

# **Onderzoeksraamwerk**

## Implementaties van koolstofmonoxide sensoren in een dynamisch sensornetwerk

R. BOLDING

*Amsterdam University of Applied Sciences*

*HvA*

*Sensor Netwerken: groep 5*

*Studentnummer: 500757732*

*20 September, 2019*

## Inhoudsopgave

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Koolstofmonoxide</b>	<b>3</b>
2.1	Ontstaan van CO . . . . .	3
2.2	Effecten op gezondheid . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Algemene koolstofmonoxide concentraties</b>	<b>4</b>
3.1	Koolstofmonoxide concentraties in de HvA Leeuwenburg .	4
<b>4</b>	<b>Luchtkwaliteit meten</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Specificaties</b>	<b>5</b>
<b>6</b>	<b>Sensor technieken</b>	<b>6</b>
6.1	Elektrochemische sensoren . . . . .	6
6.2	Metaaloxide sensoren . . . . .	7
6.3	Sensor keuze . . . . .	8
<b>7</b>	<b>Ontwerpkeuzes</b>	<b>8</b>
7.1	Globaal overzicht van de sensormodule . . . . .	8
<b>A</b>	<b>Appendix A: NOx onderzoek</b>	<b>9</b>
A.1	Effecten van NOx . . . . .	9
A.1.1	Normen . . . . .	9
A.1.2	Sensoren . . . . .	10
A.1.3	Conclusie . . . . .	10

# 1 Inleiding

In dit verslag wordt de implementatie van een koolstofmonoxide sensor in een dynamisch sensornetwerk besproken voor het project: "Sensornetwerken". Het doel van dit project is om een low-power sensormodule te ontwikkelen die een grootheid met relatie tot de luchtkwaliteit meet en deze meetdata vervolgens deelt in een dynamisch draadloos sensornetwerk. De gekozen grootheid bedraagt in dit geval koolstofmonoxide (Hierna naar gerefereerd onder de scheikundige afkorting CO). In eerste instantie was er gekozen voor stikstofdioxide, de onderbouwing om van keuze te veranderen staat beschreven in appendix A. Allereerst zal er besproken worden wat voor grootheid CO is en waarom het meten hiervan nuttig is. Voor dit onderzoek wordt er gekeken naar de gebruikelijke concentraties, grenswaarden uitschieters van CO concentraties in professionele werkomgevingen (zoals kantoorpanden). Op basis van die informatie zullen de specificaties van de sensormodule worden opgesteld, die op hun beurt weer de basis vormen voor de gemaakte keuzen bij het ontwerp van de sensor. Verder wordt er ook nog een globale uitleg gegeven over de werking van het netwerk.

## 2 Koolstofmonoxide

Koolstofmonoxide (CO) is een verbinding tussen koolstof en zuurstof. Het is een kleur- en geurloos gas. CO komt vrij bij een onvolledige verbranding. Dit kan erg gevaarlijk zijn voor de gezondheid omdat het gas je ongemerkt vergiftigt. Het word dan ook wel eens een "sluipmoordenaar" genoemd [1].

### 2.1 Ontstaan van CO

Bij de verbranding van koolstofverbindingen ontstaat er normaal CO<sub>2</sub>. Als de verbranding onvolledig is, door bijvoorbeeld een tekort aan zuurstof, ontstaat er CO [1]. Een veel voorkomende oorzaak van CO productie zijn niet goed afgestelde of niet goed onderhouden gas kachels en cv-ketels [2].

### 2.2 Effecten op gezondheid

CO is gevaarlijk voor de mens omdat het geur en kleurloos is en bij inademing van CO word de zuurstofopname verstoord. In plaats van zuurstof, bind de CO zich aan de rode bloedcellen. Omdat CO zich sterker hecht aan de rode bloedcellen dan zuurstof, word er minder zuurstof door het lichaam vervoerd.

De effecten van blootstelling aan CO zijn het gevolg van een zuurstoftekort

in het bloed. Hoe meer CO er wordt opgenomen hoe minder zuurstof er kan worden opgenomen [1].

### **3 Algemene koolstofmonoxide concentraties**

Het RIVM heeft tussen april 2007 tot en met januari 2008 metingen gedaan in 1028 huishoudens. In 169 van de 1028 huishoudens werden er concentraties boven het detectie limiet van 1 *parts per million* (hierna naar gerefereerd als *ppm*) gevonden. In 8 huishoudens werden er waarden van tussen de 25 en 75 *ppm*, dit waren de meest extreme waarden. In 10 andere huishoudens werden er waarden aangetroffen van tussen de 10 en 25 *ppm* en in de rest van de huishoudens (verreweg de meesten) werden er waarden aangetroffen tussen de 1 en 9 *ppm* [2]. Over een werkdag van 8 uur wordt een tijdgewogen gemiddelde concentratie van 25 *ppm* als grenswaarde aangenomen, over 15 minuten is dit 150 *ppm*. De advies waarden van de Wereldgezondheidsorganisatie (Engels: World Health Organization, WHO) zijn 10 *ppm* als tijdgewogen gemiddelde over 8 uur en 25 *ppm* over 1 uur [3].

#### **3.1 Koolstofmonoxide concentraties in de HvA Leeuwenburg**

Om meer te weten te komen over de huidige manieren van meten van de koolstofmonoxide concentraties in het gebouw van de HvA faculteit techniek, is er contact gezocht met het gebouwbeheer. Uit een klein gesprek is gebleken dat er momenteel alleen in de garage CO meters hangen, die wanneer er een bepaalde grenswaarde wordt overschreden (momenteel nog onbekend voor ons welke grenswaarde dat is) alarm slaan waarna vervolgens iedereen de garage moet verlaten.

### **4 Luchtkwaliteit meten**

Zoals eerder werd besproken worden de te ontwikkelen sensor modules gebruikt om de luchtkwaliteit te meten. Hierbij wordt dus niet alleen bedoeld om een detector te maken die afgaat na het overschrijden van een bepaalde waarde, maar is het een doel om ook te kunnen meten wanneer je welke concentratie CO in de lucht hebt zitten en hoe ver deze concentratie ligt van de grenswaarden.

Om de gevoeligheid en detectielimiet van de sensor te bepalen, wordt er gekeken naar de laagste grenswaarde. In dit geval gaat het over de grenswaarden die gelden voor de blootstelling aan CO over een hele

werkdag (8 uur). De minimale grenswaarde komt voort uit de Wereldgezondheidsorganisatie (Engels: World Health Organization, WHO) en bedraagt deze 10 *ppm* als tijdgewogen gemiddelde over de hele werkdag. Om de grenswaarden goed te kunnen detecteren is er in groep 5 besloten dat een gevoeligheid van maximaal 20% van de laagte grenswaarde, in dit geval dus een gevoeligheid van 2 *ppm* of lager wenselijk is. Het detectie limit van de sensor bedraagt ook 2 *ppm* [3].

Aangezien CO een gas is, wordt er rekening gehouden met de optie dat de keuze uiteindelijk valt op het ontwikkelen van een elektro-chemische sensor. Dit type sensoren hebben vaak een bepaalde responstijd, deze mag niet groter zijn dan de sampletijd. Ook hier wordt er weer gekeken naar de minimale grenswaarde. De grenswaarden worden altijd gepresenteerd als een gemiddelde concentratie over tijd (een tijdgewogen gemiddelde), ook wel de duur van blootstelling aan een bepaalde concentratie CO. Binnen deze minimale blootstellingsduur moeten er minimaal 5 metingen zijn gedaan om een goed tijdgewogen gemiddelde te bepalen. De minimale blootstellingsduur die wordt omschreven door het RIVM bedraagt 15 minuten (voor een concentratie van 90 *ppm*), wat dus een sampletijd van 3 minuten bedraagt. Dit betekent dat de responstijd van de sensor maximaal 3 minuten mag zijn [3].

Bij het ontwikkelen van deze sensor modules wordt er gewerkt met het HvA-Xmega-Board. Deze heeft een spanningsregulator die een stabiele spanning van 3,3 V afgeeft [7], Daarom is het wenselijk als de sensor module een voedspanning heeft van zo'n 2,7 V tot 3,3 V.

## 5 Specificaties

In dit hoofdstuk wordt er een overzicht geboden van de specificaties waar de sensormodule aan moet voldoen. De specificaties zijn opgesteld volgens de redeneringen die in hoofdstuk 4 zijn gedaan.

Specificaties voor de implementaties van CO sensoren	
Meetbereik a:	0 - 200 <i>ppm</i>
detectie limiet:	<2 <i>ppm</i>
detectie resolutie:	2 <i>ppm</i>
responstijd:	< 3 minuut
Voed spanning:	min: 2,7V max: 3,3V
Maximaal vermogen:	1 mW
Output gevoeligheid:	1mV/ <i>ppm</i>

## 6 Sensor technieken

Er zijn verschillende technieken beschikbaar om CO te kunnen meten. In dit hoofdstuk worden de meest gebruikte technieken uitgelicht, wat in combinatie met de specificaties uit hoofdstuk 5 de basis van de onderbouwing gaat vormen voor de keuze voor een van deze technieken.

### 6.1 Elektrochemische sensoren

Bij het meten van gassen wordt er vaak gebruik gemaakt van elektrochemische sensoren. elektrochemische sensoren detecteren gassen door een chemische reactie te veroorzaken tussen het gas en de zuurstof in de sensor. Deze reactie produceert een kleine stroom, die evenredig is met de concentratie van het aanwezige gas, in dit geval dus CO. Vaak hebben elektrochemische sensoren 2 elektroden die, wanneer ze gecombineerd worden, het detectieproces starten [8]. Zoals in figuur 1 te zien is zit er een onderscheid

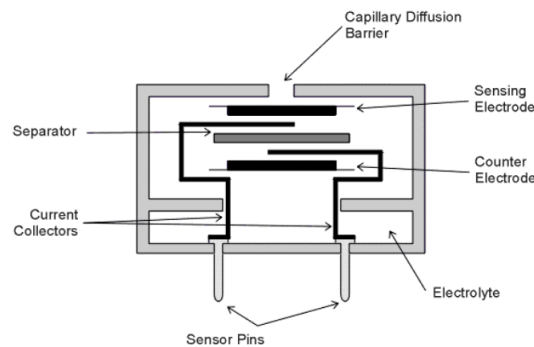


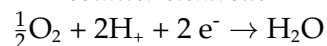
Fig 1. Overzicht van een elektrochemische sensor [8]

tussen beide elektroden. Bij de *sensing elektrode* reageert het doelgas (CO) met water. deze reactie veroorzaakt koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), waterstof ionen (H<sub>+</sub>) en 2 elektronen bij de *counter elektrode*. Bij de *counter elektrode* reageert zuurstof(O<sub>2</sub>) met de waterstof ionen en de elektronen (e<sup>-</sup>) tot water [8].

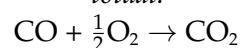
*sensing elektrode:*



*counter elektrode:*



*totaal:*



Voor maximale efficiëntie van de sensor is het wenselijk dat er geen spanningsverschil zit tussen bij elektroden. Wanneer er gereageerd wordt met het gas (CO) ontstaat er een spanning bij de *sensing elektrode*. Door een *referentie elektrode* te verbinden met de *sensing elektrode* wordt de spanningsverandering voorkomen [8].

Verder moet er bij elektrochemische sensoren altijd rekening worden gehouden met kruisgevoeligheid voor andere gassen. Over het algemeen staat hier in de datasheets van de sensoren zelf meer informatie over dit onderwerp. Verder is het belangrijk om de effecten van temperatuurverandering zo veel mogelijk te minimaliseren, hiervoor moet de temperatuur bij de sensor bekend zijn. Om de elektrochemische sensor te optimaliseren is er een *referentie elektrode* en een thermometer nodig [8].

## 6.2 Metaaloxide sensoren

Een andere techniek om gassen te detecteren zijn sensoren gebaseerd op metaaloxide halfgeleiders (metaaloxide sensoren). Bij temperaturen tussen de 150 en 400 °Celsius wordt er zuurstof geabsorbeerd bij het oppervlak van de metaaloxiden door elektronen af te vangen. Als gevolg hiervan zal de weerstand van de sensor verhogen in het geval van n-type materialen en verlagen in het geval van p-type materialen. Op zijn beurt zal het gas wat gemeten moet worden reageren met het opgenomen zuurstof of de oxiden. Ook dit zal de weerstand van de sensor veranderen, waarbij de verandering van de weerstand correleert met de concentratie van het te meten gas [9].

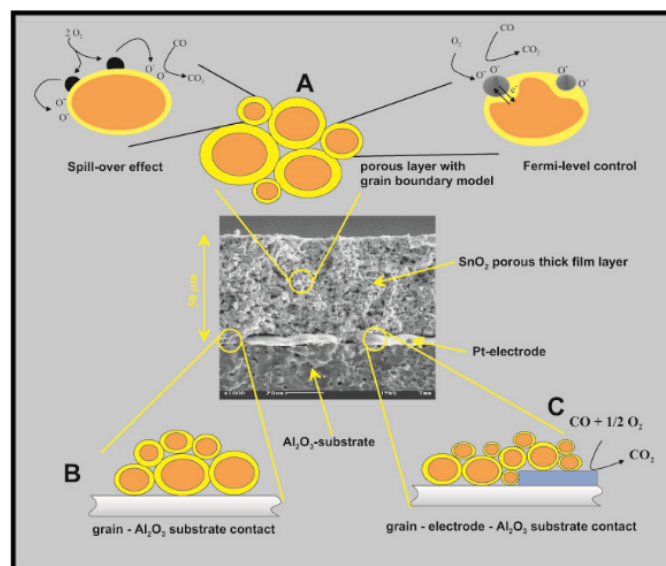


Fig 2. Overzicht van de werking van een metaaloxide sensor [9]

### **6.3 Sensor keuze**

Voor de keuze van een sensor techniek moet rekening gehouden worden de specificaties die in hoofdstuk 5 en omschrijving van het eindproduct die beschreven staat in 1. De sensor moet bij voorkeur zo min mogelijk energie verbruiken. Met beide sensor technieken zijn de specificaties wat betreft de gevoeligheid en responstijd te halen [10]. Bij het energieverbruik van elektrochemische sensoren kan worden gedacht aan een vermogen van microwatt, waarmee die aan de specificaties wat betreft energieverbruik voldoen. Omdat metaaloxide sensoren werken op de temperaturen die staan beschreven in paragraaf 6.2 is er een verwarmingselement nodig om gassen te kunnen detecteren, wat een negatief effect heeft op het energieverbruik. Om die rede voldoen metaaloxide sensoren niet aan die specificaties die gaan over het energieverbruik van de sensormodule [9] [10]. Om die rede wordt er gekozen om bij het ontwerp van de sensormodule een elektrochemische sensor te implementeren.

## **7 Ontwerpkeuzes**

In dit hoofdstuk worden de ontwerpkeuzes besproken en onderbouwd voor het realiseren van een sensormodule die voldoet aan de omschrijving van het eindproduct uit hoofdstuk 1 en de specificaties uit hoofdstuk 5.

### **7.1 Globaal overzicht van de sensormodule**

Zoals staat beschreven in paragraaf 6.3 is er gekozen om CO te meten met een elektrochemische sensor. Voor een optimaal gebruik van elektrochemische sensor moet de temperatuur bekend zijn, hiervoor is er een thermometer nodig. Ook zal er enige analoge signaalverwerking nodig zijn voordat om de CO sensor bruikbaar te maken. Aangezien meting uiteindelijk gedeeld moeten worden in een draadloos dynamisch sensornetwerk, dit gebeurt d.m.v. een microcontroller (de Xmega). Om deze rede moet het analoge signaal van de sensor worden omgezet naar het digitale domein d.m.v. een ADC.



## A Appendix A: NO<sub>x</sub> onderzoek

Stikstofoxides zijn verbindingen tussen stikstof en zuurstof in de vormen NO en NO<sub>2</sub>. Stikstofdioxide (NO<sub>2</sub>) komt vrij bij de verbranding van fossielen brandstoffen. In Nederland zijn de grootste uitstoters van NO<sub>x</sub> het verkeer en de elektriciteitscentrales. De uitstoot van NO<sub>2</sub> heeft gevolgen voor de natuur en de gezondheid. NO<sub>2</sub> wordt dan ook vaak gebruikt als indicator van de luchtkwaliteit.

### A.1 Effecten van NO<sub>x</sub>

Stikstofoxide levert een bijdrage aan de vorming van zure regen. Blootstelling aan NO<sub>2</sub> hangt samen met luchtwegklachten zoals verminderende longfunctie, astma-aanvallen en infecties. NO daarin tegen heeft weinig gezondheidseffecten [4].

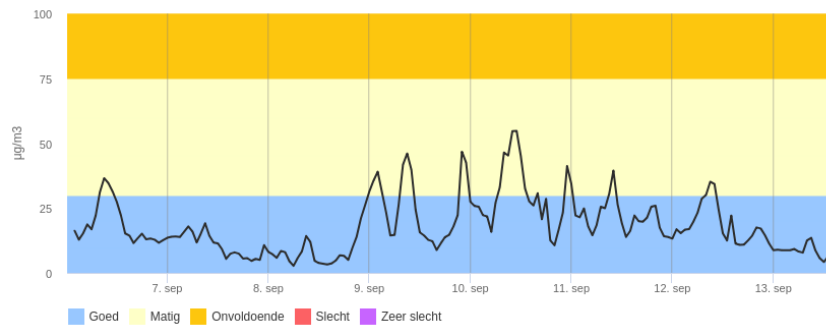
#### A.1.1 Normen

De norm voor het jaargemiddelde NO<sub>2</sub> is 40 µg/m<sup>3</sup>. Deze norm wordt lokaal enkele keren per jaar overschreden. Omdat het verkeer veel NO<sub>2</sub> uitstoot, geldt een maximaal toegestaan uurgemiddelde van 200 µg/m<sup>3</sup> voor wegen waar meer dan 40.000 motorvoertuigen per etmaal gebruik van maken.

Soort norm	Concentratie
Jaargemiddelde	40 µg/m <sup>3</sup>
Uurgemiddelde	200 µg/m <sup>3</sup> *

\* Van toepassing voor wegen waarvan ten minste 40.000 motorvoertuigen per etmaal gebruik maken.

De gemiddelde concentratie NO<sub>2</sub> in de Amsterdamse buitenlucht ligt rond de 25 µg/m<sup>3</sup> (13 ppb). De concentraties binnen liggen meestal een factor 2 lager dan buiten.



**Fig 3.** Meetwaardes  $NO_2$  Kantershof Amsterdam zuidoost. 6 tot 11 september 2019 [5]

### A.1.2 Sensoren

Om de voorkomende niveau's te kunnen meten moet de gekozen sensor een meetbereik hebben tussen de 0 en de 40 ppb, met een resolutie van 1 ppb.

De  $NO_2$ -B43F  $NO_2$  sensor is een chemoresistive sensor van Alphasense en lijkt de beste optie maar is niet geschikt.

Deze sensor een meetbereik van 0 tot 20 ppm met een meetonzekerheid van 15 ppb. Deze sensor is niet gevoelig genoeg om de lage concentraties met een resolutie van 1 ppb uit de lucht goed te kunnen meten.

Sensoren die  $NO_2$  meten hebben een kruisgevoeligheid voor andere gassen zoals  $O_3$  en zijn erg gevoelig voor veranderingen in temperatuur en luchtvochtigheid.

De sensor moet energie zuinig zijn waardoor chemoresistive sensoren niet geschikt zijn omdat deze een continu verbruik is in de ordegrootte van 50 mW [6].

### A.1.3 Conclusie

Er is geen sensor op de markt beschikbaar om de concentraties  $NO_2$  die we verwachten te meten. De beschikbare sensoren zijn niet gevoelig genoeg en verbruiken te veel energie. Daarom is er voor gekozen om af te stappen van het meten van  $NO_2$  als indicator van de luchtkwaliteit binnen de HvA gebouwen. Als alternatief is gekozen voor het meten van CO concentraties in de lucht. CO is een giftig gas en kan vrijkomen bij onvolledige verbrandingen en is daarom belangrijk om dit gas tijdig te registreren.

## References

1. Mariët Ticheler, 2008 [Bekeken in september 2019], [Rapport], "Koolmonoxide", Beschikbaar: [https://www.leefmilieu.nl/sites/www3.leefmilieu.nl/files/imported/pdf\\_s/MGM\\_2008-02\\_koolmonoxide.pdf](https://www.leefmilieu.nl/sites/www3.leefmilieu.nl/files/imported/pdf_s/MGM_2008-02_koolmonoxide.pdf)
2. M. van Bruggen, J.T.M. Gram, E.L. Boels, L. Ruhaak, M. Mooij, RIVM, 2009 [Bekeken in september 2019], [Rapport], "Koolmonoxide in huurwoningen in de Randstad", Beschikbaar: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/609300009.pdf>
3. M. Mooij, RIVM, 2008 [Bekeken in september 2019], [Rapport], "Chronische blootstelling aan koolmonoxide, tabel 2.2", Beschikbaar: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/609300005.pdf>
4. RIVM, J.p. Wesseling, S. van der Zee, P.L. Nguyen, 2008 [Bekeken in september 2019], [Rapport], "Gemeten en berekende NO<sub>2</sub>-concentraties in Amsterdam in 2008", Beschikbaar: <https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/680705015.pdf>
5. Rijksinstituut voor Volksgezondheid 2019[Bekeken in september 2019], [Online], "Meetgegevens NO<sub>2</sub>", Beschikbaar: <https://www.luchtmeetnet.nl>
6. Alphasense 2018[Bekeken in september 2019], [Datasheet], "Datasheet", Beschikbaar: <http://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2018/12/N02B43F.pdf>
7. 978-90-484-3527-2, W. Dolman, 2016[Bekeken in september 2019], [boek], "De taal C en de Xmega (2e druk)", Culemborg, Free Musketeers uitgeverij en productie
8. SGX Sensortech, 01-02-2007 [Bekeken in oktober 2019], [Online], "Introduction to Electrochemical (EC) Gas Sensors", Beschikbaar: <https://www.sgxsensortech.com/content/uploads/2014/08/Introduction-to-Electrochemical-EC-Gas-Sensors1.pdf>
9. N. Barsan, U. Weimar, Institute of Physical and Theoretical Chemistry, University of Tuebingen, [Bekeken in september 2019], [Artikel], "Fundamentals of Metal Oxide Gas Sensors", Beschikbaar: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwjDwY\\_\\_icTlAhVGJFAKHceND0gQFjAIegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ama-science.org%2Fproceedings%2FgetFile%2FBGx1&usg=AOvVawOHkmgTDH\\_rmiX19YCcaHD](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=9&ved=2ahUKEwjDwY__icTlAhVGJFAKHceND0gQFjAIegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.ama-science.org%2Fproceedings%2FgetFile%2FBGx1&usg=AOvVawOHkmgTDH_rmiX19YCcaHD)

10. H. Li, X. Mu, Y. Yang, A. J. Mason, IEEE, 2014 [Bekeken in september 2019], [Artikel], "Low power Multi-mode Electrochemical Gas Sensor Array System for Wearable Health and Safety Monitoring", Beschikbaar: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6851860>