	°C	-30 tot 50
Druk bereik	kPa	80 tot 120
Luchtvochtigheid bereik	% relatieve luchtvochtigheid (continu)	15 tot 90
Opslagperiode	# maanden bij 3 tot 20°C	6
Belastingsweerstand	Ohm (aangeraden op AFE te gebruiken)	33 tot 100
Gewicht	g	<6

De prijs van deze sensor bedraagt 48 euro.

2.12 CO-A4

Op onderstaande afbeelding kunnen de afmetingen van de CO-sensor teruggevonden worden. Alle afmetingen zijn in millimeters gegeven. In tabel 8 worden de eigenschappen van de sensor samengevat.



FIGUUR 26: AFMETINGEN CO-SENSOR

Bron: (Alphasense, 2019c)

TABEL 8: EIGENSCHAPPEN CO-SENSOR

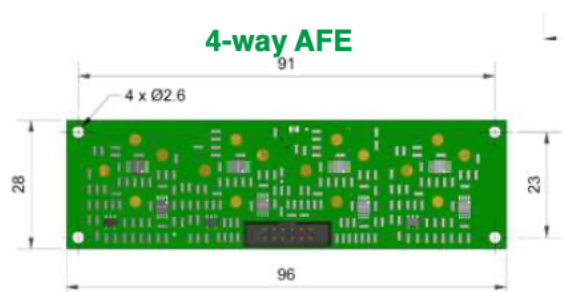
Bron: bewerkt van Alphasense, 2019c

Sensorwaarden CO-A4		
Prestaties		
Sensitiviteit	nA/ppm bij 2 ppm CO	220 tot 410
Respons tijd	Van nul naar 10 ppm CO	< 30
Nul stroom	nA in zuivere lucht bij 20°C	-100 tot +10
Ruis	afwijking van signaal (in ppb)	20
Bereik	ppm CO grens voor goede resultaten	500
Lineariteit	ppm fout op volledige schaal, lineair op 0 en 20 ppm CO	0 tot -5
Overgas limiet	Maximale ppm om nog een stabiele respons te geven op gas concentratie	2000
Levensduur		
Nul drift	In ppb, verandering per jaar in labolucht	< 100
Sensitiviteit drift	in %, verandering per jaar	< 10
Levensduur	# maanden tot signaal 50% is van originele signaal	> 36
Kruissensitiviteit		
Filter capaciteit	ppm u	250 000
H2S	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm H2S	<0,1
NO2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm NO2	<-2
Cl2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm Cl2	<0,1
NO	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm SO2	<-2
SO2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 5 ppm SO2	<0,1
C2H4	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm C2H4	<0,5
NH3	Sensitiviteit % gemeten gas @ 20 ppm NH3	<0,1
H2	Sensitiviteit % gemeten gas @ 100 ppm H2	<50
Belangrijke specificaties		
Temperatuur bereik	°C	-30 tot 50
Druk bereik	kPa	80 tot 120
Luchtvochtigheid bereik	% relatieve luchtvochtigheid (continu)	15 tot 90
Opslagperiode	# maanden bij 3 tot 20°C	6
Belastingsweerstand	Ohm (aangeraden op AFE te gebruiken)	33 tot 100
Gewicht	g	<6

De prijs van deze sensor bedraagt 48 euro.

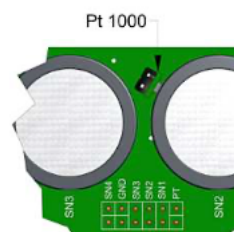
2.13 SENSORBORD

De sensoren zitten allemaal op een sensorbord van Alphasense. Dit bord is specifiek ontworpen om zo weinig mogelijk ruis te creëren tijdens de metingen. Het type dat gebruikt wordt is de 4-way AFE. Hierop zijn 4 plaatsen voorzien voor 4 gassensoren en in het midden bevindt zich nog een temperatuur sensor. De temperatuursensor staat vast op het bord, maar de gassensoren worden er gewoon op geklikt. Op die manier kan men zelf kiezen welke sensoren men op het bord wil plaatsen.



FIGUUR 27: AFMETINGEN SENSORBORD

Bron: (Alphasense, 2019d)



FIGUUR 28: TEMPERATUURSENSOR LOCATIE

Bron: (Alphasense, 2019d)

De afmetingen op bovenstaande figuren zijn in millimeter uitgedrukt.

In dit project wordt het sensorbord van het type 810-0023-00 gebruikt.

Per type is de locatie van de sensoren vastgelegd. Men kan niet zomaar elke sensor eender waar plaatsen op het bord. De positie van de sensor op het bord is dus van belang.

TABEL 9: GESCHIKTE SENSORPLAATSEN OP BORD

Bron: (Alphasense, 2019d)

Part number	SN1	SN2	SN3	SN4
810-0023-00	NO ₂ /O ₃	NO ₂ /O ₃	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)
810-0023-01	NO ₂ /O ₃	NO ₂ /O ₃	NO / (CO/SO ₂ /H ₂ S)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)
810-0023-02	NO ₂ /O ₃	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)
810-0023-03	NO ₂ /O ₃	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)	NO / (CO/SO ₂ /H ₂ S)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)
810-0023-04	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)	NO / (CO/SO ₂ /H ₂ S)	CO/SO ₂ /H ₂ S / (NO)

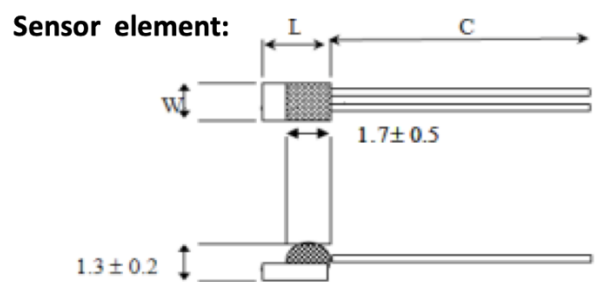
Zoals weergegeven in tabel 9 moeten de sensoren dus geplaatst worden.

Op dit project staan de sensoren in volgende volgorde. Op SN1 staat de NO₂-sensor, op SN2 de O₃-sensor, op SN3 de SO₂-sensor en op SN4 staat de CO-sensor.

De prijs van het sensorbord bedraagt 152 euro. De bijhorende bekabeling bedraagt 10 euro.

2.13.1 *TEMPERATUURSENSOR*

De temperatuursensor is van de producent KEB Taiwan met nummer TW-TF-26-RW-P3-XXX en is van het type Pt 1000. Deze is zeer klein en staat rechtopstaand tussenin de sensoren op het sensorbord. De sensor genereert een analoog signaal zoals de gassensoren en geeft dus een signaal weer in mV. Het bereik van de sensor ligt tussen -60°C en 200°C. De sensor bevat een weerstand en deze weerstand is temperatuur afhankelijk. Door deze temperatuur afhankelijke weerstand, verandert de uitgangsspanning ook. Men kan de spanning over de weerstand meten.



FIGUUR 29: TEMPERATUURSENSOR

Bron: (KEB Taiwan, 2017)

3 CONSTRUCTIEMETHODE: SOFTWARE

Om metingen te kunnen uitvoeren dient er software in de taal Python te worden geschreven die met de hardware communiceert. Zonder dit kunnen er geen metingen uitgevoerd worden.

3.1 PYTHONCODE VOOR METING

Op onderstaande afbeeldingen kan de volledige code gevonden worden om het signaal van de sensoren te kunnen uitlezen. De lijnen die beginnen met een # geven extra informatie weer over wat het exacte doel of de functie is van de bijhorende code. De code is deels gebaseerd op de code die voorzien werd door het bedrijf van de ADC. De code leest een kanaal van de ADC via de functie "Getreading", daarna wordt de meting weggeschreven en nadat alle sensoren zijn uitgelezen wacht het gedurende een vaste periode om de sensoren allemaal opnieuw te meten. In de code wordt de referentiespanning van 5V eveneens ingevoerd. Alle resultaten die de Pi meet worden vermenigvuldigd met een factor 1000 om alles in millivolt op te slagen. Dit wordt gedaan omdat de kalibratie ook in millivolt gebeurt. Na iedere handeling wordt een "time.sleep(tiempo)" commando ingevoerd, deze is nodig tussen iedere kanaaluitlezing. Zonder dit start de Pi niet aan het volgende commando.

```

#ophalen van tijd
from datetime import date
from datetime import datetime
import time

#locatie en input raspberry pi en ADC
import smbus
import sys
import subprocess

#variabele waar locatie schrijfbestand in wordt opgeslagen
fdel = open("/home/pi/Desktop/Tshirp.odt", "w")
# om file mee te beginnen
fdel.write(" ")

#locatie poorten
from smbus import SMBus
from sys import exit

#variabele gevuld met locatie
bus = SMBus(1)

#variabele met toegewezen kanaal en bijhorende locatie
address = 0b1110110

channel0      =      0xB0
channel1      =      0xB8
channel2      =      0xB1
channel3      =      0xB9
channel4      =      0xB2
channel5      =      0xBA
channel6      =      0xB3
channel7      =      0xBB
channel8      =      0xB4
channel9      =      0xBC
channel10     =      0xB5
channel11     =      0xBD
channel12     =      0xB6
channel13     =      0xBE
channel14     =      0xB7
channel15     =      0xBF

#referentiespanning
vref = 5

max_reading = 8388608.0

```

FIGUUR 30: CODE DEEL 1

Bron: eigen werk

```

# lange = aantal bits te lezen.
# minimum van 3 bytes worden gelezen. Wij lezen 6 bytes,
# de laatste 3 worden genegeerd.
# zeit = hoe frequent de uitlezingen moeten gelezen worden van de ADC.
# dit definieert de slaaptijd tussen de uitlezingen.
# tiempo = geeft weer hoe dikwijls elk kanaal uitgelezen wordt over de I2C bus.

lange = 0x06 # aantal bits te lezen in het blok
zeit = 15    # aantal seconden tussen elke meting
tiempo = 0.5 # aantal seconden tussen elke kanaaluitlesing

def getreading(adc_address,adc_channel):
    bus.write_byte(adc_address, adc_channel)
    time.sleep(tiempo)
    reading = bus.read_i2c_block_data(adc_address, adc_channel, lange)
    #----- Start conversie voor kanaal data -----
    valor = (((reading[0]&0x3F)<<16))+((reading[1]<<8))+((reading[2]&0xE0)))
    #----- Einde conversie voor het kanaal -----
    volts = valor*vref/max_reading

    if( (reading[0]& 0b11000000) == 0b11000000):
        print ("*****")
        print ("Input voltage to channel 0x%x is either open or more than %5.2f. The reading
              |may not be correct. Value read in is %12.8f Volts." % ((adc_channel), vref, volts))
        print ("*****")

    return volts
#=====

time.sleep(tiempo)

ch0_mult = 1000 # vermenigvuldigingsfactor op de waarde die de pi geeft

# openen bestand waar data in opgeslagen wordt
while (True):
    f = open("Tshirp.rtf", "a")

    Ch0Value = ch0_mult*getreading(address,channel0)
    f.write("T %f " % (Ch0Value))
    f.flush()
    print("Temp is %12.2f" % (Ch0Value))

    time.sleep(tiempo)

    Ch1Value = ch0_mult*getreading(address, channel1)
    f.write("NO2 %f " % (Ch1Value))
    f.flush()
    print("NO2 is %12.2f" % (Ch1Value))

    time.sleep(tiempo)

```

FIGUUR 31: CODE DEEL 2

Bron: eigen werk

```

now = datetime.now()
Ch2Value = ch0_mult*getreading(address, channel2)
f.write("NO2 %f " % (Ch2Value))
f.flush()
print("NO2 is %12.2f" % (Ch2Value))

time.sleep(tiempo)

Ch3Value = ch0_mult*getreading(address, channel3)
f.write("OX %f " % (Ch3Value))
f.flush()
print("OX is %12.2f" % (Ch3Value))

time.sleep(tiempo)

Ch4Value = ch0_mult*getreading(address, channel4)
f.write("OX %f %19.19s " % (Ch4Value, now))
f.flush()
print("OX at %19.19s is %12.2f" % (now, Ch4Value))

time.sleep(tiempo)

Ch5Value = ch0_mult*getreading(address, channel5)
f.write("SO2 %f " % (Ch5Value))
f.flush()
print("SO2 is %12.2f" % (Ch5Value))

time.sleep(tiempo)

now = datetime.now()
Ch6Value = ch0_mult*getreading(address, channel6)
f.write("SO2 %f " % (Ch6Value))
f.flush()
print("SO2 is %12.2f" % (Ch6Value))

time.sleep(tiempo)

Ch7Value = ch0_mult*getreading(address, channel7)
f.write("CO %f " % (Ch7Value))
f.flush()
print("CO is %12.2f" % (Ch7Value))

time.sleep(tiempo)

Ch8Value = ch0_mult*getreading(address, channel8)
f.write("CO %f \n" % (Ch8Value))
f.flush()
print("CO is %12.2f \n" % (Ch8Value))

time.sleep(tiempo)

sys.stdout.flush()# op exit of interrupt, zonder dit kunnen metingen verloren gaan
time.sleep(zeit)

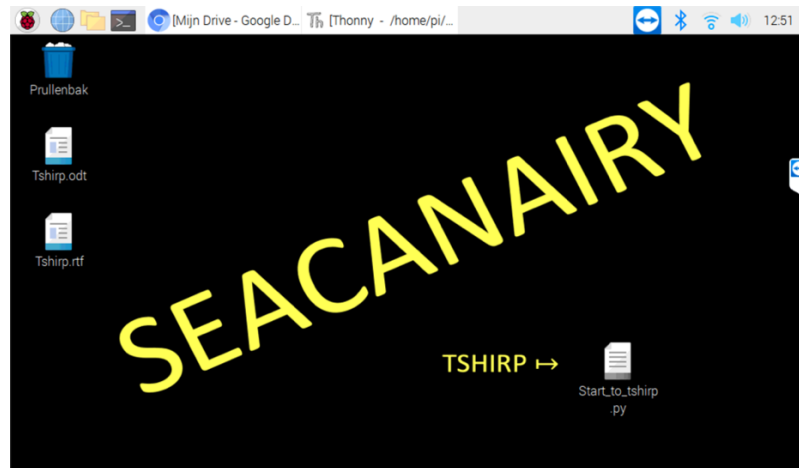
```

FIGUUR 32: CODE DEEL 3

Bron: eigen werk

3.1.1 PROGRAMMA STARTEN

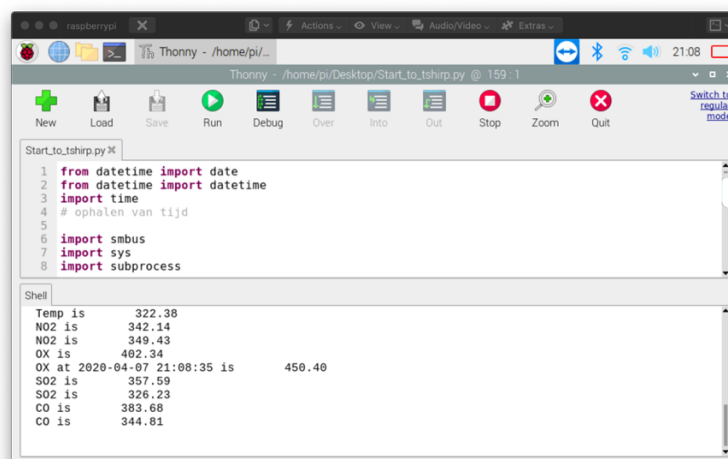
Om het programma dat hierboven getoond wordt te starten moet men op het bestand Start_to_tshirp.py geklikt worden.



FIGUUR 33: SCHERMAFBEELDING PROGRAMMA STARTEN STAP 1

Bron: eigen werk

Vervolgens zal men het beeld van figuur 34 zien en moet op run geklikt worden bovenaan in de werkbalk. Van zodra hierop gedruwd is, zal de Pi beginnen met meten en zullen de metingen onderaan kunnen gezien worden.



FIGUUR 34: SCHERMAFBEELDING PROGRAMMA STARTEN STAP 2

Bron: eigen werk

3.2 CODE VOOR EXTERN BEELDSCHERM

Om het beeld van de Pi goed te kunnen weergeven op het externe 7 inch scherm moeten er aanpassingen gemaakt worden in het systeem van de Raspberry. Op onderstaande afbeelding kan de code die ingevoerd moet worden in de terminal teruggevonden worden. Zonder deze code in te geven zal het scherm maar gedeeltelijk of zeer schokkerig getoond worden. Dit moet eenmalig ingevoerd worden in de terminal van de Pi en zal nadien altijd automatisch gebeuren.

```
max_usb_current=1
hdmi_group=2
hdmi_mode=87
hdmi_cvt 1024 600 60 6 0 0 0
hdmi_drive=1
```

FIGUUR 35: CODE VOOR SCHERM

Bron: (Waveshare, 2019)

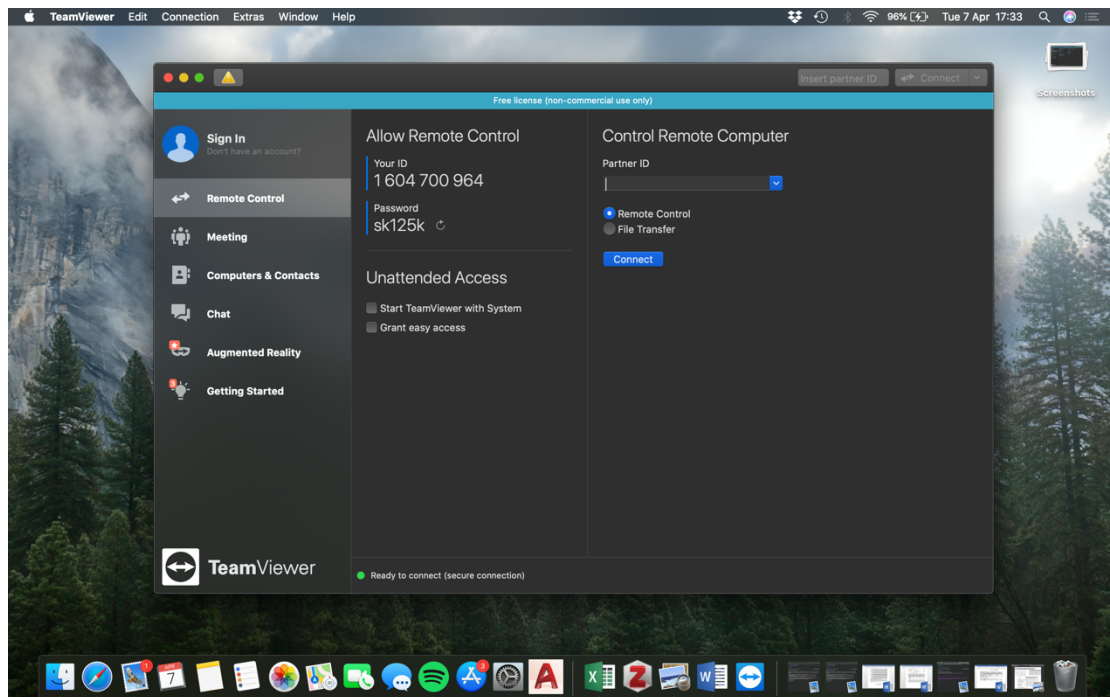
3.3 TEAMVIEWER

Om de Seacanairy aan de cloud te koppelen, dient men de software Teamviewer op de Raspberry Pi te installeren, maar ook op het toestel dat de Raspberry Pi van op afstand wilt bedienen.

Op de Pi is teamviewer geïnstalleerd, hiermee kan men te allen tijde de Raspberry bedienen vanop afstand. De enige voorwaarde die hieraan verbonden is, is internet. Het doel van Teamviewer op de Pi te zetten is wanneer de opstelling voor een lange tijd aan boord gezet zou worden. Zodoende kan men bestanden uploaden in de *cloud* en tegelijkertijd controleren of de metingen nog steeds goed verlopen vanop een afstand.

3.3.1 STAPPENPLAN

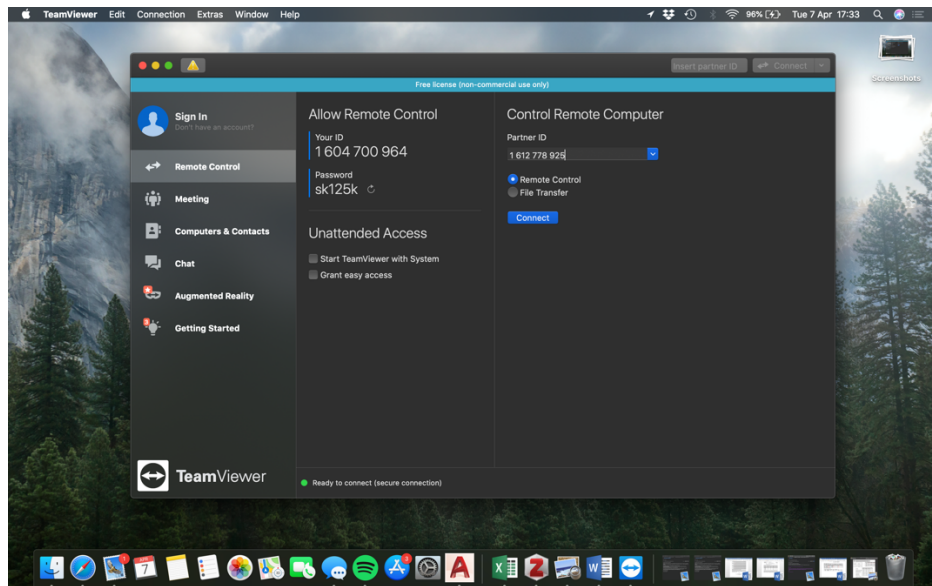
Eerst moet teamviewer geïnstalleerd worden op het apparaat vanwaar men de Pi wil gaan besturen. Eens het programma geïnstalleerd en geopend is, ziet men dit beeld:



FIGUUR 36: SCHERMAFBEELDING TEAMVIEWER STAP 1

Bron: eigen werk

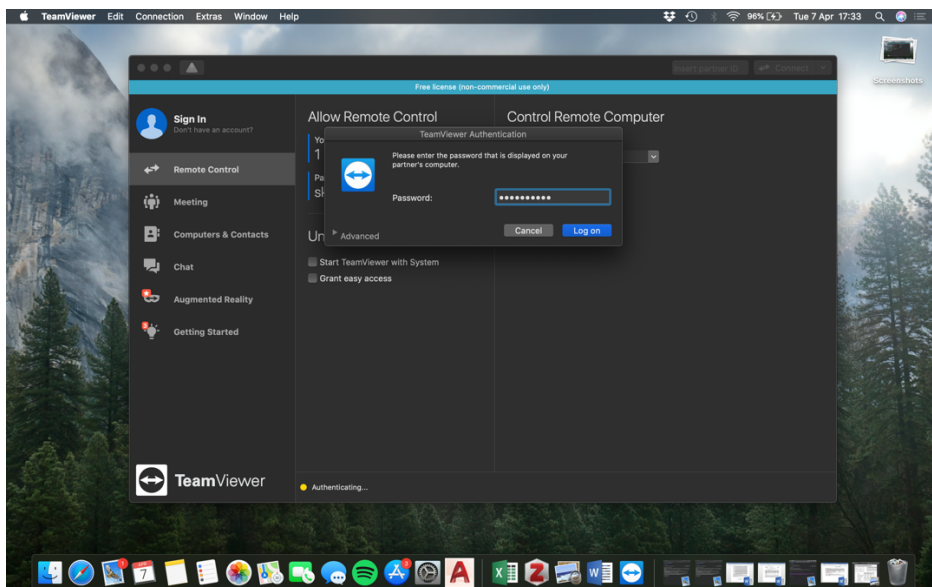
Vervolgens gaat men het vaste nummer van de Pi intypen bij het partner ID. Dit is altijd hetzelfde en is 1 612 778 925. Dit nummer is uniek voor deze Raspberry Pi.



FIGUUR 37: SCHERMAFBEELDING TEAMVIEWER STAP 2

Bron: eigen werk

Vervolgens klikt men "connect" aan en dan komt men uit op het volgende scherm. Hier moet men het wachtwoord invullen om toegang te krijgen tot de Raspberry. Het wachtwoord is: se@c@n@iry. Dit werd ingesteld via de Pi zelf.

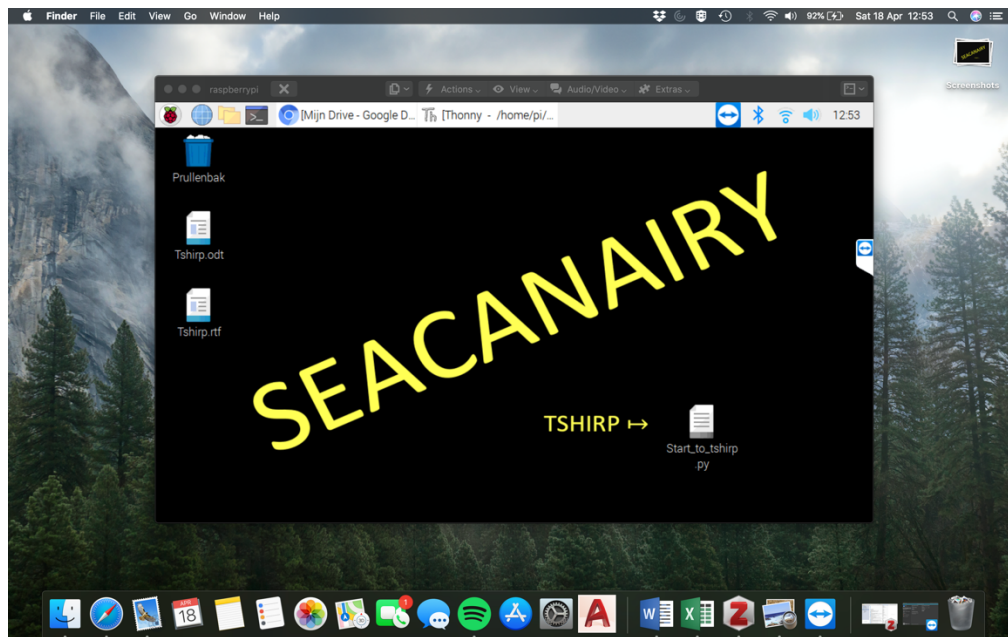


FIGUUR 38: SCHERMAFBEELDING TEAMVIEWER STAP 3

Bron: eigen werk

Na het wachtwoord te hebben ingegeven bedient men de Pi zelf, maar dan vanop een andere pc, laptop of gsm. Soms kan het zijn dat men het wachtwoord van de Pi zelf moet ingeven om toegang te krijgen. Dit wachtwoord is: raspberry. De loginnaam van de Pi is raspberry.

Onderstaande schermafbeelding toont het resultaat.



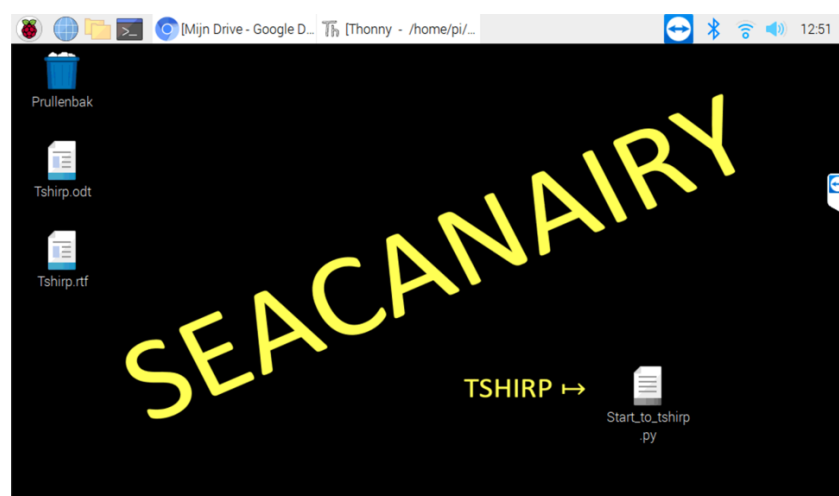
FIGUUR 39: SCHERMAFBEELDING TEAMVIEWER STAP 4

Bron: eigen werk

3.4 GOOGLE DRIVE

Voor de luchtkwaliteitsmeter is een Googleaccount aangemaakt. De naam hiervan is Seacanairy@gmail.com en het wachtwoord is se@c@n@iry. De reden hiervoor is om toegang te hebben tot een drive van Google. Wanneer men dan via teamviewer op afstand werkt in de Raspberry kan men zo de meetresultaten opslagen in de cloud als Excel bestand. Hieronder kan een stappenplan teruggevonden worden van hoe dit in zijn werk gaat via teamviewer. Dit kan natuurlijk ook perfect zonder teamviewer vanuit de Raspberry in se.

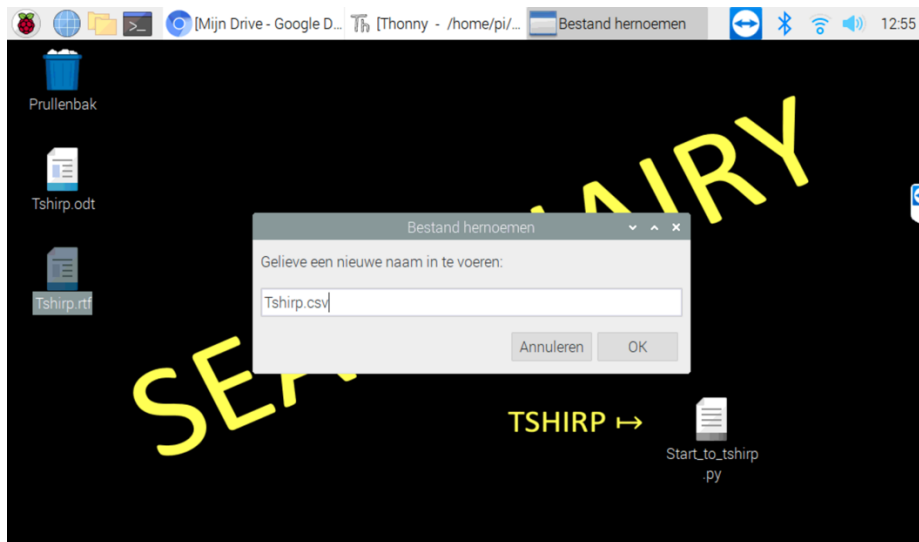
3.4.1 STAPPENPLAN DATA OPSLAAN IN GOOGLE DRIVE ALS EXCEL BESTAND



FIGUUR 40: SCHERMAFBEELDING DATA OPSLAAN STAP 1

Bron: eigen werk

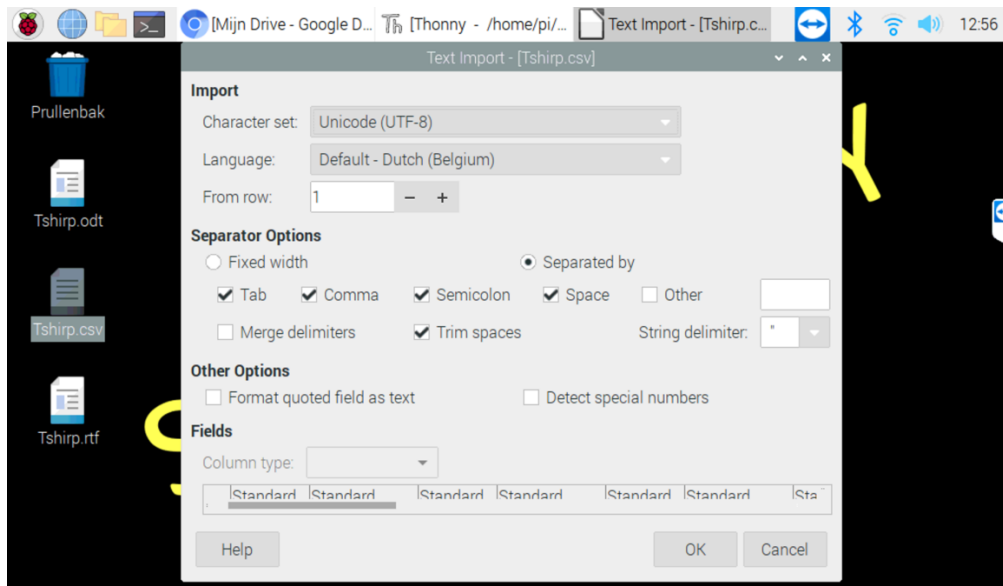
Op stap 1 ziet men onderaan de prullenbak 2 bestanden staan. Het onderste bestand genaamd Tshirp.rtf wordt hernoemd naar 'CSV' via de rechtermuisknop. Dit mag niet gedaan worden door eerst het bestand te openen en het dan te hernoemen omdat de Pi deze bewerking dan weigert uit te voeren.



FIGUUR 41: SCHERMAFBEELDING DATA OPSLAAN STAP 2

Bron: eigen werk

Vervolgens wordt het omgevormde CSV-bestand geopend. Dit gebeurt via Libre Office, een standaardprogramma dat op de Pi staat. Het volgende scherm zal zich nadien openen.

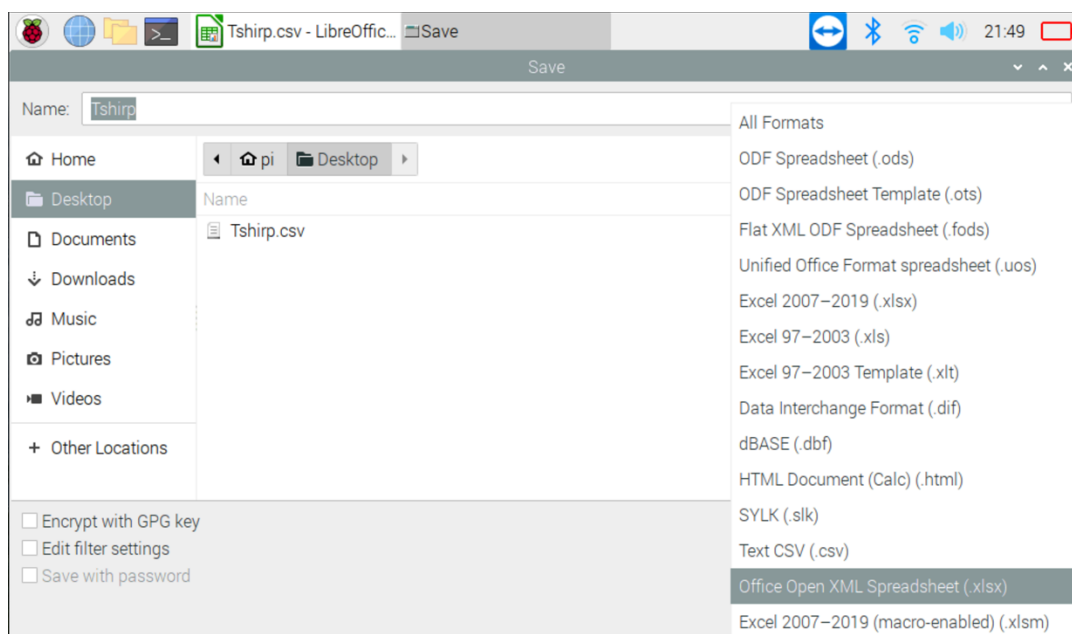


FIGUUR 42: SCHERMAFBEELDING DATA OPSLAAN STAP 3

Bron: eigen werk

Hierbij is het belangrijk dat bij character set zeker de keuze Unicode (UTF-8) aangeduid wordt. Dit durft soms uit zichzelf te veranderen waardoor het bestand vreemde vormen kan aannemen.

Het volgende dat gezien kan worden is een bestand dat vele gelijkenissen toont met een Excel-bestand, dit is het echter nog niet. Om het om te zetten naar een Excel-bestand moet bovenaan links op *file => save as...* geklikt worden. Vervolgens wordt het volgende scherm gekozen waarbij de office open XML Spreadsheet moet gekozen worden. Vervolgens duwt men op save en dan staat het kant-en-klare Excel-document klaar om opgeslagen te worden in de drive vanuit het bureaublad.



FIGUUR 43: SCHERMAFBEELDING DATA OPSLAAN STAP 4

Bron: eigen werk

Nadien wordt Chromium geopend en typen we daar Google Drive in bovenaan de zoekbalk. Chromium is de internetbrowser van Raspberry zelf, een andere browser kan niet gekozen worden om het internet te bereiken. In de drive kan het Excel-bestand dan opgeslagen worden onder de map van meetresultaten. Vanaf dat moment staat alle data veilig in de cloud en kan deze van overal geraadpleegd en gedownload worden.

Eens het bestand succesvol opgeslagen is, wordt het aangeraden beide "Tshirp-bestanden" die op het bureaublad staan te verwijderen. Indien dit niet wordt gedaan, zullen de nieuwe data in hetzelfde bestand komen te staan onder de oudere metingen. Dit kan voor verwarring zorgen.

3.5 SCHERM VAN DE SEACANAIRY VERGRENDELEN

Na het gebruik van de teamviewer applicatie verschijnt er iedere keer een pop-up venster. Dit venster verhindert de Pi om zichzelf na een tijdje te vergrendelen en deze blijft dus het commando geven om het scherm aan te laten en zich niet te vergrendelen. Omdat het scherm voor langere tijd aan laten staan schadelijk is moet dit verhinderd worden. Dit wordt opgelost door de Pi manueel iedere keer op het einde van een teamviewer-sessie te vergrendelen. Doordat de Pi vergrendeld is, zal het pup-up venster niet meer tevoorschijn komen en wordt het scherm wel uitgezet. De metingen blijven verder lopen ongeacht of de Pi vergrendeld is of niet. Wanneer men zich uitlogt op de Pi worden de metingen wel gestopt. Men mag zich dus nooit afmelden tijdens een metingsessie.

De vergrendelfunctie wordt eenmalig in de Pi geprogrammeerd via de terminal via de volgende codes.

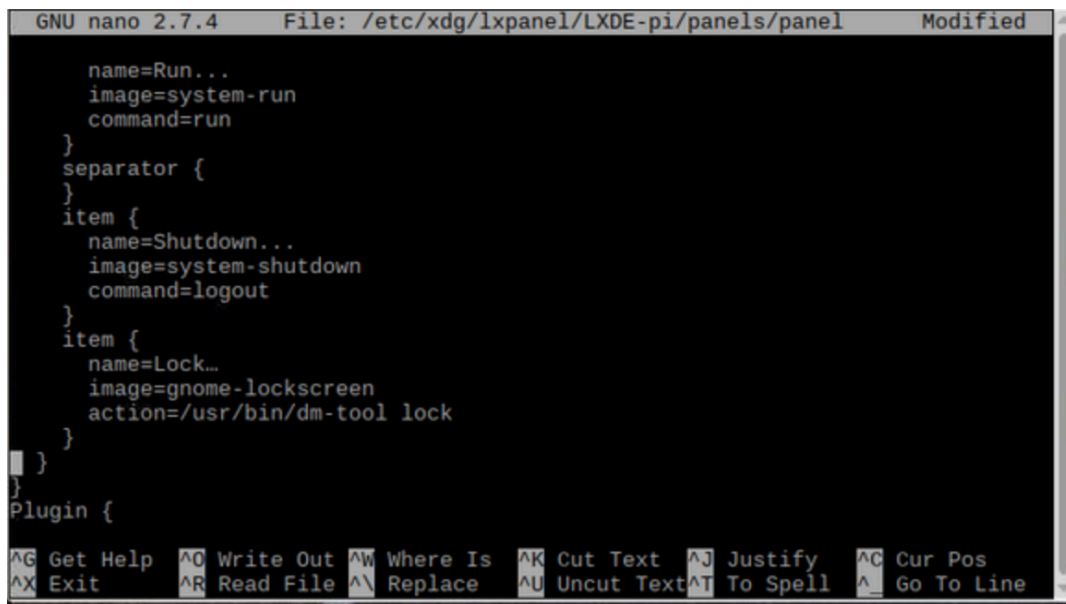
De eerste code die men moet ingeven in de terminal is de volgende:

```
sudo nano /etc/xdg/lxpanel/LXDE-pi/panels/panel
```

Nadien komt men in een scherm terecht waarin men het volgende moet typen:

```
item {  
    name=Lock...  
    image=gnome-locksreen  
    action=/usr/bin/dm-tool lock  
}
```


Het resultaat zou er zoals op figuur 44 uit moeten zien.

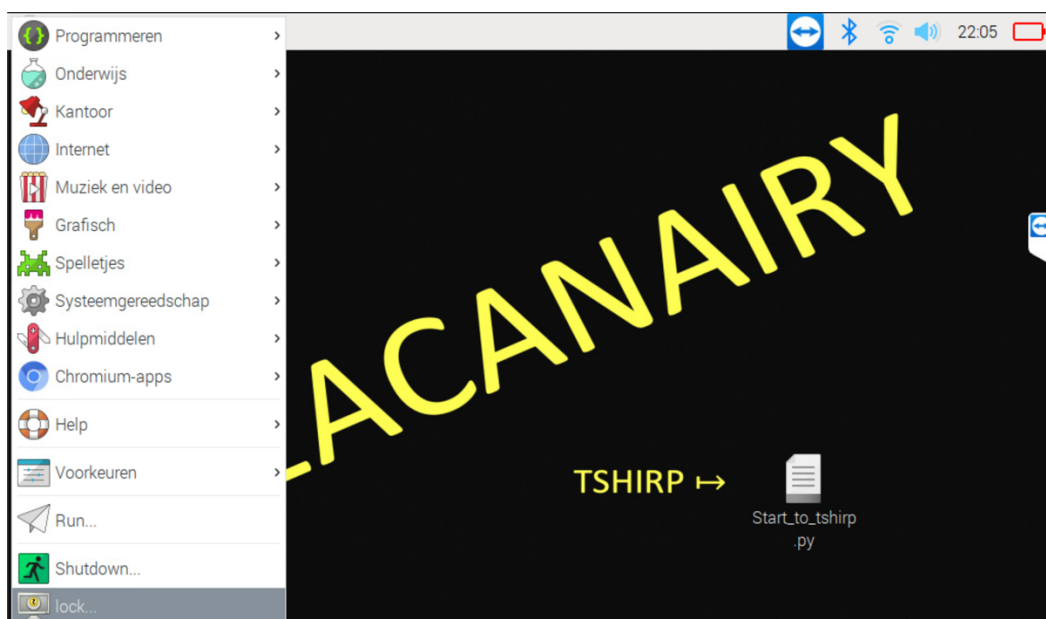


```
GNU nano 2.7.4 File: /etc/xdg/lxpanel/LXDE-pi/panels/panel Modified
name=Run...
image=system-run
command=run
}
separator {
}
item {
name=Shutdown...
image=system-shutdown
command=logout
}
item {
name=Lock...
image=gnome-lockscreen
action=/usr/bin/dm-tool lock
}
}
Plugin {
^G Get Help ^O Write Out ^W Where Is ^K Cut Text ^J Justify ^C Cur Pos
^X Exit ^R Read File ^N Replace ^U Uncut Text ^T To Spell ^_ Go To Line
```

FIGUUR 44: TERMINALSCHERM VERGRENDEN COMMANDO

Bron: (Pihut, 2018)

Vanaf de volgende keer dat de Pi wordt opgestart, kan het vergrendel commando teruggevonden worden zoals op de volgende foto bij figuur 45. Na de vergrendeling kan men probleemloos teamviewer afsluiten.



FIGUUR 45: VERGRENDELFUNCTIE PI

Bron: eigen werk

4 ALGEMENE KALIBRATIE

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd hoe de algemene parameters met betrekking tot de kalibratie bepaald worden. Deze parameters worden later gebruikt in de eerste kalibratie. Zonder deze kan men niet beginnen kalibreren. De manier waarop deze parameters juist bepaald worden en wat deze betekenen wordt ook verklaard. Bij de eerste kalibratie worden de gevonden parameters ingevoerd in de algoritmen van de producent per sensortype. Dit is voor iedere sensor anders. In het volgende hoofdstuk wordt de tweede kalibratie uitgevoerd die een constante toevoegt aan de eerste kalibratie. Deze constante is nodig om de permanente fout die in de opstelling zit na de eerste kalibratie weg te filteren. In de volledige kalibratie worden de eerste en tweede kalibratie verwerkt in één volledige kalibratieformule per sensor en per algoritme. Na deze kalibratie is de Seacanairy klaar voor gebruik in het veld.

4.1 GASSENSOREN

Om het signaal naar een concentratie te kunnen omzetten dienen alle kalibratieconstanten gekend te zijn, alsook de formules die de conversie uitvoeren. Jammer genoeg zijn de kalibratieconstanten die door Alphasense worden gegeven niet in de juiste vorm en niet volledig. Dat komt omdat de sensoren apart van de Alphasense front end 810-0023-00 werden gekocht.

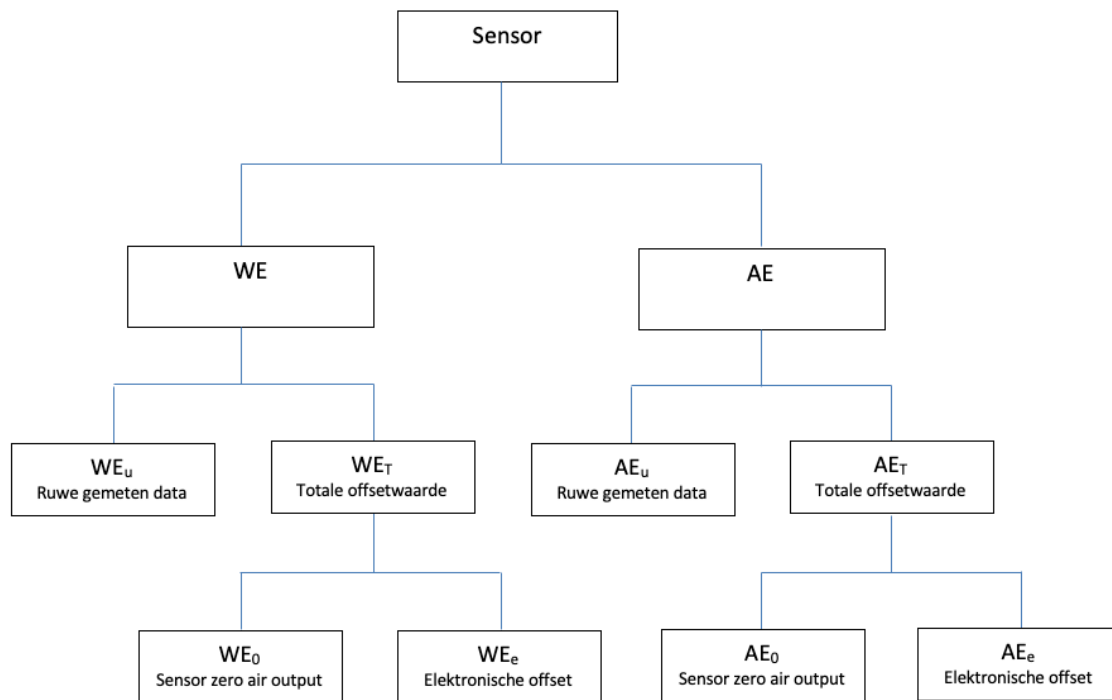
Vooraleer men kan beginnen met de kalibratie, moeten alle waarden van de volgende tabel gekend zijn, behalve de laatste namelijk C_{gas} .

TABEL 10: ALGEMENE PARAMETERS SENSOREN

Bron: bewerkt van (Alphasense, 2013)

Algemene parameters	
WE	Working electrode
AE	Auxiliary electrode
WE_u	Uncorrected raw output of WE (mV)
AE_u	Uncorrected raw output of AE (mV)
WE_c	Corrected WE output (mV)
WE_e	WE electronic offset (mV)
AE_e	AE electronic offset (mV)
WE₀	WE sensor zero (mV)
AE₀	AE sensor zero (mV)
WE_T	Total WE zero offset (mV)
AE_T	Total AE zero offset (mV)
n_T	Correctiefactor voor algoritme 1
k_T	Correctiefactor voor algoritme 2
k'_T	Correctiefactor voor algoritme 3
k''_T	Correctiefactor voor algoritme 4
S	Sensitiviteit (nA/ ppm)
G	Gain (mV/nA)
C_{gas}	Concentratie gas in ppm

In onderstaand schema kunnen de parameters overzichtelijk afgelezen worden.

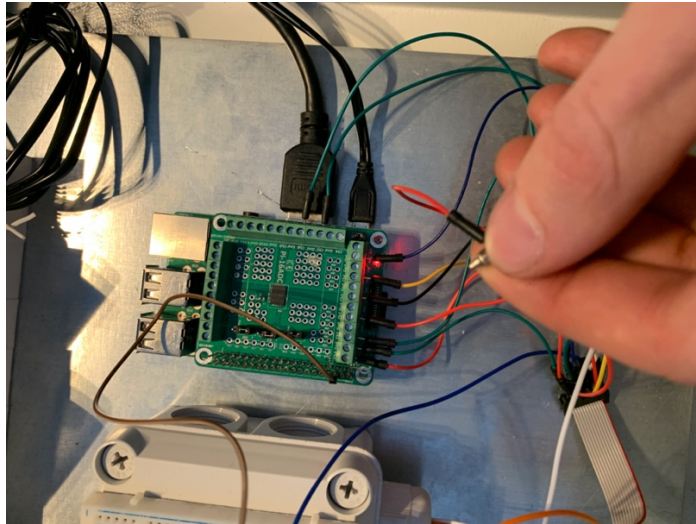


FIGUUR 46: SCHEMA VAN PARAMETERS

Bron: eigen werk

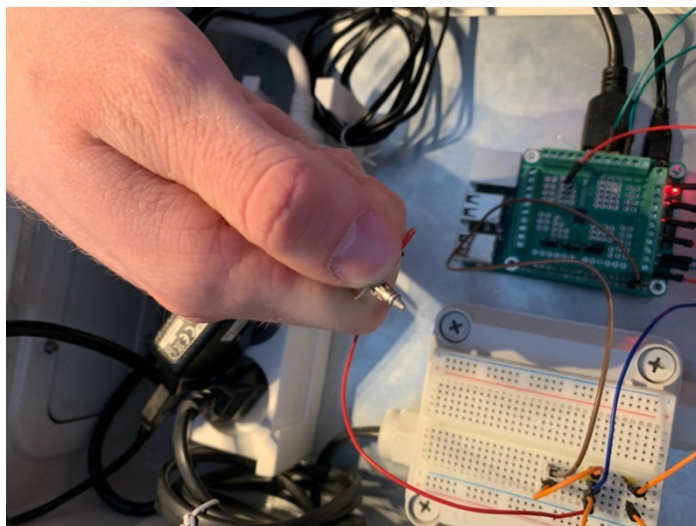
4.1.1 BEPALING VAN DE PARAMETERS

De WE_u en AE_u zijn de waarden die rechtstreeks gemeten worden door de Pi. Dit zijn dus de ruwe data. WE_c bekomt men als uitkomst na een van de 4 algoritmen toegepast te hebben. De WE_e en AE_e verkrijgt men ofwel via een kalibratie certificaat van de producent ofwel door deze zelf te meten met een multimeter. De multimeter wordt aan de ene kant aangesloten op de aarding en aan de andere kant op het uiteinde van een van de sensorkabels. Onderstaande afbeeldingen illustreren dit. De sensoren worden bij deze handeling van het bord gehaald.



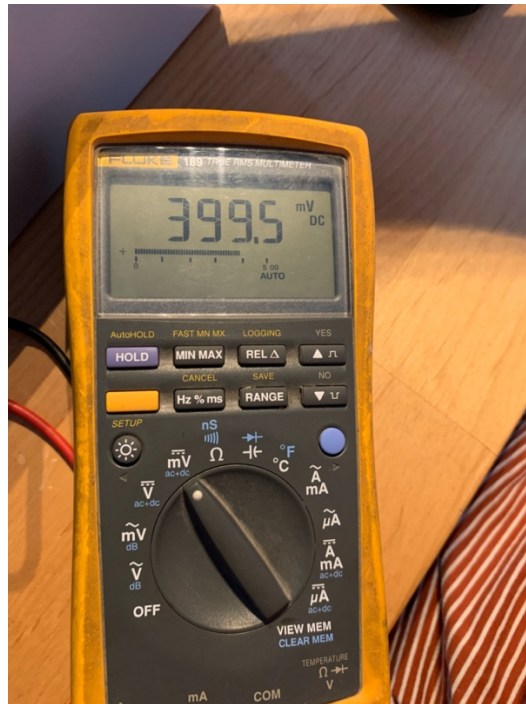
FIGUUR 47: MULTIMETER PROBE AAN EEN SENSORKABEL

Bron: eigen werk



FIGUUR 48: MULTIMETER PROBE AAN AARDING

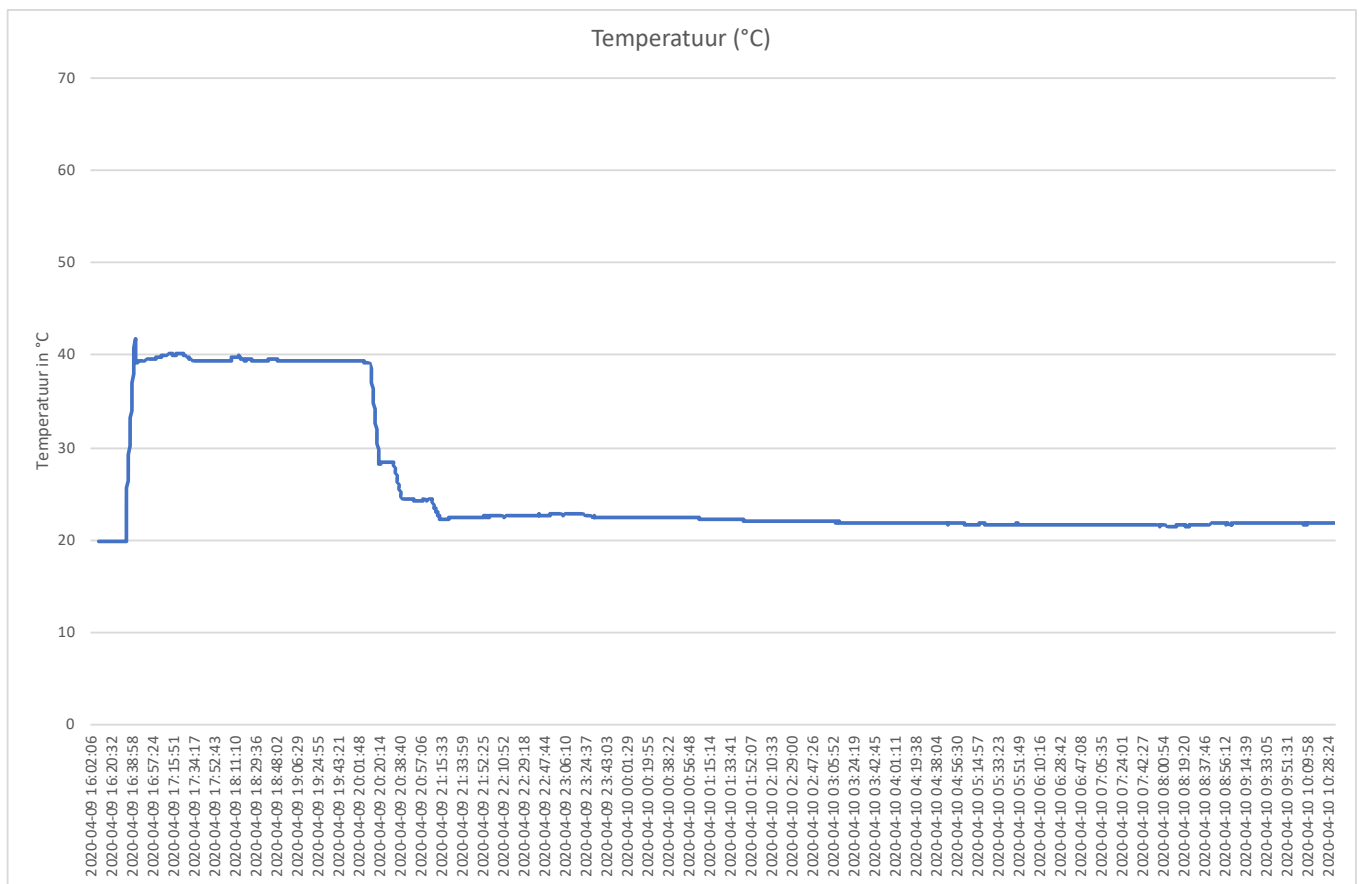
Bron: eigen werk



FIGUUR 49: UITLEZING OP MULTIMETER

Bron: eigen werk

Dit is de manier die voorgesteld werd door de producent zelf. Echter wanneer de elektrische kabels aangeraakt worden, gaan deze zichzelf opladen. Hierdoor stijgen de voltages enorm en zijn deze zeer onregelmatig. De opgenomen spanning daalt zeer traag weer naar de normale waarden. Een uitzetting hiervan van de temperatuur kan op volgende grafiek teruggevonden worden. Het verloop van de andere signalen verloopt identiek met die van de temperatuur.



FIGUUR 50: VERSTOORD ELEKTRONISCH SIGNAAL

Bron: eigen werk

Op de grafiek van figuur 50, kan een forse stijging afgelezen worden wanneer de kabels aangeraakt worden om 16u40. Deze stijging blijft ongeveer vier uur duren. Dit betekent dat wanneer de kabels aangeraakt worden of bewegen, de metingen voor vier uur onbruikbaar zijn. Dit probleem wordt opgelost door alle kabels vast te binden met tiewraps. De elektronische spanningen van het systeem die gemeten werden via de multimeter kunnen in tabel 11 afgelezen worden. Dit werd gemeten om de elektronische offset te bepalen van het sensorbord met een multimeter.

TABEL 11: METINGEN ELECTRONIC OFFSET MULTIMETER

Bron: eigen werk

Electronic offset met multimeter								
Naam specifieke gassensor	NO2-A43F 212870427		OX- A431 214810129		SO2-A4 134330003		CO-A4 132330502	
verdeling WE/AE	WE	AE	WE	AE	WE	AE	WE	AE
electronic offset (mV)	300	309	443	448	353	333	396	320

Voorgaande manier is dus niet betrouwbaar omdat de kabels aangeraakt worden tijdens de metingen met de multimeter. Daarom werd er gezocht naar een andere manier om de elektronische offset te meten.

De Raspberry Pi geeft in se zelf spanningen weer die hij ontvangt via de ADC. In theorie is deze dus reeds een voltmeter die al deze voltages gewoon opslaat. Indien de sensoren van het bord gehaald worden bekomt men zo ook het elektronische voltage, maar dan gemeten door de Pi. Om zeker te zijn dat de juiste waarde genomen werd en alle resterende spanning uit het systeem was, heeft men de opstelling enkele uren laten draaien. De resterende spanning vloeit weg via de aarding. De spanningen die gemeten werden door de Pi, kunnen in de kalibratie bij de sensoren gevonden worden.

WE_0 en AE_0 zijn de output van de sensoren in zuivere lucht, zonder aanwezigheid van het doelgas. Dat wil zeggen dat dit het voltage is dat gecreëerd wordt door de sensor zonder dat deze reageert met het doelgas. Deze kan gevonden worden aan de hand van het kalibratie document van de sensor. Dit kalibratie document is gegeven door de producent. Men kan dit ook zelf doen door de sensor in zuivere lucht te laten staan voor enkele uren. Hierbij moet men wel zeker weten dat de ruimte vrij is van het doelgas. Wanneer een stabiele waarde wordt bereikt in de metingen, zal het evenwichtspunt en dus de sensor zero air waarde bereikt zijn. Dit wordt voor alle duidelijkheid in dit project niet zelf gedaan maar berekent via het document van de producent

De output van de sensoren in zero air (WE_0/AE_0) kan men berekenen door de elektronische spanning (WE_e/AE_e) af te trekken van de totale gemeten spanning (WE_T/AE_T).

$$WE_e + WE_0 = WE_T \Rightarrow WE_0 = WE_T - WE_e$$

Op het kalibratiedocument van de sensor dat gegeven wordt door de producent, staat de output van de sensor (WE_0/AE_0), zie tabel 12. Dit is dus de output van de sensor in zuivere lucht. Deze is niet gegeven in voltages maar wel in ampères. Deze kunnen omgezet worden naar voltages door deze te vermenigvuldigen met de *gain*. De *gain* is voor alle sensoren van de A reeks behalve H₂S, CO en SO₂ gelijk aan -0,73 mV/nA. Voor de H₂S-, SO-2- en CO-sensoren is de gain gelijk aan +0,80 mV/nA. Deze gain is verkregen via de producent (Alphasense) zelf. Wanneer men echter het bord samen met de sensoren koopt, geeft de producent zelf alle waarden weer in mV en hoeft men deze omzetting via de gain dus niet meer te doen.

TABEL 12: KALIBRATIEDOCUMENT SENSOR

Bron: (Alphasense, z.d.)

Serial No	Zero Current (nA)	Aux Zero Current (nA)	Sensitivity (nA/ppm)	Response t90 (s)
Min	32,2	15,4	-400,7	18,8
Mean	32,2	15,4	-400,7	18,8
Max	32,2	15,4	-400,7	18,8
(+/-) 95% Conf.	NA	NA	NA	NA
212870427	32,2	15,4	-400,7	18,8

Formule om WE_0 om te zetten naar mV:

$$WE_0(nA) \times G \left(\frac{mV}{nA} \right) = WE_0(mV)$$

TABEL 13: GAINWAARDEN

Bron: bewerkt van (Alphasense, 2013)

Gainwaarden (mV/nA)	
H ₂ S, CO en SO ₂	0,80
Alle andere	-0,73

Voor AE_0 en de sensitiviteit, geldt dezelfde berekening als voor WE.

4.1.2 VERANTWOORDING ALGORITMES

Om de gecorrigeerde waarden (WE_c) te bekomen, bestaan er 4 algoritmes opgesteld door de producent. Het volledige kalibratiedocument kan in bijlage A teruggevonden worden.

Table 1 : Algorithms to correct the WE output for the effects of temperature

Algorithm	Equation	Notes
1	$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T * (AE_u - AE_e)$	Subtraction of the electronic offsets from the raw WE_u and AE_u outputs then scales the net AE output with the n_T factor. Gross under or over compensation can occur if $(AE_u - AE_e)$ is of opposite sign to n_T , or if $(AE_u - AE_e)$ is significantly smaller or larger than $(WE_u - WE_e)$. Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative, or much higher compared to a reference value.
2	$WE_c = (WE_u - WE_e) - k_T * \left(\frac{WE_o}{AE_o} \right) * (AE_u - AE_e)$	A refinement of Algorithm 1 where the AE scaling factor n_T is replaced with $k_T * (WE_o / AE_o)$. An error or gross over compensation will result if AE_o is very small compared to WE_o or is zero. If WE_o and AE_o are of opposite signs then over compensation can also occur. Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.
3	$WE_c = (WE_u - WE_e) - (WE_o - AE_o) - k'_T * (AE_u - AE_e)$	Avoids the problem of Algorithm 2 with a zero AE_o value. Gross over or under compensation can result if AE_o is of opposite sign to WE_o , or if AE_o is significantly smaller or larger than WE_o . Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.
4	$WE_c = (WE_u - WE_e) - WE_o - k''_T$	Correction without using the outputs from the auxiliary electrode. Gross under or over compensation can occur if WE_o or k''_T are significantly smaller or larger than WE_u . Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.

FIGUUR 51: 4 ALGORITMES TABEL 1 VAN PRODUCENT

Bron: (Alphasense, 2019e)

Om te weten welk algoritme moet worden toegepast op welk soort sensor, wordt tabel 14, gegeven door de producent gevolgd.

TABEL 14: ALGORITME TABEL 2 VAN PRODUCENT

Bron: bewerkt van Alphasense, 2019e

Algoritmen		
Gas	Aangeraden	Alternatief
CO	1	4
H2S	2	1
NO	3	4
NO2	1	3
OX	3	1
SO2	4	1,3

In tabel 14 kunnen de aangewezen algoritmen per soort sensor teruggevonden worden. De correctiefactoren per algoritme zijn afhankelijk van de temperatuur en van het type sensor. Deze factoren voor de temperatuur kunnen op de volgende pagina teruggevonden worden.

Eens men de gecorrigeerde outputwaarde heeft, moet men deze nog delen door de sensitiviteit om de gasconcentratie te kunnen bepalen.

$$C_{gas}(ppb) = \frac{WE_c (mV)}{S \left(\frac{mV}{ppb} \right)}$$

TABEL 15: CORRECTIEFACTOREN TABEL 3 VAN PRODUCENT

Bron: bewerkt van Alphasense, 2019e

Temperatuurcorrectiefactoren tabel 3 van producent											
Sensor	Algoritme	Correctiefactor	Temperatuur (°C)								
			-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
NO ₂ -A43F	1	n_T	0.8	0.8	1.0	1.2	1.6	1.8	1.9	2.5	3.6
	2	k_T	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9	1.0	1.1	1.4	2.0
	3	K'_T	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7	1.0	1.3	2.1	3.5
	4	K''_T	-4	-4	-4	-4	-2	0	10	35	132
OX-A431	1	n_T	1.0	1.2	1.2	1.6	1.7	2.0	2.1	3.	4.6
	2	k_T	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	1.0	1.1	1.7	2.3
	3	K'_T	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	1.0	1.7	3.0	4.0
	4	K''_T	-5	-5	-4	-3	0.5	0	9	42	134
SO ₂ -A4	1	n_T	1.3	1.3	1.3	1.2	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4
	2	k_T	3.3	3.3	3.3	3.0	2.3	1.0	1.0	1.0	1.0
	3	K'_T	1.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	4	K''_T	0	0	0	0	0	0	5	25	45
CO-A4	1	n_T	1.0	1.0	1.0	1.0	-0.2	-0.9	-1.5	-1.5	-1.5
	2	k_T	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	0.2	1.0	1.7	1.7	1.7
	3	K'_T	1.9	2.9	2.7	3.9	2.1	1.0	-0.6	-0.3	-0.5
	4	K''_T	13	12	16	11	4	0	-15	-18	-36

Tabel 15 moet geraadpleegd worden om de juiste temperatuurcorrectie toe te passen. De kleurencode die gebruikt wordt in de tabel komt overeen met de kleur die de sensor heeft.

Eens al de voorgaande parameters gekend zijn, kan men beginnen met de afzonderlijke en unieke kalibratie per sensor.

4.2 KALIBRATIE TEMPERATUURSENSOR

De Pt1000 sensor is een weerstand die met de temperatuur varieert. Bij 0°C is de weerstand in principe 1000 Ohm. Deze sensor geeft een bepaalde spanning weer bij eeningangsspanning van 5V op het bord. Om deze te kalibreren berusten we op een klassieke thermometer. Simultaan kijkt men hoeveel °C men meet op de thermometer alsook hoeveel volt de sensor aangeeft. Aan de hand van deze eenmalige kalibratiegegevens kan de sensor als volgt gekalibreerd worden.

TABEL 16: KALIBRATIE TEMPERATUURSENSOR

Bron: eigen werk

Kalibratie temperatuursensor	
Therm. Sensitiviteit (mV/°C)	1
V _{kal} (mV/°C)	314
T _{kal} (°C)	18

De thermische sensitiviteit bedraagt exact 1 mV/°C. Wanneer we een simultane meting doen van de spanning en temperatuur vinden we dat bij een temperatuur van 18°C, de weergegeven spanning 314 mV bedraagt. De berekening voor andere temperaturen gaat via volgende formule:

$$T = \frac{(V_T - V_{kal})}{Th_s + T_{kal}}$$

Hierbij is T de temperatuur in °C, V_T de gemeten spanning en V_{kal} is de gemeten kalibratiespanning. Th_s is de thermische sensitiviteit en T_{kal} is de gemeten kalibratietemperatuur.

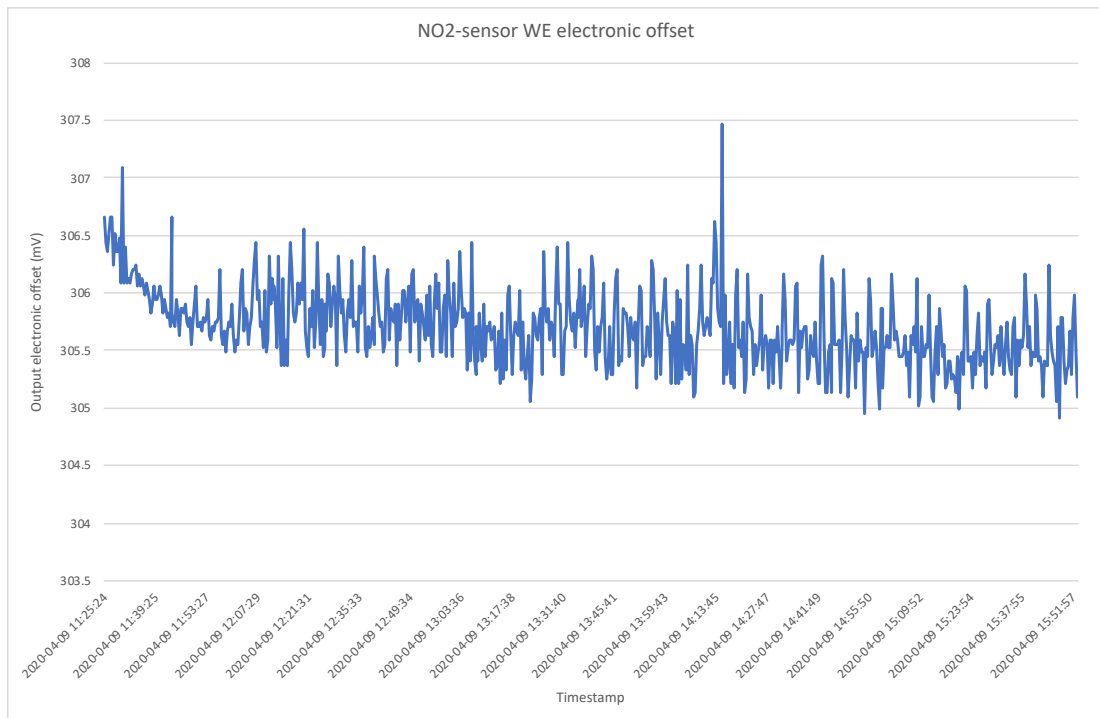
5 EERSTE KALIBRATIE

In dit hoofdstuk wordt per sensor de volledige kalibratie getoond op de manier van de producent. Eerst wordt de elektronische offset bepaald. Dit gebeurt door de sensoren van het bord te halen en dan te meten via het meetprogramma wat de gemiddelde waarden zijn. Na deze stap wordt per sensor de sensor zero air en sensitiviteit berekend. Dit wordt gedaan via de tabellen die opgesteld werden door de producent. Ten slotte wordt een volledige berekening beschreven van 1 meting van de sensor. Men verwerkt dus een WE_u en AE_u naar een concentratie in ppb. Dit wordt gedaan per sensor voor ieder toegestaan algoritme.

5.1 NO₂-A43F

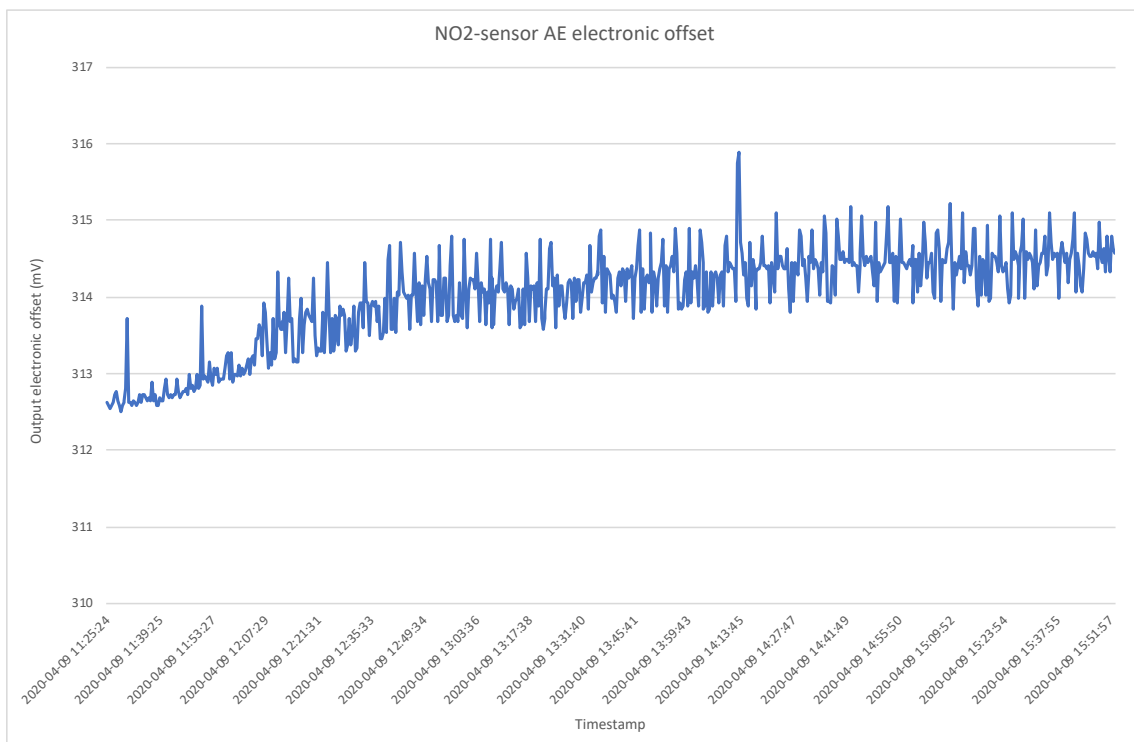
5.1.1 BEPALING ELECTRONIC OFFSET WE EN AE

Figuur 52 toont aan dat de elektronische offset voor de WE van de NO₂-sensor stabiliseert rond de 305,5 mV. Deze waarde zal dus gebruikt worden in het algoritme. Bij de AE van de NO₂-sensor zien we dat de output stabiliseert rond de 314,5 mV. Dit wordt afgelezen vanaf figuur 53.



FIGUUR 52: NO₂-SENSOR WE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk



FIGUUR 53: NO₂-SENSOR AE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk

5.1.2 BEPALING SENSOR ZERO AIR EN SENSITIVITEIT (WE_0 , AE_0 EN S)

TABEL 17: NO₂-SENSOR KALIBRATIE DOCUMENT

Bron: (Alphasense, z.d.)

Serial No	Zero Current (nA)	Aux Zero Current (nA)	Sensitivity (nA/ppm)	Response t90 (s)
Min	32,2	15,4	-400,7	18,8
Mean	32,2	15,4	-400,7	18,8
Max	32,2	15,4	-400,7	18,8
(+/-) 95% Conf.	NA	NA	NA	NA
212870427	32,2	15,4	-400,7	18,8

Om WE en AE in voltages te krijgen maken we gebruik van de reeds besproken formules.

$$WE_0 = 32,2 \times -0,73 = -23,506 \text{ mV}$$

$$AE_0 = 15,4 \times -0,73 = -11,242 \text{ mV}$$

$$S = -400,7 \times -0,73 = 292,511 \text{ mV/ppm}$$

5.1.3 BEREKENING

Voor de NO₂-sensor kan afgelezen worden uit de algoritmen tabel dat algoritme 1 moet gekozen worden. Algoritme 3 mag ook gebruikt worden als alternatief.

5.1.4 VOORBEELD

TABEL 18: VOORBEELDWAARDEN NO₂-SENSOR

Bron: eigen werk

Sensorwaarden NO₂	
WE_u (mV)	295,334
AE_u (mV)	307,884
WE_e (mV)	305,5
AE_e (mV)	314,5
WE₀ (mV)	-23,506
AE₀ (mV)	-11,242
n_T	1,8
k_T	/
k'_T	1
k''_T	/
S (mV/ppm)	292,511

De correctiefactoren zijn genomen voor een temperatuur van 20°C.

5.1.4.1 Algoritme 1

De waarden in de algoritme 1 plaatsen geeft het volgende resultaat:

$$WE_c = (295,334 - 305,5) - 1,8 \times (307,884 - 314,5) = 1,7428 \text{ mV}$$

$$C_{NO_2} = \frac{1,7428}{292,511} = 0,006 \text{ ppm} = 6 \text{ ppb}$$

5.1.4.2 Algoritme 3

$$WE_c = (295,334 - 305,5) - (-23,506 - (-11,242)) - 1 \times (307,884 - 314,5)$$

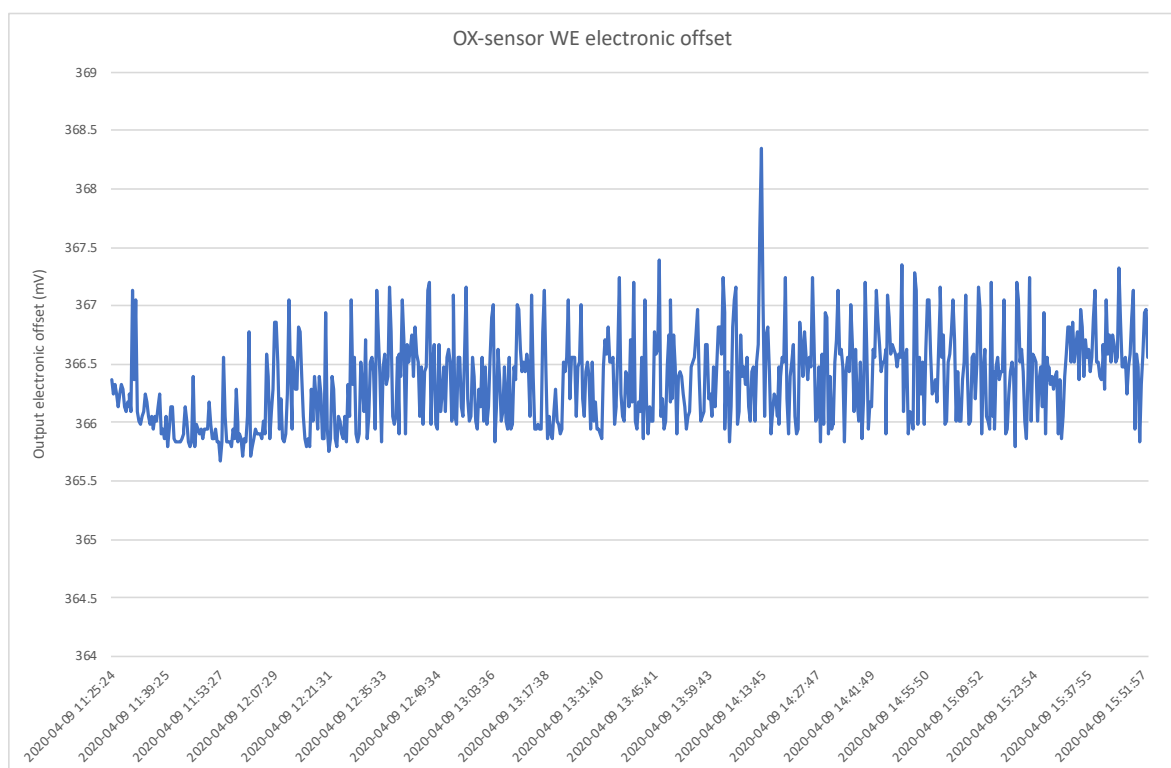
$$WE_c = 8,714 \text{ mV}$$

$$C_{NO_2} = \frac{8,714}{292,511} = 0,030 \text{ ppm} = 30 \text{ ppb}$$

5.2 OX-A431

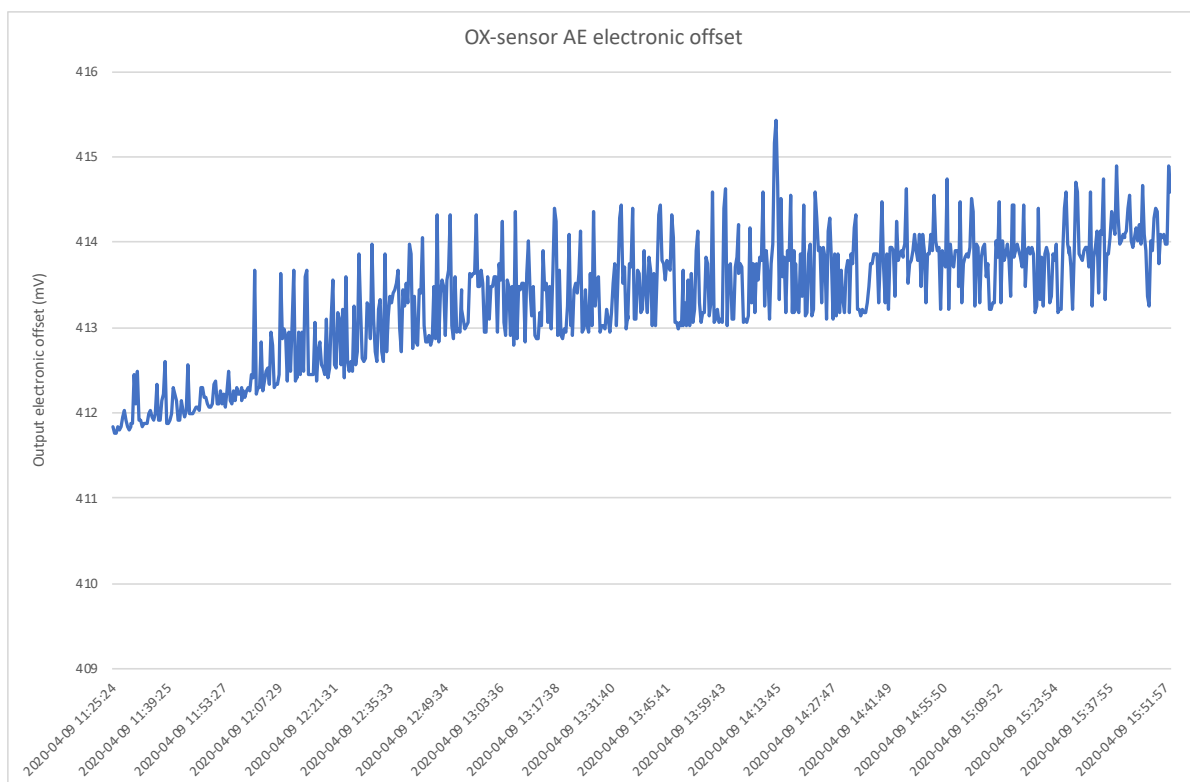
5.2.1 BEPALING ELECTRONIC OFFSET WE EN AE

Voor de OX-sensor stabiliseert de output van de WE rond de 366,5 mV. Dit wordt afgeleid uit figuur 54. Voor de AE kan afgelezen worden via figuur 55, dat deze stabiliseert rond de 414 mV.



FIGUUR 54: OX-SENSOR WE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk



FIGUUR 55: OX-SENSOR AE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk

5.2.2 BEPALING SENSOR ZERO AIR EN SENSITIVITEIT (WE_0 , AE_0 EN S)

TABEL 19: OX-SENSOR KALIBRATIE DOCUMENT

Bron: (Alphasense, z.d.)

Serial No	Zero Current (nA)	Aux Zero Current (nA)	O3 Sensitivity (nA/ppm)	NO2 Sensitivity (nA/ppm)	Response t90 (s)
Min	50,8	11,7	-548,8	-577,7	15,8
Mean	64,4	15,3	-519,3	-534,8	18,8
Max	68,4	19,5	-505,0	-478,1	21,9
(+/-) 95% Conf.	12,8	4,9	32,3	67,1	4,0
214810126	50,76	19,55	-529,55	-519,57	18,48
214810127	68,41	15,13	-548,77	-529,82	21,89
214810128	66,84	16,08	-506,28	-568,60	15,85
214810129	68,41	11,67	-507,05	-577,74	20,47
214810130	67,78	13,87	-505,02	-478,11	17,42

$$WE_0 = 68,41 \times -0,73 = -49,939 \text{ mV}$$

$$AE_0 = 11,67 \times -0,73 = -8,519 \text{ mV}$$

$$S_{O_3} = -507,05 \times -0,73 = 370,147 \text{ mV/ppm}$$

$$S_{NO_2} = -577,74 \times -0,73 = 421,750 \frac{\text{mV}}{\text{ppm}}$$

5.2.3 BEREKENING

Voor de berekening van de ozonconcentratie is het een speciaal geval waarbij de reeds berekende gas concentratie van stikstofdioxide mee in de berekening komt.

Wanneer tabel 2 geraadpleegd wordt kan hieruit afgeleid worden dat algoritme 3 moet gebruikt worden en als alternatief mag 1 gebruikt worden. 3 heeft echter wel de voorkeur voor de OX-sensor.

Voor ozon is het verschil dat:

$$(WE_u - WE_e) = WE_u - WE_e - WE_{C_{NO_2}}$$

Waarbij:

$$WE_{C_{NO_2}} = C_{NO_2} \times S_{NO_2}$$

Hieruit volgt de volgende formule:

$$(WE_u - WE_e) = WE_u - WE_e - (C_{NO_2} \times S_{NO_2})$$

Ten slotte komen we wederom tot de volgende formule om de concentratie te vinden:

$$C_{O_3}(ppb) = \frac{WE_c}{S}$$

5.2.4 VOORBEELD

TABEL 20: VOORBEELDWAARDEN OX-SENSOR

Bron: eigen werk

Sensorwaarden OX	
WE_u (mV)	361,710
AE_u (mV)	412,254
WE_e (mV)	366,5
AE_e (mV)	414
WE₀ (mV)	-49,939
AE₀ (mV)	-8,519
n_T	2
k_T	/
k'_T	1
k''_T	/
S_{NO2} (mV/ppm)	421,75
S_{O3} (mV/ppm)	370,1465

De correctiefactoren zijn genomen voor een temperatuur van 20°C. Voor de NO₂-concentratie wordt 0,006 ppm genomen.

5.2.4.1 Algoritme 1

$$WE_c = (361,710 - 366,5 - (0,006 \times 421,75)) - 2 \times (412,254 - 414)$$

$$WE_c = -3,8285 \text{ mV}$$

$$C_{O_3}(\text{ppm}) = \frac{-3,8285}{370,147} = -0,010 \text{ ppm} = -10 \text{ ppb}$$

5.2.4.2 Algoritme 3

Wanneer we de waarden in de formule invullen krijgen we:

$$WE_c = (361,710 - 366,5 - (0,006 \times 421,75)) - (-49,939 - (-8,519)) - 1 \times (412,254 - 414)$$

$$WE_c = 35,8455 \text{ mV}$$

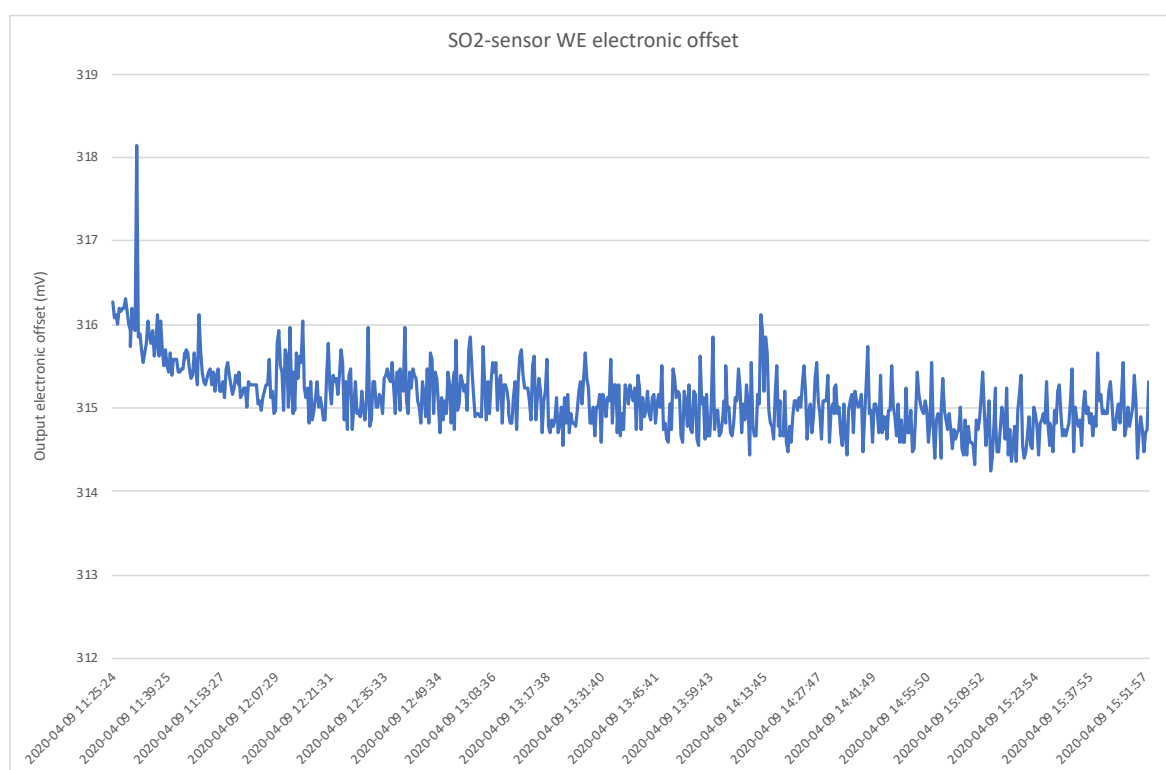
De concentratie is dan:

$$C_{O_3}(\text{ppm}) = \frac{35,8455}{370,147} = 0,097 \text{ ppm} = 97 \text{ ppb}$$

5.3 SO₂-A4

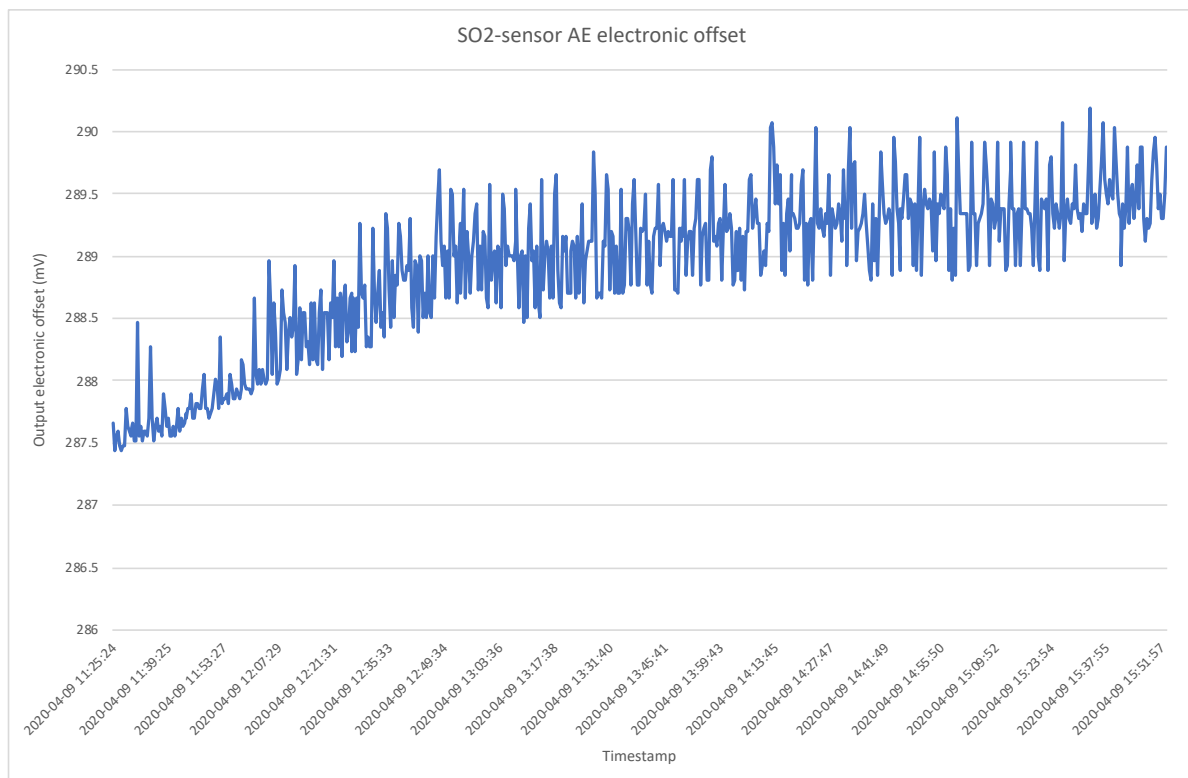
5.3.1 BEPALING ELECTRONIC OFFSET WE EN AE

Uit figuur 56 kan afgeleid worden dat de elektronische offset van de WE ongeveer 315 mV bedraagt. Via figuur 57 kan afgeleid worden dat de electronic offset 289,5 mV bedraagt.



FIGUUR 56: SO₂-SENSOR WE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk



FIGUUR 57: SO₂-SENSOR AE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk

5.3.2 BEPALING SENSOR ZERO AIR EN SENSITIVITEIT (WE_0 , AE_0 EN S)

TABEL 21: SO₂-SENSOR KALIBRATIE DOCUMENT

Bron: (Alphasense, z.d.)

Serial No	Zero Current (nA)	Aux Zero Current (nA)	Sensitivity (nA/ppm)	Response t90 (s)
Min	15,8	8,8	330,2	9,4
Mean	22,2	13,9	365,0	12,5
Max	31,8	18,0	389,5	14,1
(+/-) 95% Conf.	10,3	7,5	40,5	3,1
134330001	31,8	18,0	330,2	13,8
134330002	19,9	16,7	351,2	9,4
134330003	15,8	9,1	371,1	14,1
134330004	19,2	8,8	382,9	12,7
134330005	24,3	16,7	389,5	12,6

$$WE_0 = 15,8 \times 0,80 = 12,64 \text{ mV}$$

$$AE_0 = 9,1 \times 0,80 = 7,28 \text{ mV}$$

$$S_{SO_2} = 371,1 \times 0,80 = 296,88 \text{ mV/ppm}$$

5.3.3 BEREKENING

Voor de SO₂-sensor kan afgelezen worden uit de algoritmen tabel dat algoritme 4 moet gekozen worden. 1 en 3 kan ook, maar deze worden in mindere mate aangeraden.

5.3.4 VOORBEELD

TABEL 22: VOORBEELDWAARDEN SO₂-SENSOR

Bron: eigen werk

Sensorwaarden SO₂	
WE_u (mV)	322,037
AE_u (mV)	289,230
WE_e (mV)	315
AE_e (mV)	289,5
WE₀ (mV)	12,64
AE₀ (mV)	7,28
n_T	0,4
k_T	/
k'_T	1
k''_T	0
S (mV/ppm)	296,88

De correctiefactoren zijn genomen voor een temperatuur van 20°C.

5.3.4.1 Algoritme 1

$$WE_c = (322,037 - 315) - 0,4 \times (289,23 - 289,5)$$

$$WE_c = 7,145 \text{ mV}$$

$$C_{SO_2}(ppm) = \frac{7,145}{296,88} = 0,024 \text{ ppm} = 24 \text{ ppb}$$

5.3.4.2 Algoritme 3

$$WE_c = (322,037 - 315) - (12,64 - 7,28) - 1 \times (289,23 - 289,5)$$

$$WE_c = 1,947 \text{ mV}$$

$$C_{SO_2}(ppm) = \frac{1,947}{296,88} = 0,0065 \text{ ppm} = 6,5 \text{ ppb}$$

5.3.4.3 Algoritme 4

$$WE_c = (322,037 - 315) - (12,64) - 0$$

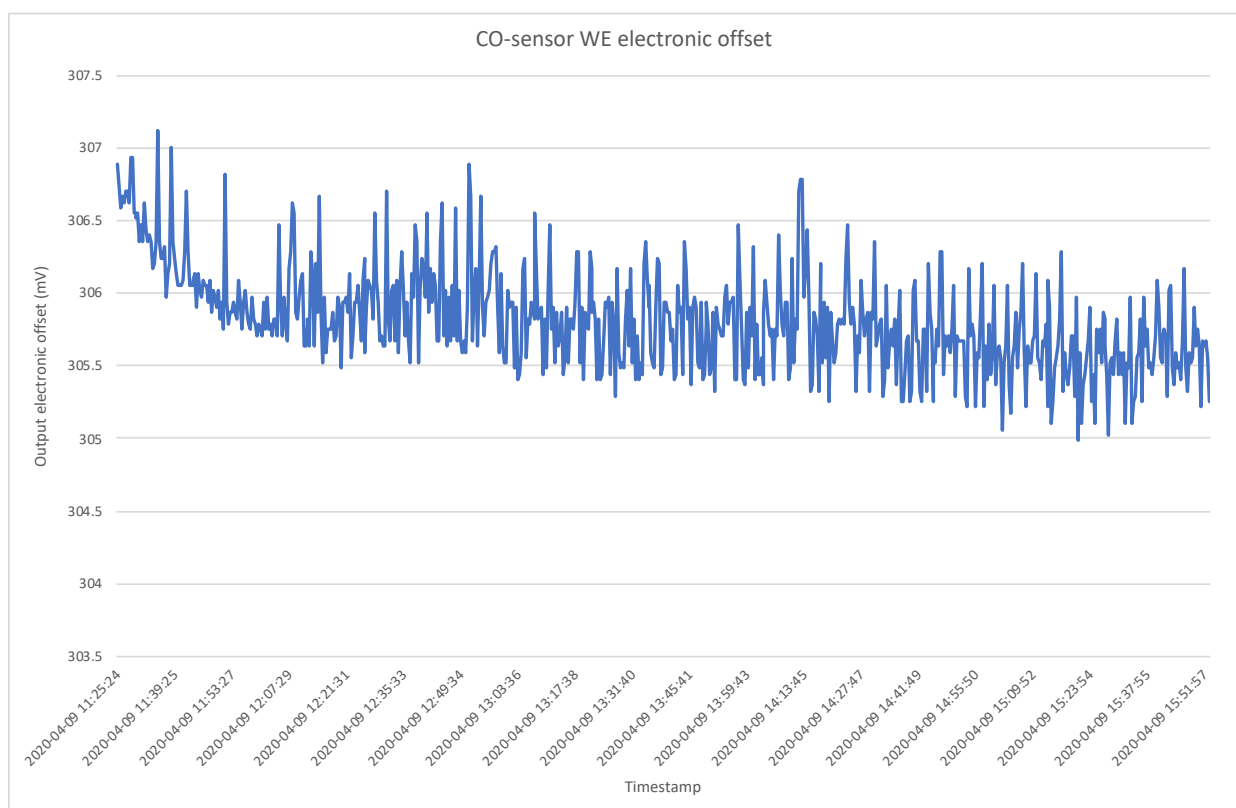
$$WE_c = -5,603 \text{ mV}$$

$$C_{SO_2}(ppm) = \frac{-5,603}{296,88} = -0,019 \text{ ppm} = -19 \text{ ppb}$$

5.4 CO-A4

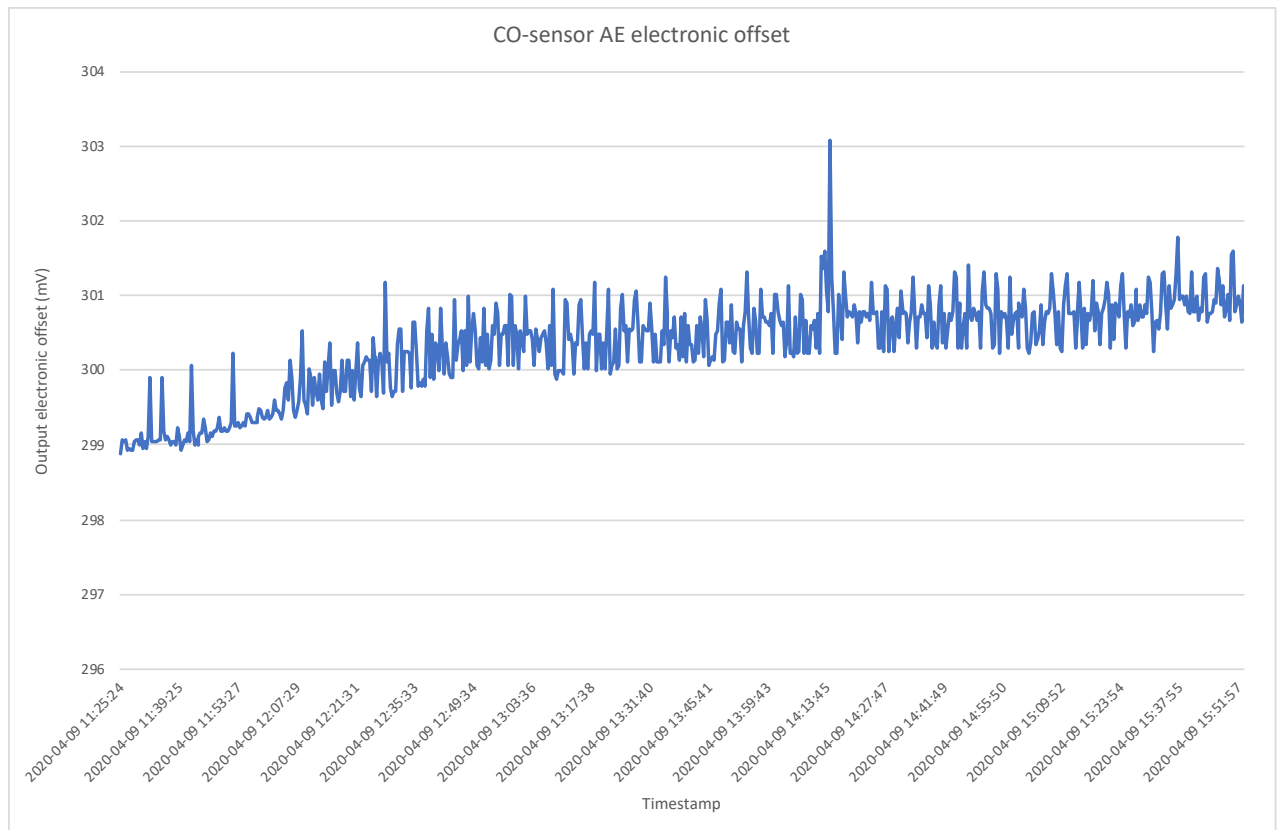
5.4.1 BEPALING ELECTRONIC OFFSET WE EN AE

Op figuur 58 kan afgelezen worden dat de output stabiliseert rond 305,5 mV. Op de grafiek van de AE-output kan afgelezen worden dat de waarde streeft naar de 301 mV.



FIGUUR 58: CO-SENSOR WE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk



FIGUUR 59: CO-SENSOR AE ELECTRONIC OFFSET

Bron: eigen werk

5.4.2 BEPALING SENSOR ZERO AIR EN SENSITIVITEIT (WE_0 , AE_0 EN S)

TABEL 23: CO-SENSOR KALIBRATIE DOCUMENT

Bron: (Alphasense, z.d.)

Serial No	Zero Current (nA)	Aux Zero Current (nA)	Sensitivity (nA/ppm)	Response t90 (s)
Min	-68,1	5,0	340,2	8,4
Mean	-47,5	21,6	367,5	11,1
Max	-30,0	35,3	408,0	16,1
(+/-) 95% Conf.	25,4	21,4	57,4	5,0
132330501	-30,0	35,3	340,3	10,9
132330502	-35,3	32,2	347,0	8,4
132330503	-50,8	12,6	340,2	16,1
132330504	-53,3	22,7	402,0	10,3
132330505	-68,1	5,0	408,0	9,9

$$WE_0 = -35,3 \times 0,80 = -28,24 \text{ mV}$$

$$AE_0 = 32,2 \times 0,80 = 25,76 \text{ mV}$$

$$S_{CO} \text{ (mV)} = 347,0 \times 0,80 = 277,6 \text{ mV/ppm}$$

5.4.3 BEREKENING

Voor de CO-sensor kan men aflezen uit tabel 2 van de producent dat het meest aangewezen algoritme voor deze sensor algoritme 1 is. Algoritme 4 mag ook als alternatief genomen worden.

5.4.4 VOORBEELD

TABEL 24: VOORBEELDWAARDEN CO-SENSOR

Bron: eigen werk

Sensorwaarden CO	
WE_u (mV)	376,053
AE_u (mV)	314,140
WE_e (mV)	305,5
AE_e (mV)	301
WE₀ (mV)	-28,24
AE₀ (mV)	25,76
n_T	-0,9
k_T	/
k'_T	/
k''_T	0
S (mV/ppm)	277,6

De correctiefactoren zijn genomen voor een temperatuur van 20°C.

5.4.4.1 Algoritme 1

$$WE_c = (376,053 - 305,5) - (-0,9) \times (314,14 - 301)$$

$$WE_c = 82,379 \text{ mV}$$

$$C_{co}(ppm) = \frac{82,379}{277,6} = 0,297 \text{ ppm} = 297 \text{ ppb}$$

5.4.4.2 Algoritme 4

$$WE_c = (376,053 - 305,5) - (-28,24) - 0$$

$$WE_c = 98,793 \text{ mV}$$

$$C_{co}(ppm) = \frac{98,793}{277,6} = 0,356 \text{ ppm} = 356 \text{ ppb}$$

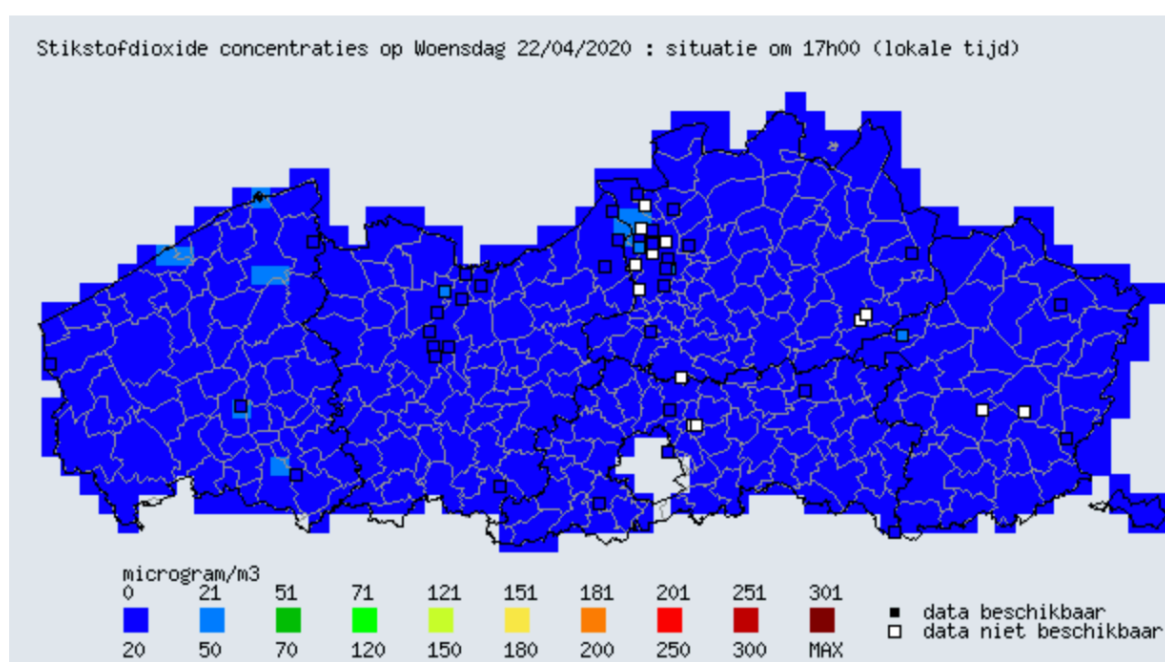
6 TWEEDE KALIBRATIE

Daar de resultaten na verder onderzoek nog niet volledig op punt stonden, is er overwogen om een tweede kalibratie uit te voeren. Deze is gebaseerd op empirische resultaten en via de meetresultaten van de Vlaamse Milieumaatschappij en Windy, de site met windmaps maar waar ook luchtkwaliteitsparameters terug te vinden zijn. De waarden van de toegevoegde constanten aan de algoritmen zijn nauwkeurig tot op een geheel getal. Dit exacte gemiddelde tot op enkele cijfers na de komma berekenen heeft geen zin daar wanneer men naar bvb. figuur 52 kijkt (elektronische offset van NO₂-sensor) deze waarden ongeveer een breedte hebben van 1 millivolt. Wanneer je dan kijkt bij de NO₂-sensor waar de sensitiviteit 0,3 mV/ppb bedraagt, weet je hieruit dat er een schommeling is met breedte van 6 ppb tussen deze waarden. Hierdoor is een benadering van 1 ppb genoeg.

6.1 NO₂-A43F

6.1.1 REFERENTIECONCENTRATIE

Op figuur 60 kan afgelezen worden dat de concentratie tussen de 0 en 20 microgram/m³ moet liggen. We nemen als ware waarde het gemiddelde, 10 microgram/m³. Dit is gelijk aan 5 ppb.



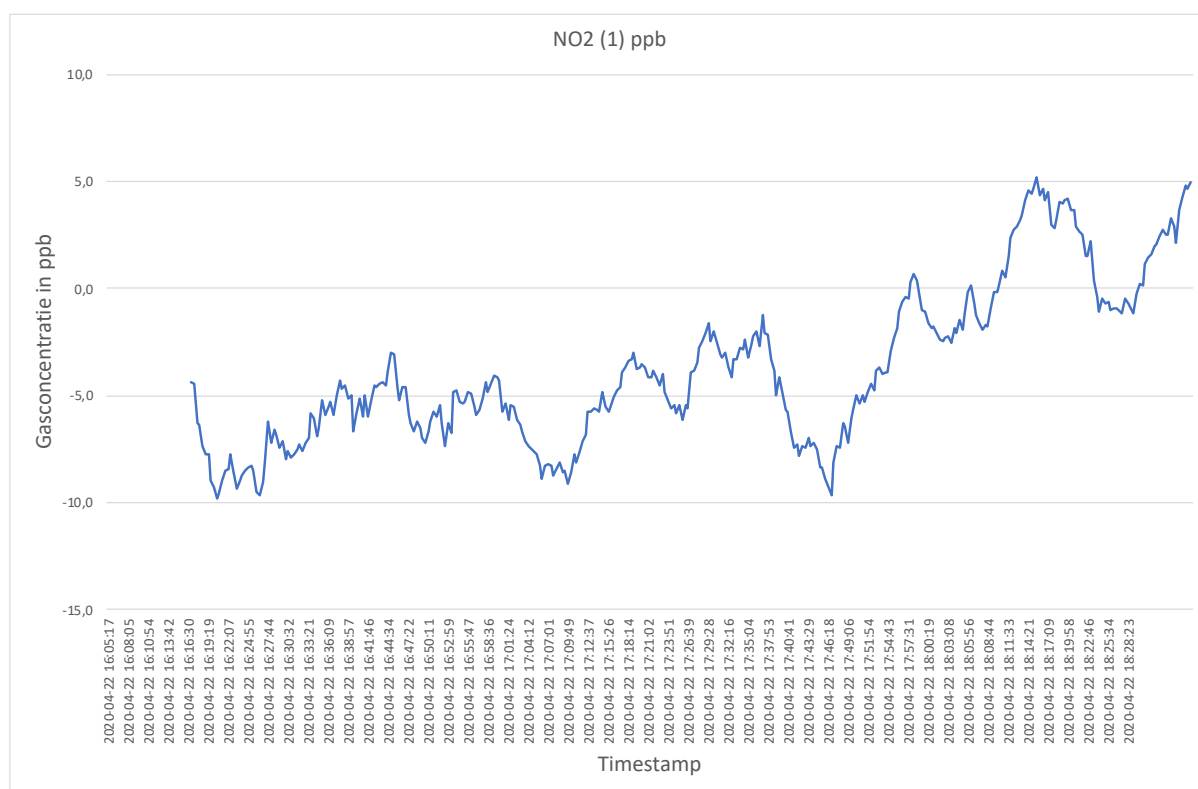
FIGUUR 60: NO₂-CONCENTRATIE

Bron: (VMM, z.d.-a)

6.1.2 METINGEN

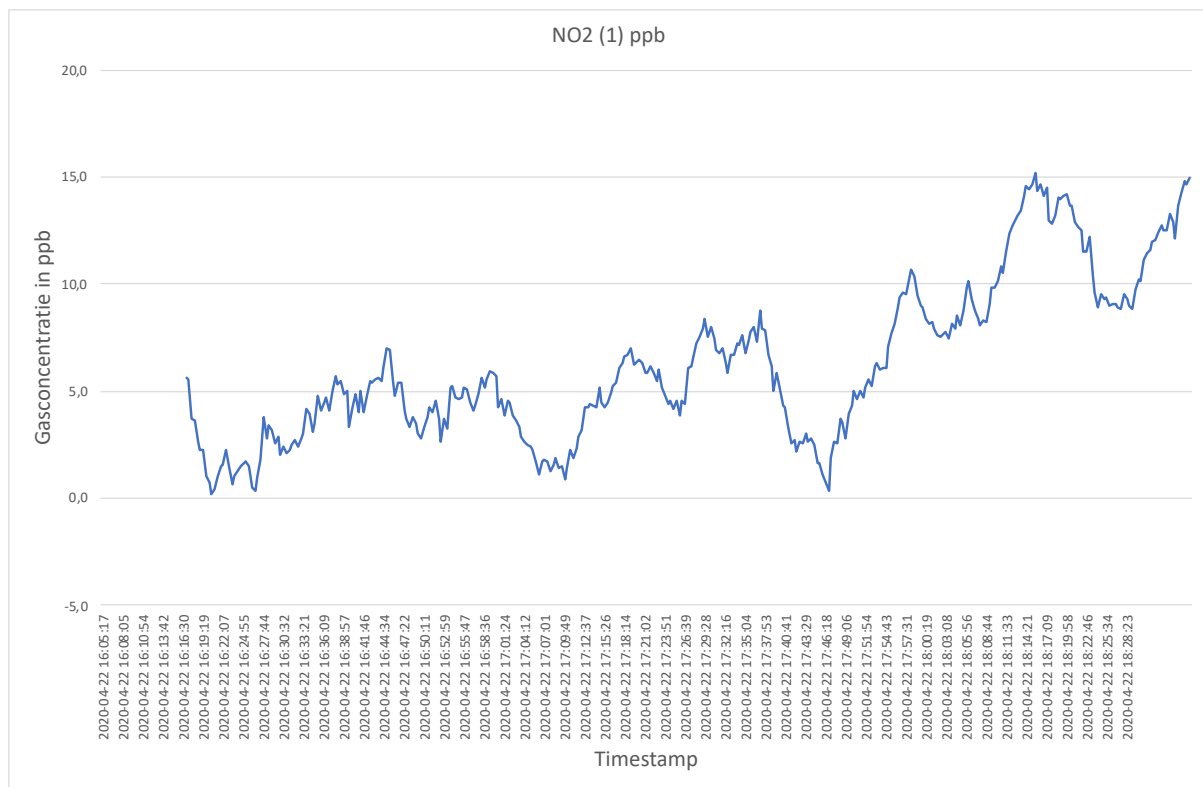
6.1.2.1 Algoritme 1 (aangeraden)

Op de figuur 61, kan men duidelijk zien dat de waarde in open lucht ongeveer 10 ppb te laag zit. Met deze reden werd aan het algoritme 1 voor NO₂, een constante van +10 toegevoegd. Deze geeft volgende grafiek weer op figuur 62. Daarbij zien we duidelijk dat de waarden wanneer de gewone buitenlucht in contact kwam met de sensor gelijk zijn aan ongeveer 5 ppb. De grafieken zijn gemaakt met een *moving average* van 20.



FIGUUR 61: GRAFIEK METINGEN NO₂ (1)

Bron: eigen werk

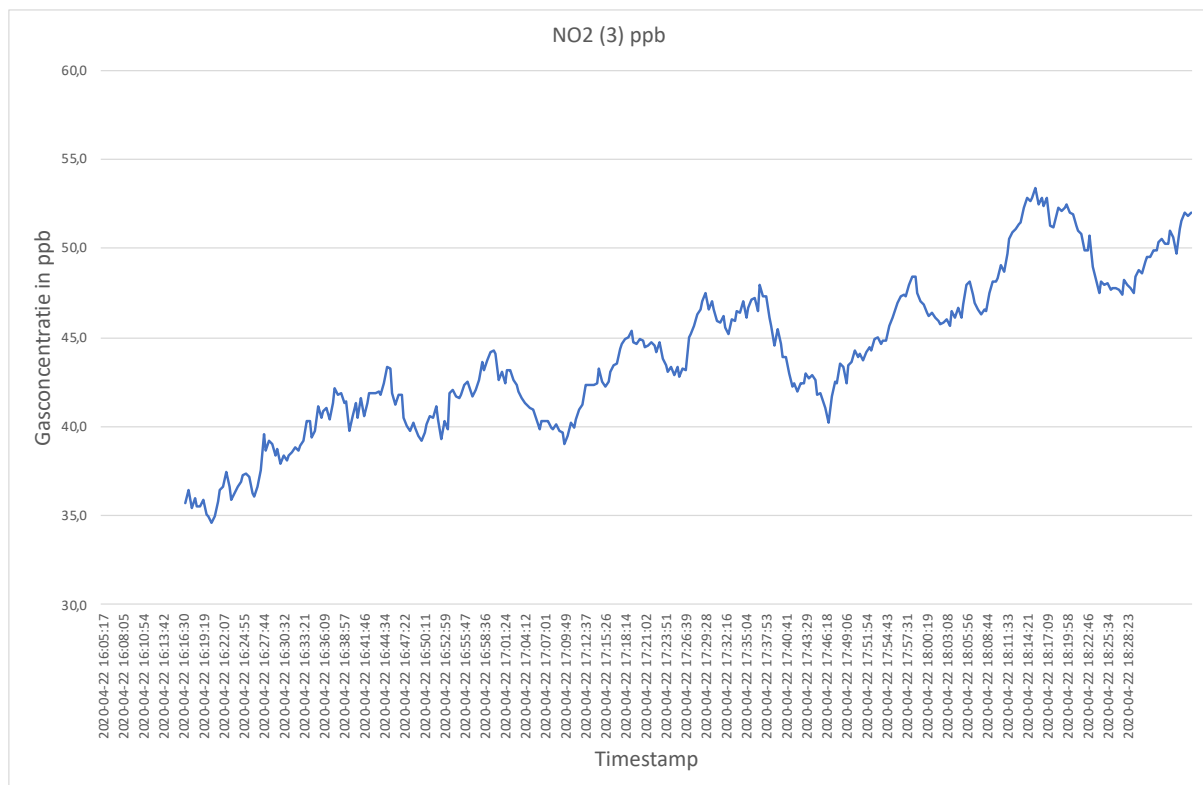


FIGUUR 62: GRAFIEK METINGEN NO₂ (1) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

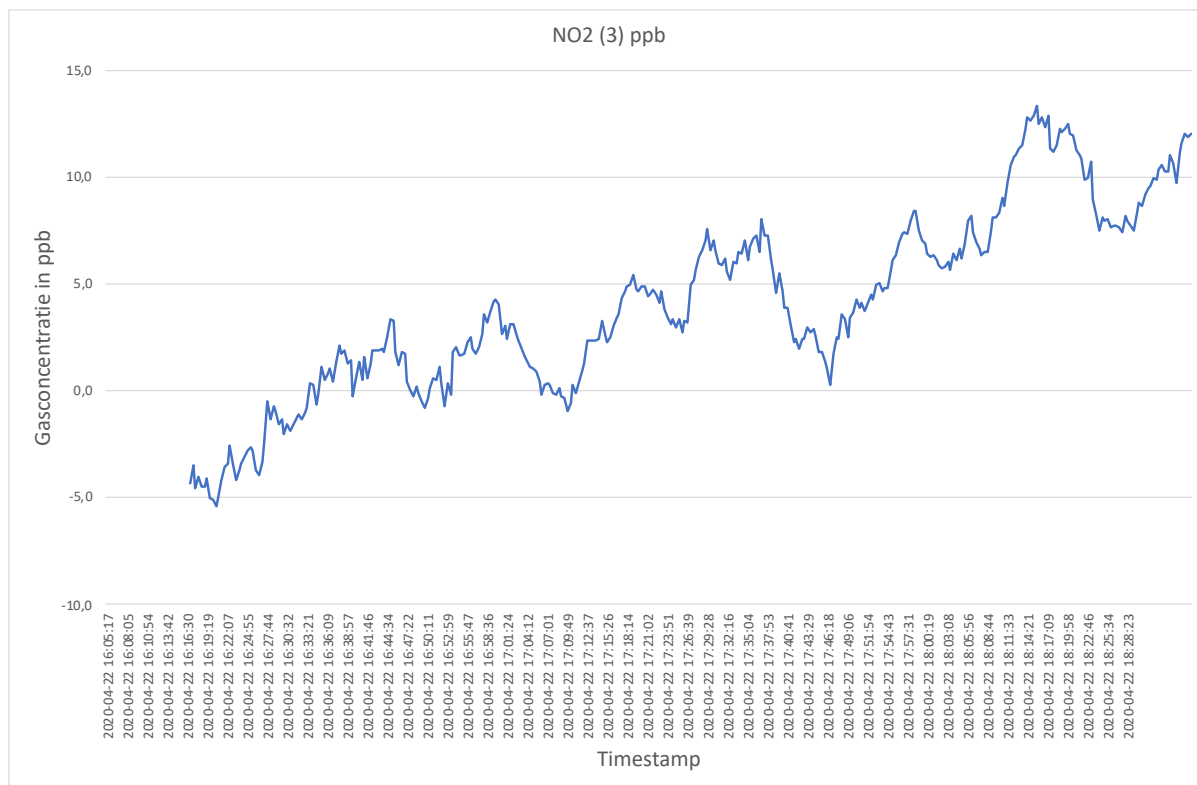
6.1.2.2 Algoritme 3 (Alternatief)

Op figuur 63, zien we dat de waarden collectief ongeveer 40 ppb te hoog liggen. Daarom wordt hier een constante aan het algoritme toegevoegd van -40 ppb. Het resultaat van deze constante kan afgelezen worden op figuur 64. De grafieken zijn gemaakt met een *moving average* van 20.



FIGUUR 63: GRAFIEK METINGEN NO₂ (3)

Bron: eigen werk



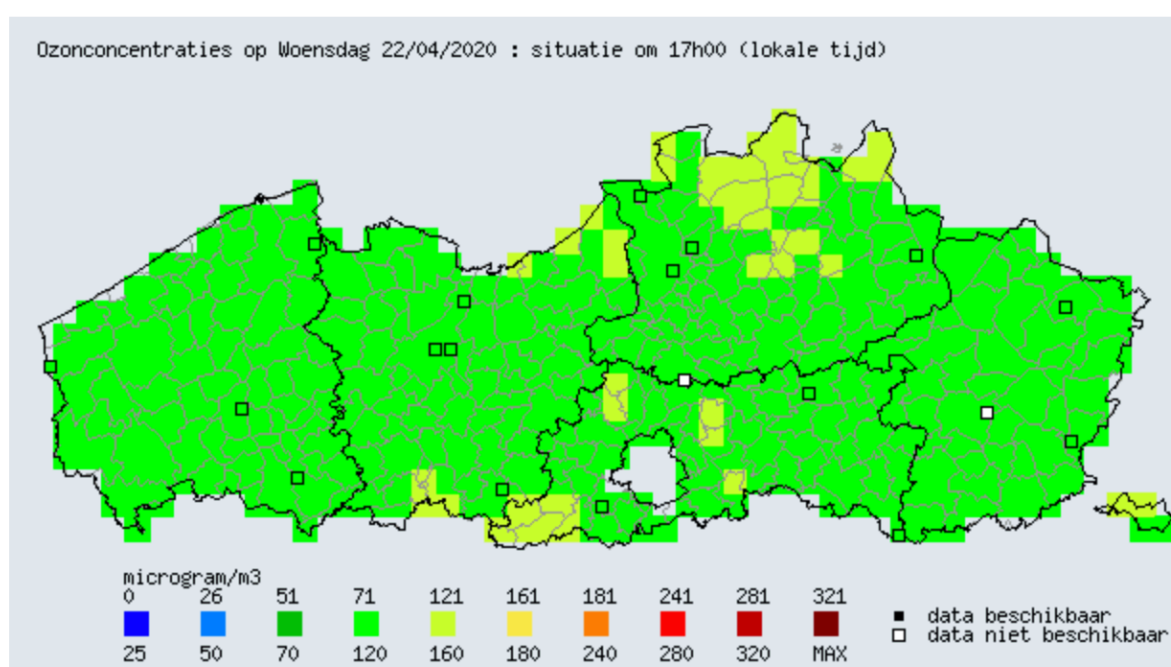
FIGUUR 64: GRAFIEK METINGEN NO₂ (3) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

6.2 OX-A431

6.2.1 REFERENTIECONCENTRATIE

Op figuur 65 kan afgelezen worden dat de concentratie van ozon tussen de 71 en 120 microgram/m³ moet liggen. Hiervan nemen we wederom het gemiddelde namelijk 95 microgram/m³. Dit omgezet naar ppb is 47 ppb.



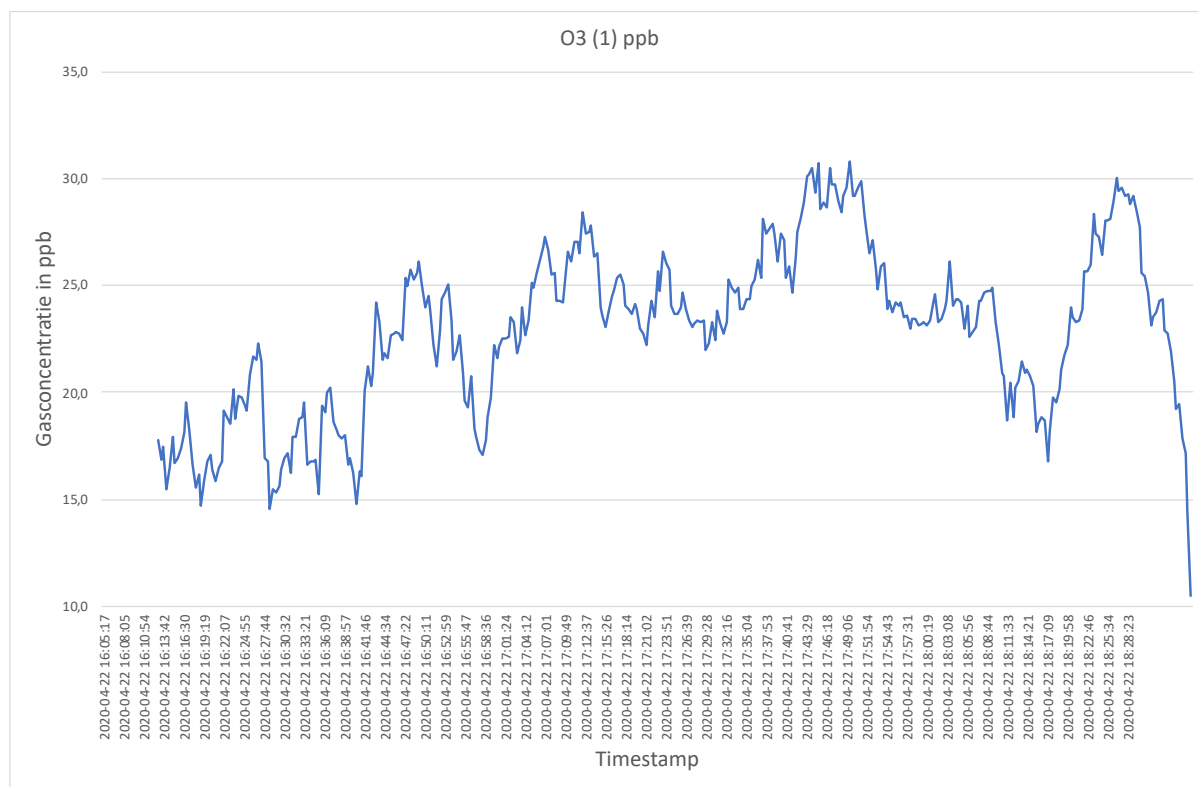
FIGUUR 65: O₃-CONCENTRATIE

Bron: (VMM, z.d.-a)

6.2.2 METINGEN

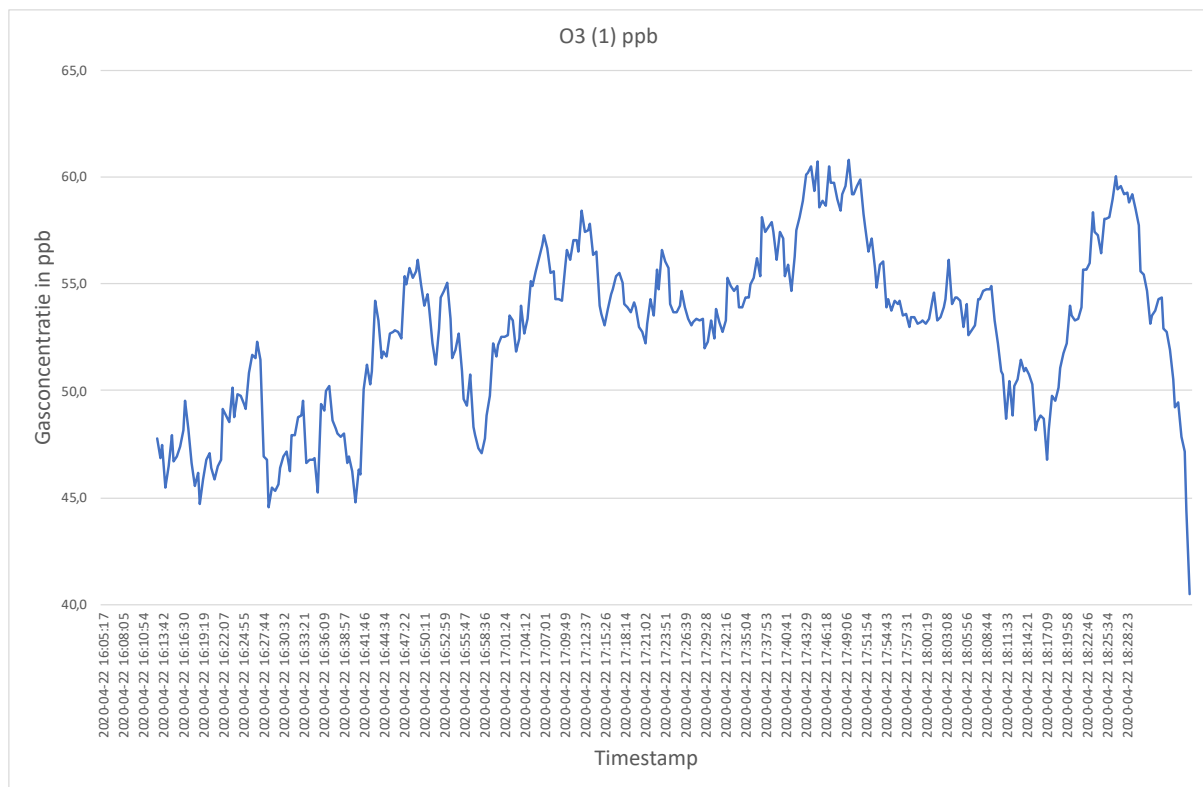
6.2.2.1 Algoritme 1 (alternatief)

Op de grafiek op figuur 66 zien we dat de waarden ongeveer 30 ppb te laag liggen. Daarom wordt voor dit algoritme de constante van +30 ppb toegevoegd. Het resultaat van deze correctie kan op figuur 67 teruggevonden worden. De *moving average* bij deze grafieken is 20.



FIGUUR 66: GRAFIEK METINGEN O₃ (1)

Bron: Eigen werk

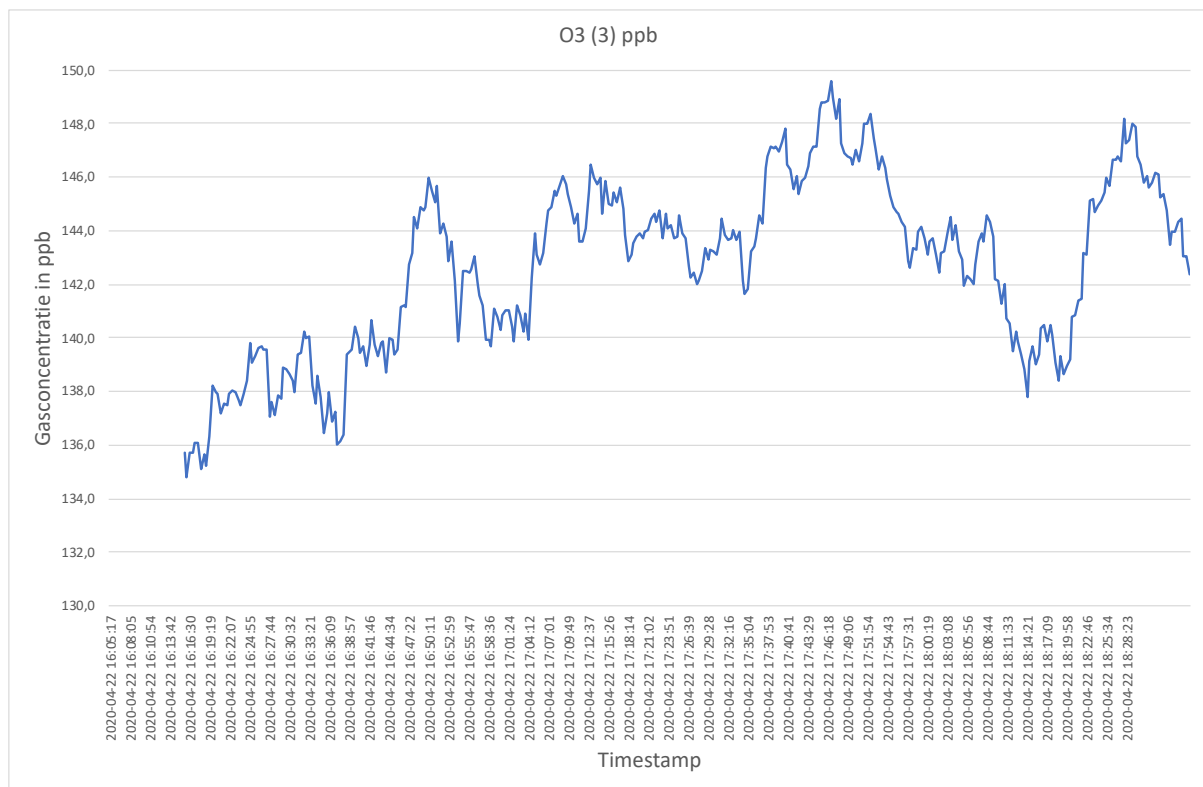


FIGUUR 67: GRAFIEK METINGEN O₃ (1) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

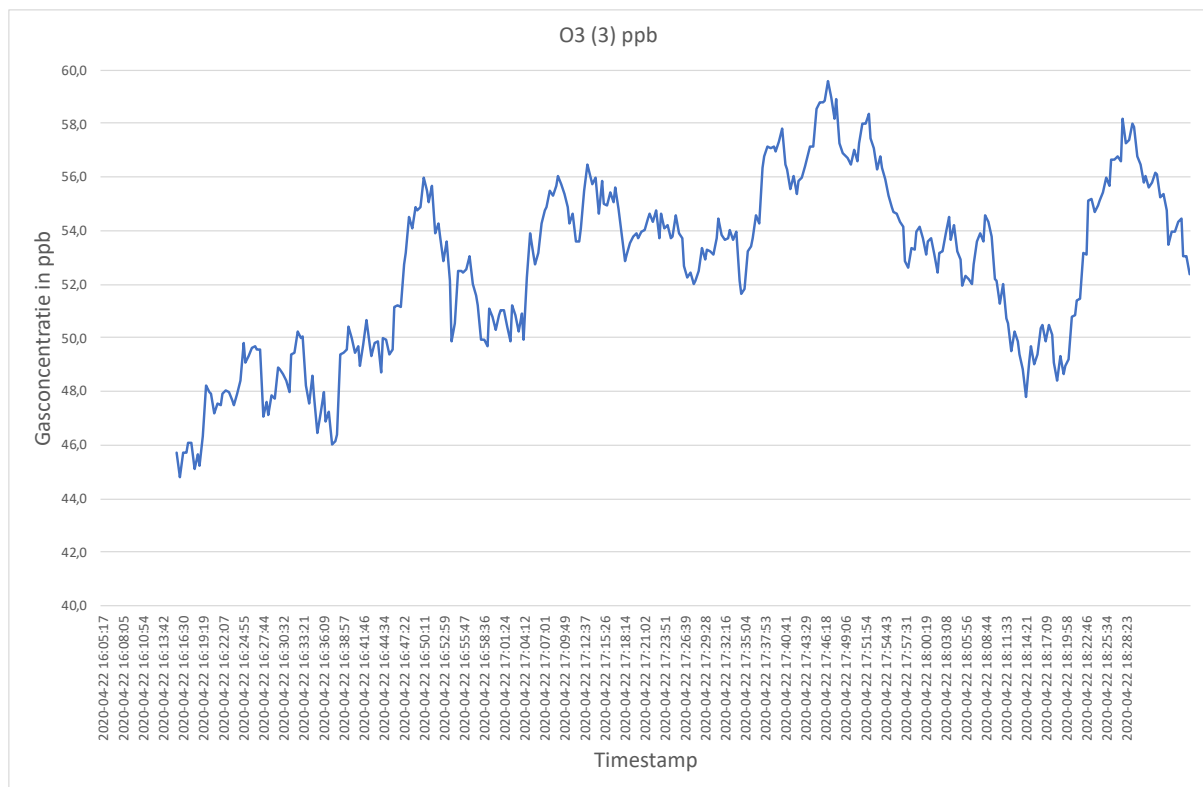
6.2.2.2 Algoritme 3 (aangeraden)

Op figuur 68 zien we dat de waarden ongeveer 90 ppb te hoog liggen. De constante die toegevoegd werd aan algoritme 3 bij ozon bedraagt hierdoor -90. Hiermee komen we volgende grafiek uit. De *moving average* bij deze grafieken bedraagt 20.



FIGUUR 68: GRAFIEK METINGEN O₃ (3)

Bron: eigen werk



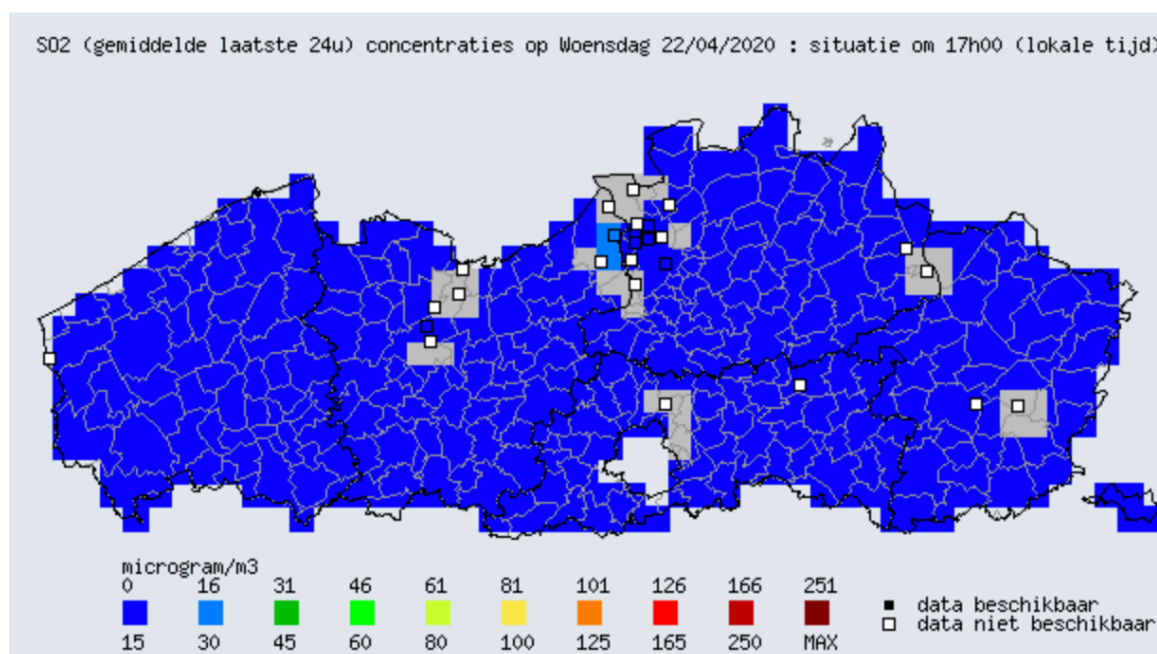
FIGUUR 69: GRAFIEK METINGEN O₃ (3) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

6.3 SO₂-A4

6.3.1 REFERENTIECONCENTRATIE

Op onderstaand kaartje kan teruggevonden worden dat de concentratie zwaveldioxide tussen de 0 en 15 microgram/m³ moet liggen. We nemen 8 microgram/m³ als referentiewaarde. Dit betekent dat de concentratie in gewone buitenlucht ongeveer 3 ppb bedraagt.



FIGUUR 70: SO₂-CONCENTRATIE

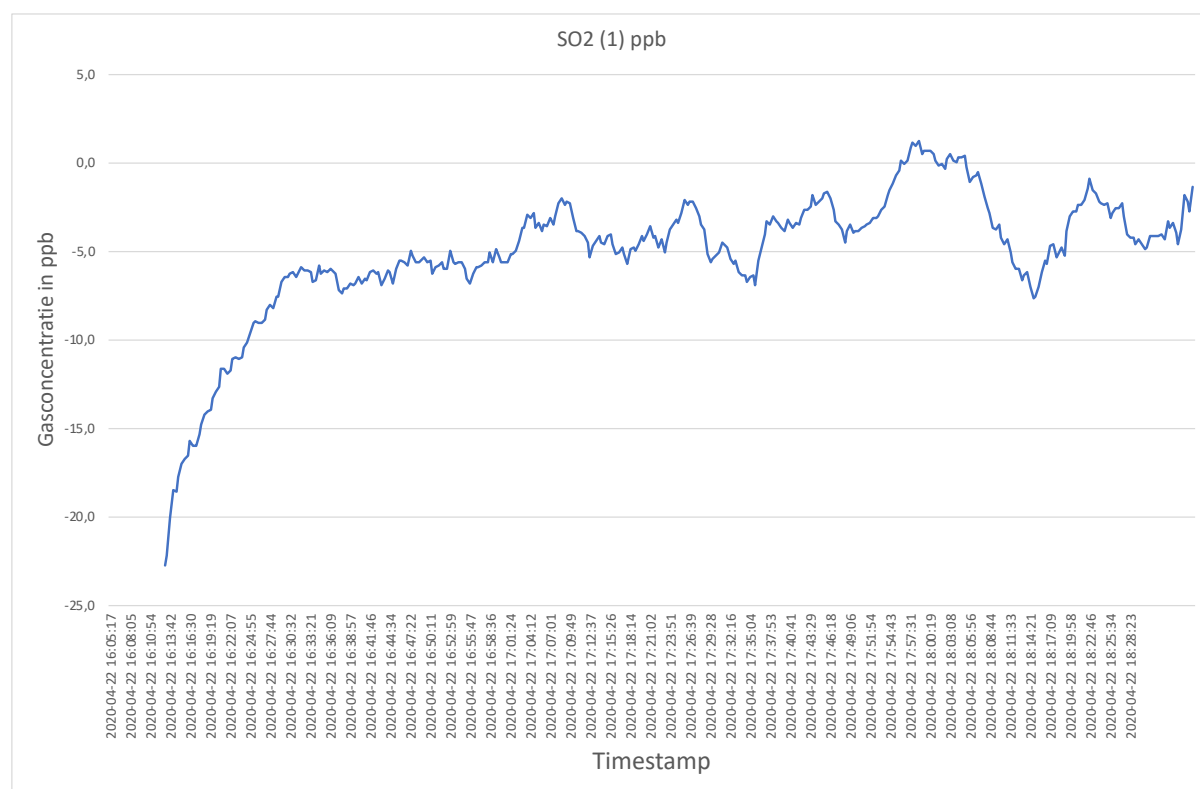
Bron: (VMM, z.d.-a)

6.3.2 METINGEN

Alle grafieken van de SO₂ concentraties zijn gespiegeld ten opzichte van de x-as. Dit wordt gedaan omdat men anders negatieve pieken krijgt.

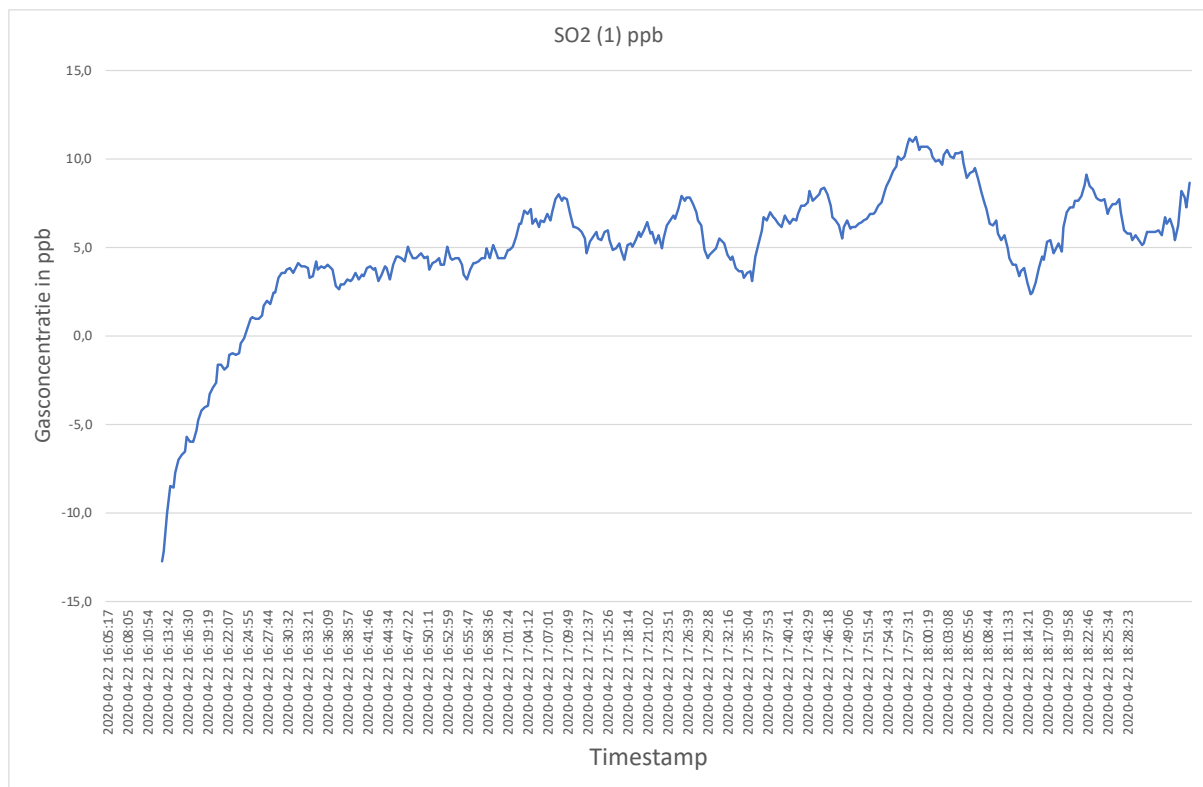
6.3.2.1 Algoritme 1 (alternatief)

Op figuur 71 kunnen de waarden teruggevonden worden van algoritme 1 zonder een constante aan toegevoegd. Indien we een constante van +10 toevoegen komen we onderstaande grafiek op figuur 72 uit, die de realiteit beter benadert. De *moving average* bij deze grafieken bedraagt 20.



FIGUUR 71: GRAFIEK METINGEN SO₂ (1)

Bron: eigen werk

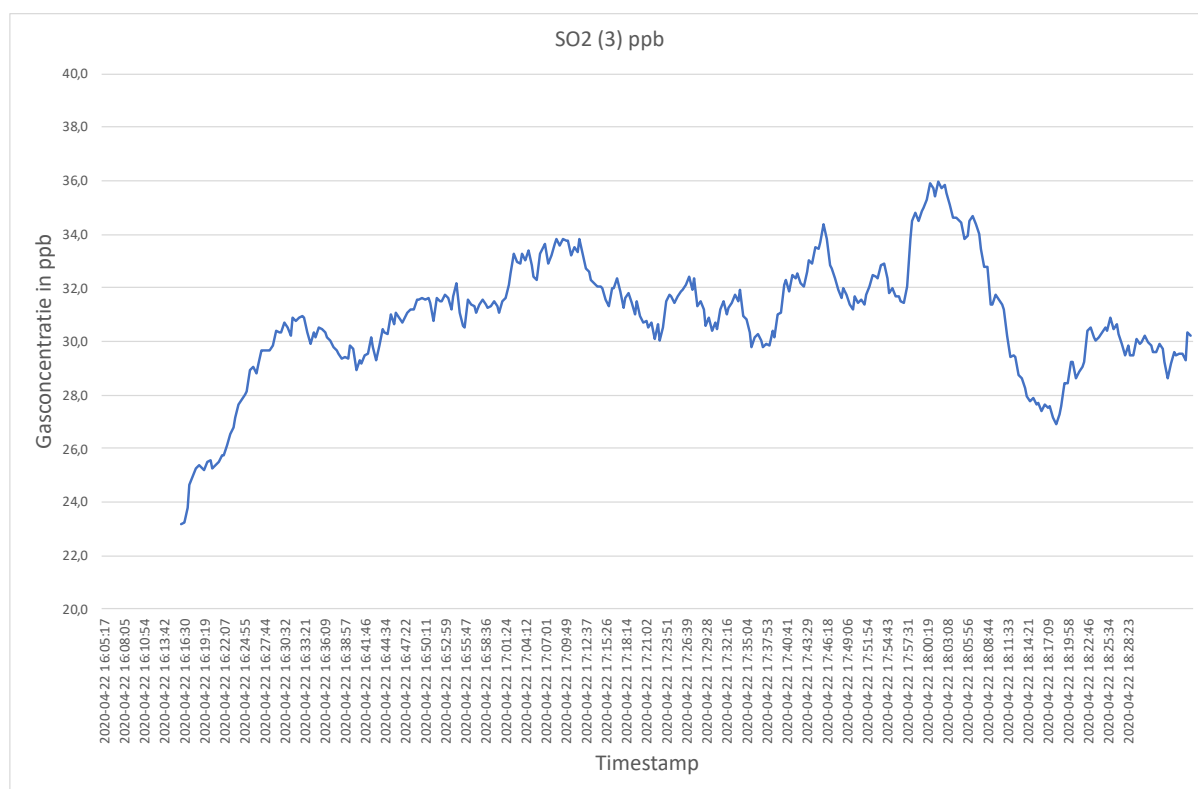


FIGUUR 72: GRAFIEK METINGEN SO₂ (1) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

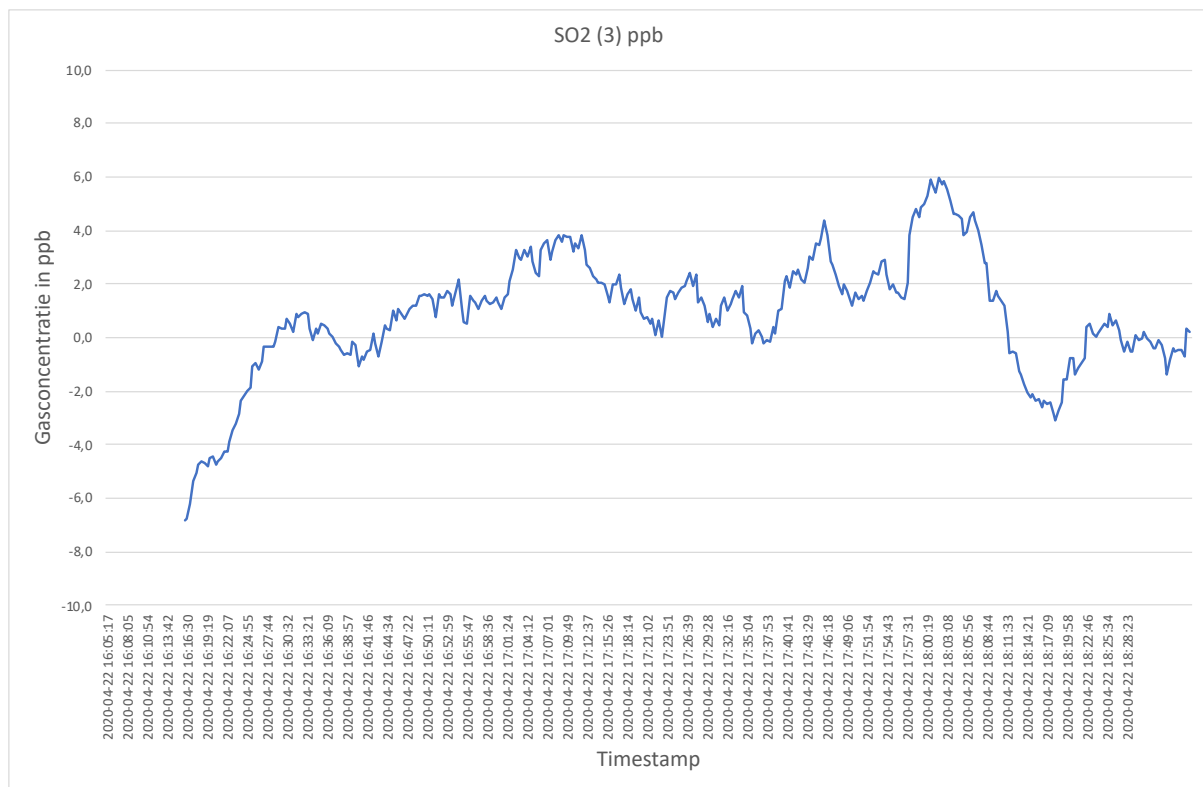
6.3.2.2 Algoritme 3 (alternatief)

Op de grafiek van figuur 73 kan afgelezen worden dat de waarden allemaal te hoog liggen ten opzichte van de echte waarden. Na onderzoek werd gevonden dat de waarden ongeveer 30 ppb te hoog lagen. Hierdoor werd aan algoritme 3 van SO₂-concentratie een constante van -30 toegevoegd wat de grafiek van figuur 74 als resultaat geeft. De *moving average* bij deze grafieken bedraagt 20.



FIGUUR 73: GRAFIEK METINGEN SO₂ (3)

Bron: eigen werk

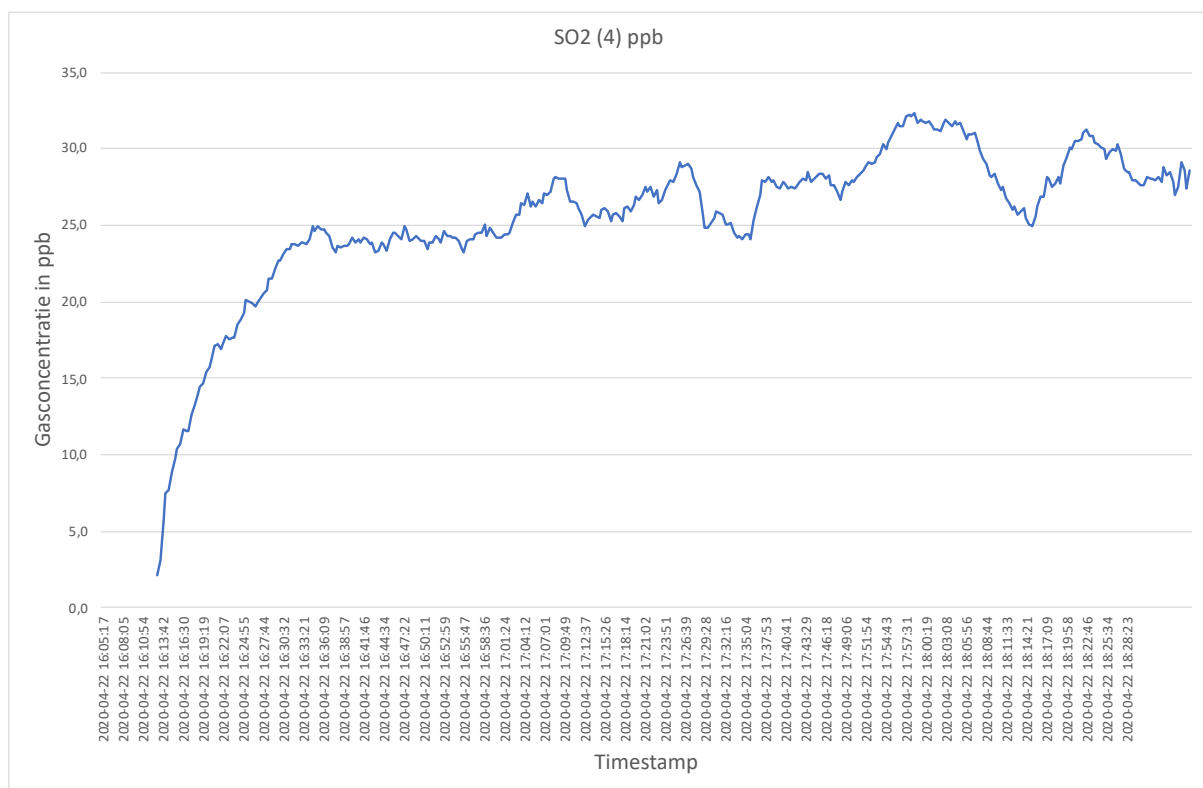


FIGUUR 74: GRAFIEK METINGEN SO₂ (3) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

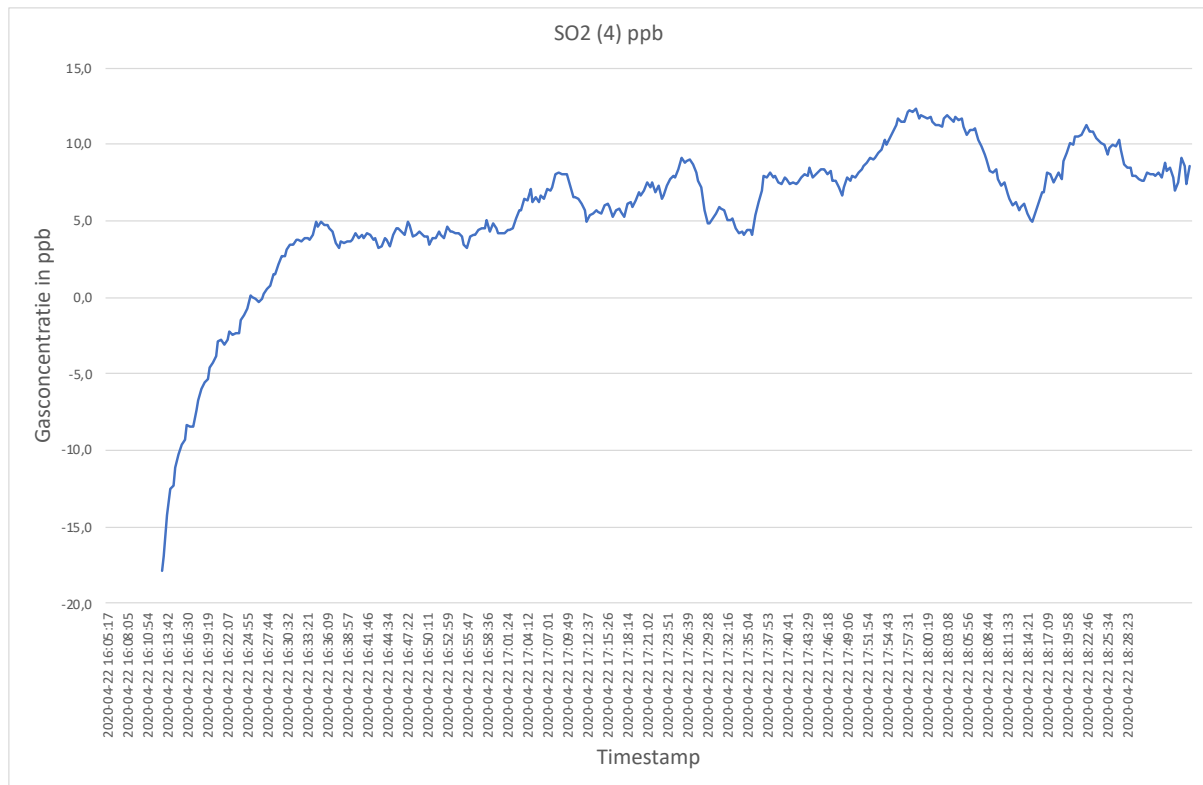
6.3.2.3 Algoritme 4 (aangeraden)

Op figuur 75 kunnen de meetwaarden van algoritme 4 uitgelezen worden. Deze bevinden zich ongeveer allemaal 20 ppb te hoog in verhouding met de waarden van de realiteit. Hierdoor wordt een constante aan algoritme 4 van -20 toegevoegd. Hiermee bekomt men figuur 76. De *moving average* bij deze grafieken bedraagt 20.



FIGUUR 75: GRAFIEK METINGEN SO₂ (4)

Bron: eigen werk



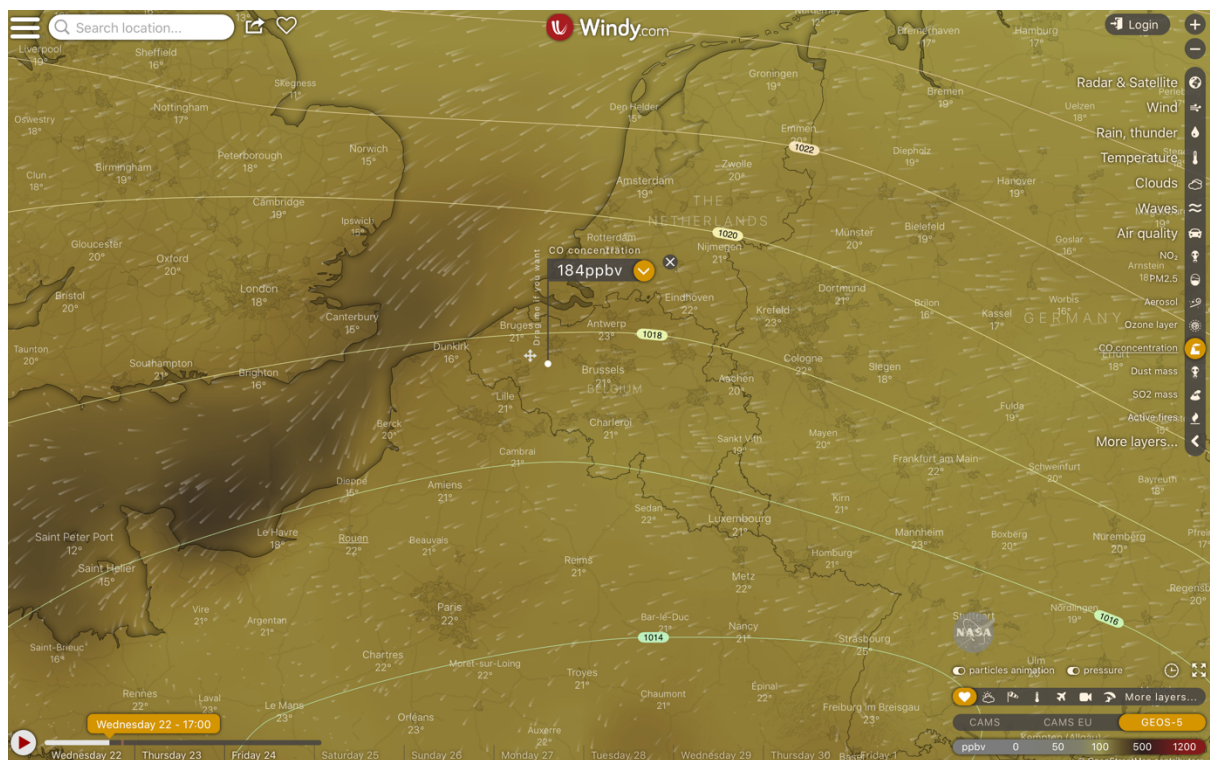
FIGUUR 76: GRAFIEK METINGEN SO₂ (4) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

6.4 CO-A4

6.4.1 REFERENTIECONCENTRATIE

Op Figuur 77 kan de algemene concentratie van koolstofmonoxide in de lucht teruggevonden worden. Dit is via een andere bron namelijk Windy, omdat het VMM deze informatie niet publiceert op hun site.



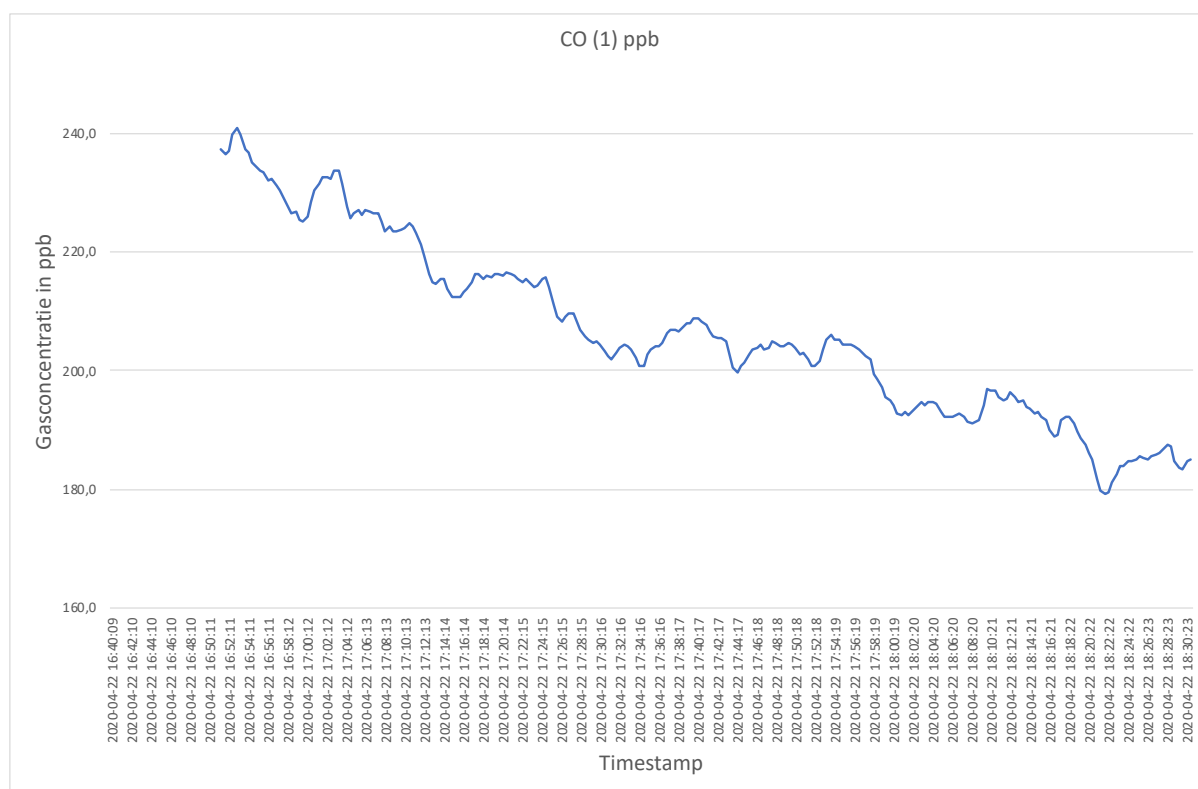
FIGUUR 77: CO-CONCENTRATIE

Bron: (Windy, z.d.)

6.4.2 METINGEN

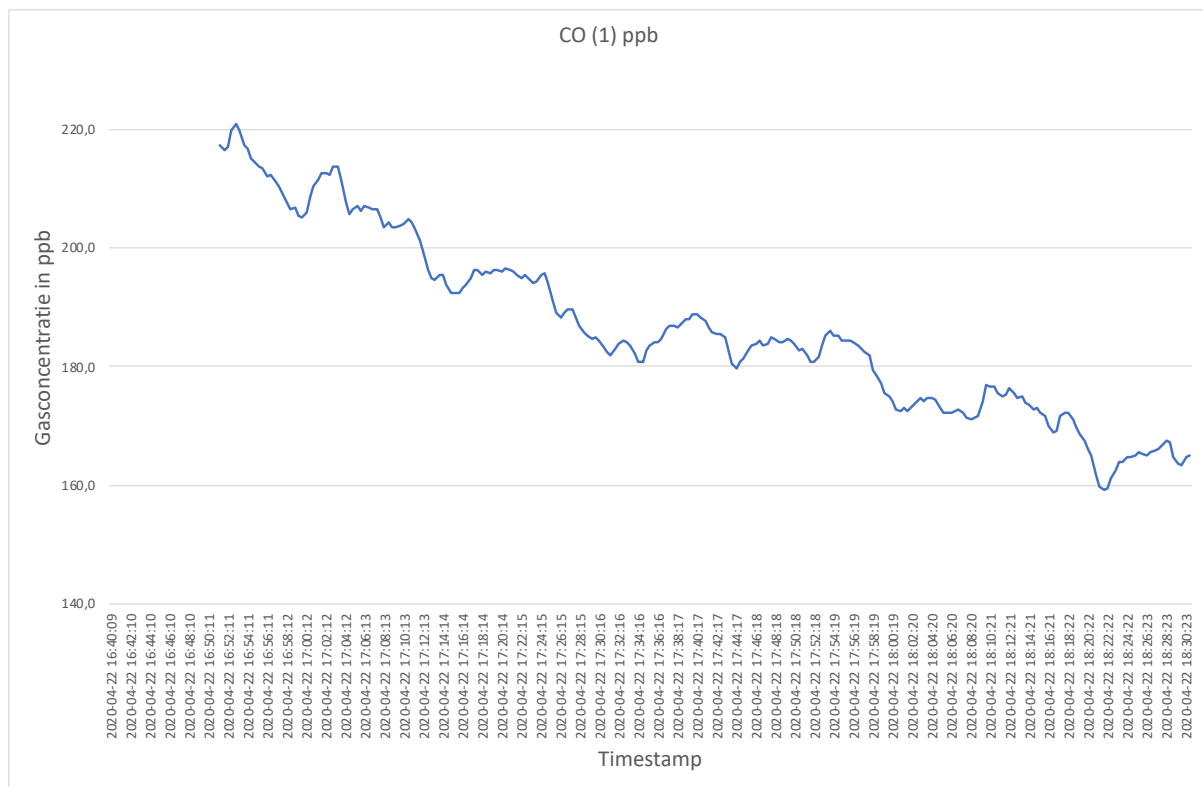
6.4.2.1 Algoritme 1 (aangeraden)

Op figuur 78 kan men de waarden zien voor algoritme 1. Hierop zien we dat de waarden ongeveer 20 ppb te hoog liggen. Met deze reden voegen we aan algoritme dus een constante toe van -20. Het resultaat hiervan kan op de volgende grafiek teruggevonden worden. De *moving average* bij deze grafieken bedraagt 20.



FIGUUR 78: GRAFIEK METINGEN CO (1)

Bron: eigen werk

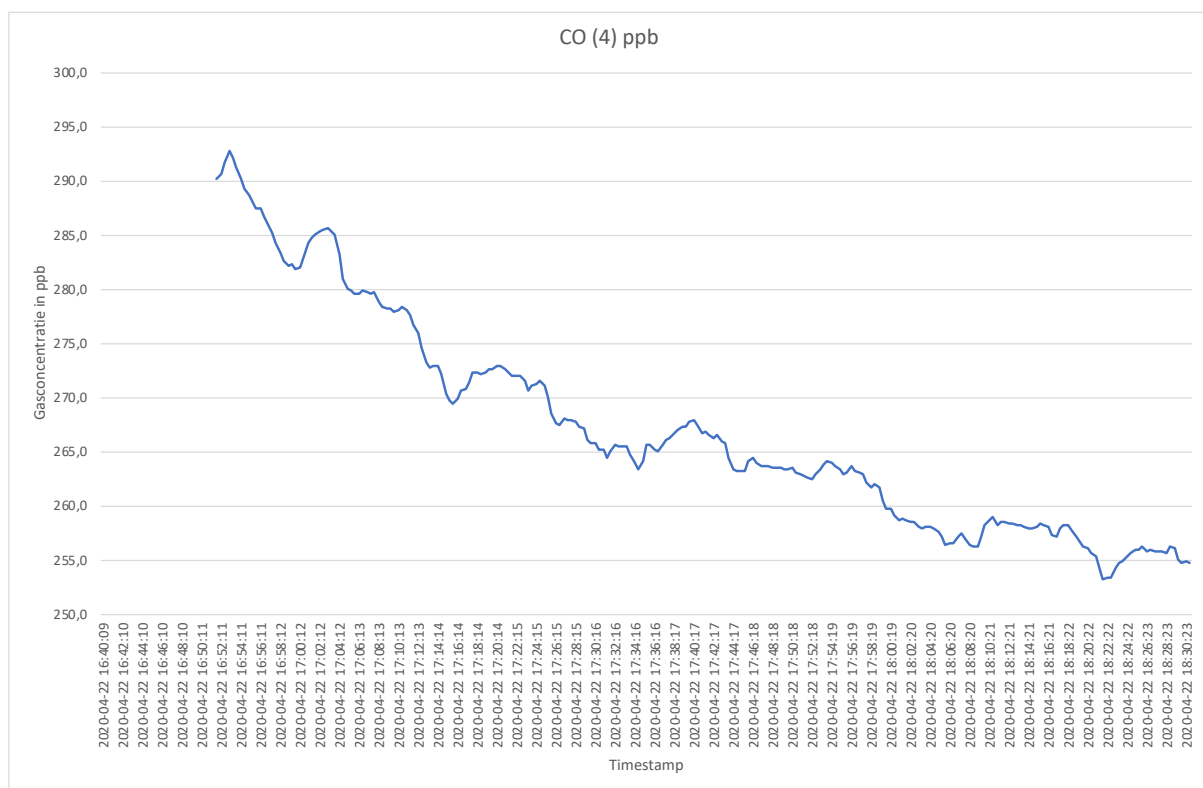


FIGUUR 79: GRAFIEK METINGEN CO (1) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

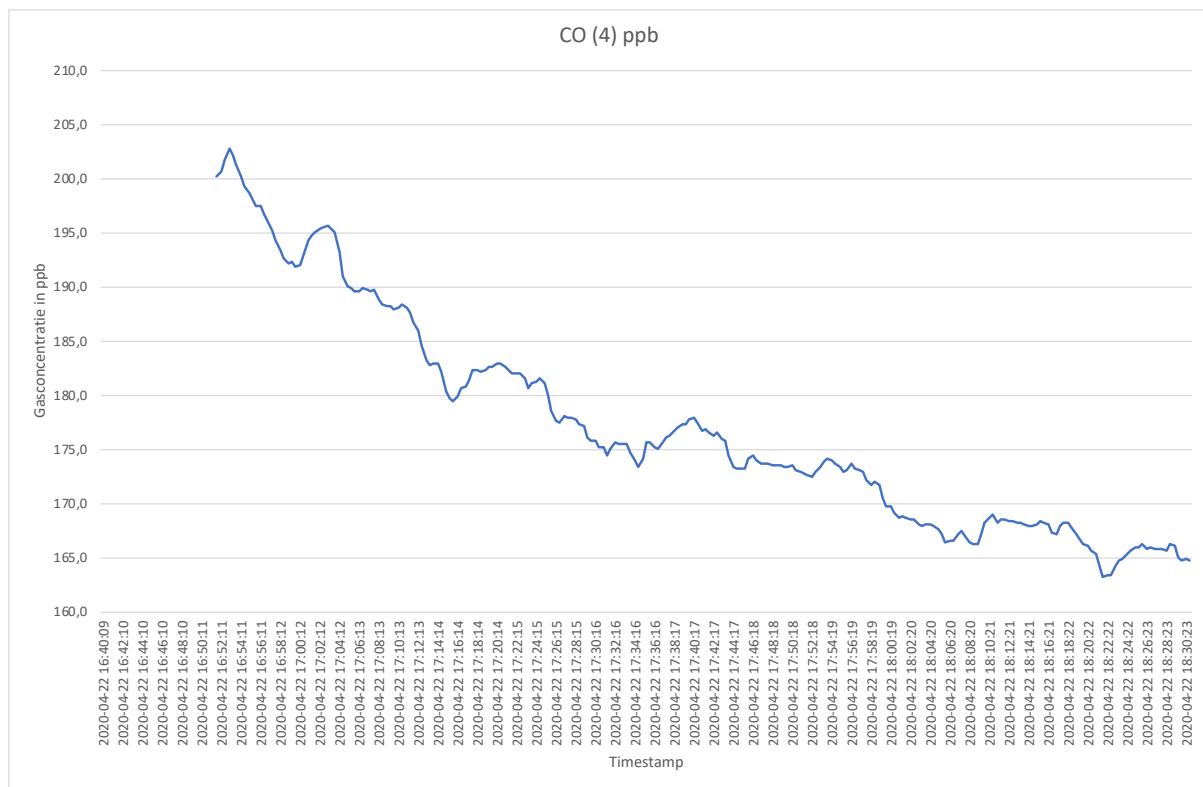
6.4.2.2 Algoritme 4 (alternatief)

Op figuur 80 kan men de waarden zien voor algoritme 4 van de CO-sensor. Deze waarden liggen allemaal ongeveer 90 ppb te hoog. Met deze reden werd de constante van -90 toegevoegd aan algoritme 4 waarmee men de grafiek van figuur 81 krijgt. De *moving average* bij deze grafieken bedraagt 20.



FIGUUR 80: GRAFIEK METINGEN CO (4)

Bron: eigen werk



FIGUUR 81: GRAFIEK METINGEN CO (4) GECORRIGEERD

Bron: eigen werk

7 VOLLEDIGE KALIBRATIE

Daar de eerste kalibratie niet toereiken en correct genoeg was, werd er nog een tweede kalibratie toegepast op de meetresultaten. De uiteindelijke formules van de volledige kalibratie per sensor staan in deze sectie uitgeschreven voor een temperatuur van 20°C.

7.1 NO₂-SENSOR

7.1.1 ALGORITME 1 (AANGERADEN)

$$C_{NO_2}(ppb) = \left(\frac{(WE_u - 305,5) - 1,8 \times (AE_u - 314,5)}{0,292511} \right) + 10$$

7.1.2 ALGORITME 3 (ALTERNATIEF)

$$C_{NO_2}(ppb) = \left(\frac{(WE_u - 305,5) - (-23,506 - (-11,242)) - 1,0 \times (AE_u - 314,5)}{0,292511} \right) - 40$$

7.2 OX-SENSOR

7.2.1 ALGORITME 1 (ALTERNATIEF)

$$C_{O_3}(ppb) = \left(\frac{(WE_u - 366,5 - (C_{NO_2}(ppb) \times 0,42175)) - 2 \times (AE_u - 414)}{0,3701465} \right) + 30$$

7.2.2 ALGORITME 3 (AANGERADEN)

$$C_{O_3}(ppb) = \left(\frac{(WE_u - 366,5 - (C_{NO_2}(ppb) \times 0,42175)) - (-49,939 - (-8,519)) - 1 \times (AE_u - 414)}{0,3701465} \right) - 90$$

7.3 SO₂-SENSOR

7.3.1 ALGORITME 1 (ALTERNATIEF)

$$C_{SO_2}(ppb) = -1 \times \left(\frac{(WE_u - 315,0) - 0,4 \times (AE_u - 289,5)}{0,29688} \right) + 10$$

7.3.2 ALGORITME 3 (ALTERNATIEF)

$$C_{SO_2}(ppb) = -1 \times \left(\frac{(WE_u - 315,0) - (12,64 - 7,28) - 1,0 \times (AE_u - 289,5)}{0,29688} \right) - 30$$

7.3.3 ALGORITME 4 (AANGERADEN)

$$C_{SO_2}(ppb) = -1 \times \left(\frac{(WE_u - 315,0) - 12,64 - 0}{0,29688} \right) - 20$$

7.4 CO-SENSOR

7.4.1 ALGORITME 1 (AANGERADEN)

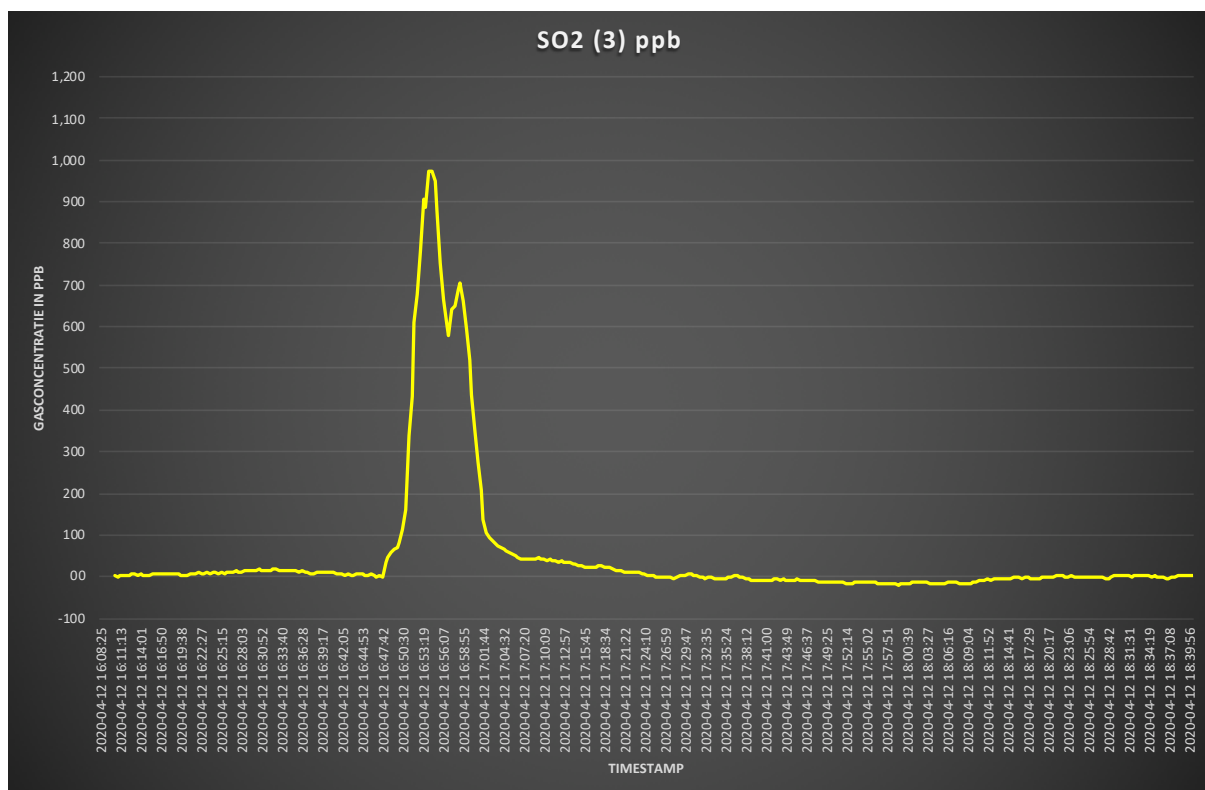
$$c_{co}(ppb) = \left(\frac{(WE_u - 305,5) - (-0,9) \times (AE_u - 301,0)}{0,2776} \right) - 20$$

7.4.2 ALGORITME 4 (ALTERNATIEF)

$$c_{co}(ppb) = \left(\frac{(WE_u - 305,5) - (-28,24) - 0}{0,2776} \right) - 90$$

7.5 KALIBRATIEDOCUMENT EXCEL

Daar de kalibratieberekeningen redelijk lang zijn, is hiervoor een specifiek Excel document aangemaakt. De gemeten data van de Seacanairy moet dan gewoon in de tabel van ruwe data geplakt worden en zo bekomt men op een snelle en overzichtelijke manier de gasconcentraties in ppb per algoritme in aparte grafieken.



FIGUUR 82: VOORBEELD GASCONCENTRATIEGRAFIEK

Bron: eigen werk

Kalibratiedocument SEACANAIRY

Specifieke sensorgegevens				
Sensornaam	NO2-A43F 212870427	OX-A431 214810129	SO2-A4 134330001	CO-A4 132305002
WE SENS (mV/ppb)	0,292511	0,3701465	0,29688	0,2776
WE SENS (mV/ppb) (NO2)		0,622175		
WE ₀ (mV)	305,5	366,5	315	305,5
AE ₀ (mV)	314,5	414	289,5	301
WE ₁ (mV)	-23,506	-49,939	12,64	-28,24
AE ₁ (mV)	-11,242	-8,519	7,28	25,76
WE ₂ (mV)	281,994	316,561	327,64	277,26
AE ₂ (mV)	303,258	405,481	296,78	326,76

Correcties per algoritme			
Algoritme 1	Algoritme 2	Algoritme 3	Algoritme 4
r ₀ = 1,8	r ₀ = 2	r ₀ = 0,4	r ₀ = -0,9
C = 10	C = 30	C = 10	C = -20
k ₁ = /	k ₁ = /	k ₁ = /	k ₁ = /
C = /	C = /	C = /	C = /
k ₁ ' = 1	k ₁ ' = 1	k ₁ ' = 1	k ₁ ' = /
C = -40	C = -90	C = -30	C = /
k ₁ ' = /	k ₁ ' = /	k ₁ ' = 0	k ₁ ' = 0
C = /	C = /	C = -20	C = -90

Kalibratie temperatuursensor	
Therm. Sensitiviteit (mV/°C)	1
Vkal (mV/°C)	314
Tkal (°C)	18

Raw data (mV)									
TIMESTAMP	NO2 WE	NO2 AE	OX WE	OX AE	SO2 WE	SO2 AE	CO WE	CO AE	T
2020-04-22 16:05:17	285,649963	306,472778	362,2437	403,900146	329,704285	307,235718	321,5836	285,971	16,1
2020-04-22 16:05:41	303,421021	307,807922	368,7709	405,960083	336,341858	307,502747	301,4038	306,7398	16,2
2020-04-22 16:06:05	297,546387	309,21936	368,8812	409,736633	332,756042	301,818848	484,2377	302,0096	16,3
2020-04-22 16:06:29	296,783447	309,9823	360,0693	407,600403	327,148438	304,450989	467,3004	302,2766	16,4
2020-04-22 16:06:53	311,317444	367,4	409,0	327,949524	302,209583	452,3	298,4	316,123962	16,5
2020-04-22 16:07:17	297,50824	312,080383	365,6387	409,088135	327,186584	303,535461	439,4531	298,3093	16,6
2020-04-22 16:07:41	305,976868	313,034058	375,8621	409,889221	335,965881	303,910931	436,9395	296,8579	16,7
2020-04-22 16:08:05	303,649902	312,995911	366,306	410,575867	327,87323	304,145813	432,7993	301,5818	16,8
2020-04-22 16:08:29	308,837891	313,339233	377,6932	411,834717	328,292847	303,535461	425,4913	300,4074	16,9
2020-04-22 16:08:53	298,500061	313,796997	354,7287	412,063599	323,638916	302,54364	416,9464	297,4319	17,0
2020-04-22 16:09:17	293,807983	313,873291	370,7886	413,894653	325,012207	301,589966	417,2897	302,0477	17,1
2020-04-22 16:09:42	298,538208	314,025879	370,7841	412,17804	324,630737	303,421021	425,9252	314,7888	17,2
2020-04-22 16:10:06	303,573608	313,75885	374,3744	413,398743	326,384938	301,589966	419,6167	317,4591	17,3
2020-04-22 16:10:30	300,941467	314,52179	371,4317	413,9328	325,660706	300,941467	407,9056	307,0831	17,4
2020-04-22 16:10:54	310,020447	315,093994	382,3327	413,818359	323,982239	301,628113	403,0991	306,0913	17,5
2020-04-22 16:11:18	306,091309	315,666199	373,2681	413,703918	324,897766	300,598145	404,1672	311,2793	17,6
2020-04-22 16:11:42	306,930542	315,361023	378,418	414,199829	326,728821	301,704407	405,7691	312,6144	17,7
2020-04-22 16:12:06	301,895142	315,437317	373,9166	413,703918	323,677063	301,246641	402,4506	308,609	17,8
2020-04-22 16:12:30	305,023193	315,132141	384,7504	414,466858	326,99585	300,865173	397,4152	309,2194	17,9
2020-04-22 16:12:54	305,976868	317,8785	414,619446	325,164795	298,00415	395,4697	312,2711	316,810608	18,0
2020-04-22 16:13:18	303,230286	315,399117	374,7177	415,19165	324,020386	301,170349	393,9819	309,1431	18,1
2020-04-22 16:13:42	301,208496	315,437317	386,7831	414,428711	320,396423	299,186707	395,213	311,4485	18,2
2020-04-22 16:14:06	311,682556	315,742493	370,7504	414,810181	322,81783	300,292969	393,6005	314,2548	18,3
2020-04-22 16:14:30	306,472778	315,666199	380,1727	414,428711	325,889587	299,987793	387,4969	306,778	18,4
2020-04-22 16:14:54	302,963257	315,971375	374,8322	414,161682	321,006775	296,7453	387,1536	310,3638	18,5
2020-04-22 16:15:18	302,085876	315,818787	366,1728	415,229797	322,189331	303,268433	392,4942	314,1785	18,6
2020-04-22 16:15:42	299,530029	315,895081	371,3226	415,19165	322,026743	297,851562	388,5999	314,2166	18,7
2020-04-22 16:16:06	312,348424	315,742493	383,1863	414,657593	325,622559	301,66620	390,3198	317,3065	18,8
2020-04-22 16:16:30	302,696228	315,742493	373,6496	414,581299	322,494507	300,521851	386,8103	315,5899	18,9
2020-04-22 16:16:54	307,693481	315,589905	379,6768	415,039062	324,325562	300,369263	389,8621	319,4046	19,0
2020-04-22 16:17:18	305,82428	315,895081	379,5766	415,382385	325,012207	301,28479	385,4752	317,1158	19,1
2020-04-22 16:17:43	303,421021	315,696167	365,7679	415,496826	318,77981	298,194883	379,3716	309,4101	19,2
2020-04-22 16:18:07	308,456421	315,78064	372,2348	415,840149	322,265425	299,14856	377,1973	310,6689	19,3
2020-04-22 16:18:31	298,919678	315,78064	371,5515	414,581299	321,350098	298,728943	381,6223	317,955	19,4
2020-04-22 16:18:55	308,113098	315,628052	370,4453	415,496826	321,350098	298,690796	379,5242	317,159331	19,5
2020-04-22 16:19:19	304,908752	316,162109	382,3378	415,496826	323,944092	299,034119	384,1019	319,252	19,6
2020-04-22 16:19:43	301,437378	315,27585	377,6643	415,558679	321,960449	299,660231	379,9284	318,3365	19,7
2020-04-22 16:20:07	305,213928	315,361023	384,7122	415,649414	321,846008	301,589966	377,7695	319,5953	19,8
2020-04-22 16:20:31	307,998657	315,589905	384,2926	415,077209	324,401855	298,38562	376,1292	317,1921	19,9
2020-04-22 16:20:55	304,412842	316,123962	367,0502	415,802002	319,404602	298,919678	377,2621	319,252	20,0

Gaswaarden per geschikt algoritme (ppb)									
NO2 (1) +10	NO2 (3) -40	OX (1) +30	OX (3) -90	SO2 (1) +10	SO2 (3) -30	SO2 (4) -20	CO (1) -20	CO (4) -90	
5,2	24,8	67,1	66,0	-13,6	-1,7	-27,0	795,1	750,1	20,10608
44,1	17,7	28,0	28,2	-37,6	-21,2	-49,3	704,3	717,4	20,20256
15,3	-7,2	42,0	48,1	-37,2	-30,3	-37,2	627,1	655,8	20,162109
8,0	-12,4	38,1	36,0	-10,8	-2,5	-18,3	567,0	594,6	20,085815
24,3	7,5	32,0	29,4	-16,8	-13,4	-21,0	500,4	540,6	20,123962
-2,4	-17,1	57,0	52,4	-12,1	-5,7	-18,5	453,8	494,3	20,162109
20,7	8,6	54,0	48,5	-7,5	-0,3	-14,7	438,4	483,4	20,292138
12,9	0,7	34,1	30,7	-13,6	-6,0	-20,8	443,5	470,1	20,352844
28,6	17,3	39,4	38,3	-15,9	-9,4	-22,2	410,3	444,0	20,429138
-9,6	-19,6	19,6	17,7	-1,5	2,9	-6,5	369,9	413,2	20,505432
-26,1	-35,9	71,9	74,7	-7,4	-4,9	-11,1	386,1	414,4	20,467285
-10,9	-20,3	63,5	61,2	-3,7	2,5	-8,9	446,5	433,5	20,543579
8,0	-2,1	45,4	47,2	-12,1	-9,6	-15,8	444,4	422,8	20,96167
-5,7	-13,7	50,2	51,1	-10,5	-9,3	-13,3	368,6	380,6	20,619873
21,8	15,3	48,6	47,4	-3,9	-1,3	-7,7	348,1	363,3	21,077637
4,8	0,0	44,4	41,0	-8,4	-7,9	-10,8	368,8	367,2	20,734314
9,6	3,9	50,2	49,1	-13,1	-10,3	-16,9	376,9	372,9	20,96167
-8,1	-13,6	60,9	58,3	-1,4	-1,6	-6,7	353,9	361,0	20,848755
4,5	-1,9	71,7	72,1	-15,1	-14,1	-17,8	337,8	342,8	20,810608
8,7	1,9	36,7	38,0	-12,8	-17,5	-11,7	340,6	335,8	20,810608
-3,3	-8,9	49,5	51,0	-4,7	-3,0	-7,8	325,1	330,5	20,925049
-10,4	-15,9	40,3	39,7	4,9	2,5	4,4	348,9	337,1	20,889692
30,3	25,7	2,5	2,0	-1,9	-2,0	-3,8	340,3	329,1	21,077637
6,1	1,3	57,6	56,2	-12,5	-13,3	-14,1	294,1	307,1	21,153931
-7,7	-11,8	60,4	57,4	-0,5	-7,8	2,3	304,5	305,9	20,963196
-9,8	14,3	33,6	33,9	4,3	10,2	-1,6	336,1	325,1	20,963196
-19,0	-23,3	28,2	28,2	-2,4	-7,5	-1,1	321,0	309,9	21,15784
25,2	20,6	42,8	41,8	-9,4	-6,7	-13,2	338,4	317,3	21,268372
-7,2	-11,9	54,4	53,2	-0,4	-0,1	-2,7	320,2	304,6	21,15784
10,8	5,7	47,7	48,2	-6,8	-6,7	-8,8	343,6	315,6	21,03949
2,5	-1,7	45,3	45,7	-7,8	-6,0	-11,1	320,3	299,8	21,230225
-10,6	-12,7	31,8	30,1	9,3	4,9	10,2	275,4	277,8	21,268372
12,2	-7,7	23,5	25,6	-1,5	-3,9	-1,9	269,6	270,0	21,268372
-20,4	-24,9	63,7	62,4	1,0	-2,2	1,2	309,2	285,9	21,15784
12,0	7,0	18,9	20,5	1,0	-2,4	1,2	300,5	278,1	21,153931
-2,2	-5,8	67,8	67,8	-7,3	-10,0	-7,6	322,3	294,9	21,153931
-14,8	-18,9	66,6	68,1	0,2	-1,3	-0,9	306,0	279,5	21,230225
3,7	3,0	22,0	22,0	5,2	5,7	-0,5	300,6	272,1	21,268372
11,8	6,7	58,8	59,4	-9,7	-13,7	-9,1	286,9	266,2	21,306519
-3,7	-7,3	26,0	26,9	7,9	4,9	7,7	298,3	270,8	21,59106

Temperatuur (°C)	
20,10608	16,1
20,20256	16,2
20,162109	16,3
20,085815	16,4
20,123962	16,5
20,162109	16,6
20,292138	16,7
20,352844	16,8
20,429138	16,9
20,505432	17,0
20,467285	17,1
20,543579	17,2
20,96167	17,3
20,619873	17,4
21,077637	17,5

8 MEETRESULTATEN

In deze sectie worden de gemeten resultaten beschreven. Hier zullen enkel de resultaten van de aangeraden algoritmen in besproken worden. Voor de meetresultaten werd de opstelling in een garage gezet met een grote poort voor voldoende verluchting van buitenaf indien nodig. De bekomen resultaten werden in hun geschikte algoritmes verwerkt en uitgezet op grafieken in Excel. De metadata van het experiment kan teruggevonden worden in onderstaande tabel. Het onderzoek ging door te Kruishoutem op 12 april. Het experiment vond plaats in een loods met een grote poort die open en toe kan.

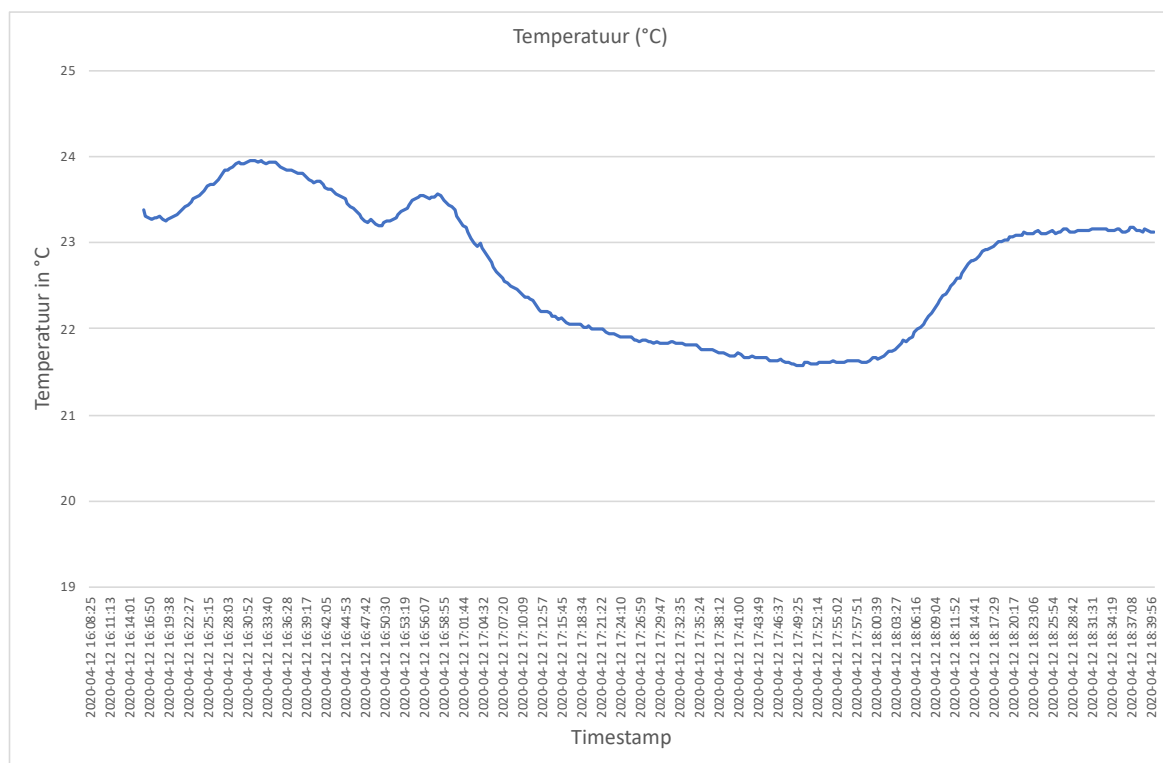
TABEL 25: METADATA TWEEDE KALIBRATIE

Bron: Eigen werk

Metadata tweede kalibratie	
1600	Start meting, poort open
1640	Poort toegedaan
1645	Motor personenwagen gestart
1648	Extra gas gegeven
1651	Motor stilgelegd
1757	Poort geopend
1840	Stop metingen

8.1 TEMPERATUUR

De meting startte rond 16u00, de poort werd opengezet vanaf het begin om zeker de buitenlucht binnen te krijgen. Daar het buiten warmer was dan binnen, stijgt de temperatuur tot 24 graden, wat overeenkomt met de buitentemperatuur. Om 16u40 werd de poort gesloten en daalde de temperatuur weer tot ongeveer 23°C rond 16u50. De wagen werd gestart om 16u45 en lijkt voor een lichte stijging in temperatuur te zorgen. Om 16u51 is de wagen stilgelegd en vanaf 16u56 begint de temperatuur terug te zakken. De temperatuurdaling blijft zich voortzetten tot ongeveer 18u00. Om 17u57 werd de poort geopend en steeg de binnentemperatuur weer tot deze gelijk was aan de buitentemperatuur. Uit het verloop van deze grafiek zijn geen abnormale zaken te merken en liggen de resultaten in de lijn van de verwachtingen.



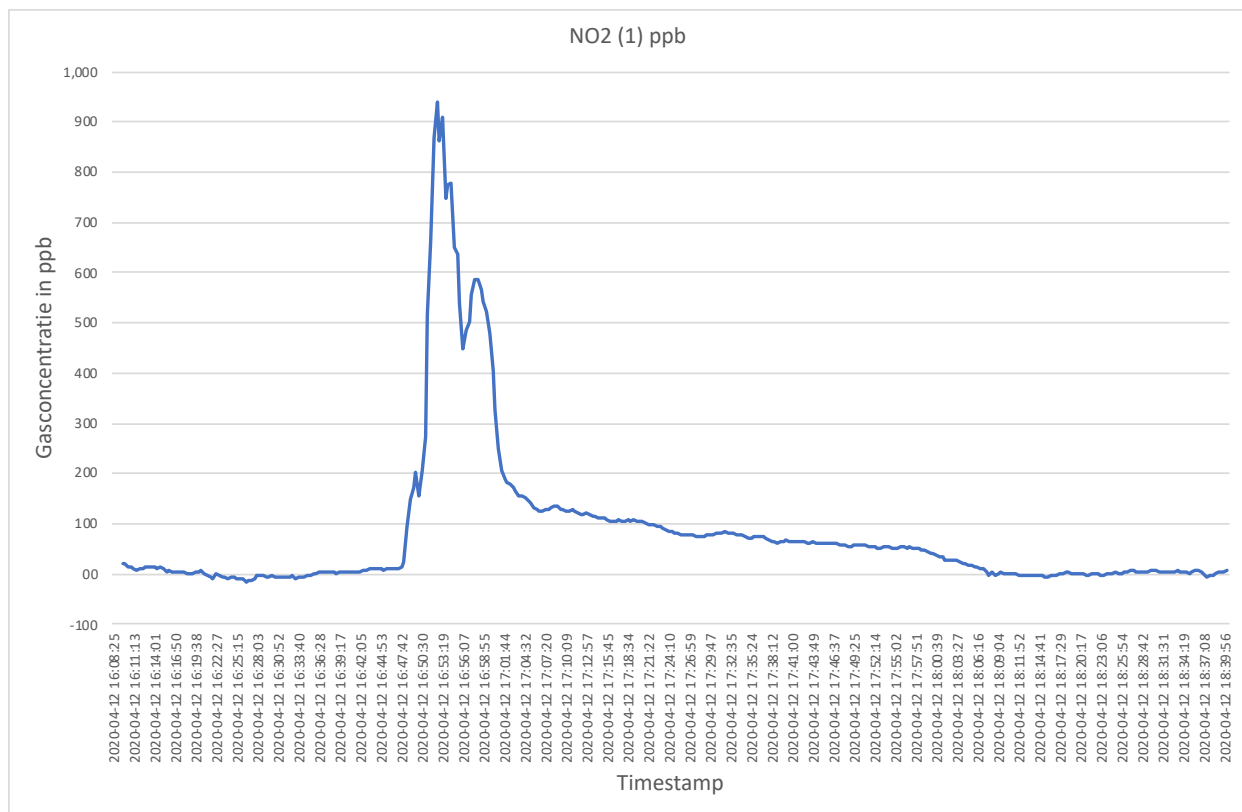
FIGUUR 84: GRAFIEK TEMPERATUUR

Bron: eigen werk

8.2 STIKSTOFDIOXIDE

In de periode van 16u00 tot 16u47 is de concentratie van stikstofdioxide constant. Enkele minuten na dat de motor gestart werd om 16u45 kan een forse stijging in concentratie waargenomen worden. De piek ligt ongeveer op 950 ppb, wat ongeveer negen keer hoger ligt dan de maximale concentratie voor 1 uur namelijk 105 ppb. De piek daalt echter snel, maar maakt toch nog een tweede piek rond 16u53. Dit is te wijten aan het feit dat er op dat tijdstip 16u48 nogmaals extra gas werd gegeven voor een periode van 2 seconden. Deze 2 seconden extra gas geven heeft dus een redelijk grote piek gecreëerd enkele minuten later. Na deze tweede piek daalt de concentratie gestaag. Op het tijdstip van 18u00 is de daling sterker, door het openen van de poort. Nadien blijft de waarde opnieuw constant op dezelfde waarde als die van aanvang.

Uit deze grafiek kan afgeleid worden dat de meetresultaten overeenkomen met de te verwachten stijgingen en dalingen. Men leert hier eveneens uit dat de pieken enkele minuten vertraging hebben op het ontstaan ervan. De resultaten lijken goed in lijn te liggen met de te verwachten waarden.

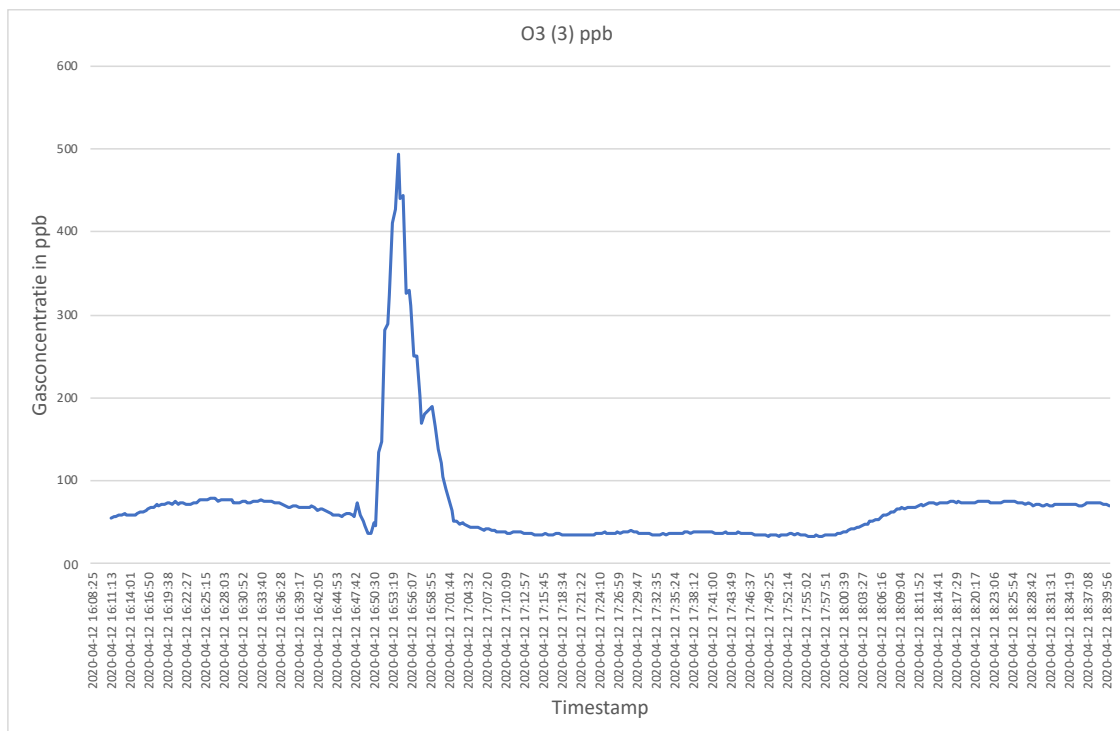


FIGUUR 85: GRAFIEK STIKSTOFDIOXIDE

Bron: eigen werk

8.3 OZON

In het begin kan gezien worden dat de concentratie stabiel blijft rond de waarde van buiten op dat moment. In het begin ziet men een zeer lichte stijging tot het moment dat de poort toegaat (16u40). Na het sluiten van de poort, zakt de waarde tot het moment dat de wagen gestart wordt. De forse stijging start om 16u50, wat 5 minuten na het starten van de motor is. In de piek is wederom een tweede piek te zien die plaatsvindt om 16u59, wat ongeveer elf minuten later is dan het moment waarop kort extra gas gegeven werd. De maximale concentratie die gemeten werd bedraagt 500ppb, wat 10 keer hoger ligt dan de maximale concentratie voor 8u blootstelling namelijk 50ppb. Na de tweede piek daalt de concentratie zeer snel naar een equilibrium, dat lager ligt dan dat van buiten. De ozonconcentratie heeft als eigenschap zeer snel te dalen dus. Van het moment dat de poort geopend wordt, stijgt de concentratie tot deze in equilibrium is met die van buiten.

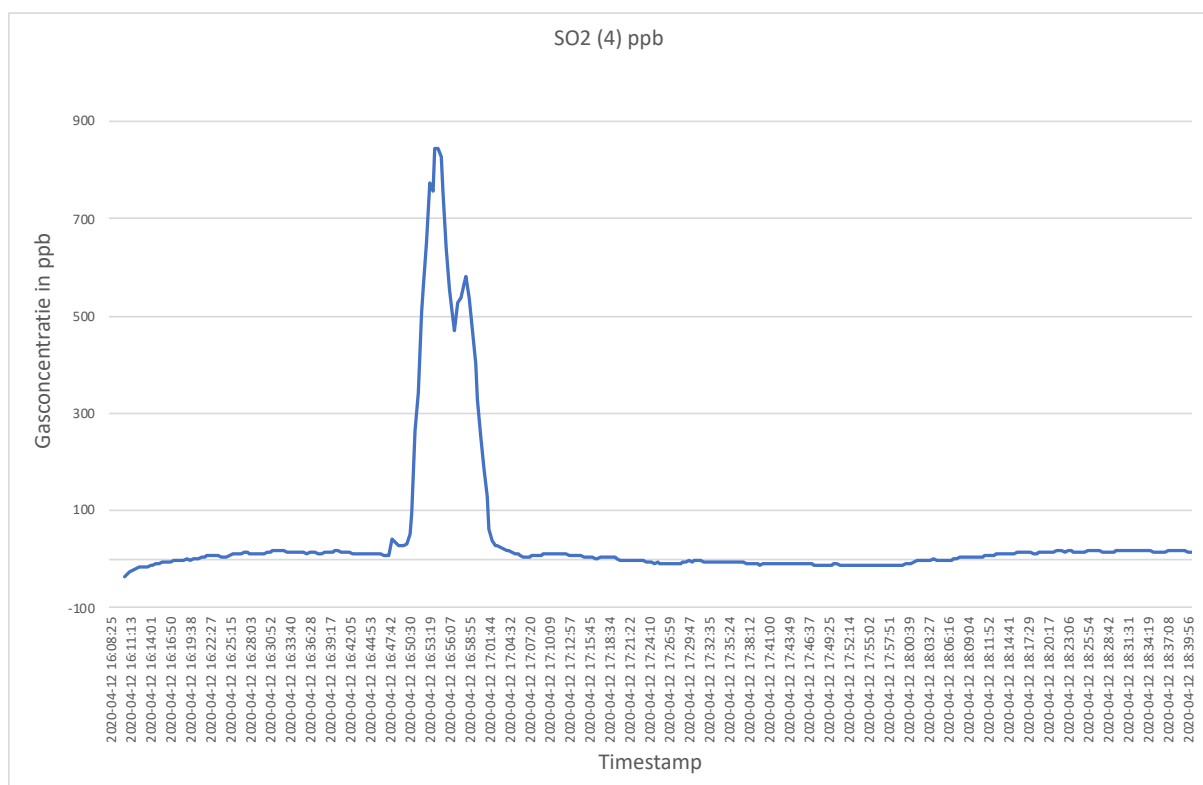


FIGUUR 86: GRAFIEK OZON

Bron: eigen werk

8.4 ZWAVELDIOXIDE

In het begin kan in de zwavelconcentratie een lichte stijging teruggevonden worden tot de poort gesloten wordt om 16u40 om dan weer licht te dalen. De forse piek start rond 16u50, ongeveer 5 minuten na het starten van de wagen. De maximale piek die bereikt wordt bedraagt ongeveer 850ppb. Deze waarde ligt ongeveer 4 keer hoger dan de maximale concentratie bij 10 min blootstelling aan dit gas namelijk 192 ppb. De tweede piek is wederom aanwezig en vindt plaats om 16u59, dit is ongeveer 11 min later dan het tijdstip dat er kort extra gas werd gegeven. Na deze tweede piek daalt de concentratie snel. Deze blijft constant tot het moment dat de poort wordt opengezet. Vanaf dan stijgt deze lichtjes tot een nieuwe concentratie die gelijkligt met die van buiten. De meetresultaten liggen hier ook weer in de trend die verwacht wordt bij dergelijke handelingen.

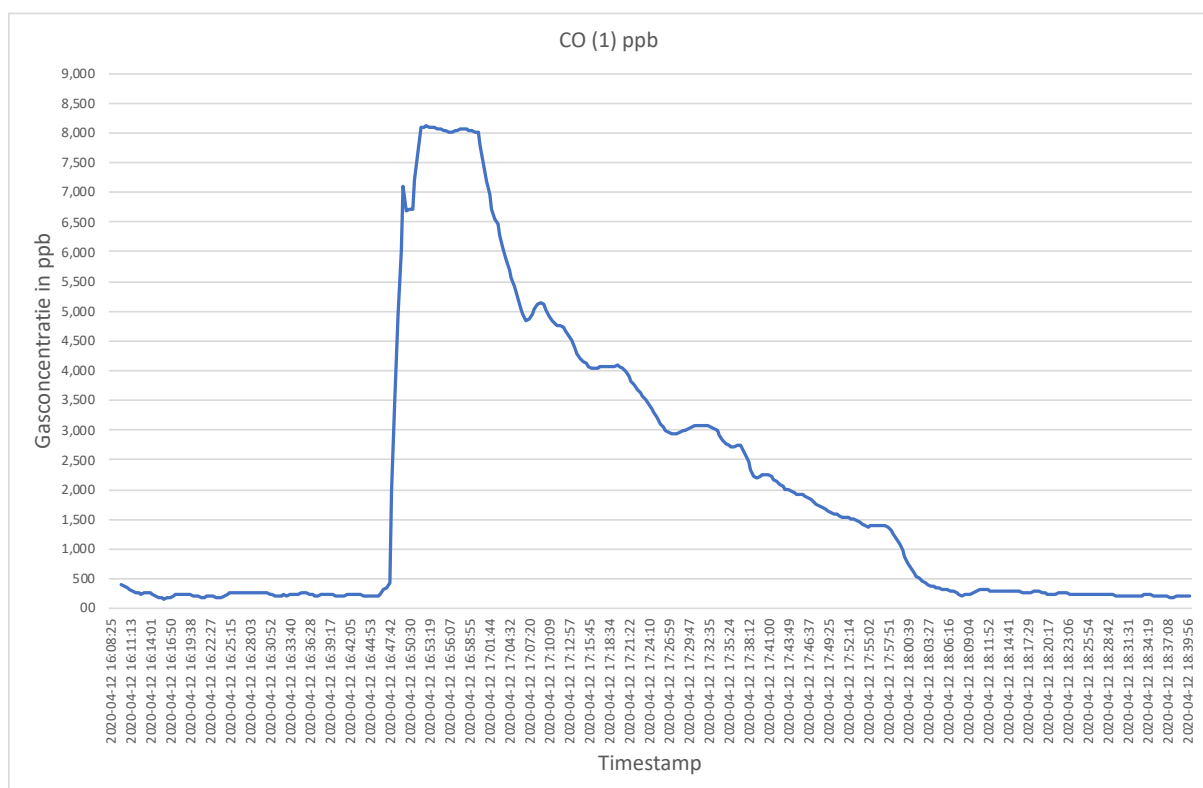


FIGUUR 87: GRAFIEK ZWAVELDIOXIDE

Bron: eigen werk

8.5 KOOLSTOFMONOXIDE

In het begin geven de metingen een constante lijn. Het sluiten van de poort geeft geen verschil met deze aanvangswaarden. Een forse stijging kan waargenomen worden. De piek verloopt tot 8ppm en is volledig vlak voor enkele minuten. Dit is te wijten aan het feit dat de spanning die de sensor doorgaf aan de ADC hoger was dan 2,5V. Een hogere waarde kan deze niet aangeven. De ware piek lag dus hoger dan 8ppm. De maximale concentratie waar men aan blootgesteld mag worden voor een 8u-gemiddelde bedraagt 9ppm. Na deze afgevlakte piek daalt de concentratie weer. Wat hierbij sterk opvalt is dat deze concentratie zeer traag daalt tot men de poort opende, dan daalt deze sterker. Dit is een typische eigenschap van CO en maakt deze ook zo gevaarlijk. Hier liggen de waarden wederom in de lijn van de verwachtingen en reageert alles logisch op elkaar.



FIGUUR 88: GRAFIEK KOOLSTOFMONOXIDE

Bron: eigen werk

8.6 DISCUSSIE

Na deze individuele bespreking kan een algemeen beeld gesteld worden over de Seacanairy. De maximaal te meten gasconcentraties zijn overal toereikend behalve bij de koolstofmonoxide sensor. Hierbij zit men 1 ppm onder de laagste waarde die gemeten zou moeten worden. Bij alle andere sensoren kunnen alle waarden gemeten worden van de laagste tot de hoogste maximale concentratie. Dit probleem bij de CO-sensor kan in se opgelost worden door een spanningsdeler tussen de sensor en de ADC te plaatsen. Via deze spanningsdeler kan men de spanning in de ADC verlagen tot onder de 2,5 volt. De factor van de spanningsdeler kan in de code geprogrammeerd worden, zodat de werkelijke voltages die de sensor produceert, die veel hoger liggen toch worden opgeslagen. Deze bewerking zou enkel nodig zijn bij de koolstofmonoxidesensor omdat daar de minimale schadelijke waarde niet bereikt wordt. Verder liggen alle stijgingen in lijn met de voorafgaande handelingen in de garage. De Seacanairy reageert dus correct op concentratiestijgingen en -dalingen. De absolute waarden die deze aangeeft lijken eveneens in lijn te liggen met de realiteit.

9 BETROUWBAARHEID VAN HET SYSTEEM

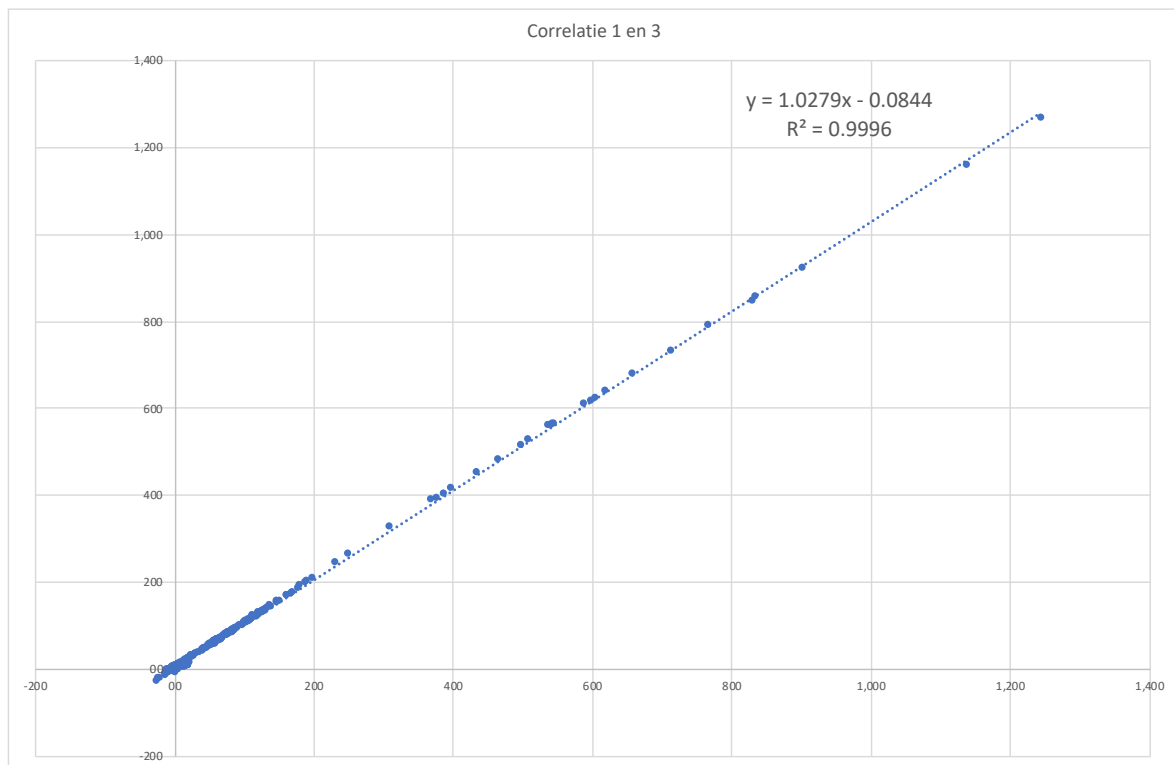
In dit hoofdstuk wordt getracht een onderzoek te doen naar de betrouwbaarheid van de Seacanairy en naar de verschillen tussen verschillende algoritmen.

9.1 CORRELATIE TUSSEN DE ALGORITMEN

Indien de correlatie tussen de algoritmen gelijk of bijna gelijk is aan 1, dan wil dat zeggen dat deze algoritmen hetzelfde verloop kennen. Dit is een goede manier om te testen of alle algoritmen wel juist zijn en er geen grote verschillen tussen zijn. Indien er een grote discrepantie is, zal de correlatie afwijken van de waarde 1. De grafieken zijn gebaseerd op de meetwaarden van het experiment in de garage onder het hoofdstuk getiteld meetresultaten.

9.1.1 STIKSTOFDIOXIDE

Men kan aflezen op de grafiek dat R^2 ongeveer gelijk is aan 1. Dit is dus een resultaat dat aantoont dat beide algoritmen zeer gelijkaardig zijn. De beide algoritmen zijn naar alle waarschijnlijkheid juist.

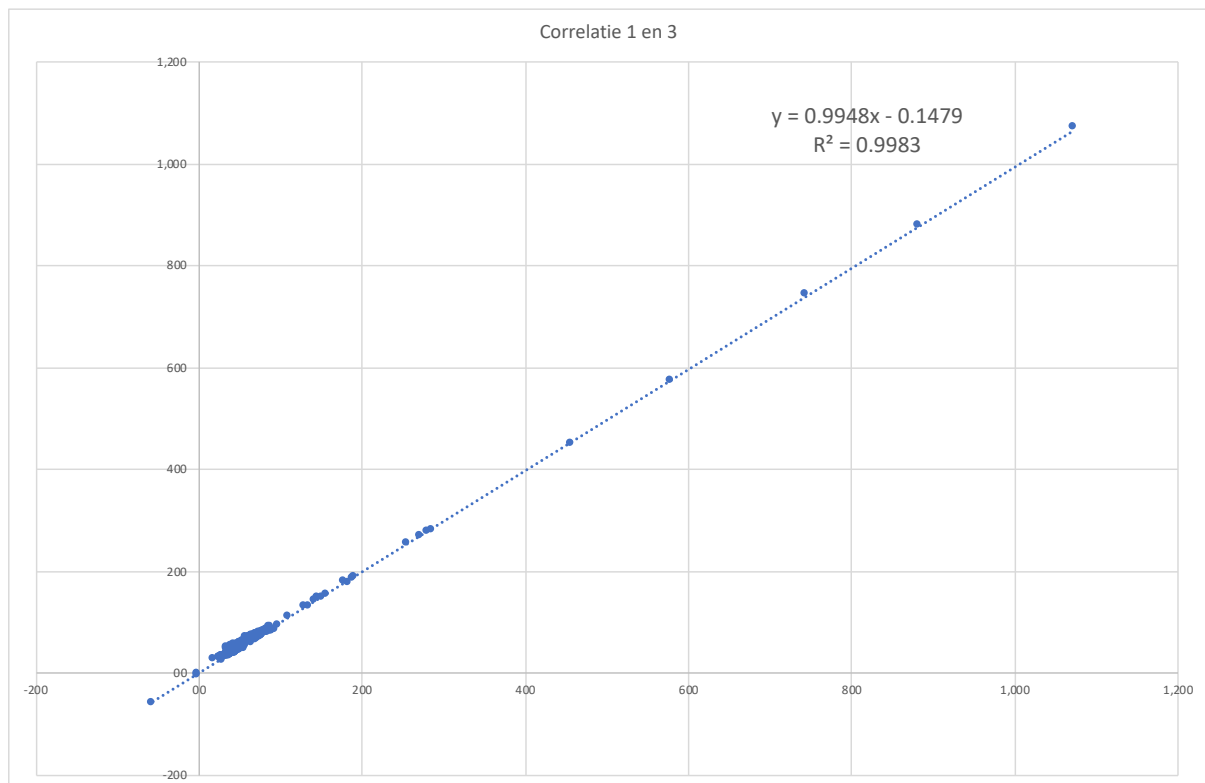


FIGUUR 89: GRAFIEK CORRELATIE ALGORITME 1 EN 3

Bron: eigen werk

9.1.2 OZON

Op bovenstaande grafiek kan afgelezen worden dat de correlatie bijna gelijk is aan 1, namelijk 0,9983. Dit wil zeggen dat er weinig verschil zit in het gebruik van algoritme 1 of 3 voor de ozon-sensor.

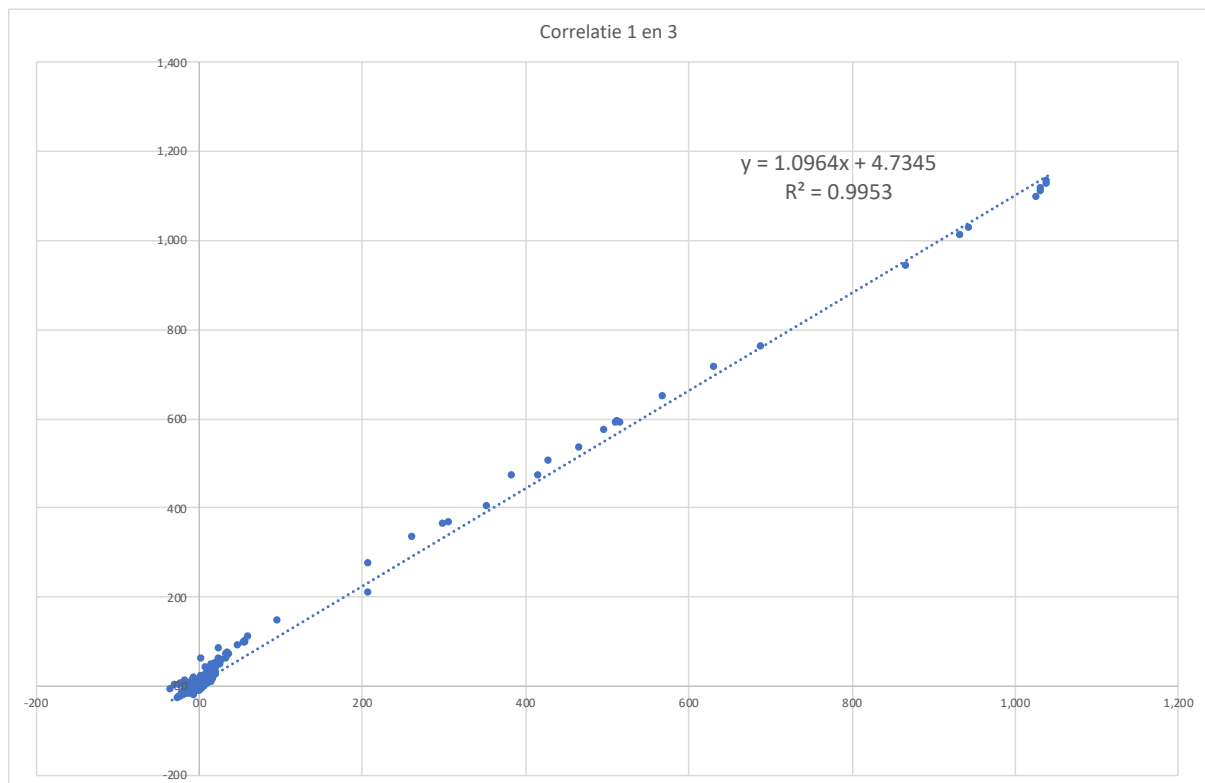


FIGUUR 90: GRAFIEK CORRELATIE ALGORITME 1 EN 3

Bron: eigen werk

9.1.3 ZWAVELDIOXIDE

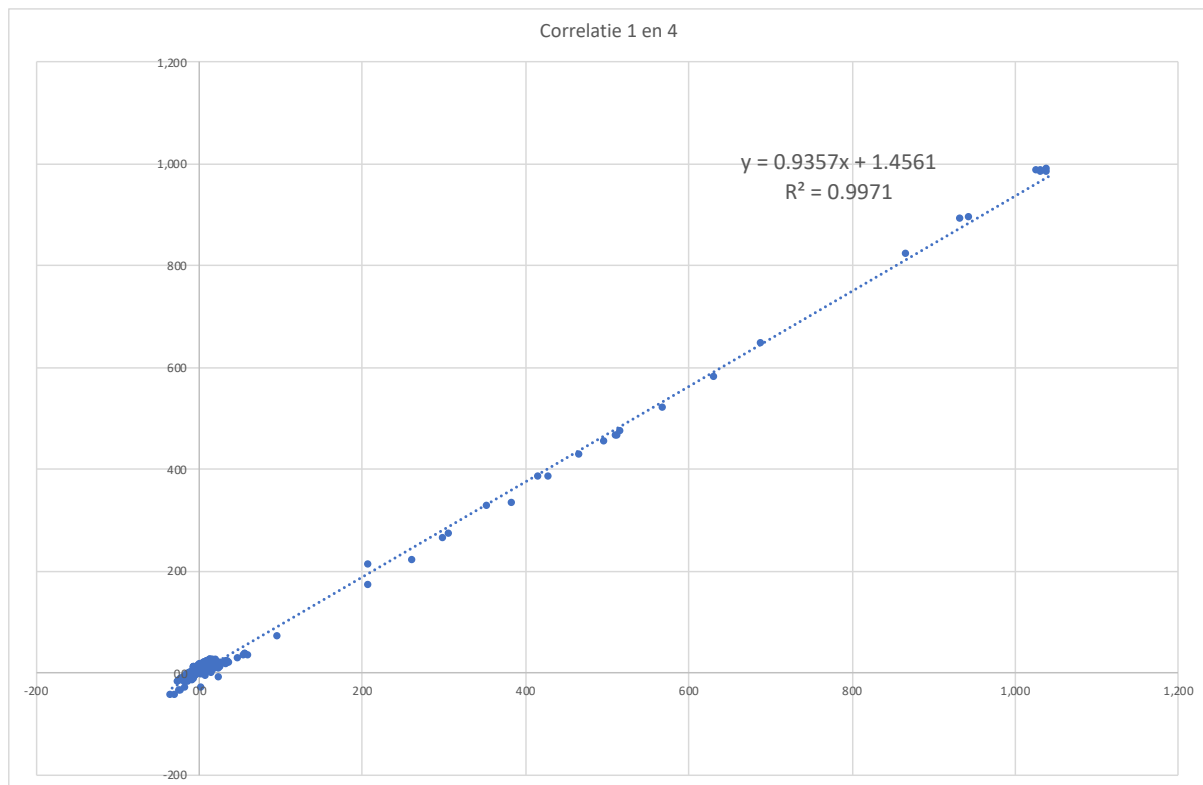
Op bovenstaande grafiek kan afgelezen worden dat de correlatie quasi gelijk is aan 1. Dit wil wederom zeggen dat de algoritmen 1 en 3 bij de zwaveldioxide-sensor amper verschillen van elkaar.



FIGUUR 91: GRAFIEK CORRELATIE ALGORITME 1 EN 3

Bron: eigen werk

Uit Figuur 92 kan afgelezen worden dat de correlatie ongeveer gelijk is aan 1. De verschillen tussen algoritme 4 en 1 zijn dus zeer klein. Daar de correlatie hoog is tussen 1 en 3 en 1 en 4 is deze bijgevolg ook hoog tussen 3 en 4.

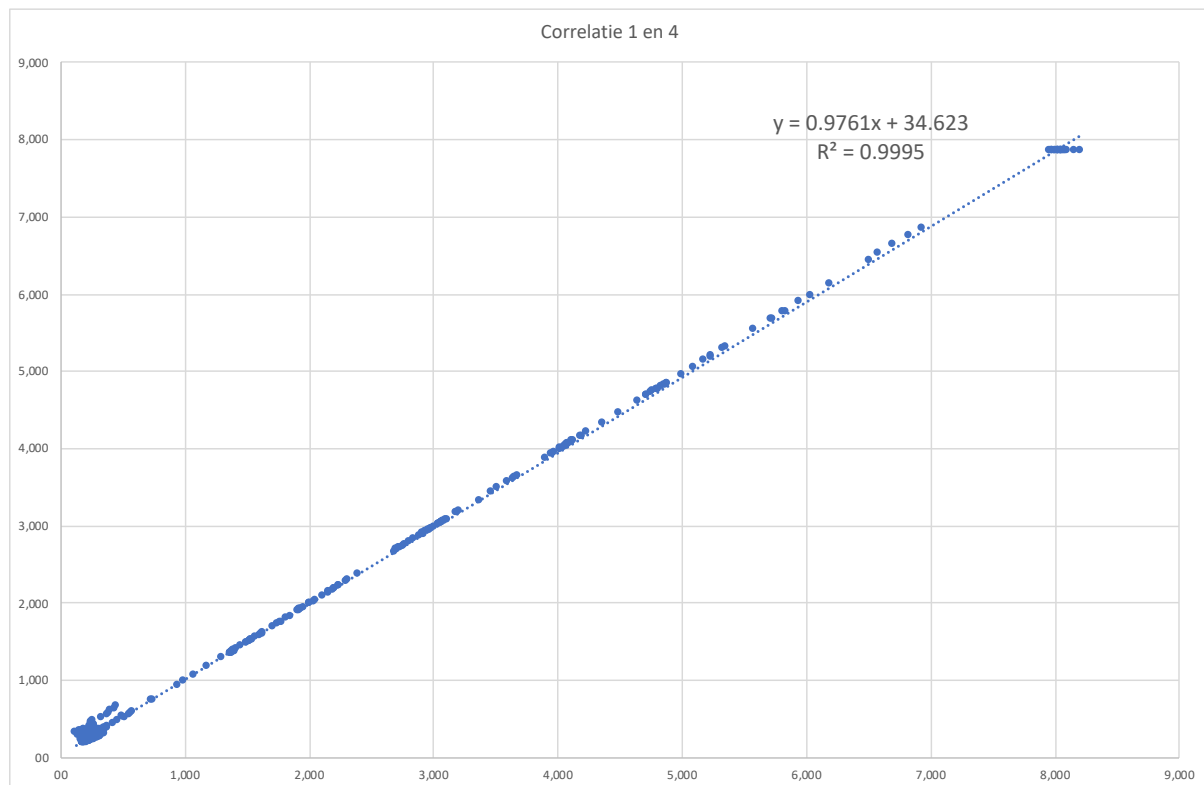


FIGUUR 92: GRAFIEK CORRELATIE ALGORITME 1 EN 4

Bron: eigen werk

9.1.4 KOOLSTOFMONOXIDE

Op figuur 93 kan afgelezen worden dat de correlatie hoog is. Deze toont aan dat de verschillen tussen beide algoritmen klein zijn en het dus weinig zal uitmaken welke gekozen wordt.



FIGUUR 93: GRAFIEK CORRELATIE ALGORITME 1 EN 4

Bron: eigen werk

9.2 IJKING

De opstelling werd meerdere malen in de buitenlucht geplaatst op dezelfde manier als bij de tweede kalibratie. Dit werd gedaan om te testen of de constanten die achteraan bij de kalibratie worden toegevoegd wel altijd dezelfde waarde zouden hebben. Uit dit experiment dat 3 keer werd uitgevoerd kwam als resultaat dat de bekomen waarden met dezelfde kalibratieformules steeds overeenstemden met de absolute waarden van het VMM en Windy. De kalibratieformules die bekomen zijn kennen een constant karakter en hoeven dus niet iedere keer opnieuw per meting uitgezocht worden.

10 BESLUIT

De Seacanairy is een gasmeettoestel dat gebouwd is om antwoorden te bieden op de onderzoeksvragen. De constructie bestaat in grote lijnen uit een metalen kast, sensoren, ADC, Raspberry Pi, en een gereguleerde voeding. De metalen kast is zorgvuldig gekozen aan de hand van een 3D tekening, zodat de opstelling hier perfect in past. De sensoren zijn analoog en van de producent Alphasense. De sensoren berusten op het elektrochemische meetprincipe om signalen door te sturen. De sensoren staan op een sensorbord dat hiervoor specifiek ontworpen is. Het sensorbord zorgt ervoor dat er zo weinig mogelijk ruis in het signaal van de sensoren zit. De analoge signalen worden doorgestuurd via elektrische kabels naar de ADC. Deze ADC zet de analoge signalen om naar digitale signalen. Deze digitale signalen worden doorgegeven naar de Raspberry Pi. De Pi is zo geprogrammeerd om met een bepaald tijdsinterval de waarden van de sensoren te meten en op te slaan. De gereguleerde voeding is voorzien om de spanningen in het elektrische netwerk van het schip te compenseren en het sensorbord via een continue spanning te voeden. De kalibratie van de Seacanairy gebeurt in drie stappen. In de eerste kalibratie worden de algemene parameters van de sensoren bepaald. In de tweede kalibratie worden de constanten bepaald die de permanente fout in de bekomen meetresultaten weg filtert. Bij de derde alsook finale kalibratie, worden de eerste en tweede samengevoegd in een kalibratieformule per sensor per algoritme. Deze formules zijn uniek voor deze opstelling en hoeven maar 1 keer bepaald worden. De meetresultaten van het experiment tonen dat de opstelling de verwachte trends weergeeft in de gasconcentraties en dat de absolute waarden eveneens kloppen. De betrouwbaarheid van de opstelling alsook de kalibratie wordt getest. De verschillende algoritmen worden met elkaar vergeleken en hieruit volgt dat de correlatie overal de 1 benadert. Dit betekent dat de algoritmen kloppen ten opzichte van elkaar.

De kalibratie werd in totaal 3 keer uitgevoerd en 3 keer opnieuw kwamen dezelfde formules uit. De kalibratie is dus constant en hoeft niet iedere keer opnieuw uitgevoerd te worden. De Seacanairy is een betrouwbaar toestel waarmee men 4 gassen met een belangrijke invloed op de menselijke gezondheid kan meten. De opstelling kan verbonden worden met het internet en de metingen kunnen vanop afstand gedownload worden vanaf een opslagplaats in de cloud. Dit maakt het toestel geschikt om aan boord te zetten en voor lange tijd ongeroerd daar te laten. De totale prijs van de constructie bedraagt 657 euro. Normaliter ging de Seacanairy aan boord gezet worden van een jack-up schip dat windmolens plaatst. Echter wegens de coronacrisis is deze meetcampagne niet kunnen doorgaan. Desondanks zal ik de opstelling toch nog aan boord zetten buiten de thesis uit grote eigen interesse gedurende de zomermaanden.

11 BIBLIOGRAFIE

- Alchemy Power. (z.d.). Pi-16ADC. Geraadpleegd 16 april 2020, van <http://alchemy-power.com/pi-16adc/>
- Alphasense. (2013). Products | Alphasense. Geraadpleegd van <http://www.alphasense.com/index.php/air/products/>
- Alphasense. (2018 november). SO2-A4 Sulfur Dioxide Sensor 4-elektrode. *Alphasense*. PDF, . Geraadpleegd 10 april 2019, van <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2018/12/SO2A4.pdf>
- Alphasense. (2019a juli). NO2-A43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode. *NO2-A43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode*. PDF, . Geraadpleegd 12 april 2020, a van <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2019/09/NO2-A43F.pdf>
- Alphasense. (2019b juli). OX-A431. PDF, . Geraadpleegd 16 april 2020, b van <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2019/09/OX-A431.pdf>
- Alphasense. (2019c juli). CO-A4. PDF, . Geraadpleegd 16 april 2020, c van <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2019/09/CO-A4.pdf>
- Alphasense. (2019d Oktober). Analogue Front End. Geraadpleegd 16 april 2020, d van <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2019/10/AFE.pdf>

Alphasense. (2019e juni). CORRECTING FOR BACKGROUND CURRENTS IN FOUR ELECTRODE TOXIC GAS SENSORS (AAN 803-05).

Alphasense. (z.d.). Calibration certificate sensor.

Antigifcentrum. (z.d.-a). Geraadpleegd 27 maart 2020, a van https://www.antigifcentrum.be/sites/default/files/styles/square_thumbnail/public/CO-molecule-chemische-structuur_118150546_2.jpg?itok=OBCnrCMC

Antigifcentrum. (z.d.-b). CO in detail. Geraadpleegd 27 maart 2020, b van <https://www.antigifcentrum.be/koolstofmonoxide/co-detail>

Chen, T.-M., Kuschner, W. G., Gokhale, J., & Shofer, S. (2007). Outdoor Air Pollution: Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide, and Carbon Monoxide Health Effects. *The American Journal of the Medical Sciences*, 333(4), 249–256. doi:10.1097/MAJ.0b013e31803b900f

Chou, J. (2000). *Hazardous gas monitors: A practical guide to selection, operation and applications*. New York: McGraw-Hill.

E4U. (2019a, 23 maart). What is a Regulated Power Supply? *What is a Regulated Power Supply?* Geraadpleegd 2 april 2020, a van <https://www.electrical4u.com/regulated-power-supply/>

E4U. (2019b, 23 maart). Regulated Power Supply: Circuit Diagram & Types. *Regulated Power Supply: Circuit Diagram & Types*. Geraadpleegd 2 april 2020, b van <https://www.electrical4u.com/regulated-power-supply/>

E4U. (2020, 23 maart). Step Down Transformer: Construction & Working Principle. *Step Down Transformer: Construction & Working Principle*.

Geraadpleegd 2 april 2020, van <https://www.electrical4u.com/step-down-transformers/>

Geerts, T. (2018). *Elektronica theorie elektronica*.

Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362–367. doi:10.1016/j.envpol.2007.06.012

KEB Taiwan. (2017, 17 maart). Thermistor pt1000. Geraadpleegd 16 april 2020, van <http://www.keb.com.tw/Files/Other/PDF/Data%20Sheet-PT1000-RW.pdf>

Koken, P. J. M., Piver, W. T., Ye, F., Elixhauser, A., Olsen, L. M., & Portier, C. J. (2003). Temperature, air pollution, and hospitalization for cardiovascular diseases among elderly people in Denver. *Environmental Health Perspectives*, 111(10), 1312–1317. doi:10.1289/ehp.5957

Liu, T.-K., Sheu, H.-Y., & Tsai, J.-Y. (2014). Sulfur Dioxide Emission Estimates from Merchant Vessels in a Port Area and Related Control Strategies. *Aerosol and Air Quality Research*, 14(1), 413–421. doi:10.4209/aaqr.2013.02.0061

Madhusa. (z.d.). Geraadpleegd 26 maart 2020, van <https://pediaa.com/difference-between-sulfur-and-sulfur-dioxide/>

Mathiesen, E. (2012, 10 september). Methods for Reducing Frequency and Voltage Variations on DP Vessels. *Methods for Reducing Frequency and Voltage Variations on DP Vessels*. Geraadpleegd 2 april 2020, van

https://www.researchgate.net/publication/230898790_Methods_for_Reducing_Frequency_and_Voltage_Variations_on_DP_Vessels

Northern Vermont University. (z.d.). Formation of Haze, Fog, and Clouds: Condensation Nuclei. *Atmospheric sciences*. Northern Vermont University, . Geraadpleegd 26 maart 2020, van <http://apollo.lsc.vsc.edu/classes/met130/notes/chapter5/ccn.html>

Pihut. (2018, 5 december). How to lock your Raspberry Pi Screen. Geraadpleegd 23 april 2020, van <https://thepihut.com/blogs/raspberry-pi-tutorials/how-to-lock-your-raspberry-pi-screen>

Potters, G. (2018). *Chemie voor bachelors nautische wetenschappen*. Hogere Zeevaartschool.

Quantum Universe. (2019, 20 mei). De kooi van Farraday. *De kooi van Farraday*. Geraadpleegd 1 april 2020, van <https://www.quantumuniverse.nl/de-kooi-van-faraday>

Raspberry. (z.d.). GPIO diagram. Geraadpleegd 15 april 2020, van <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>

Schneider electronics. (2020). Geraadpleegd 1 april 2020, van <https://www.se.com/be/nl/product/NSYS3D4315P/spacial-s3d-volle-deur-met-montageplaat.-h400xb300xd150-ip66-ik10-ral7035./?range=2536-spacial-s3d>

Sipila, M., Berndt, T., Petaja, T., Brus, D., Vanhanen, J., Stratmann, F., Patokoski, J., e.a. (2010). The Role of Sulfuric Acid in Atmospheric

- Nucleation. *Science*, 327(5970), 1243–1246.
doi:10.1126/science.1180315
- Smith, S. J., van Aardenne, J., Klimont, Z., Andres, R. J., Volke, A., & Delgado Arias, S. (2011). Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(3), 1101–1116.
doi:10.5194/acp-11-1101-2011
- Sossolutions. (2020, 28 maart). Geraadpleegd van
<https://www.sossolutions.nl/raspberry-pi-3-model-b-plus>
- Tagaris, E., Stergiou, I., & Sotiropoulou, R. P. (2017). Impact of shipping emissions on ozone levels over Europe: Assessing the relative importance of the Standard Nomenclature for Air Pollution (SNAP) categories. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(17), 14903–14909. doi:10.1007/s11356-017-9046-x
- Threshold Limit Values (TLV) and Immediately Dangerous to Life and Health (IDLH) values. (2019, 6 mei). *Matheson Tri-Gas*. Geraadpleegd 26 maart 2020, van
[https://www.mathesongas.com/pdfs/products/threshold-limit-values-\(tlv\).pdf](https://www.mathesongas.com/pdfs/products/threshold-limit-values-(tlv).pdf)
- US EPA, O. (2015, 5 juni). Health Effects of Ozone Pollution. *US EPA*. Overviews and Factsheets, . Geraadpleegd 9 mei 2019, van
<https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>
- VMM. (2020, 26 maart). Koolstofmonoxide. Geraadpleegd van
<https://www.vmm.be/lucht/koolstofmonoxide>

- VMM. (z.d.-a). Luchtkwaliteit. Geraadpleegd 27 maart 2020, a van <https://www.vmm.be/lucht>
- VMM. (z.d.-c). Streef- en advieswaarden ozon. Geraadpleegd 26 maart 2020, c van <https://www.vmm.be/lucht/ozon/streef-en-advieswaarden-ozon>
- VMM. (z.d.-d). Grens en advieswaarden zwaveldioxide. Geraadpleegd 26 maart 2020, d van <https://www.vmm.be/lucht/zwaveldioxide/grens-en-advieswaarden-zwaveldioxide>
- Waveshare. (2019, 31 juli). 7inch HDMI LCD (C). Geraadpleegd 1 april 2020, van [https://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_\(C\)](https://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_(C))
- Wikipedia. (z.d.). Ozon. Geraadpleegd van [https://nl.wikipedia.org/wiki/Ozon_\(stof\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Ozon_(stof))
- Windy. (z.d.). Windy. *Windy*. Geraadpleegd 13 april 2020, van <https://www.windy.com/-CO-concentration-cosc?cosc,50.875,4.850,8,i:pressure,m:e32aghe>
- Zhang, R., Lei, W., Tie, X., & Hess, P. (2004). Industrial emissions cause extreme urban ozone diurnal variability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(17), 6346–6350. doi:10.1073/pnas.0401484101

LIJST VAN BIJLAGEN

A	Kalibratiedocument van Alphasense	159
B	Kalibratiebestand SEACANAIRY	

BIJLAGE A

Alphasense Application Note

AAN 803-05

CORRECTING FOR BACKGROUND CURRENTS IN FOUR ELECTRODE TOXIC GAS SENSORS

Introduction

This application note provides some guidance on the correction of the zero background current within the temperature range from -30°C to +50°C using only the ambient sensor temperature and knowledge of the reference ambient calibration temperature.

Correction of the zero background is complex and the results obtained from these simple algorithms should be considered as the first step in a process to correlate sensor results to the gas concentration measured by a reference analyser. Secondary corrections are usually required to further correct for any residual offsets and gain changes to obtain an acceptably accurate gas concentration. This application note describes only the primary correction to the zero background current for the effects of temperature. Further residual corrections are only discussed below.

Electrochemical amperometric gas sensors generate a background current in addition to the current from oxidation or reduction of the sampled gas. This background current is commonly called the **zero background current**. Zero background currents can be significant and can frustrate attempts to make measurements at low gas concentrations. Sources of these zero currents can include anodic or cathodic reactions on the working electrode (**WE**), electrochemical oxidation or reduction of the sensor electrolyte or electrolyte contaminants, and reduction of oxygen in the sampled air. The auxiliary electrode (**AE**) will also generate a current which mostly tracks the WE current.

If you have purchased the Alphasense Individual Sensor Boards (ISB) or Analogue Front End (AFE) boards, the calibrated offsets and sensor outputs will be expressed in voltage (mV) rather than current (nA). You will also have been provided with values for the electronic offsets for the WE (mV) and AE (mV) channels, and the Total Zero Offsets (mV) as a sum of the electronic offsets and the sensor offsets as determined in zero air at a temperature of 20 - 25 °C. These values will be required when calculating the corrected WE output.

Term definitions

WE_u = uncorrected raw WE output
 AE_u = uncorrected raw AE output
 WE_c = corrected WE output
 WE_e = WE electronic offset on the AFE or ISB
 AE_e = AE electronic offset on the AFE or ISB
 WE_o = WE sensor zero, i.e. the sensor WE output in zero air
 AE_o = AE sensor zero, i.e. the sensor AE output in zero air
 WE_T = Total WE zero offset
 AE_T = Total AE zero offset

n_T = temperature dependent correction factor for algorithm 1, refer to Table 3 for values
 k_T = temperature dependent correction factor for algorithm 2, refer to Table 3 for values
 k'_T = temperature dependent correction factor for algorithm 3, refer to Table 3 for values
 k''_T = temperature dependent correction factor for algorithm 4, refer to Table 3 for values

Initial calibration

- 1 If the sensors have been purchased on Alphasense AFE (Analog Front End) or ISB (Individual Sensor Board) electronics, then the following parameters will have been provided :

WE electronic offset, WE_e (mV)

AE electronic offset, AE_e (mV)

Total WE zero offset, WE_T , (mV)

Total AE zero offset, AE_T , (mV)

WE sensor zero (WE_o)

AE sensor zero (AE_o)

WE sensitivity in units of nA/ppb and mV/ppb. The latter will allow you to directly convert the mV output into ppb of gas.

Program your software with the supplied values. Remember to subtract the electronic offsets WE_e and AE_e from the raw WE_u and AE_u readings before correcting.

If you are using your own electronics, then first measure the open circuit voltage to determine your own board's WE and AE electronic offsets. By default, Alphasense sets the electronic offsets on the AFE boards and ISBs to within the range 200 to 300 mV so that any zero sensor currents, either positive or negative about zero current can be measured as positive voltages.

Fit the sensor(s) to your board, apply power and allow several hours for the sensor to stabilise in ambient, clean air. Measure the outputs from the WE and AE channels, this will be your 'Total WE zero offset (WE_T)' and 'Total AE zero offset (AE_T)'. Note that the sensor will respond to any gases and VOCs in your ambient air. Alphasense calibrates zero current using filtered, scrubbed and dehumidified air.

- 2 Create a look-up table or other method in your software for determining the correction factor for your sensor at the measured sensor temperature (see table 3 for the complete list of temperature compensation factors). Correction factors are typically linearly interpolated between the temperatures listed in the Table.
- 3 Ensure that the temperature recorded as the sensor temperature is the temperature at the top of the sensor to within $\pm 1^\circ\text{C}$ to ensure using the correct temperature compensation factor.

Initial temperature corrections and calculating the gas concentration

- 1 Measure the WE and AE current (or voltage from your ISB or AFE) in your application.
- 2 If using Alphasense AFE boards or ISBs, subtract the working electrode and auxiliary electrode electronic offsets (WE_e and AE_e) from both the uncorrected WE and AE total outputs (WE_u and AE_u). On your own boards, determine the sensor output by subtracting any offsets to obtain the actual sensor output.
- 3 Determine the temperature of operation, and from this temperature select the appropriate correction factor of n_T , k_T , k'_T or k''_T depending on which algorithm is to be used (**Table 1**).
- 4 Table 1 illustrates how each equation uses a different approach for how the sensor parameters are combined. Table 2 is offered as a suggestion of which equation to use for a sensor type, but you are encouraged to explore the other equations in Table 1. Each model has their own limitations and you may find your own optimum choice to better suit the conditions in which the sensor is used.
- 5 Divide the final corrected WE result (WE_c) by the sensor's sensitivity to calculate the gas concentration. If desired, developers may wish to add a further refinement to the final gas concentration value by dividing the corrected WE output (WE_c) by a temperature corrected

sensitivity instead of only the single ambient sensor sensitivity value provided. Each sensor type usually has a plot in its technical datasheet illustrating how the sensor sensitivity varies with temperature. Thus a complete temperature profile for the sensor type can be produced that corrects for background current changes (above) and sensitivity (or gain) changes due to temperature changes.

Compensation on the OX-A431 or OX-B431 sensor

This is a special case for this sensor since it responds to both O₃ and NO₂ gases but with different sensitivities. In the environment the two gases are usually present at the same time where air quality measurements are being made. If you received your OX sensor on an AFE or ISB then you will have been given a calibration certificate that provides the sensitivity for NO₂ and O₃ on the sensor. To determine the O₃ concentration on the OX sensor you will require the NO₂ concentration determined from an NO₂ sensor (NO₂-A43F or NO₂-B43F). Use this value to calculate the output from the OX sensor by multiplying the NO₂ concentration by the NO₂ sensitivity of the OX sensor. The resulting mV value is equivalent to the WE_c result from any one of the algorithms, call this $WE_c(NO_2)$. Then take the total raw mV output from the OX sensor on an AFE or ISB and subtract WE_o and $WE_c(NO_2)$, treat the result as the equivalent of $(WE_u - WE_o)$ in the compensation algorithms. Treat AE_o (and WE_o and AE_o) as usual for the OX sensor in the algorithms and follow through the calculations to obtain $WE_c(O_3)$. Divide this value by the O₃ sensitivity to give the O₃ concentration.

Further residual corrections

After applying your chosen algorithm, you may find the results do not meet your expectations for accuracy when compared to reference values. You may find the gas concentrations are negative compared to reference values or appear to be much smaller or larger than the reference values but in general the sensor output is following the reference gas concentration. Respectively these are offset errors (which can also be in the positive direction) and gain errors.

Several factors may be skewing your results:

- thermal transients can temporarily destabilise the sensor signal
- humidity changes and humidity transients (usually due to temperature transients) can also destabilise temporarily the sensor signal, and
- diurnal and seasonal temperature/humidity patterns can shift calibration
- the difference between real environments where, amongst other things, humidity is present to varying levels compared to the lab testing environment where the correction factors were determined at controlled temperatures, dry gases, and no cross-sensitive gases.

These real but uncontrolled variations will affect the initial lab calibration. Although the sensors will adapt to the new environment the zero currents (WE_o and AE_o) will be different and sensitivity will change to a lesser degree. Cross-sensitivity to other gases and VOCs may also change to a lesser extent and contribute to the change of the WE_o zero current.

These residual errors can be corrected by empirically determining and applying a correction factor to the sensor sensitivity and applying a correction to minimise the offset error such that the sensor gas reading matches as closely as possible a set of reference gas values over a period of time, e.g. one week, although longer will provide more confidence in the corrections.

It should be noted that compensating the outputs of sensors for the effects of environmental effects, i.e. temperature, humidity, is complex.

These algorithms are provided as suggestions for attempting to correct for temperature changes only and should not be regarded as a complete solution for providing gas concentration results that meet an accuracy acceptable for your application.

For the calibration of a low cost air quality network, one suggested strategy would be to initially cluster your sensor nodes together around a reference station. Preferably they should be within about 1 m of the station to ensure as best as possible, the same gas sample is within this shared environmental volume. What follows will then be a process of sensor calibrations to your environment of your sensors as described above. Published papers, for example references 1,2,3, explain in much more detail air quality network deployment and the challenges on obtaining accurate results.

Alphasense follows a continual process improvement process and as such is working to refine the process of compensating sensor readings for the effects of the environment for our customers. Please contact us to follow our progress.

References

1. Mead et al., Atmos. Environ. 70 (2013) 186-203; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
2. Popoola et al., Atmos. Environ. 147 (2016) 330-343; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.024>
3. Cross et al., Atmos. Meas. Tech., 10, 3575–3588, 2017; <https://doi.org/10.5194/amt-10-3575-2017>

Table 1 : Algorithms to correct the WE output for the effects of temperature

Algorithm	Equation	Notes
1	$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T * (AE_u - AE_e)$	Subtraction of the electronic offsets from the raw WE_u and AE_u outputs then scales the net AE output with the n_T factor. Gross under or over compensation can occur if $(AE_u - AE_e)$ is of opposite sign to n_T , or if $(AE_u - AE_e)$ is significantly smaller or larger than $(WE_u - WE_e)$. Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative, or much higher compared to a reference value.
2	$WE_c = (WE_u - WE_e) - k_T * \left(\frac{WE_o}{AE_o} \right) * (AE_u - AE_e)$	A refinement of Algorithm 1 where the AE scaling factor n_T is replaced with $k_T * (WE_o/AE_o)$. An error or gross over compensation will result if AE_o is very small compared to WE_o or is zero. If WE_o and AE_o are of opposite signs then over compensation can also occur. Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.
3	$WE_c = (WE_u - WE_e) - (WE_o - AE_o) - k'_T * (AE_u - AE_e)$	Avoids the problem of Algorithm 2 with a zero AE_o value. Gross over or under compensation can result if AE_o is of opposite sign to WE_o , or if AE_o is significantly smaller or larger than WE_o . Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.
4	$WE_c = (WE_u - WE_e) - WE_o - k''_T$	Correction without using the outputs from the auxiliary electrode. Gross over or under compensation can occur if WE_o or k''_T are significantly smaller or larger than WE_u . Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.

Table 2 : Suggested algorithms for both A and B type sensors

Sensor	Suggested algorithm		Alternative algorithm	
	A	B	A	B
CO	1	1	4	2
H ₂ S	2	1	1	2
NO	3	2	4	3
NO ₂	1	1	3	3
OX	3	1	1	3
SO ₂	4	4	1 or 3	1 or 2

Table 3: Zero background current temperature compensation factors

Sensor	Algorithm	Factor	T / °C								
			-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
CO-A4	1	n_T	1	1	1	1	-0.2	-0.9	-1.5	-1.5	-1.5
	2	k_T	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	0.2	1	1.7	1.7	1.7
	3	k'_T	1.9	2.9	2.7	3.9	2.1	1	-0.6	-0.3	-0.5
	4	k''_T	13	12	16	11	4	0	-15	-18	-36
CO-B4	1	n_T	0.7	0.7	0.7	0.7	1	3	3.5	4	4.5
	2	k_T	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	1	1.2	1.3	1.5
	3	k'_T	-1	-0.5	0	0	0	1	1	1	1
	4	k''_T	55	55	55	50	31	0	-50	-150	-250
H ₂ S-A4	1	n_T	3	3	3	1	-1	-2	-1.5	-1	-0.5
	2	k_T	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	0.5	1	0.8	0.5	0.3
	3	k'_T	9	9	9	9	3	1	0.3	0.3	0.3
	4	k''_T	50	46	43	37	25	0	-8	-16	-20
H ₂ S-B4	1	n_T	-0.6	-0.6	0.1	0.8	-0.7	-2.5	-2.5	-2.2	-1.8
	2	k_T	0.2	0.2	0	-0.3	0.3	1	1	0.9	0.7
	3	k'_T	-14	-14	3	3	2	1	-1.2	-1.2	-1.2
	4	k''_T	52	51	48	45	26	0	-65	-125	-180
NO-A4	1	n_T	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7
	2	k_T	1.1	1.1	1.1	1	1	1	1	1.1	1.1
	3	k'_T	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	1	1.2	1.4	1.6
	4	k''_T	-25	-25	-25	-25	-16	0	56	200	615
NO-B4	1	n_T	2.9	2.9	2.2	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
	2	k_T	1.8	1.8	1.4	1.1	1.1	1	0.9	0.9	0.8
	3	k'_T	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
	4	k''_T	-25	-25	-25	-25	-16	0	56	200	615

Table 3 continued

Sensor	Algorithm	Factor	T / °C								
			-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
NO2-A43F	1	n_T	0.8	0.8	1	1.2	1.6	1.8	1.9	2.5	3.6
	2	k_T	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1.1	1.4	2
	3	k'_T	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7	1	1.3	2.1	3.5
	4	k''_T	-4	-4	-4	-4	-2	0	10	35	132
NO2-B43F	1	n_T	1.3	1.3	1.3	1.3	1	0.6	0.4	0.2	-1.5
	2	k_T	2.2	2.2	2.2	2.2	1.7	1	0.7	0.3	-2.5
	3	k'_T	1	1	1	1	1	1	0.4	-0.1	-4
	4	k''_T	7	7	7	7	4	0	0.5	5	67
OX-A431	1	n_T	1	1.2	1.2	1.6	1.7	2	2.1	3.4	4.6
	2	k_T	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	1	1.1	1.7	2.3
	3	k'_T	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	1	1.7	3	4
	4	k''_T	-5	-5	-4	-3	0.5	0	9	42	134
OX-B431	1	n_T	0.9	0.9	1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.7
	2	k_T	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1.2	1.5	2.2
	3	k'_T	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	1	2.8	5	5.3
	4	k''_T	1	1	1	1	1	1	8.5	23	103
SO2-A4	1	n_T	1.3	1.3	1.3	1.2	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4
	2	k_T	3.3	3.3	3.3	3	2.3	1	1	1	1
	3	k'_T	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1
	4	k''_T	0	0	0	0	0	0	5	25	45
SO2-B4	1	n_T	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	3	5.8
	2	k_T	1	1	1	1	1	1	1.2	1.9	3.6
	3	k'_T	1	1	1	1	1	1	2	3.5	7
	4	k''_T	-4	-4	-4	-4	-4	0	20	140	450