

2015•2016  
FACULTEIT INDUSTRIËLE INGENIEURSWETENSCHAPPEN  
*master in de industriële wetenschappen: bouwkunde*

## Masterproef

Monitoring van gezinswoningen op basis van low-cost open-sources  
sensortechnieken

Promotor :  
Prof. Jelle LANGMANS  
dr.ir.arch. GEERT BAUWENS

Joren Meesters

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële  
wetenschappen: bouwkunde*

Gezamenlijke opleiding Universiteit Hasselt en KU Leuven

2015•2016  
Faculteit Industriële  
ingenieurswetenschappen  
*master in de industriële wetenschappen: bouwkunde*

## Masterproef

Monitoring van gezinswoningen op basis van low-cost  
open-sources sensortechnieken

Promotor :  
Prof. Jelle LANGMANS  
dr.ir.arch. GEERT BAUWENS

Joren Meesters

*Scriptie ingediend tot het behalen van de graad van master in de industriële  
wetenschappen: bouwkunde*

## Woord vooraf

Beste lezer,

In het middelbaar onderwijs heb ik een eindwerk gemaakt over energiebesparende maatregelen in huizen. Sindsdien ben ik geïnteresseerd in methodes om huizen energiezuiniger en gezonder te maken. Het is dan ook vanzelfsprekend dat ik voor een onderwerp gekozen heb dat beide aspecten omvat.

Dankzij de hulp van verschillende mensen heb ik deze thesis tot een goed einde kunnen brengen. Allereerst wil ik graag mijn promotor dr. ing. Jelle Langmans bedanken voor zijn inbreng en advies gedurende het maken van deze thesis. Zonder zijn hulp was ik er nooit in geslaagd deze thesis tot een goed einde te brengen. Ook wil ik prof. dr. ing. Bram Vandoren bedanken voor zijn masterproef seminaries. Verder wil ik prof. dr. ir.-arch Jelle Lavarge bedanken voor het ter beschikken stellen van de VOS sensoren. Ten slotte wil ik mijn ouders nog bedanken die mij de kans gegeven hebben om deze studies te volgen. Zonder hun niet steun was het mij nooit gelukt om deze opleiding tot een goed einde te brengen.

Joren



# Inhoud

Woord vooraf .....	1
Lijst van Tabellen.....	5
Lijst met afbeeldingen.....	7
Lijst met afkortingen .....	9
Abstract .....	11
Abstract in English .....	13
1 Inleiding .....	15
2 Parameters binnenluchtkwaliteit .....	17
2.1 Temperatuur (T) en relatieve luchtvochtigheid (RV).....	18
2.2 Fijnstof deeltjes (PM, <i>particle matter</i> ) .....	24
2.3 Koolstof dioxide (CO <sub>2</sub> ).....	27
2.4 Vluchtige organische stoffen (VOS) .....	30
2.5 Andere parameters .....	33
2.6 Maatgevende parameters .....	34
3 <i>Open-source</i> sensoren/dataloggers .....	35
3.1 Gebruikte <i>open-source</i> platformen .....	36
3.1.1 Arduino.....	36
3.1.2 Particle.....	38
3.2 Gerealiseerde dataloggers.....	38
3.2.1 Temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger .....	39
3.2.2 Fijnstof (PM <sub>2,5</sub> ) datalogger.....	45
3.2.3 CO <sub>2</sub> datalogger .....	51
3.2.4 VOS datalogger .....	57
3.2.5 All-in-one datalogger .....	60
4 Vergelijkende studie <i>open-source</i> en <i>ready-made</i> sensoren/dataloggers .....	63
4.1 Vergelijking temperatuur en relatieve vochtigheid dataloggers.....	64
4.2 Vergelijking fijnstof dataloggers .....	70
4.3 Vergelijking CO <sub>2</sub> dataloggers.....	73
4.4 Vergelijking VOS dataloggers.....	80
4.5 Vergelijking IAQ systemen .....	85
4.6 Conclusie .....	89

5	Meetresultaten.....	90
5.1	Meetmethode .....	90
5.2	Monitoren van een slaapkamer.....	90
5.3	Monitoren van een badkamer .....	93
5.4	Fijnstof metingen.....	96
5.5	Opmerking bij metingen.....	99
6	Conclusie.....	101
	Literatuurlijst.....	105
	Bijlage .....	109
6.1	Bijlage A1: CD .....	109

## Lijst van Tabellen

Tabel 1: Meest voorkomende vervuilingen in een gebouw, vertaald uit [5].....	17
Tabel 2: grenzen temperatuur en relatieve vochtigheid i.f.v. seizoen [11] .....	19
Tabel 3: bovengrenzen ter beoordeling van thermisch comfort, vertaald uit[10].....	20
Tabel 4: Binnenklimaatklasse [14].....	23
Tabel 5: grenswaarden PM <sub>10,0</sub> en PM <sub>2,5</sub> volgens Richtlijn 2008/50/EG [23] .....	26
Tabel 6: grenswaarden PM <sub>10,0</sub> en PM <sub>2,5</sub> volgens de Wereldgezondheidsorganisatie [6] .....	26
Tabel 7: Luchtkwaliteit op basis van de PM <sub>2,5</sub> en PM <sub>10</sub> waarde [20, 24].....	27
Tabel 8: classificatie binnenluchtkwaliteit [25, 26] .....	28
Tabel 9: grenswaarde CO <sub>2</sub> [ppm], vertaald uit [5] .....	29
Tabel 10: Richtwaarde verontreinigingen [6] .....	33
Tabel 11: Maatgevende parameter in woningen, vertaald uit [5].....	34
Tabel 12:eigenschappen waarden DHT22 sensor[44].....	39
Tabel 13: Kostprijs temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger .....	42
Tabel 14: Eigenschappen DVM171THD [45] .....	43
Tabel 15: Eigenschappen Samyoung stofsensor DSM501a [46] .....	48
Tabel 16: kostprijs PM <sub>2,5</sub> datalogger .....	50
Tabel 17: eigenschappen K-30 CO <sub>2</sub> sensor .....	51
Tabel 18: Kostprijs CO <sub>2</sub> datalogger .....	54
Tabel 19: Eigenschappen SD800 CO <sub>2</sub> sensor [49].....	55
Tabel 20: Eigenschappen IAQ core sensor .....	57
Tabel 21: Kostprijs VOS datalogger .....	59
Tabel 22: Kostprijs all-in-one datalogger (T&RV; PM <sub>2,5</sub> ; CO <sub>2</sub> ; VOS) .....	61
Tabel 23: overzicht prijzen <i>open-source</i> dataloggers .....	62
Tabel 24: DVM171THD temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger.....	64
Tabel 25: HOBO UX100-003 datalogger .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 26: LogTag HAXO-8 Humidity & temperature logger .....	66
Tabel 27: ATV-11 datalogger .....	<b>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</b>
Tabel 28: Vergelijkende tabel open-source - <i>ready-made</i> dataloggers .....	68
Tabel 29: Sujing Y09-PM2.5 Air Quality Monitor .....	70
Tabel 30: Dylos DC1100-PRO .....	71
Tabel 31: AIR-PM <sub>2,5</sub> datalogger .....	72
Tabel 32: vergelijking PM <sub>2,5</sub> <i>open-source</i> met <i>ready-made</i> dataloggers .....	72
Tabel 33: SD800 CO <sub>2</sub> datalogger .....	73
Tabel 34: <i>SensAir</i> tSENSE .....	74
Tabel 35: <i>SensAir</i> eSENSE .....	75
Tabel 36: HOBO MX1102 .....	76
Tabel 37: Wöhler CDL210 CO <sub>2</sub> datalogger .....	77
Tabel 38: CM-0212 .....	78
Tabel 39: Overzicht geselecteerde CO <sub>2</sub> dataloggers .....	79
Tabel 40: CM-0212 .....	80
Tabel 41: VOS monitor .....	81
Tabel 42: Yocto-VOC .....	82
Tabel 43: BAPI-Stat 3 Unit .....	83
Tabel 44: vergelijking VOS dataloggers .....	84
Tabel 45: Tongdy CO <sub>2</sub> + VOC + RH/T Monitor & Alarm w. Relay.....	85
Tabel 46: Blueair Aware .....	86

Tabel 47: Air quality eggs .....	87
Tabel 48: AirSensor CO <sub>2</sub> shield .....	88
Tabel 49: PM <sub>2,5</sub> 24-uurgemiddelde in slaapkamer .....	97
Tabel 50: 2de meting PM <sub>2,5</sub> in een slaapkamer .....	97
Tabel 51: classificatie binnenluchtkwaliteit [25, 26] .....	102
Tabel 52: Maatgevende parameter in woningen, vertaald uit [5].....	102
Tabel 53: overzicht prijzen <i>open-source</i> dataloggers .....	103



## Lijst met afbeeldingen

Figuur 1: Flowchart ter bepaling gebouwtype Alpha of Bèta [10] .....	20
Figuur 2: Grenzen thermisch comfort voor gebouwtype Alpha [10].....	21
Figuur 3: Grenzen thermisch comfort voor gebouwtype Bèta [10] .....	21
Figuur 4: Behaaglijkheidsgebied [12].....	22
Figuur 5: Fijnstof in het menselijke lichaam [20] .....	25
Figuur 6: Emissies fijnstof (PM <sub>2,5</sub> ) in 2013 (Emissieregistratie) [20] .....	26
Figuur 7: VOS meting t.o.v. CO <sub>2</sub> meting [5] .....	31
Figuur 8: Formaldehyde transport door muren [9].....	32
Figuur 9: Emissie van formaldehyde in een ruimte [9].....	32
Figuur 10: relatie temperatuur – emissie van formaldehyde [9] .....	32
Figuur 11: Frequentie van voorkomende verontreinigingen [38] .....	34
Figuur 12: meten en verwerken data IAQ-sensor [39].....	35
Figuur 13: Arduino Uno .....	36
Figuur 14: Links: Arduino Pro Mini; Rechts: FTDI (USB component) .....	37
Figuur 15: <i>Real Time Clock</i> DS3234 .....	37
Figuur 16: Photon van Particle .....	38
Figuur 17: links: DHT22 sensor; rechts: Arduino uno .....	39
Figuur 18: Temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger .....	40
Figuur 19: gerealiseerde temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger .....	41
Figuur 20: temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger op basis van een Photon .....	41
Figuur 22: Meting <i>open-source</i> datalogger DHT22 .....	43
Figuur 21: DVM171THD [44] .....	43
Figuur 23: Kalibratiemeting temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger .....	44
Figuur 24: Onder- en bovengrens DVM171THD t.o.v. DHT22.....	45
Figuur 25: Werking stofsensoren [20] .....	46
Figuur 26: Stofsensoren Samyoung DMS501a.....	46
Figuur 27: gewicht deeltjes per volume-eenheid i.f.v. de 'lage signaal ratio' .....	47
Figuur 28: aantal deeltjes per volume-eenheid i.f.v. de 'lage signaal ratio' .....	47
Figuur 29: Bedrading PM <sub>2,5</sub> datalogger .....	48
Figuur 30: PM <sub>2,5</sub> datalogger met Arduino Pro mini .....	49
Figuur 31: K-30 CO <sub>2</sub> sensor [31] .....	51
Figuur 32: Werking infrarood CO <sub>2</sub> sensor [47] .....	52
Figuur 33: Bedrading CO <sub>2</sub> datalogger.....	52
Figuur 34: CO <sub>2</sub> datalogger .....	53
Figuur 35: SD800 datalogger [49] .....	55
Figuur 36: CO <sub>2</sub> meting DS800 t.o.v. K-30 sensor .....	56
Figuur 37: DS800 onder- en bovengrens i.f.v. K-30 CO <sub>2</sub> sensor.....	56
Figuur 38: VOS sensor IAQ core .....	57
Figuur 39: VOS datalogger .....	58
Figuur 40: Prijzen dataloggers .....	62
Figuur 41: DVM171THD.....	64
Figuur 42: HOBO UX100-003.....	65
Figuur 43: LogTag HAXO-8 Humidity & temperature logger.....	66
Figuur 44: ATV-11.....	67
Figuur 45: Sujing Y09-PM <sub>2,5</sub> Air Quality Monitor .....	70
Figuur 46: DC1100-PRO Air Quality Monitor .....	71
Figuur 47: AIR-PM <sub>2,5</sub> .....	72
Figuur 48: SD800 CO <sub>2</sub> datalogger .....	73

Figuur 49: <i>SensAir</i> tSENSE .....	74
Figuur 50: <i>SensAir</i> eSENSE.....	75
Figuur 51: HOBO MX1102 .....	76
Figuur 52: Wöhler CDL210 CO <sub>2</sub> datalogger .....	77
Figuur 53: CM-0212.....	78
Figuur 54: Tongdy VOS detector.....	80
Figuur 55: VOS monitor .....	81
Figuur 56: Yocto VOC .....	82
Figuur 57: BAPI-Stat 3 Unit .....	83
Figuur 58: Tongdy CO <sub>2</sub> + VOC + RH/T Monitor & Alarm w. Relay .....	85
Figuur 59: Blueair Aware.....	86
Figuur 60: Air quality eggs .....	87
Figuur 61: AirSensor CO <sub>2</sub> shield .....	88
Figuur 62: Meting temperatuur en relatieve vochtigheid.....	91
Figuur 63: Meting CO <sub>2</sub> .....	92
Figuur 64: Temperatuur en relatieve vochtigheidsmeting in badkamer .....	94
Figuur 65: schimmelgroei in badkamer .....	95
Figuur 66: Aantasting houten dakvenster in badkamer.....	95
Figuur 67: CO <sub>2</sub> concentratie in een badkamer .....	96
Figuur 68: PM <sub>2,5</sub> in slaapkamer - uurgemiddelde .....	97
Figuur 69: PM <sub>2,5</sub> meting slaapkamer .....	98
Figuur 70: PM <sub>2,5</sub> in keuken - uurgemiddelde .....	98

## Lijst met afkortingen

**ATG:** Adaptieve temperatuur grenswaarde

**Bq/m<sup>3</sup>:** bequerel per kubieke meter, maat voor radioactiviteit

**IAQ:** *Indoor Air Quality*, binnenlucht kwaliteit

**IDA:** indoor air

**Pa:** Pascal

**PM:** *particle matter*, fijnstof deeltjes

**ppm:** parts per million

**RTC:** Real time clock

**RV:** Relatieve luchtvochtigheid

**SBS:** *Sick Building Syndrome*

**T:** Temperatuur

**TVOC:** totaal VOC gehalte

**TVOS:** totaal VOS gehalte

**VOC:** vluchtige organische componenten

**VOS:** vluchtige organische stoffen

**WHO:** *World Health Organisation*, Wereldgezondheidsorganisatie



## Abstract

Gemiddeld gezien brengen mensen ongeveer 80 tot 90% van hun tijd door in gebouwen. Het binnenluchtklimaat is dus een belangrijke factor voor de menselijke gezondheid. Om aan de steeds strenger wordende EPB-regelgeving te voldoen dient een woning luchtdicht gebouwd te worden. Hierdoor kunnen verontreinigingen de woning niet meer op een natuurlijke verlaten. Enkel door middel van een ventilatiesysteem kan lucht ververst worden. Indien dit systeem niet goed werkt blijven de vervuilingen in de woning aanwezig. De belangrijkste verontreinigingsbronnen in een woning zijn de mens en de aanwezige materialen. De maatgevende verontreinigingen in een woning zijn temperatuur, vocht, koolstofdioxide en vluchtige organische stoffen (VOS).

Er bestaan verschillende *ready-made* monitoringsystemen om deze parameters op te volgen in gebouwen. Het nadeel van de bestaande systemen is dat ze weinig flexibel en vaak zeer duur zijn. De doelstelling van deze thesis is een zoektocht naar alternatieve *open-source* platformen die toelaten om binnenlucht kwaliteit te monitoren. ARDUINO en PARTICLE zijn gebruikt als *open-source* platformen. Om te kijken of deze dataloggers evenwaardig of beter zijn dan *ready-made* sensoren zijn deze vergeleken op basis van prijs, nauwkeurigheid, robuustheid en aanpasbaarheid. Hieruit is gebleken dat in de meeste gevallen de *open-source* datalogger goedkoper is voor dezelfde nauwkeurigheid. Uit kalibratiemetingen bleek dat er voor de gebruikte sensoren geen extra kalibraties nodig zijn om nauwkeurige resultaten te bekomen.



## **Abstract in English**

People spend approximately 80 to 90% of their time in buildings. The indoor air climate (IAQ) is therefore an important factor according to human health. In order to meet the increasingly stringent EPB-regulation buildings need to be airtight. Today's buildings are equipped with ventilation systems. However, when this system is malfunctioning all pollutants remains in the airtight building resulting in a bad indoor air quality. The main source of pollutants are the inhabitants and the used building materials. The main pollutants are temperature, moisture, carbon dioxide and volatile organic compounds (VOC).

There are several readymade monitoring systems to observe these parameters. The disadvantage of the existing systems is that they are inflexible and often very expensive. The objective of this thesis is to search for alternative open-source platforms which permit to monitor the indoor air quality. ARDUINO and PARTICLE are used as open-source platforms. To see if these data loggers are equivalent or better than readymade sensors a comparison is made based on the price, accuracy, robustness and adaptability. It has shown that in most cases the open-source data logger is cheaper for the similar accuracy levels. Calibration measurements have shown that there no additional calibration is necessary in order to obtain accurate results for the open-source data loggers investigated.





# 1 Inleiding

De dag van vandaag zit de mens 80 tot 90 procent van zijn tijd binnen in een gebouw [1]. Hierdoor zal de binnenluchtkwaliteit een zeer grote impact hebben op de menselijke gezondheid. Dit in combinatie met de evolutie van de Energie Prestatie regelgeving (EPB-eisen), de bouwmaterialen en bouwtechnieken worden woningen zo goed als altijd luchtdicht gebouwd. In oudere woningen is er een lager risico op een slechte binnenluchtkwaliteit door de natuurlijke ventilatie die kan optreden doorheen de gebouwschil. Bij een nieuwbouwwoning of bij een grondige energetische renovatie worden woningen meestal luchtdicht uigevoerd om aan de EPB-eisen te voldoen. In België wordt de luchtdichtheid echter niet opgelegd door een norm en is dus bijgevolg niet verplicht. Indien men echter in orde wil zijn met de EPB regelgeving is het wenselijk om luchtdicht te bouwen. Het plaatsen van een ventilatiesysteem is wel verplicht. Er wordt steeds meer gebruik maken van een mechanisch ventilatiesysteem te plaatsen. Dit betekent dat zowel het debiet aan ingaande en uitgaande lucht opgelegd wordt het ventilatiesysteem. Indien dit systeem niet correct werkt bestaat de kans dat er door de ophoping van vervuilingen een slechte binnenluchtkwaliteit gaat heersen in het gebouw [2].

Het doel van deze thesis om te onderzoeken of het monitoren van de binnenluchtkwaliteit van residentiële gebouwen kan gebeuren op basis van *open-source* platformen zoals Raspberry Pi, Arduino, Particle, etc. Deze platformen staan toe om met een relatief laag budget dataloggers/sensoren te realiseren die de binnenluchtkwaliteit monitoren. Het grote voordeel van deze dataloggers is dat ze makkelijk aanpasbaar zijn; zelf te programmeren zijn en ze kunnen bijvoorbeeld een ventilatiesysteem aansturen. De focus tijdens het onderzoek zal liggen op de betrouwbaarheid, nauwkeurigheid, en prijs van de dataloggers. Om te kijken het wel effectief is om met *open-source* dataloggers te werken worden deze vergeleken met *ready-made* sensoren.

In het eerste hoofdstuk worden de verschillende parameters beschreven die een invloed hebben op de binnenluchtkwaliteit van een gebouw. In deze thesis ligt de focus vooral op de temperatuur (T, [°C]), relatieve luchtvochtigheid (RV, [%]), concentratie aan koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>, [ppm]), concentratie aan stofdeeltjes [ppm, µg/m<sup>3</sup>] en de concentratie aan VOS [ppm, CO<sub>2</sub> equivalent] om de binnenluchtkwaliteit te evalueren [3]. VOS zijn vluchtige organische stoffen die kunnen vrijkomen tijdens het uitvoeren van verschillende handelingen (koken, wassen,...), de uitstoot van verschillende materialen (verf, poetsmiddelen,...). Een slechte binnenlucht kwaliteit kan condens, schimmels,... met zich meebrengen. Deze verschijnselen dienen zeker vermeden te worden om het gebouw en de menselijke gezondheid niet aan te tasten [4].

In het tweede hoofdstuk ligt de focus op de *open-source* dataloggers zelf. Hier wordt besproken welke *open-source* platformen gebruikt. Daarna wordt per type datalogger beschreven welke sensor gebruikt. Hierbij wordt ook een overzicht gegeven van de totale kostprijs van de dataloggers. Tevens wordt in dit hoofdstuk beschreven of de dataloggers bijkomende kalibraties nodig hebben. Dit werd gedaan door met de zelfgemaakte *open-source* en een *ready-made* datalogger de binnenlucht te monitoren en de resultaten tegen elkaar af te wegen.

In het derde hoofdstuk zal er een vergelijking gemaakt worden tussen de *open-source* dataloggers en *ready-made* dataloggers. Dit zijn sensoren die standaard aangekocht kunnen worden om de binnenlucht te beoordelen. De vergelijking zal gebeuren op basis van de prijs, nauwkeurigheid, toepasbaarheid binnen een ventilatiesysteem, etc.

Als laatste fase in dit onderzoek werden er metingen uitgevoerd met de verschillende sensoren om deze in een woning te testen. In deze woning werd er een monitoring uitgevoerd in een slaapkamer en een badkamer. De resultaten van deze metingen zullen besproken worden in hoofdstuk vier.

In het besluit tenslotte worden de resultaten die gevonden zijn gedurende het onderzoek bondig overlopen. Ook zullen hier enkele voorstellen voor verder onderzoek gegeven worden.

## 2 Parameters binnenluchtkwaliteit

Normale, zuivere, binnenlucht bestaat uit 21% zuurstof en 79% stikstof. Er zijn 3 hoofdoorzaken die de binnenluchtkwaliteit in een residentieel gebouw nadelig beïnvloeden:

- Dagdagelijkse bezigheden zoals koken, wassen, poetsen,...;
- Producten die gebruikt in de woning (poetsmiddel, verf,...);
- Emissie van stoffen uit gebruikte materialen in de woningen;

De meest gebruikelijke vervuilingen vertalen zich ineen te lage of te hoge vochtigheid; een te hoge koolstof mono- en dioxide concentratie en een te hoog vluchtige organische stoffen concentratie (VOS). Deze vervuilingen zijn weergegeven in Tabel 1. Al deze vervuilingen worden in dit hoofdstuk besproken [5, 6].

Tabel 1: Meest voorkomende vervuilingen in een gebouw, vertaald uit [5]

Binnenlucht		Typische bestandsdelen		Behandeling
Verontreinigings-bron	emissie bron	VOS	Andere	
De mens	adem	aceton, ethanol, isopreen	CO <sub>2</sub> vocht	Vraag gestuurde ventilatie
	huidademhaling zweet	en nonanal, decanal, α- pineen	vocht	
	Flatulentie (winderigheid)	methaan, waterstof		
	cosmetica	limonen, eucalyptol		
	huishoudproducten	alcohol esters, limonen		
	Verbranding (motoren, huishoudelijke apparaten, tabaksrook)		CO CO <sub>2</sub> vocht	
Bouwmaterialen, meubels, kantoorbenodigdheden	verf, lijm, solventen	formaldehyde, alkanen, alcoholen, ketonen		Permanent, 5- 10% ventilatie
	PVC	tolueen, xyleen, decaan		
	printers, computers	benzeen, styreen, fenol		

Vervuilingen ten gevolge van de dagdagelijkse bezigheden zijn moeilijk te vermijden. De contaminaties ten gevolge van de bouwmaterialen zijn in bepaalde mate wel te vermijden. Door een juiste keuze van bouwmaterialen, meubels, verven, etc. treden

bepaalde vervuilingen niet op. Op de website van de departement leefmilieu, natuur & energie is een lijst te vinden met materialen en producten een lagere emissie van schadelijke stoffen hebben [7]. Deze materialen worden tevens aangeduid met een ecolabel. Van de goedgekeurde labels is er een lijst te vinden op voornoemde website.

Indien bewoners en gebruikers van een gebouw discomfort en gezondheidsklachten ervaren die gecorreleerd kunnen worden met de tijd dat men in het gebouw heeft doorgebracht zonder dat er een oorzaak of andere ziekte bepaald kan worden spreekt men van het *sick building syndrome* (SBS) . Het SBS wordt voornamelijk veroorzaakt door 6 hoofdoorzaken:

- Chemische verontreiniging,
- Biologische verontreiniging,
- Slechte ventilatie,
- Elektromagnetische straling,
- Psychologische factoren,
- Slechte verlichting, akoestiek en ergonomie,

Het SBS wordt in de meeste gevallen veroorzaakt door een slechte binnenkwaliteit. Typische klachten van het SBS zijn hoofdpijn, moeilijk ademhalen, bloedneuzen, allergieën, etc. Klachten ten gevolge van het SBS komen al na korte tijd naar boven en verdwijnen ook als men niet meer verblijft in een gebouw met SBS. In uitzonderlijk gevallen kan het zijn dat er blijvende ziekten en klachten optreden. [8, 9]

Wanneer er SBS vastgesteld wordt in een gebouw gaat men allereerst de binnenluchtkwaliteit in het gebouw gaan bepalen. Daarnaast is het ook belangrijk om alle mogelijke bronnen van vervuiling binnen het gebouw op te lijsten en te kwantificeren. De meest gebruikelijke oorzaak van een slechte binnenlucht is het ontbreken van of onvoldoende ventilatie. Vaak zal dan ook als eerste aandacht besteed worden aan de controle van de aanwezig ventilatie. Afhankelijk van het type vervuiling kan men opteren voor een verschillende manier van ventileren. Indien de bewoner de hoofdoorzaak van de vervuiling is, is het beter om te werken met een vraag gestuurd ventilatiesysteem. Hierdoor wordt er enkel op het moment geventileerd dat er behoefte is aan verse lucht. Indien de oorzaak van vervuiling echter bij de gekozen materialen ligt, is het aan te raden om een permanent werkend ventilatiesysteem te plaatsen. Door dit te doen zal men nooit grenswaarden overschrijden en zal het te allen tijde veilig zijn om in deze ruimte te verblijven.

## **2.1 Temperatuur (T) en relatieve luchtvochtigheid (RV)**

De relatieve luchtvochtigheid is rechtstreeks gecorreleerd met de temperatuur in de woningen. Indien er een lagere temperatuur heerst zal de relatieve luchtvochtigheid hoger zijn bij eenzelfde absolute luchtvochtigheid dan op een hogere temperatuur. De temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid van binnenlucht worden vooral gebruikt om het binnenklimaat en thermisch comfort aan te duiden.

De graad van thermisch comfort is vooral afhankelijk van de personen die zich een woning bevinden. Bij mensen speelt het gedrag, zijn fysiologie en denken een rol in het accepteren van een bepaald thermisch comfort een grote rol. Adaptief thermisch

comfort kan beschreven als: “Wanneer er een verandering optreedt die thermisch discomfort veroorzaakt, zal de mens zo reageren zodat het thermisch comfort terug hersteld wordt” [10]. Zijn gedrag komt naar voren in de maatregelen die hij neemt indien hij een thermisch discomfort ervaart. Zo kan een mens ramen gaan open of toe doen, extra kleren uitdoen, etc. Zijn fysiologie komt naar voren in zweten en dergelijke. Indien men lange tijd in een bepaald klimaat doorbrengt past het lichaam zich daar naar aan. Zo zal het zweten na langere tijd in een warm klimaat verminderen. Mensen hebben altijd bepaalde verwachtingen bij het thermisch comfort van een bepaalde ruimte. Indien het werkelijke thermische comfort niet overeenkomt met zijn verwachtingen zal het comfort rapper als onaangenaam beschouwd worden. Zo speelt ook de buitentemperatuur een rol de verwachtingen. Indien het al geruime tijd warm weer is, zal een hogere binnentemperatuur sneller als aangenaam ervaren worden dan bij koud weer. Dit komt ook naar voren in het “Besluit van de Vlaamse Regering van 11 juni 2004 houdende maatregelen tot bestrijding van de gezondheidsrisico’s door verontreiniging van het binnenmilieu (BS 19/10/2004)” [11]. Daar worden seizoensafhankelijke grenzen voor temperatuur en relatieve vochtigheid gegeven, deze zijn te vinden in Tabel 2.

**Tabel 2: grenzen temperatuur en relatieve vochtigheid i.f.v. seizoen [11]**

Seizoen	Temperatuur	Relatieve vochtigheid
Winter	$20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 24^{\circ}\text{C}$	$30\% \leq \text{RV} \leq 55\%$
Zomer	$22^{\circ}\text{C} \leq T \leq 26^{\circ}\text{C}$	$30\% \leq \text{RV} \leq 80\%$

Om het thermisch comfort van een gebouw te kunnen beoordelen waarbij rekening gehouden wordt de menselijke factor is de Adaptieve Temperatuur Grenswaarde (ATG) opgesteld. Hierbij houdt men rekening met de buitentemperatuur die er al enkele dag buiten heerst. Op deze manier worden menselijke factoren zoals de verwachtingen, manier van kleden, etc. in rekening gebracht. Dit wordt gedaan door de gemiddelde buitentemperatuur van 4 dagen (de dag zelf + 3 voorgaande dagen) te wegen aan de hand van Vergelijking 1.

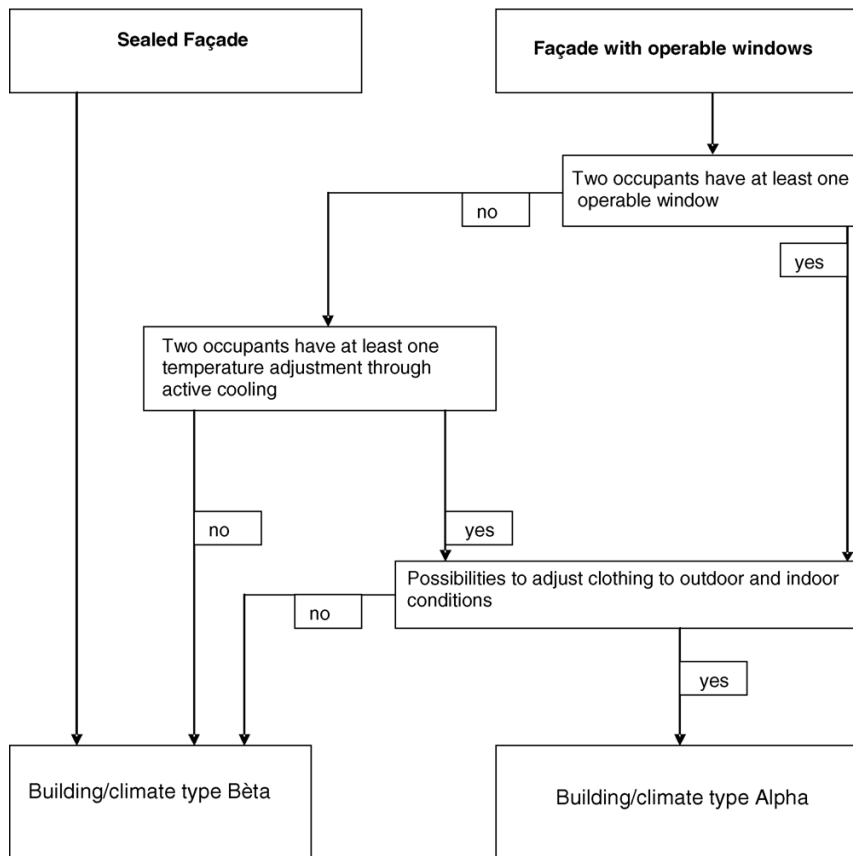
$$T_{e,ref} = \frac{T_{gem,vandaag} + 0,8T_{gem,gisteren} + 0,4T_{gem,eergisteren} + 0,2T_{gem,3\text{ dagen geleden}}}{2,4}$$

**Vergelijking 1: Bepalen referentietemperatuur, vertaald uit [10]**

Bij elk type gebouw heeft de mens een andere adaptatie. In België en Nederland werden er twee gebouwtype opgesteld:

- Type Alpha: natuurlijk geventileerde gebouwen, met de mogelijkheid om ramen open te zetten;
- Type Bèta: gebouwen die een klimaatbeheersing hebben zonder de mogelijkheid om ramen te openen.

Omdat men in een gebouwtype Alpha zelf de mogelijkheid heeft om de temperatuur te regelen gaat men daar een hogere temperatuur aanvaarden dan in een gebouw waar dit niet mogelijk is (type Bèta). In Figuur 1 wordt een flowchart weergegeven die gebruikt dient te worden om het gebouwtype te bepalen.



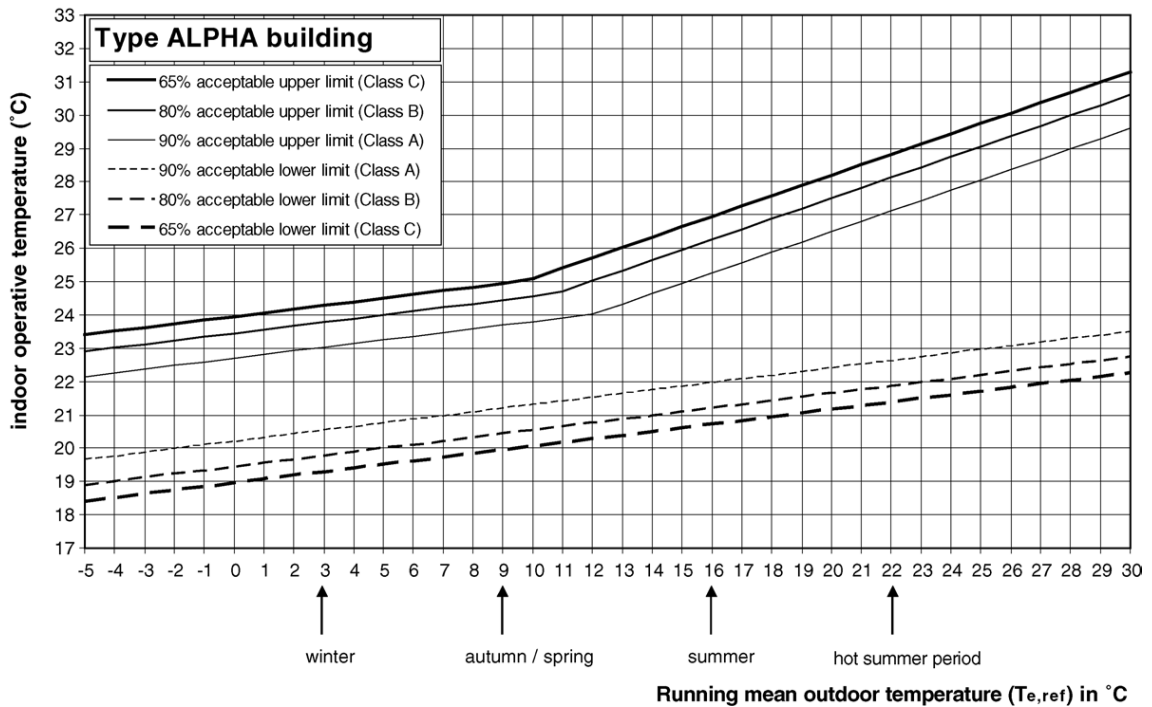
**Figuur 1: Flowchart ter bepaling gebouwtype Alpha of Bèta [10]**

Het thermisch binnenklimaat werd opgesplitst in 3 categorieën: A (zeer goed), B (goed) en C (aanvaardbaar). Aan elk van deze categorieën hangt een bepaalde graad van acceptatie van het thermisch comfort aan vast. Deze klasse, hun graad van acceptatie en hun bovengrenzen van temperatuur worden gegeven in Tabel 3.

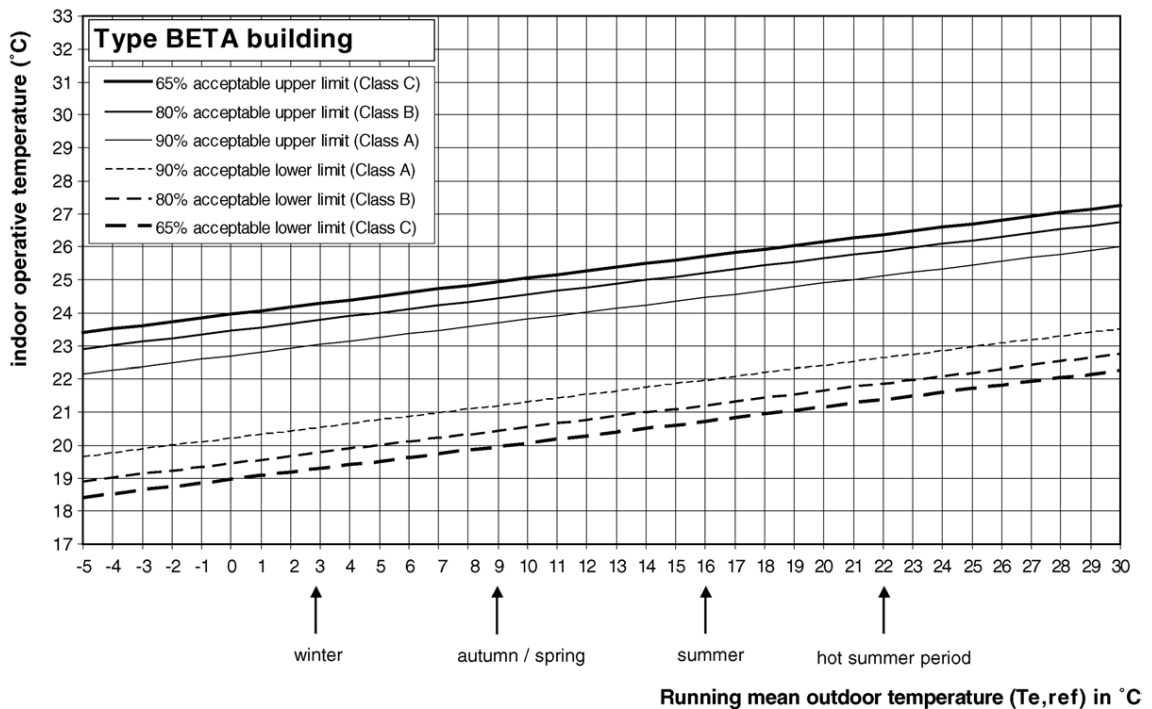
**Tabel 3: bovengrenzen ter boordeling van thermisch comfort, vertaald uit[10]**

Klasse	Acceptatie	Gebouwtype	
		Alpha	Bèta
A	90%	$T_{e,ref} > \pm 12^{\circ}\text{C}: T_i < 20,3 + 0,31T_{e,ref}$	$T_i < 22,7 + 0,11T_{e,ref}$
		$T_{e,ref} < \pm 12^{\circ}\text{C}: T_i < 22,7 + 0,11T_{e,ref}$	
B	80%	$T_{e,ref} > \pm 11^{\circ}\text{C}: T_i < 21,3 + 0,31T_{e,ref}$	$T_i < 23,45 + 0,11T_{e,ref}$
		$T_{e,ref} < \pm 11^{\circ}\text{C}: T_i < 23,45 + 0,11T_{e,ref}$	
C	65%	$T_{e,ref} > \pm 10^{\circ}\text{C}: T_i < 20,3 + 0,31T_{e,ref}$	$T_i < 23,95 + 0,11T_{e,ref}$
		$T_{e,ref} < \pm 10^{\circ}\text{C}: T_i < 23,95 + 0,11T_{e,ref}$	

In deze tabel is te zien dat er geen verschil in bovengrenzen is tussen een Alpha en Beta type bij lage referentie buitentemperaturen. Dit komt doordat mensen bij deze temperaturen niet de neiging hebben om vensters open te zetten. Men kan in dit geval dus niet meer spreken van een natuurlijk geventileerd gebouw. Dit is ook duidelijk te zien in Figuur 2 en Figuur 3. In deze figuren zijn tevens de ondergrenzen van elke klasse te zien. Deze zijn identiek voor elk type gebouw doordat men ook in dit geval geen vensters gaat willen openzetten.

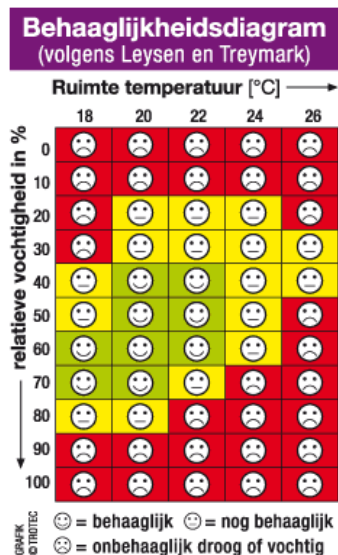


**Figuur 2: Grenzen thermisch comfort voor gebouwtype Alpha [10]**



**Figuur 3: Grenzen thermisch comfort voor gebouwtype Bèta [10]**

Naast de temperatuur speelt ook de relatie temperatuur – relatieve vochtigheid een rol in het thermisch comfort van een gebouw. Deze relatie is te zien aan de hand van een behaaglijkheidsgebied. Een voorbeeld hiervan is te zien in Figuur 4. Indien er een hogere temperatuur heerst in een gebouw zal men een lagere luchtvochtigheid als aangenaam ervaren. Bij koudere temperaturen mag de luchtvochtigheid dan weer hoger zijn. Dit komt doordat de absolute hoeveelheid vocht in de lucht in beide gevallen ongeveer gelijk zal zijn elkaar.



Figuur 4: Behaaglijkheidsgebied [12]

Omdat de vochtproductie in ieder type gebouw verschillend is zijn er binnenklimaatklasse opgesteld. Deze klasse bepalen de vochtbelasting in gebouwen. Aan de hand van de dampdruk die heerst in een gebouw kan een klasse toegekend worden. Hierbij valt op te merken dat het om jaargemiddelde dampdrukken gaat. Dit doordat vochtdiffusie een zeer traag proces is [13]. Indien men bepaalt dat de werkelijke dampdruk te hoog of te laag is dient men aan vochtbeheersing te doen. De dampdruk in een gebouw is te bepalen met Vergelijking 2.

$$p_i = p_e + \frac{R_v T_i}{nV} G_p$$

Vergelijking 2: dampdruk in gebouwen [13]

Met:  $p_i$ : de dampdruk van de binnenlucht, [Pa];  
 $p_e$ : de dampdruk van de buitenlucht, [Pa];  
 $R_v$ : de gasconstante van waterdamp, [462 J/kgK];  
 $n$ : het ventilatievoud, [1/h];  
 $V$ : het volume van het gebouw of ruimte, [m<sup>3</sup>];  
 $G_p$ : de vochtproductie in het gebouw, [kg/h];

De verschillende klasse zijn te vinden in Tabel 14. Hoe lager de klimaatklasse, hoe lager de vochtigheid in een gebouw is. Woningen vallen zo goed als altijd gekenmerkt door binnenklimaatklasse II of III. [14]



Tabel 4: Binnenklimaatklasse [14]

Binnenklimaatklasse	Voorbeelden	Jaargemiddelde dampdrukken in het gebouw $p_i$ [Pa]	Gemiddelde dampdrukverschil gedurende 4 weken ( $p_i - p_e$ ) [Pa]
I Gebouwen met weinig tot permanente vochtproductie	Stapelplaatsen voor droge goederen Kerken, toonzalen, garages, werkplaatsen	$1.100 \leq p_i < 1.165$	$< 159 - 10.\theta_e^*$
II Gebouwen met beperkte vochtproductie per m <sup>3</sup> en goede ventilatie	Volgens de norm geventileerde woningen Scholen, winkels Niet-geklimatiseerde kantoren Sportzalen en polyvalente hallen	$1.165 \leq p_i < 1.370$	$< 436 - 22.\theta_e^*$
III Gebouwen met een belangrijke vochtproductie per m <sup>3</sup> en matige tot voldoende ventilatie	Niet volgens de norm geventileerde woningen Ziekenhuizen en verzorgingstehuizen Verbruikszalen, restaurants, feestzalen, theaters Laaggeklimatiseerde gebouwen (RV $\leq 60\%$ )	$1.370 \leq p_i < 1.500$	$< 713 - 22.\theta_e^*$
IV Gebouwen met hoge vochtproductie	Hooggeklimatiseerde gebouwen (RV $\geq 60\%$ ) Hydrotherapieruimten Overdekte zwembaden Vochtige industriële ruimtes: wasserijen, brouwerijen, etc.	$p_i \geq 1500$ , beperkt tot 3.000 Pa	$< 713 - 22.\theta_e^*$

\*  $\theta_e$  is de buitentemperatuur

De vochtproductie in woningen wordt geleverd door de inwoners zelf en de activiteiten waarbij water gebruikt wordt (koken, wassen, ...). Elke persoon heeft een vochtproductie die ligt tussen 30 tot 50g/h, samen met de activiteiten die gebeuren is er een gemiddelde vochtproductie van 300g/h per dag [15]. Volgens het EPA, Amerikaans federaal milieuagentschap, en het WHO, de wereld gezondheidsorganisatie is er geen risico op vochtproblemen indien de relatieve vochtigheid schommelt tussen 40 en 60%.

Er wordt gesproken van een te droge lucht indien de relatieve vochtigheid onder de 40% zakt. Zeer droge lucht (<15% RV) treedt in België en Nederland zelden op doordat het daarvoor een zeer lange periode zeer koud moet zijn. [16, 17]. Symptomen bij de mens van een te lage luchtvochtigheid zijn: oog-, neus- en keelklachten; geïrriteerde luchtwegen en sterk geprikkelde slijmvliezen. Deze irritaties treden op ten gevolge van de grotere hoeveelheid stofdeeltjes die makkelijker in droge lucht rondzweven, te vinden zijn in de binnenlucht. Uit eerder onderzoek van Fang et al [18] is tevens gebleken dat vooral mensen die gevoelig zijn een slecht binnenmilieu klachten ondervinden. Indien er een te lage vochtigheid heerst worden fijnstof deeltjes meer verspreid in de lucht. Dit kan problemen veroorzaken in de luchtwegen. Ook ogen gaan rapper uitdrogen door een te lage relatieve vochtigheid. Vooral mensen die

contactlenzen dragen; last hebben van een droge huid; lijden astma of hooikoorts; etc. gaan hinder ondervinden van een te lage relatieve vochtigheid.

Deze te droge lucht kan ook schade veroorzaken aan houten materialen. In houtskeletbouw woningen en woningen waar veel houten meubelen aanwezig zijn is het dan ook belangrijk om aandacht te besteden aan de relatieve vochtigheidsgraad. Bij een relatieve vochtigheid lager dan 40% gaan houten materialen krimpen. Hierdoor ontstaan er scheuren in het hout. In structurele elementen beïnvloeden de scheuren de sterkte nadelig en kunnen in extreme gevallen de stabiliteit van het bouwwerk in gedrang brengen. Voor de meubels gaan deze scheuren vooral esthetisch van aard zijn.

Een te hoge relatieve vochtigheid (> 60%) is niet direct schadelijk voor de menselijke gezondheid. Ter hoogte van koudebruggen, waar een temperatuurschok optreedt, zal er condensatie kunnen optreden. Dit komt doordat de lucht in een ruimte rond een koud oppervlak afkoelt en dus minder vocht kan vasthouden dan in de rest van ruimte. De condensatie die ter hoogte van deze plaatsen optreedt veroorzaakt schimmelproblemen (>80%), afschilferen van verf en een kweek van huisstofmijt[15]. Door de hoge vochtigheid zullen de schimmels zich door de lucht kunnen verplaatsen. Dit kan leiden tot ademhalingsproblemen. Door koudebruggen te vermijden en gebruik te maken van de juiste afwerkingmaterialen kan condensvorming tegengegaan worden. Door voldoende te ventileren kan men de overtollige vocht uit de lucht filteren. Uit eerder onderzoek is tevens gebleken dat de emissie van vluchtige organische componenten uit afwerkingmaterialen toeneemt bij hogere temperaturen en hogere relatieve vochtigheden.

Om de relatieve luchtvochtigheid in een ruimte binnen de toelaatbare grenzen te houden kan men werken met luchtbevochtigers en luchtontvochtigers. Deze worden aangestuurd door een hygrostaat die indien er een bepaalde RV-grens overschreden wordt de des gewenste maatregelen gaat nemen. De functie van de hygrostaat kan overgenomen worden door een *open-source* sensor.

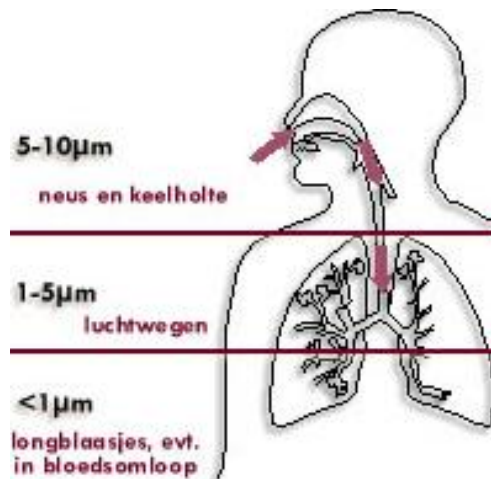
## 2.2 Fijnstof deeltjes (PM, *particle matter*)

Fijnstof (*Eng.: particle matter [PM]*) wordt beschouwd als één van de meest schadelijke verontreinigen die kunnen optreden in de lucht. Fijnstof bestaat uit verschillende deeltjes die elk een eigen grootte en samenstelling kunnen hebben. Men onderscheidt 2 soorten van fijnstof deeltjes: de natuurlijke deeltjes (planten, bodem,...) en de deeltjes die door menselijk handelen ontstaan (verbrandingsgassen,...). Algemeen gezien wordt fijnstof opgedeeld in 3 categorieën op basis van de grootte (aerodynamische diameter) van de deeltjes:

- PM<sub>0,1</sub>: Deeltjes kleiner dan 0,1 micrometer, zogenaamd ultrafijnstof;
- PM<sub>2,5</sub>: deeltjes kleiner dan 2,5 micrometer, aangeduid als fijnstof (bacteriën, schimmelsporen, tabaksrook, smog, houtrook,...);
- PM<sub>10</sub>: deeltjes kleiner dan 10 micrometer, bekend als grofstof (pollen, huisstofmijt, opwaaiende bodemstof,...);

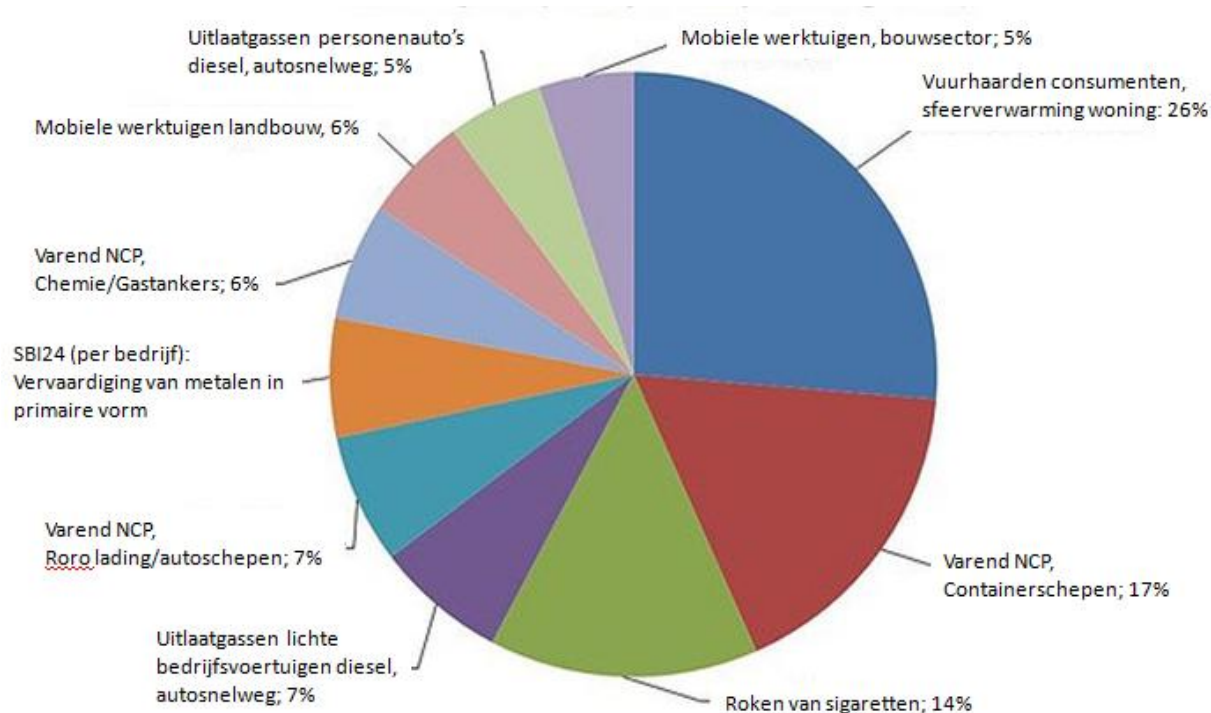
De grotere deeltjes oftewel de inhaleerbare fracties (5-10 µm) komen vooral in de neus- en keelholte terecht. De meeste van deze deeltjes worden door de menselijke reflex om

te niezen of te hoesten terug verwijderd uit het lichaam. Kleinere deeltjes (thoracale fractie,  $<5\mu\text{m}$ ) zijn schadelijker voor de menselijke gezondheid. Dit komt doordat deze deeltjes dieper in de longen kunnen indringen. Ultrafijn stof (respirabele fractie) komt terecht in de longblaasjes en zelfs in de bloedsomloop. Dit geeft een verhoogd risico op bloedklontering. Voor kinderen is fijnstof nog schadelijker doordat hun longen nog in ontwikkeling zijn. Door het inademen van te veel fijnstof lopen mensen een verhoogd risico op ademhalingsproblemen, astma en longkanker [19, 20].  $\text{PM}_{2,5}$  is voor 85% afkomstig van menselijke activiteit. Daarom dient men zeker aan deze bronnen voldoende aandacht te besteden en maatregelen nemen indien deze concentratie te hoog oploopt.



Figuur 5: Fijnstof in het menselijke lichaam [20]

Vroeger was het verkeer de hoofdoorzaak van de aanwezigheid van fijnstof in de lucht. Door de evolutie in de auto-industrie om milieuvriendelijkere auto's te produceren wordt deze bijdrage steeds kleiner waardoor andere menselijke handelen belangrijker worden. Uit Figuur 6 blijkt dat de voornaamste bijdrage aan fijnstof  $\text{PM}_{2,5}$  in woningen afkomstig is van de verbrandingen van hout in een open haard (26%) en roken (14%) [20]. Ook stofzuigen, koken en tapijten zijn een bron van fijnstof in woningen [7]. De bijdrage aan  $\text{PM}_{10,0}$  fijnstof deeltjes door de verbranding van hout en andere brandstoffen ligt tussen de 9% en 27% van de volledige hoeveelheid  $\text{PM}_{10,0}$  in de lucht. Voor  $\text{PM}_{2,5}$  ligt dit aandeel al tussen de 30% en 39%. Uit metingen blijkt dat er in woning waar gerookt wordt een verhoging van  $5,1\mu\text{g}/\text{m}^3$  aan  $\text{PM}_{2,5}$  en  $5,9\mu\text{g}/\text{m}^3$  aan  $\text{PM}_{10,0}$  optreedt. Dit is een verhoging van ongeveer 25% [21]. Hieruit blijkt dat in woningen waar gerookt wordt en/of een directe verbranding van hout of andere brandstoffen gebeurt zeker het fijnstof gehalte gemeten dient te worden [22]. Tevens zijn huishoudelijke activiteiten ook een oorzaak van fijnstof in de lucht. Door te stofzuigen, op te ruimen, et. wordt neergeslagen fijnstof de lucht in gebracht waardoor tijdelijk hoge concentraties fijn stof optreden.



Figuur 6: Emissies fijnstof (PM<sub>2,5</sub>) in 2013 (Emissieregistratie) [20]

Voor de binnenlucht zijn er in 2016 nog geen normen beschikbaar op vlak van fijnstof deeltjes. Voorlopig worden dezelfde normen van de buitenlucht gebruikt om de binnenlucht te beoordelen. Deze worden beschreven in richtlijn 2008/50/EG en zijn te vinden in Tabel 5. Tegen 2020 stelt men een indicatieve grenswaarde van 20µg/m<sup>3</sup> voor PM<sub>2,5</sub> voor. Dit is echter nog niet vertaald in een echte norm [23]. Voor de Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) zijn deze normen nog niet streng genoeg. Hun richtlijnen zijn weergegeven in Tabel 6. Indien de richtlijnen van het WHO gevolgd worden, zouden de longkankergevallen ten gevolge van fijnstof met 95% kunnen afnemen [6].

Tabel 5: grenswaarden PM<sub>10,0</sub> en PM<sub>2,5</sub> volgens Richtlijn 2008/50/EG [23]

	PM <sub>10,0</sub>		PM <sub>2,5</sub>
	24-uurgemiddelde	Jaargemiddelde	Jaargemiddelde
<b>Grenswaarde Max. overschrijding</b>	50µg/m <sup>3</sup> 35 keer per kalenderjaar	40µg/m <sup>3</sup> /	25µg/m <sup>3</sup> /

Tabel 6: grenswaarden PM<sub>10,0</sub> en PM<sub>2,5</sub> volgens de Wereldgezondheidsorganisatie [6]

	PM <sub>10,0</sub>		PM <sub>2,5</sub>	
	24-uurgemiddelde	Jaargemiddelde	24-uurgemiddelde	Jaargemiddelde
<b>Grenswaarde Max. overschrijding</b>	20 µg/m <sup>3</sup> 35 keer per kalenderjaar	50 µg/m <sup>3</sup> /	10 µg/m <sup>3</sup> 35 keer per kalenderjaar	25 µg/m <sup>3</sup> /

Op basis van de PM<sub>2,5</sub> waarde is er ook een onderverdeling van de luchtkwaliteit gemaakt. Deze wordt weergegeven in Tabel 7.

Tabel 7: Luchtkwaliteit op basis van de PM<sub>2,5</sub> en PM<sub>10</sub> waarde [20, 24]

Luchtkwaliteit	Concentratie PM <sub>2,5</sub>	Concentratie PM <sub>10</sub>
Slecht	>47 µg/m <sup>3</sup>	>67 µg/m <sup>3</sup>
Matig	33 – 47 µg/m <sup>3</sup>	48 – 67 µg/m <sup>3</sup>
Acceptabel	20 – 33 µg/m <sup>3</sup>	29 – 48 µg/m <sup>3</sup>
Goed	7 – 20 µg/m <sup>3</sup>	10 – 29 µg/m <sup>3</sup>
Zeer goed	<7 µg/m <sup>3</sup>	<10 µg/m <sup>3</sup>

PM<sub>10</sub> waarde bestaat voor ongeveer 70% uit PM<sub>2,5</sub>. Om een indicatie van PM<sub>10</sub> te hebben dient de PM<sub>2,5</sub> meting maal 1,43 gedaan te worden [21].

Doordat het monitoren van ultrafijn stof vrij duur is, is er voorlopig nog steeds geen norm die de grenswaarde van deze deeltjes oplegt. Dit terwijl deze deeltjes toch zeer schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid [6].

Fijnstof kan op verschillende manieren gekwantificeerd worden. In de meeste normen worden de grenswaarden opgelegd in µg/m<sup>3</sup>. Hierop is echter veel tegenkanting gekomen. Verschillende organisaties pleitten ervoor om de grenswaarden om te zetten in deeltjes/m<sup>3</sup> of deeltjes/liter. Dit wil men veranderen omdat de procentuele bijdrage massa van ultrafijn stof (PM<sub>0,1</sub>) en fijnstof (PM<sub>2,5</sub>) veel lager ligt dan deze van grofstof (PM<sub>10,0</sub>) terwijl de kleinere deeltjes veel schadelijker zijn voor de gezondheid. Een ander argument om dit te veranderen vind men in het meten van de stofdeeltjes. Het is namelijk makkelijker en goedkoper om deeltjes per liter te meten dan het gewicht per volume-eenheid [20, 22].

### 2.3 Koolstof dioxide (CO<sub>2</sub>)

Een derde belangrijke en handige parameter om de binnenluchtkwaliteit te beoordelen is de concentratie koolstofdioxide in de lucht. Zolang de CO<sub>2</sub> concentratie onder 5000ppm blijft is er geen risico voor de menselijke gezondheid. Dergelijke concentraties treden echter niet op onder normale omstandigheden. De stijging van de CO<sub>2</sub> concentratie is wel verbonden met de stijging aan andere verontreinigingen in de lucht die wel kunnen leiden tot verscheidene gezondheidsklachten.

CO<sub>2</sub> is een makkelijk meetbare stof doordat deze talrijk in de lucht aanwezig is. Een te hoge CO<sub>2</sub> concentratie is ook voor de mens makkelijk waarneembaar. Dit doordat uitademen ook gepaard gaat met andere gassen die bij een te hoge concentratie resulteren in een muffe geur. De meeste mensen hebben dan ook de natuurlijke reflex om ramen en deuren open te zetten om zo te ventileren. Hierdoor treden echter, zeker in de winter, grote ongewilde warmteverliezen op. Bij een ventilatiesysteem D (mechanische toe- en afvoer) kan de warmte van de afgevoerde lucht gerecupereerd worden door middel van een warmtewisselaar. Door daarbovenop gebruik te maken van een vraaggestuurd ventilatiesysteem (*Eng.: Demand controlled ventilation, DCV*) wordt er enkel geventileerd op de momenten dat het nodig is.

Om de binnenluchtkwaliteit te classificeren wordt gebruik gemaakt van IDA klasse, hierbij staat IDA voor indoor air. Deze classificatie is te vinden in Tabel 8. Hierbij heeft de buitenlucht een concentratie van 400ppm CO<sub>2</sub> deeltjes.[25, 26] In het geval dat er een IDA 1 heerst in een woning zal ongeveer 10% van de mensen dit toch nog als onaangenaam beschouwen. Bij een IDA 4 loopt dit percentage op tot 30% [27]. De keuze van klasse heeft ook rechtstreeks invloed op de ventilatie van de woning. Indien men een IDA 1 wilt hebben dien men ongeveer dubbel zoveel ventilatiedebiet te hebben dan als IDA 3 voldoende zou zijn. Doordat er veel meer luchtverversing is, is het zeer belangrijk dat het warmteterugwinningssysteem een hoog rendement heeft.

**Tabel 8: classificatie binnenluchtkwaliteit [25, 26]**

<b>Klasse</b>	<b>Beschrijving</b>	<b>grenswaarde</b>
IDA 1	Hoge binnenluchtkwaliteit	< 400ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau
IDA 2	Middelmatige binnenluchtkwaliteit	400 – 600ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau
IDA 3	Aanvaardbare binnenluchtkwaliteit	600 – 1000ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau
IDA 4	Lage binnenluchtkwaliteit	> 1000ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau

Aan de hand van deze klasse is de ventilatie-eis in België opgesteld. “Bij de dimensionering van een ventilatiesysteem mag het ontwerpdebiet niet kleiner zijn dan het minimum debiet overeenkomend met binnenluchtklasse IDA 3. Dit komt overeen met 22m<sup>3</sup>/h per persoon” [25].

In andere literatuur zien we dat de indeling ook met andere grenswaarden kan gebeuren. Hier wordt lucht onderverdeeld in 3 categorieën op basis van de CO<sub>2</sub> concentratie. Indien de concentratie zich tussen de 400ppm en 1000ppm bevindt spreekt men van goede binnenluchtkwaliteit en is er voldoende verluchting aanwezig. In Tabel 9. is te zien dat deze categorie nog eens opgedeeld wordt in 3 subcategorieën: uitstekende, goede en lucht van aanvaardbare kwaliteit. Indien de concentratie tussen 1000ppm en 1500ppm ligt spreekt men van een middelmatige luchtkwaliteit. In dit geval is concentratie CO<sub>2</sub> nog aanvaardbaar maar is het aan te raden om te beginnen met ventileren. Ligt de concentratie echter hoger dan 1500ppm dient men onmiddellijk maatregelen te nemen om de concentratie te laten dalen. Indien men dit niet doet kan men volgende gezondheidsklachten waarnemen: vermoeidheid, keelpijn, vermoeidheid, etc [5, 28]. Hierbij valt wel op te merken dat verschillende normen ook verschillende grenswaarde aangeven. De waarden die voortkomen uit de IDA classificatie zijn in de meeste landen (waaronder België) als grenswaarde aangenomen.

Tabel 9: grenswaarde CO<sub>2</sub> [ppm], vertaald uit [5]

CO <sub>2</sub> [ppm]	Luchtkwaliteit
2100	
2000	
1900	Slecht
1800	zwaar verontreinigde binnenlucht
1700	ventilatie nodig
1600	
1500	
1400	Middelmatig
1300	verontreinigde binnenlucht
1200	ventilatie aangeraden
1100	
1000	
900	Aanvaardbaar
800	
700	Goed
600	
500	Uitstekend
400	

In een stadsomgeving bedraagt de concentratie CO<sub>2</sub> in de buitenlucht ongeveer 450ppm (0,00045m<sup>3</sup>CO<sub>2</sub> /m<sup>3</sup> lucht). In een landelijke omgeving daalt deze tot 350ppm. Wanneer er voldoende ventilatie aanwezig is zal er dus altijd een zeer goede binnenluchtkwaliteit heersen op basis van de CO<sub>2</sub> concentratie. In Tabel 1 op pagina 17 is te zien dat menselijke activiteit de voornaamste bron van CO<sub>2</sub> is. CO<sub>2</sub> is namelijk de stof die mensen uitademen. De CO<sub>2</sub> productie van een persoon hangt af van verschillende factoren zoals de leeftijd, zuurstofgebruik, metabolisme, geslacht, gewicht, etc. Een persoon die lichte activiteiten uitvoert (koken, poetsen,...) heeft een CO<sub>2</sub> productie die ongeveer gelijk is aan 0,020m<sup>3</sup>CO<sub>2</sub>/h oftewel 20l/h. Naargelang de activiteit van personen toeneemt, stijgt ook de CO<sub>2</sub> productie [15, 29]. Indien men nu het ventilatievoud van een ruimte kent kan men het aantal aanwezige mensen in die ruimte bepalen. Dit gebeurt dan door de stijging af te wegen tegenover het ventilatiedebiet dat in de ruimte heerst.

Het is echter ook omgekeerd mogelijk. Aan de hand van de CO<sub>2</sub> concentratie kan het benodigde ventilatiedebiet te bepalen. Hiervoor dient men een inschatting te maken van de CO<sub>2</sub> productie in de ruimte; de gewenste concentratie in de ruimte (grenswaarde) en de omgevingsconcentratie (meestal de buitenlucht, 450ppm). Indien men de ruimte een tijd niet ventileert kan men uit de stijging aan CO<sub>2</sub> concentratie de CO<sub>2</sub> productie bepalen.

$$Q = \frac{CO_{2,productie}}{CO_{2,grenswaarde} - CO_{2,omgeving}} [L/s, m^3/h]$$

Vergelijking 3: Bepalen ventilatiedebiet aan de hand van CO<sub>2</sub> concentraties[29]

Indien het verloop van de CO<sub>2</sub> concentratie door heen de tijd gekend is kan door middel van de “evenwichts-CO<sub>2</sub>-analyse” of de “traceergas methode” het geleverde luchtdebiet bepaalt worden. Het is dankzij deze methode dat de efficiëntie van een

ventilatiesysteem gecontroleerd kan worden. Vaak wordt deze test uitgevoerd met behulp van de constante injectie van een traceergas, in dit geval dus CO<sub>2</sub>. Om nu het ventilatiedebiet (Q, [m<sup>3</sup>/h]) te bepalen dient het volume van de ruimte (V<sub>zone</sub> [m<sup>3</sup>]); de CO<sub>2</sub> concentratie (C<sub>2</sub> en C<sub>1</sub>); het traceergasdebiet (Q<sub>tracer</sub>, [m<sup>3</sup>/h]); de gemiddelde traceergasconcentratie (C, [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]), dit is de verhouding tussen het volume traceergas en de het volume van de ruimte en de tijd van de meting (t<sub>2</sub> en t<sub>1</sub> [h]). Aan de hand van Vergelijking 4 wordt dan het ventilatiedebiet bepaald. [30]

$$Q = Q_{tracer} \cdot \frac{1}{C_{gem}} - \frac{V_{zone}}{(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{C_2}{C_1}$$

**Vergelijking 4: Ventilatiedebiet met de evenwichts-CO<sub>2</sub> methode [30]**

Indien er nog andere bronnen van CO<sub>2</sub> aanwezig is het moeilijk om deze methode te gebruiken doordat de CO<sub>2</sub> productie gekend moet zijn.

Wanneer er geen CO<sub>2</sub> bron methode aanwezig is in de ruimte kan beter gebruik gemaakt worden van de “*tracer-gas-decay-methode*”. Bij deze methode wordt er een kleinere hoeveelheid traceergas homogeen in de ruimte gebracht. Daarna wordt er op bepaalde ogenblikken de concentratie gemeten. Aan de hand van Vergelijking 5 kan dan het gemiddelde ventilatievoud (A, [1/h]) bepaald worden. [30]

$$\bar{A} = \frac{\ln C_2 - \ln C_1}{(t_2 - t_1)}$$

**Vergelijking 5: gemiddelde ventilatievoud d.m.v. de tracer-gas-decay-methode [30]**

Dit ventilatievoud kan omgerekend worden naar een ventilatiedebiet (Q, [m<sup>3</sup>/h]) door middel van Vergelijking 6.

$$\bar{Q} = \bar{A} * V_{zone}$$

**Vergelijking 6: berekenen ventilatiedebiet [30]**

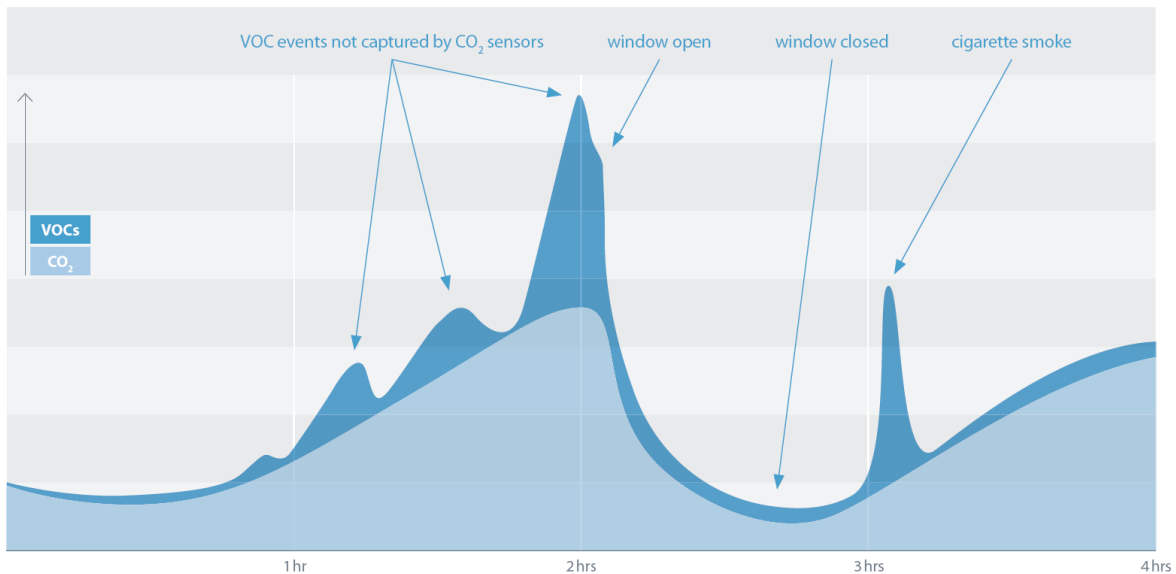
Vooraf in de winter is het belangrijk om de benodigde ventilatie correct te bepalen. Indien in deze periode er te veel geventileerd wordt treden er te veel ongewenste warmteverliezen op.

## 2.4 Vluchtige organische stoffen (VOS)

Naast CO<sub>2</sub> zijn personen ook een bron van vluchtige organische stoffen/componenten (VOS/VOC). Deze VOS zijn koolwaterstoffen (minimum 1 koolstofatoom) die zich op kamertemperatuur in de gasfase bevinden. Er bestaan tussen de 5.000 en 10.000 verschillende soorten VOS. Deze gassen komen tot 5 keer meer voor in woningen dan in de buitenlucht. Men onderscheidt verschillende oorzaken van VOS: VOS van biologische oorsprong, vooral veroorzaakt door planten, mensen (zweeten, metabolisme, etc.) en VOS door emissie uit objecten en bouwmaterialen. Deze emissie uit materialen kan jarenlang duren vooraleer de concentratie afneemt. Voor de VOS veroorzaakt door mensen is vraaggestuurde ventilatie de beste oplossing. De emissie uit bouwmaterialen treedt continu op waardoor enkel continue ventilatie een oplossing is om deze VOS uit de binnenlucht te filteren.



Aan de hand van de CO<sub>2</sub> concentratie kan er een inschatting gemaakt worden van de concentratie VOS in de binnenlucht. Zoals in Figuur 7 duidelijk wordt is dit op bepaalde ogenblikken geen goede inschatting. Bepaalde handelingen zoals poetsen, roken, pellen van vruchten, etc. geven een verhoging van de concentratie VOS in de binnenlucht [5]. Deze worden echter niet waargenomen door een CO<sub>2</sub> sensor. Met een VOS sensor is het enkel mogelijk om de VOS concentratie te bepalen. Het is echter niet mogelijk om te bepalen welke soorten VOS er op dat moment aanwezig. Daardoor is het zeer moeilijk te bepalen of het al dan niet om schadelijke VOS gaat. Hierdoor wordt tot op de dag van vandaag meestal beroep gedaan op CO<sub>2</sub> sensoren om een ventilatiesysteem aan te sturen [5, 31, 32, 33].



Figuur 7: VOS meting t.o.v. CO<sub>2</sub> meting [5]

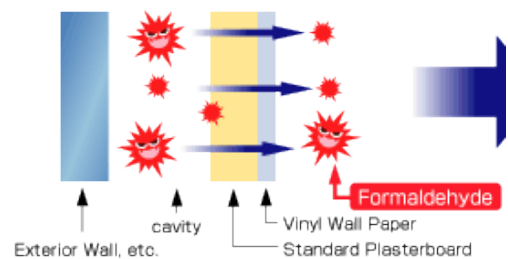
Waar CO<sub>2</sub> nog geen directe invloed had op de menselijke gezondheid kunnen vluchtige organische wel schade berokken indien deze in te hoge concentraties aanwezig zijn. Een te hoge concentratie aan VOS leiden tot duizeligheid, hoofdpijn, misselijkheid, etc. Men onderscheidt 6 verschillende typen van VOS [34]:

- aldehyde (zoals formaldehyde),
- alcoholen (ethanol,...),
- niet-aromatische koolwaterstof (propan, ...),
- aromatische koolwaterstoffen (benzeen, toluen,...),
- ketonen (aceton,...),
- halogene koolwaterstoffen,

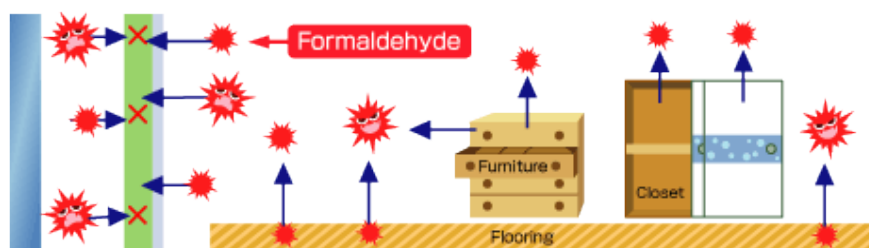
Over de chemische samenstelling en betekenis van deze gassen wordt niet verder ingegaan. Wel worden de bronnen en maatregelen van de belangrijkste typen besproken.

Voor gebouwen zijn de aldehyde, voornamelijk formaldehyde, een zeer belangrijke VOS te monitoren. Formaldehyde zijn vooral afkomstig door emissie uit bouwmaterialen, meubels en verf. De grootste emissie van formaldehyde gebeurt in isolatiematerialen. Meestal bevindt isolatie zich nog achter een wand. Zoals getoond in Figuur 8 laat de structuur van formaldehyde toe dat deze gassen emigreren door de wand naar de ruimte in de woning. Er zijn reeds enkele type gipskartonplaten die deze

migratie verhinderen. In Figuur 9 is het nadeel van deze platen te zien. Doordat migratie doorheen de platen niet mogelijk is geraakt de formaldehyde ook niet meer uit de ruimte. Om de concentratie binnen te grenswaarde te houden is er een permanente ventilatie nodig.

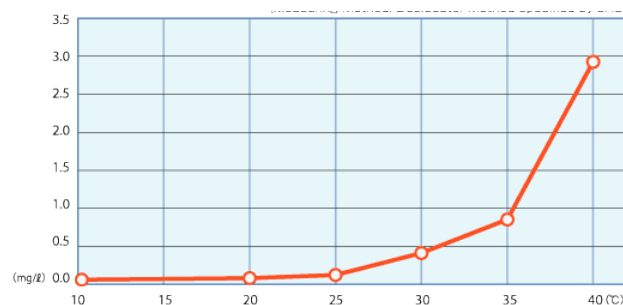


**Figuur 8: Formaldehyde transport door muren [9]**



**Figuur 9: Emissie van formaldehyde in een ruimte [9]**

Tevens is er aangetoond dat er bij een hogere temperatuur meer formaldehyde in de ruimte terechtkomt. Dit komt doordat de emissie van de formaldehyde makkelijker verloopt bij hogere temperatuur. De relatie temperatuur – concentratie formaldehyde wordt getoond in Figuur 10. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de temperatuur in een woning niet zo vaak boven de 25°C gaat oplopen en de invloed van de temperatuur op de emissie van formaldehyde in woningen gering gaat zijn.



**Figuur 10: relatie temperatuur – emissie van formaldehyde [9]**

De andere type VOS worden vooral veroorzaakt door de mens, het menselijk handelen en de gebruikte producten. In Tabel 1 op pagina 17 zijn de verschillende typen vermeld. Omdat deze VOS veroorzaakt door de mens voldoet het om hiervoor vraaggestuurde ventilatie te voorzien op het moment dat er personen aanwezig zijn in de ruimte.

De concentratie aan VOS kan uitgedrukt worden in verschillende eenheden. De meest voor de hand liggende eenheid is het totale gehalte aan vluchtige organische stoffen oftewel TVOS [ppb] . Het is ook mogelijk om het VOS gehalte uit te drukken in een CO<sub>2</sub>-equivalente waarde [ppm]. Dit is gedaan om de huidige CO<sub>2</sub> normering kunnen toe te passen op de VOS concentratie [5]. Vanaf het moment dat er normen voor VOS

gehalten gepubliceerd worden is deze eenheid niet meer nodig. Naast aantal deeltjes (ppm) worden VOS in richtwaarden vaak uitgedrukt in  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Echte normen rond VOS concentraties zijn op dit moment nog niet beschikbaar. Op 8 mei 2014 is er een koninklijk besluit uitgevaardigd waarin de drempelniveaus voor de emissie van VOS ten gevolge van bouwmaterialen worden opgelegd. Zo is er opgelegd dat de totale emissie van vluchtige organische stoffen (TVOS) 28 dagen na plaatsen van een materialen lager moet zijn dan  $1.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Voor formaldehyde is deze drempelwaarde  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [35].

Er is tevens een verband gevonden tussen de seizoenen en de concentratie aan VOS in woningen. In de winter werden er concentraties gemeten die tot 4 keer hoger konden zijn dan de concentraties in de zomer [36]. Dit komt doordat in de winter minder geventileerd wordt om warmteverliezen te vermijden.

## 2.5 Andere parameters

Andere parameters die de binnenluchtkwaliteit nadelig beïnvloeden zijn: koolstofmonoxide (CO), stikstofdioxide ( $\text{NO}_2$ ), sulfaatdioxide ( $\text{SO}_2$ ), radon (Rn) en ozon ( $\text{O}_3$ ). In Tabel 10 worden de maximale concentraties als richtwaarde weergegeven voor deze verontreinigingen. CO,  $\text{NO}_2$  en  $\text{SO}_2$  zijn afkomstig verbrandingen. CO uit verbranding komt enkel voor indien er een niet volledige verbranding van brandstoffen optreedt. Indien een niet volledige verbranding optreedt in een niet geventileerde ruimte is er een risico op koolstofmonoxide vergiftiging met mogelijk de dood tot gevolg. Daarnaast wordt CO veroorzaakt door het roken van tabak.

Radon is een radioactieve stof en is afkomstig uit de bodem onder een gebouw en in mindere maten uit de gebruikte materialen. De radonconcentratie is sterk afhankelijk van de geologische kenmerken van de ondergrond. Door barsten en spleten kan radon uit de ondergrond de woning binnendringen. Indien de woning niet goed geventileerd is krijgt men een ophoping van radon. Blootstelling aan een te hoge concentratie radon brengt een verhoogd risico op longkanker met zich mee [37].

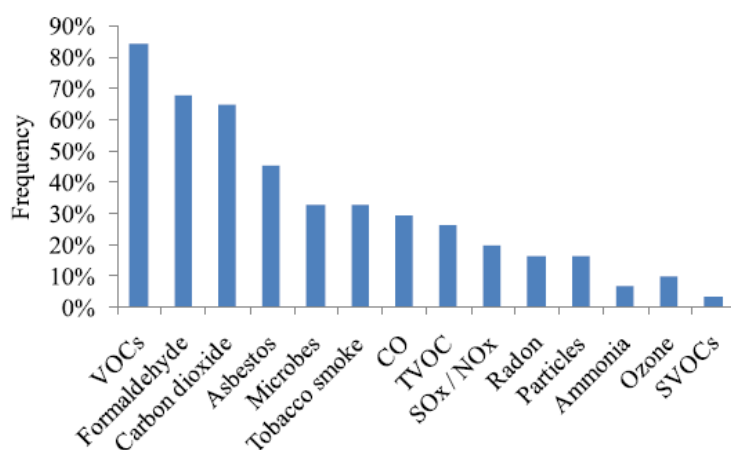
Ozon is niet direct afkomstig van een specifieke bron. Complexe chemische reacties in de atmosfeer zetten stikstofoxiden ( $\text{NO}_x$ ) en (niet-methaan) VOS onder invloed van UV-licht om in ozon. Ozon komt door invloed van wind in variërende concentraties voor in de lucht. Hoge ozon concentraties worden meestal gemeten aan de rand van grote steden en op grote hoogtes. In woningen zullen er zelden bronnen van ozon aanwezig zijn. Het grote probleem is de buitenlucht die teveel ozon kan bevatten. Bij ventileren komt de ozon dan terecht in de woning. Mogelijke gevolgen van een te hoog ozon gehalte op lange termijn zijn: aantasting van de luchtwegen; aantasting van menselijk afweersysteem en ontwikkeling van astma. [6]

Tabel 10: Richtwaarde verontreiniging [6]

Soort verontreiniging	Voorschrijver richtwaarde		
	WHO	Europese Unie	Opmerking
CO [ppm]	9	9	8 uur gemiddelde
SO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	20	125	24 uur gemiddelde
NO <sub>2</sub> [µg/m <sup>3</sup> ]	200	200	1 uur gemiddelde
Radon [Bq/m <sup>3</sup> ]	/	400	/
Ozon [µg/m <sup>3</sup> ]	100	120	8 uur gemiddelde

## 2.6 Maatgevende parameters

Zoals reeds aangetoond is in de vorige paragrafen zijn de vervuilingen sterk afhankelijk van het type ruimte en de aanwezigheid van personen. Het is dus niet nodig om in elke ruimte alle parameters te monitoren. In Figuur 11 wordt de frequentie van voorkomen van verschillende verontreinigingen in woningen weergegeven. Hier wordt nog eens duidelijk getoond dat VOS en CO<sub>2</sub> veel voorkomende vervuilingen zijn.



Figuur 11: Frequentie van voorkomende verontreinigingen [38]

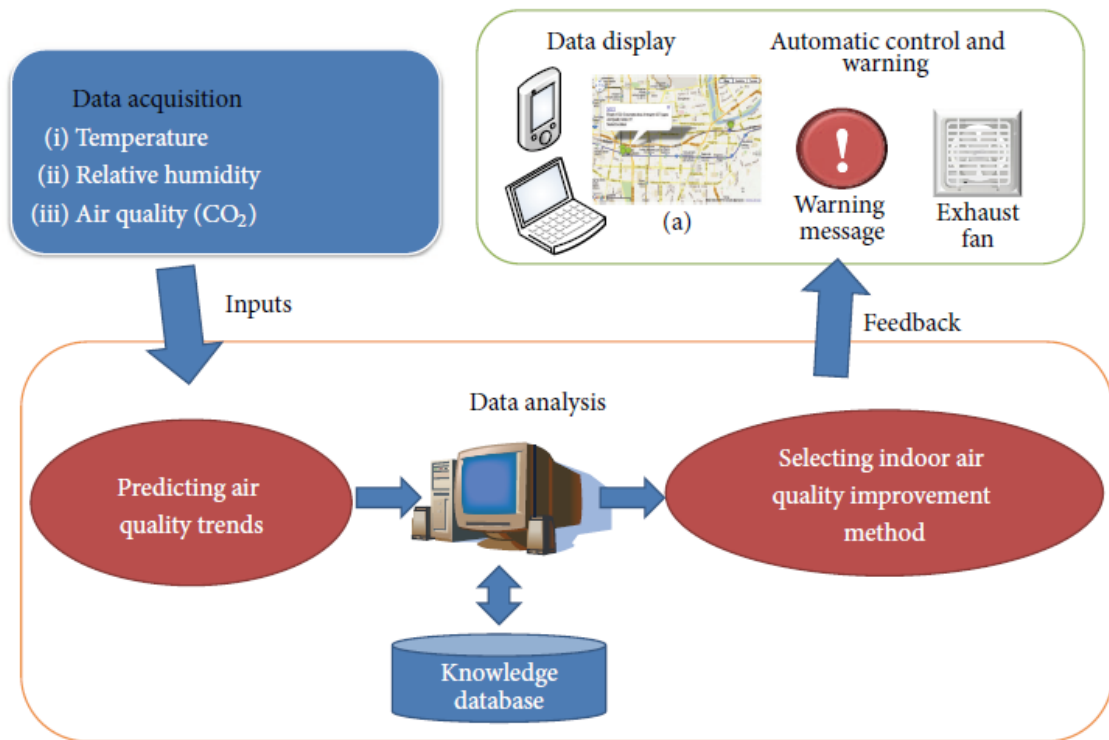
Uit Tabel 11 kan gehaald worden welke parameter maatgevend is voor een bepaald type ruimte van een woning

Tabel 11: Maatgevende parameter in woningen, vertaald uit [5]

Toepassing	Residentieel			
	Keuken	leefruimte	slaapkamer	badkamer
<b>Meest voorkomende bronnen</b>	gassen, vocht	adem, gassen	adem, gassen	vocht
Vochtsensor	voldoende	zwak	voldoende	uitstekend
CO <sub>2</sub> sensor	zwak	goed	goed	zwak
VOS sensor	uitstekend	uitstekend	uitstekend	voldoende

### 3 Open-source sensoren/dataloggers

Om de binnenluchtkwaliteit te bepalen wordt gebruik gemaakt van verschillende sensoren. In Figuur 12 wordt schematisch weergegeven hoe een controle van de binnenluchtkwaliteit gedaan wordt. Allereerst zal met sensoren de binnenluchtkwaliteit bepaald worden. Dit kan gedaan worden op basis van de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, etc. De bekomen data zal gebruikt worden om te controleren welke acties er ondernomen dienen te worden om de binnenluchtkwaliteit te verbeteren. Enkele mogelijke acties zijn een waarschuwing versturen (GSM, alarm,...) of de ventilatie automatisch laten werken. Indien men nu ook gebruik maakt van dataopslag kan men in een later stadium permanente acties ondernemen op basis van deze gegevens. Aan de hand van deze data is het ook mogelijk om eventuele gezondheidklachten te verklaren [39].



Figuur 12: meten en verwerken data IAQ-sensor [39]

De sensoren die worden gebruikt om deze data te verzamelen zijn meestal vrij prijzig. In dit hoofdstuk gaat onderzocht worden wat de kostprijs van een zelfgemaakte sensor is indien deze werkt op basis van een *open-source* platform. Bij het gebruik van een van deze platformen wordt zowel software als hardware design ter beschikking gesteld om vrij te gebruiken. De bedoeling van deze platformen is om feedback te krijgen van de gebruikers en zo verbeteringen aan te brengen [40]. De sensoren die gemaakt gedurende dit onderzoek zijn allemaal gebaseerd op tutorials die door OSBSS, *open source building science sensors*, ter beschikking gesteld zijn [41]. Tevens wordt er door middel van een kalibratiemeting bepaald of de sensoren nog bijkomende kalibraties nodig hebben om nauwkeurige metingen te geven.

Het doel van OSBSS is om een netwerk uit te bouwen van goedkope, *open-source* sensors om op lange termijn data te verzamelen over binnenluchtkwaliteit in gebouwen. Zij stellen de ontwikkeling, kalibratie en testresultaten van sensors ter beschikking voor onderzoekers over de hele wereld. Op deze manier willen zij een beter beeld krijgen over de verschillen in binnenluchtkwaliteit over de hele wereld.

### 3.1 Gebruikte *open-source* platformen

Om de sensoren te realiseren werd in het begin gekozen om met het Arduino platform te werken. Tijdens de realisatie van deze sensorsystemen kwamen enkele nadelen van deze manier aan het licht. Daarom is er gekozen om tevens gebruik te maken van het Particle platform. In de volgende paragrafen zullen de voor- en nadelen van de 2 voornoemde platformen toegelicht worden.

#### 3.1.1 Arduino

Het eerste platform dat gebruikt is om dataloggers te realiseren was Arduino. Arduino is een *open-source* platform dat werkt met een microcontroller. Een microcontroller is het ‘brein’ van een Arduino bord. Het is deze microcontroller die ervoor zorgt dat alle inkomende en uitgaande signalen juist verwerkt worden. Signalen kunnen zowel digitaal als analoog zijn. Dit zal afhangen van het type sensor dat gebruikt wordt.[42]

Dankzij systemen als Arduino is het zelf samenstellen van gestuurde apparaten zeer toegankelijk geworden voor het grote publiek. Door de inputsignalen die afkomstig zijn van sensoren gaat de microcontroller bepalen welke acties ondernomen worden. De outputsignalen worden dan gebruikt om andere componenten aan te sturen. Zo kan een relais aangestuurd worden om een ventilatiesysteem van stroom te voorzien.

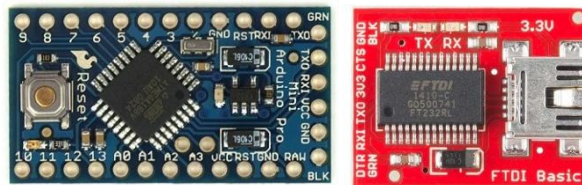
Er bestaan verschillende uitvoeringen van Arduino. De meest bekende, en momenteel meest gebruikt is de Arduino Uno (Figuur 13). Op dit bord zijn er 14 digitale poorten en 6 analoge. Op dit bord zit tevens een USB aansluiting en stroomvoorziening. De afmetingen van een Arduino Uno zijn 70mmx53mm. Deze afmetingen zijn vrij groot om nog compacte objecten mee te maken.



Figuur 13: Arduino Uno

Een ander bord is de Arduino Pro Mini. Dit is een kleine versie van een Arduino bord. De afmetingen hiervan zijn 35mmx18mm. Het grote voordeel is dat een Arduino Pro Mini op een *breadboard* geplaatst kan worden. Dit resulteert in compactere objecten. Er

zijn wel enkele nadelen verbonden aan dit type bord. Ten opzicht van de Arduino Uno heeft de Pro Mini slechts 4 analoge poorten in plaats van 6. Op dit bord zitten ook nog geen headers, headers zijn pinnen die het mogelijk maken om draden op aansluiten. Deze dienen zelf gesoldeerd te worden op het bord. Er is ook geen stroomvoorziening en USB aansluiting meer voorzien op het bord. De stroomvoorziening dient door middel van extra component op een *breadboard* geplaatst te worden. Om verbinding te maken met een computer wordt er gebruik gemaakt te worden van een FTDI (USB component), deze is te zien aan de rechterkant in Figuur 14.



**Figuur 14: Links: Arduino Pro Mini; Rechts: FTDI (USB component)**

Naast deze 2 borden zijn er nog andere borden beschikbaar met elk hun eigen specificaties. Deze zijn niet gebruikt geworden tijdens het onderzoek en worden dus niet verder aangehaald.

Arduino heeft ook twee grote nadelen. Geen enkel van hun borden bezit een interne klok. Om de tijd bij te kunnen houden dient er gebruik gemaakt te worden van een *Real Time Clock* (RTC). De RTC die gebruikt is bij elke datalogger is te vinden in Figuur 15. De tijd en datum kunnen dan achteraf via het Arduino bord geprogrammeerd worden. Het ontbreken van een interne RTC is ook de oorzaak van een ander nadeel. Indien verschillende dataloggers gemaakt worden met elk hun eigen RTC is het onmogelijk om de dataloggers op exact dezelfde te laten meten. Voor de metingen van de binnenluchtkwaliteit is dit nog geen al te groot nadeel. Bij andere metingen kan dit wel een oorzaak van fouten zijn. De code om de RTC in te stellen is te vinden op de CD in Bijlage A1: CD



**Figuur 15: Real Time Clock DS3234**

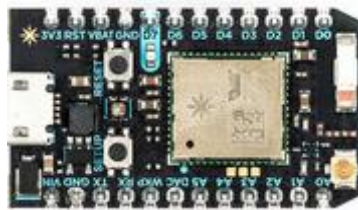
Het tweede nadeel is dat een Arduino bord geen standaard component heeft dat een wifiverbinding mogelijk maakt. Arduino heeft wel een wifibord ontwikkeld om verbinding te maken met het internet. Dit brengt echter een meerkost van 39 euro met zich mee. Later in dit hoofdstuk zal blijken dat deze meerkost niet opweegt tegen de besparing die gerealiseerd wordt door een Photon van het Particle platform te gebruiken [43]. Doordat er geen data via het internet gedeeld kan worden zal men altijd ter plaatse moeten gaan om de data verzamelen. De data zal altijd opgeslagen op een lokaal geheugen. Indien men de data wel kon delen via het internet kon er in real-time gekeken worden of er maatregelen nodig zijn zonder behulp van extra LEDs of dergelijke. Doordat men de data niet altijd kan bekijken is het ook niet mogelijk om te beoordelen of de sensor goed werkt tijdens de metingen.

Indien u meer wenst te weten over de werking van een Arduino raad ik u aan om “Exploring Arduino” van Jeremy Blum te lezen.

### 3.1.2 Particle

Een tweede *open-source* platform dat gebruikt is Particle. Het handige aan Particle is dat enkele nadelen van een Arduino opgelost zijn. Een Particle bord bevat een netwerkkaart die het mogelijk maakt om data via een wifinetwerk te versturen. Hierdoor kan men in real-time de data controleren. Indien er meerdere dataloggers op hetzelfde netwerk gebruikt worden zullen alle metingen op hetzelfde moment gebeuren. Dit is een groot voordeel tegenover Arduino waar dit, zoals eerder uitgelegd, niet altijd het geval is.

Particle heeft 2 type borden ontwikkeld: de Photon en de Elecron. De enige extra functie van een Elecron is de mogelijkheid om verbinding te maken met een 2G/3G netwerk. In de meeste woningen is tegenwoordig wifi aanwezig waardoor in deze thesis enkel gebruik gemaakt is van een Photon. In Figuur 16 wordt getoond hoe een foton eruit ziet. Een Photon is het meest vergelijkbaar met een Arduino Pro Mini. Een voordeel van de Photon is de aanwezigheid van een stroom- en USB verbinding op het toestel zelf. Dit maakt dat er geen extra componenten aangekocht moeten worden. Er zijn wel minder digitale poorten beschikbaar op de Photon. Hierdoor kan het soms zijn dat dataloggers met verschillende sensoren niet te realiseren zijn met dit type bord.



Figuur 16: Photon van Particle

Er zijn aan Particle ook nadelen verbonden. Indien het wifinetwerk wegvalt zal er geen data verzameld worden. Om de data te verzamelen op het moment dat de wifi wegvalt zal men dus ook hier een extra lokaal geheugen moeten voorzien. Ook dient men via andere websites, Ubidots bijvoorbeeld, werken om een grafische voorstelling van de gemeten data te genereren. De tools die door Particle hiervoor ter beschikking worden gesteld zijn hier niet volledig geschikt voor. Door gebruiken te maken van Ubidots is het mogelijk om bij overschrijding van zelfgekozen grenzen een waarschuwing te versturen via sms.

## 3.2 Gerealiseerde dataloggers

Aan de hand van *tutorials* die afkomstig zijn van OSBSS zijn 3 verschillende dataloggers gemaakt. Tijdens de meting worden alle metingen opgeslagen op een lokale micro SD-kaart. Dit is zoals eerder al vermeldt is een groot nadeel. Om de tijd van de metingen te kennen werd er gebruik gemaakt van een externe klok.

Er dient opgemerkt te worden dat de prijzen die vermeld worden in volgende paragrafen onderhevig zijn aan de tijds waarde van geld en mogelijk veranderende

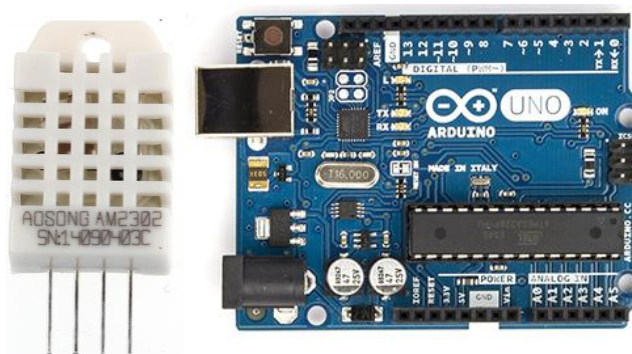


wisselkoersen. De prijs ligt iets hoger doordat ervan uitgegaan werd dat draden en weerstanden aangekocht werden in een pakket. Indien deze los gekocht zouden worden daalt de prijs.

### 3.2.1 Temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger<sup>1</sup>

#### Sensor

Om de temperatuur en relatieve luchtvochtigheid te kunnen monitoren werd er een datalogger gerealiseerd die werkt met DHT22 sensor (andere naam: AM2302) (zie Figuur 17, links). Het voordeel van deze sensor is dat zowel de temperatuur en relatieve vochtigheid gemeten worden en via een digitaal signaal doorgestuurd worden. Deze datalogger is gerealiseerd met een Arduino Uno board. Er is gekozen voor een Arduino Uno (Figuur 17, rechts) omdat hierbij niet meer gesoldeerd dient te worden.



Figuur 17: links: DHT22 sensor; rechts: Arduino uno

De eigenschappen van de DHT22 sensor worden weergegeven in Tabel 12. Vooral de nauwkeurigheid is belangrijk om de meetresultaten correct te interpreteren.

Tabel 12: eigenschappen waarden DHT22 sensor[44]

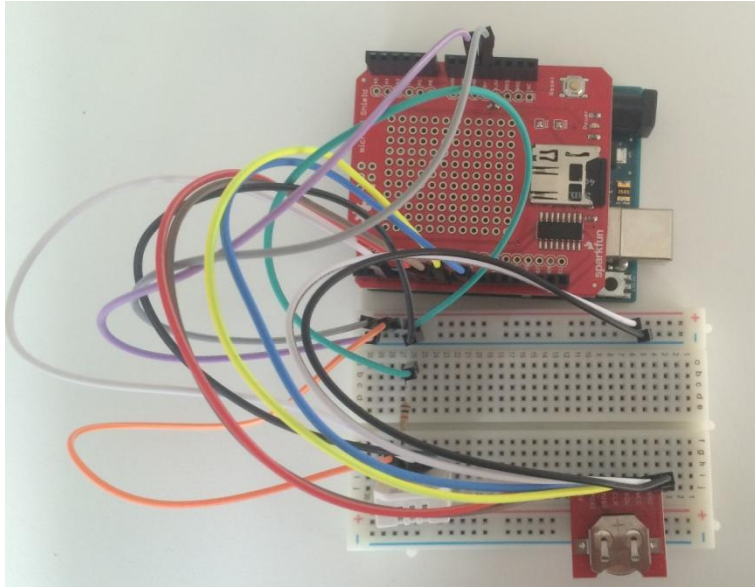
<b>Eigenschappen DHT22<sup>2</sup></b>	
Werkgebied temperatuur	-40 ~ +80°C
Nauwkeurigheid temperatuur	±0,5°C
Resolutie temperatuur	0,1°C
Werkgebied relatieve vochtigheid	0 ~ 100%RV
Nauwkeurigheid relatieve vochtigheid	±2%RV
Resolutie relatieve luchtvochtigheid	0,1%
Resolutie relatieve vochtigheid	0,1%RV

Om efficiënt te werken wordt een datalogger best met zo weinig mogelijk componenten en kabels gemaakt. Dit verkleint de kans op fouten en mogelijke storingen gedurende een meting. Sparkfun® heeft een *microSD shield* ontwikkeld dat perfect op een Arduino Uno past om data op te slaan. In Figuur 18 staat getekend hoe alle componenten dienen aangesloten te worden op de *microSD shield*. Voor deze datalogger is er enkel nog een externe RTC nodig om de datum en tijd van de metingen te kennen.

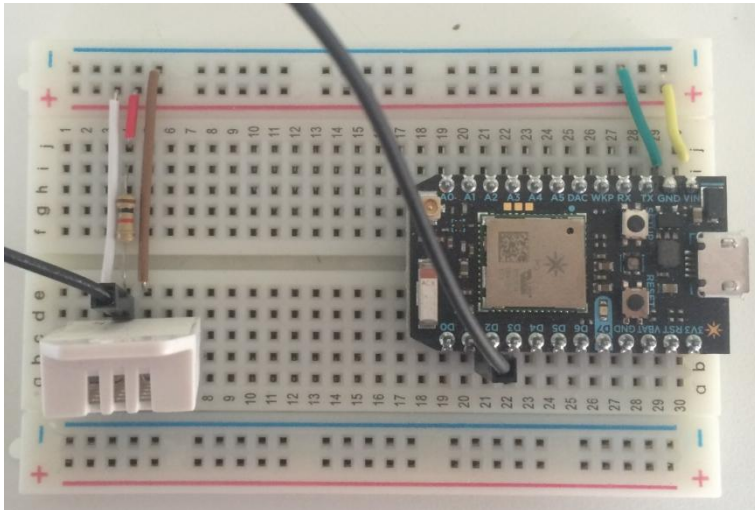
<sup>1</sup> De code om deze datalogger te realiseren met een Arduino Uno is te vinden op de CD die te vinden is in Bijlage A1: CD

<sup>2</sup> Meer informatie over deze sensor kan in de datasheet gevonden worden [43].





**Figuur 19: gerealiseerde temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger**



**Figuur 20: temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger op basis van een Photon**

## Kostprijs

Om de kostprijs van de datalogger te bepalen zijn alle benodigde componenten opgelijst in Tabel 13. Doordat niet elke soort *open-source* hardware dezelfde componenten nodig heeft zijn er prijsverschillen, deze zijn onderaan Tabel 13 te vinden. Met de *open-source* componenten wordt het bord en eventuele extra benodigdheden van het gekozen platform bedoeld. Met de elektronica componenten worden de onderdelen bedoeld die nodig zijn om de datalogger optimaal te laten werken. Onder extra componenten verstaan we de draden, weerstanden, etc.

Tabel 13: Kostprijs temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger

Component	Arduino Uno [€]	Arduino Pro Mini [€]	Photon [€]	URL
<b>Open-source componenten</b>				
<i>open-source</i> hardware	21,66	8,78	16,55	
FTDI Basic Breakout 3.3V	/	13,19	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9873">https://www.sparkfun.com/products/9873</a>
<b>Elektronica componenten</b>				
T&RV sensor: DHT22	8,80	8,80	8,80	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10167">https://www.sparkfun.com/products/10167</a>
DeadOn RTC DS3234 Breakout	17,60	17,60	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10160">https://www.sparkfun.com/products/10160</a>
CR1225 Coin cell battery	1,72	1,72	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/337">https://www.sparkfun.com/products/337</a>
SparkFun microSD Shield	13,22	/	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12761">https://www.sparkfun.com/products/12761</a>
MicroSD Transflash breakout	/	8,78	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/544">https://www.sparkfun.com/products/544</a>
microSD memory card 4GB	7,02	7,02	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/102">http://www.adafruit.com/products/102</a>
<b>Extra componenten</b>				
Breadboard	3,97	3,97	3,97	<a href="http://www.adafruit.com/products/1609">http://www.adafruit.com/products/1609</a>
Transistor - NPN	/	1,72	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/756">http://www.adafruit.com/products/756</a>
LED Basic Green 3mm	/	0,31	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9650">https://www.sparkfun.com/products/9650</a>
Wall Adapter power supply 5V DC	5,25	5,25	5,25	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12889">https://www.sparkfun.com/products/12889</a>
DC Barrel jack adapter	0,84	0,84	0,84	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10811">https://www.sparkfun.com/products/10811</a>
Headers	/	1,32	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/116">https://www.sparkfun.com/products/116</a>
Jumper wire kit	6,13	6,13	6,13	<a href="https://www.sparkfun.com/products/124">https://www.sparkfun.com/products/124</a>
resistor kit	7,01	7,01	7,01	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10969">https://www.sparkfun.com/products/10969</a>
<b>Totale kostprijs<sup>3</sup></b>	<b>93,22</b>	<b>92,44</b>	<b>48,55</b>	

<sup>3</sup> Prijzen incl. btw, excl. evt. verzendingskosten en taksen

Voor de kostprijs van de datalogger maakt het niet uit of er gebruik gemaakt wordt van een Arduino Uno of Pro Mini. Dit komt doordat de componenten die verschillen voor elke datalogger ongeveer overeenkomen in prijs. Indien er gebruik gemaakt wordt van een Photon zijn er bepaalde componenten niet nodig. Het is dus logisch dat de prijs voor een datalogger op basis van een Photon het laagst gaat zijn, namelijk 48,55 euro. Voor de temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger de Photon-datalogger bijna de helft goedkoper is.

## Kalibratiemeting

Om na te gaan of de *open-source* temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger nauwkeurig werkt werd er een kalibratiemeting uitgevoerd. Hierbij worden de metingen van de *open-source* datalogger en van een gekalibreerde *ready-made* datalogger tegen elkaar afgewogen. De eigenschappen van de reeds gekalibreerde datalogger, de DVM171THD, die gebruikt is worden weergegeven in Tabel 14 [45]. In Figuur 21 wordt de datalogger zelf voorgesteld.

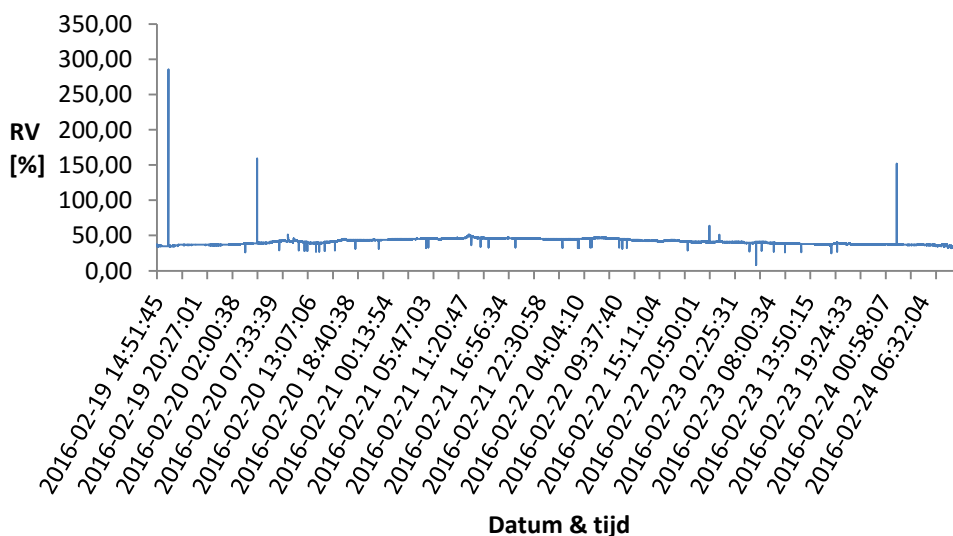
Tabel 14: Eigenschappen DVM171THD [45]

Eigenschappen DVM171THD	
Werkgebied temperatuur	-40 ~ +80°C
Nauwkeurigheid temperatuur	<±1°C
Resolutie temperatuur	0,1°C
Werkgebied relatieve vochtigheid	0 ~100%RV
Nauwkeurigheid relatieve vochtigheid	±3,0%RV
Resolutie relatieve vochtigheid	0,1%RV



Figuur 21: DVM171THD [44]

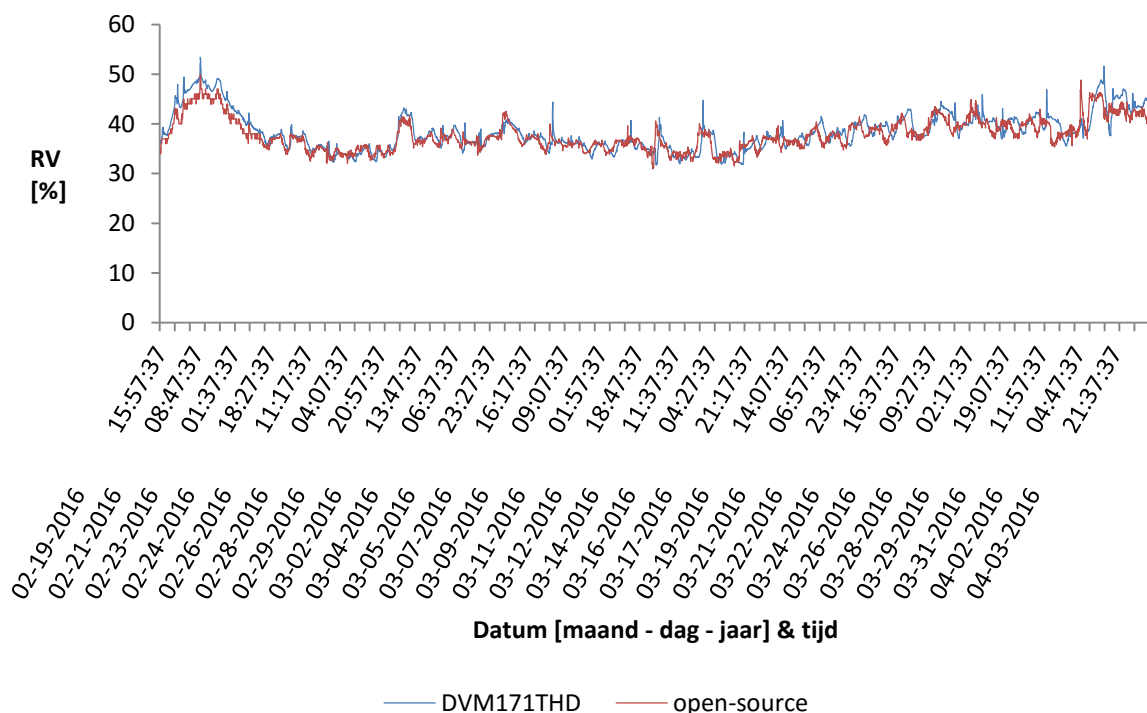
In Figuur 22 wordt de gemeten relatieve vochtigheid getoond die gemeten is door de *open-source* datalogger (DHT22 sensor). Hierop is dadelijk te zien dat de sensor soms uitschieters tot wel 280%. De relatieve vochtigheid kan echter niet hoger zijn dan 100%. Deze fysisch onmogelijke resultaten komen door de snelheid van dataverwerking. Er was onvoldoende tijd om alle data te verwerken waardoor sommige signalen niet correct werden doorgestuurd. In verdere metingen (zie hoofdstuk 4) zijn er geen uitschieters meer te vinden.



Figuur 22: Meting *open-source* datalogger DHT22

Om deze data toch te gebruiken werden de uitschieters uitgefilterd. Deze datalogger meet om de 10 seconden de relatieve vochtigheid. Indien er meer dan 10% verschil met een vorige meting (10" daarvoor) werd dit resultaat geschrapt. In de plaats werd dan aangenomen dat de relatieve vochtigheid van de vorige meting constant was gebleven. Deze aanname is te verantwoorden door de korte tijdsperiode tussen 2 metingen.

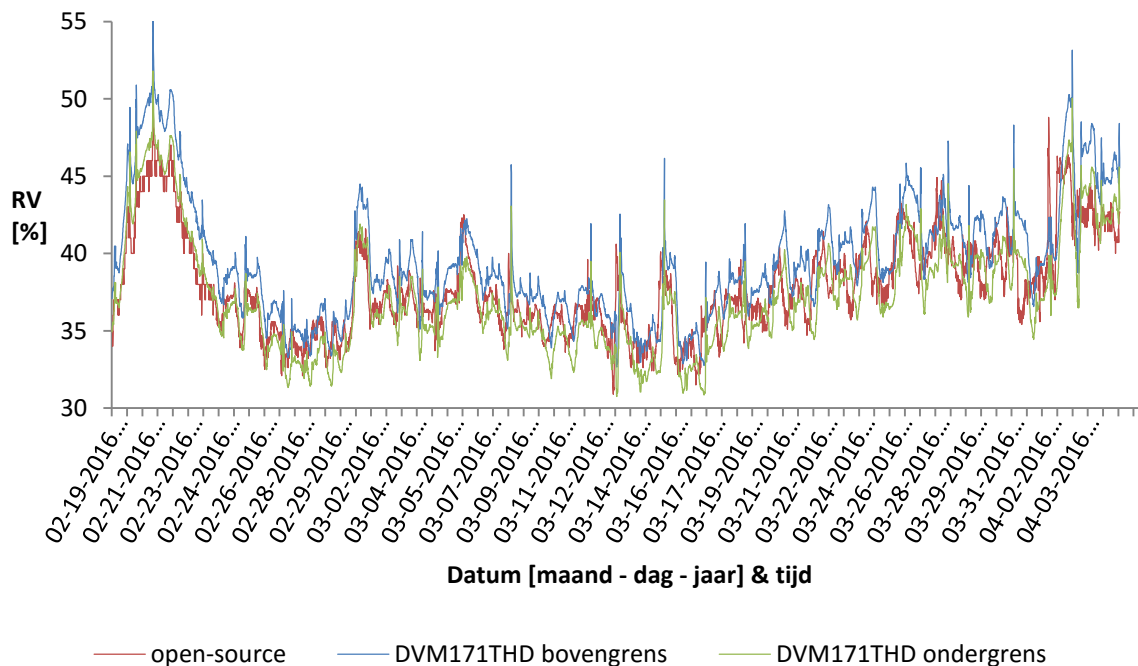
In Figuur 23 wordt de meting weergegeven zonder de uitschieters. Er is duidelijk te zien dat beide dataloggers hetzelfde verloop kennen. Doordat er 2 verschillende type sensoren gebruikt zijn is het logisch dat er een verschil tussen de 2 metingen gaat zijn.



**Figuur 23: Kalibratiemeting temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger**

Omdat er op de gekalibreerde sensor een onnauwkeurigheid van 3% zit wordt de onder- en bovengrens vergeleken met de meting van de DHT22 sensor. Deze grenzen worden berekend door 3% bij te tellen en af te trekken. In ongeveer 50% van de metingen ligt de relatieve vochtigheid gemeten door de DHT22 binnen de grenzen van DMV171THD. In de andere gevallen is er een kleine afwijking.

In het globale verloop zijn er echter weinig grote afwijkingen te zien. Bij de afwijkingen die er zijn meet de DHT22 meestal lagere vochtigheden dan de DMV171THD. Dit kan verklaard worden door het plaatsverschil van de dataloggers in de ruimte. Door lokale vochtproductie of toevallige tocht in de ruimte kan de vochtigheid in een bepaalde zone verlaagd of verhoogd en meten beide dataloggers andere waarden.



Figuur 24: Onder- en bovengrens DVM171THD t.o.v. DHT22

Uit deze kalibratiemeting kan besloten worden dat de *open-source* datalogger op basis van de DHT22 geen verdere kalibratie nodig heeft voor toepassingen binnen woningen. Indien de vochtigheid heel nauwkeurig gekend moet zijn (labo's en dergelijke) dient er wel een kalibratie te gebeuren.

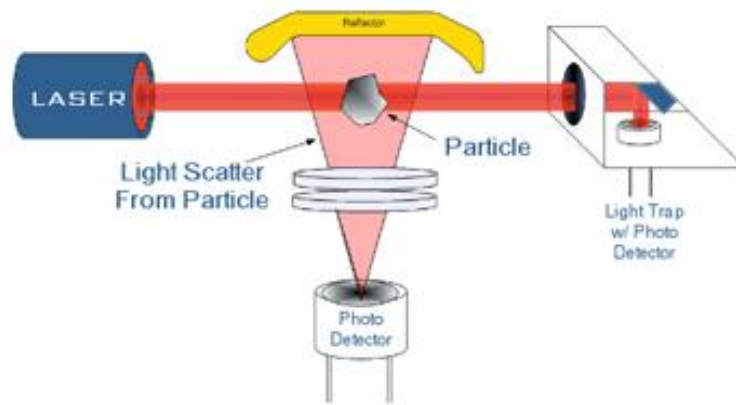
### 3.2.2 Fijnstof (PM<sub>2,5</sub>) datalogger<sup>4</sup>

#### Sensor

Het meten van fijnstof kan op twee verschillende manieren gebeuren. Een eerste manier is de Massa Concentratie Methode (MCM). In dit geval zuigt een toestel lucht in door een filter. Achteraf wordt dan de massa gewogen die in de filter achterblijft. Het grote nadeel van deze methode is dat de meting nooit direct plaatsvindt maar altijd meerdere uren in beslag neemt. Deze meting wordt dan ook uitsluitend gebruikt om dag- of jaargemiddelden te bepalen. In norm EN12341 wordt de meetwijze voor buitenlucht opgelegd. Deze methode is tevens een heel dure methode. De apparatuur kan tot wel 30.000 euro kosten en elke meting tot 1.500 euro.

De tweede methode is de Relatieve Concentratie methode (RCM). Hierbij worden het aantal deeltjes geteld die in de lucht aanwezig zijn. De werking van deze sensor is weergegeven in Figuur 25. De lucht rond de sensor wordt door een weerstand opgewarmd waarna deze met een ventilator of door de natuurlijke convectie van warme lucht door de meetkamer heen wordt gestuurd. In de meetkamer bevindt zich een laserstraal, indien deze onderbroken wordt door een deeltje wordt de straal geabsorbeerd en verstrooid in verschillende richtingen. De richtingen en mate waarin deze verstrooiing gebeurt zijn afhankelijk van de grootte van de deeltje. Hierdoor kan op een eenvoudige manier het aantal deeltjes en hun grootte bepaald worden. Dit fenomeen staat ook bekend als *light scattering* [20].

<sup>4</sup> De code om deze datalogger te realiseren met een Arduino Pro Mini is te vinden op de CD die te bijgevoegd is in Bijlage A1: CD

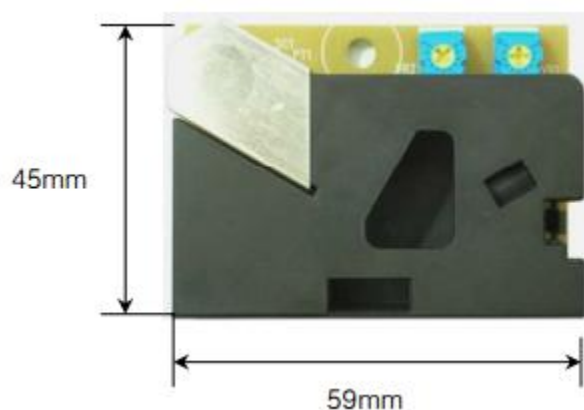


**Figuur 25: Werking stofsensor [20]**

Bij dit soort metingen dient er enkel nog een conversiefactor (K-factor) bepaald te worden om het aantal deeltjes om te rekenen naar het gewicht per volume-eenheid. Het grootste voordeel van deze meting is dat ze direct gebeurt [20]. Om deze conversie uit te voeren doet de fabrikant van deze soort sensor meestal een ijkingstest. De conversiefactor zal dus deels afhankelijk zijn van de gekozen sensor. Bij het kiezen van de sensor is het heel belangrijk om er zeker van te zijn dat er in de datafiche gegevens voor de conversie beschikbaar zijn. Indien dit niet geval is dien je zelf een ijkingstest uit te voeren volgens de Massa Concentratie methode.

Tevens is het via de RCM gemakkelijker om de fijnstof uitstoot van bepaalde bronnen vast te stellen. Via de MCM methode kan er enkel de totale fijnstof productie gedurende een bepaalde tijd gemeten worden. Om de uitstoot van een bepaalde bron te bepalen is het dan zeer belangrijk om geen andere bronnen te hebben. In een woning zijn er tal van fijnstof bronnen. Door de activiteiten die uitgevoerd worden bij te houden is het mogelijk om te kijken wat de fijnstof productie was gedurende het uitvoeren van die bepaalde taak.

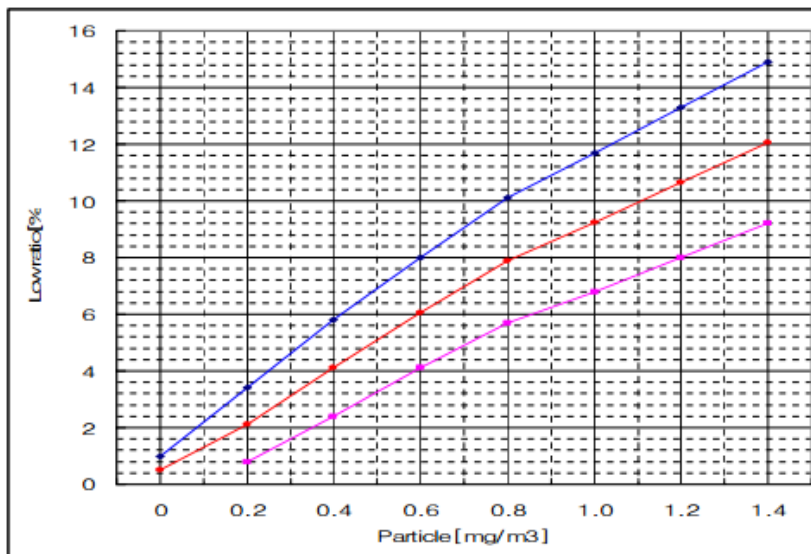
Om de fijnstof deeltjes in een woning te kunnen monitoren werd geopteerd om de fijnstof fractie ( $<2,5\mu\text{m}$ ) te monitoren aangezien deze als meest schadelijk voor de gezondheid worden aanzien. De stofsensor, een Samyoung DMS501a (Figuur 26), die gebruikt is werkt op basis van de Relatieve Concentratie Methode. De oorspronkelijk output zal dus gegeven zijn in aantal deeltjes per volume-eenheid. Aan de hand van de datasheets is er een conversieformule opgesteld om de totale massa fijnstof deeltjes per volume-eenheid te bepalen.



**Figuur 26: Stofsensor Samyoung DMS501a**



Elke keer als er deeltjes gemeten worden zal de sensor een laag signaal versturen. Door de totale tijd van een laag signaal te meten gedurende 1 meetperiode kan de 'lage signaal ratio' bepaald worden. Aan de hand van deze waarde kan dan een formule opgesteld worden om het aantal deeltjes per volume-eenheid of gewicht per volume-eenheid te kennen. Deze formule is opgesteld aan de hand van de gemiddelde waarde die uit kalibratiemetingen door het bedrijf zelf naar voor zijn gekomen. Figuur 27 (gewicht deeltjes per volume-eenheid) en Figuur 28 (aantal deeltjes per volume-eenheid) geven de grafieken van deze meting weer. De gemiddelde waarden worden weergegeven door de rode lijn. De bovenste en onderste limiet wordt weergegeven door de respectievelijk blauwe en paarse lijn.

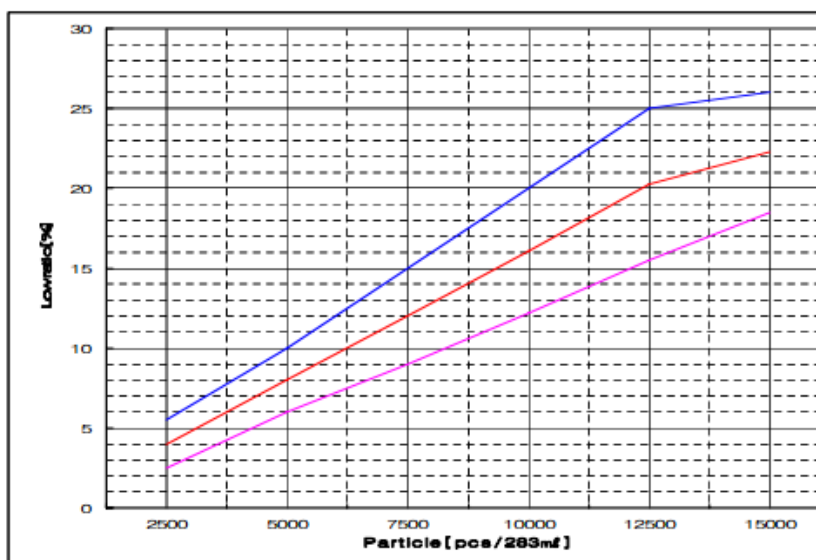


Figuur 27: gewicht deeltjes per volume-eenheid i.f.v. de 'lage signaal ratio'

Vergelijking 7 wordt dan bekomen de  $PM_{2,5}$  concentratie te bereken [41]. R stelt de 'lage signaal ratio' voor.

$$PM_{2,5} \text{ concentratie} = 0,0026 * R^2 + 0,0859 * R - 0,0184$$

Vergelijking 7:  $PM_{2,5}$  concentratie i.f.v. de 'lage signaal ratio' [41]



Figuur 28: aantal deeltjes per volume-eenheid i.f.v. de 'lage signaal ratio'

Om het aantal deeltjes PM<sub>2,5</sub> per 283ml te bepalen werd volgend vergelijking gevonden[41]:

$$PM_{2,5} \text{ aantal deeltjes} = 0,2069 * R^4 - 9,7081 * R^3 + 156,86 * R^2 - 389,72 * R + 2169,9$$

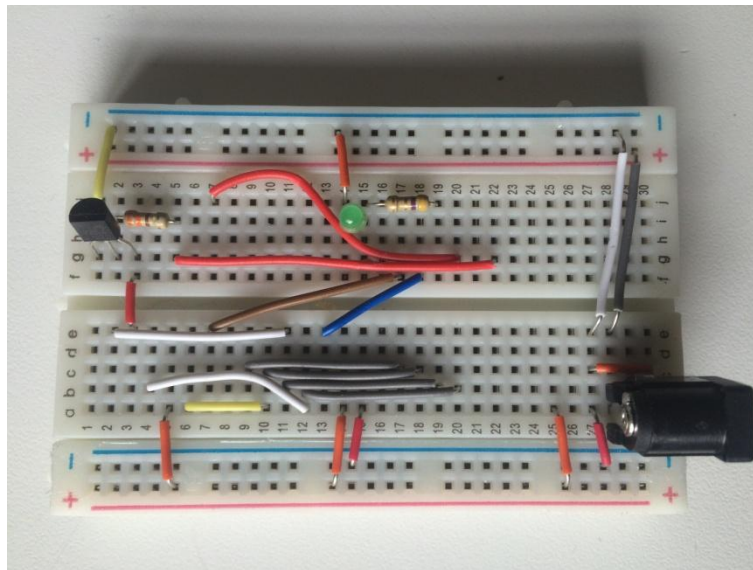
Vergelijking 8: aantal PM<sub>2,5</sub> deeltjes i.f.v. de 'lage signaal ratio' [41]

In Tabel 15 zijn de karakteristieke waarden van de DSM501a te vinden. Indien bepaalde parameters (T en RV) overschreden worden zal de sensor foutieve metingen uitvoeren. Tevens is er een beperking op de minimum grootte van stofdeeltjes die gemeten worden. Hierdoor zal ultrafijnstof niet opgenomen worden in de meting. De concentratie die gemeten kan worden door de sensor is groot genoeg om de binnenluchtkwaliteit kwantitatief te beoordelen.

Tabel 15: Eigenschappen Samyoung stofsensoren DSM501a [46]

<b>Eigenschappen DSM501a<sup>5</sup></b>	
Werkgebied temperatuur	-10 ~ +65°
Werkgebied relatieve vochtigheid	≤95%
Detecteerbare deeltjes	≥1µm
Detecteerbare concentratie	0 ~ 1,4mg/m <sup>3</sup>

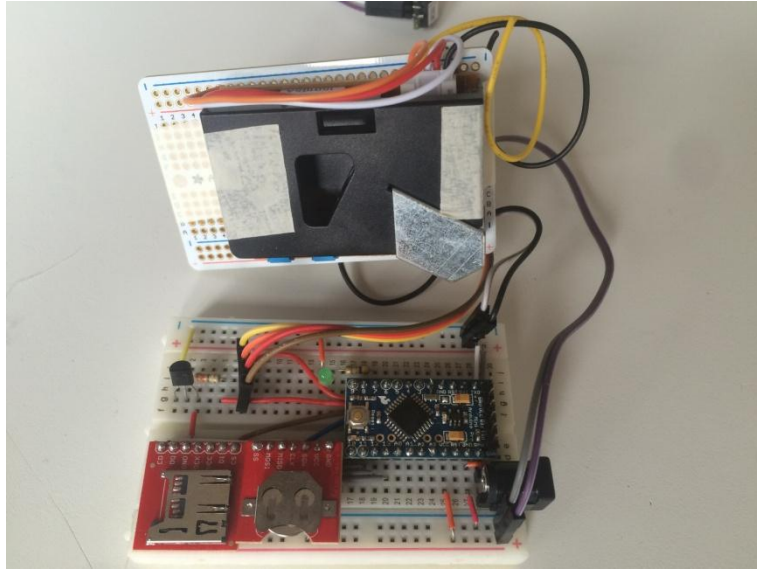
Op de volgende foto's is te zien hoe de datalogger opgebouwd is. In de eerste afbeelding (Figuur 29) zijn de kleine elektronica componenten en de bedrading te zien. Op Figuur 30 is de volledige datalogger (met sensor) zien. De rode component linksonder is de microSD shield, rechts daarvan staat de RTC.



Figuur 29: Bedrading PM<sub>2,5</sub> datalogger

---

<sup>5</sup> Meer informatie over deze sensor kan in de datasheet gevonden worden [45].



**Figuur 30: PM<sub>2,5</sub> datalogger met Arduino Pro mini**

## Kostprijs

Voor deze datalogger werd ook een kostprijs bepaald voor de 3 types van *open-source* hardware. Deze prijzen worden weergegeven in Tabel 16. Voor deze datalogger gelden dezelfde conclusies als voor de temperatuur en de relatieve vochtigheid datalogger.

Tabel 16: kostprijs PM<sub>2,5</sub> datalogger

Component	Arduino Uno [€]	Arduino Pro Mini [€]	Photon [€]	URL
<b>Open-source componenten</b>				
<i>open-source</i> hardware	21,66	8,78	16,55	
FTDI Basic Breakout 3.3V	/	13,19	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9873">https://www.sparkfun.com/products/9873</a>
<b>Elektronica componenten</b>				
Stofsensor: DSM501a DeadOn RTC DS3234 Breakout	8,55	8,55	8,55	<a href="http://www.elecrow.com/dust-sensor-dsm501a-p-854.html">http://www.elecrow.com/dust-sensor-dsm501a-p-854.html</a>
CR1225 Coin cell battery	17,60	17,60	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10160">https://www.sparkfun.com/products/10160</a>
SparkFun microSD Shield	1,72	1,72	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/337">https://www.sparkfun.com/products/337</a>
MicroSD Transflash breakout	13,22	/	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12761">https://www.sparkfun.com/products/12761</a>
microSD memory card 4GB	/	8,78	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/544">https://www.sparkfun.com/products/544</a>
	7,02	7,02	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/102">http://www.adafruit.com/products/102</a>
<b>Schakel componenten</b>				
Breadboard (2x)	7,94	7,94	7,94	<a href="http://www.adafruit.com/products/1609">http://www.adafruit.com/products/1609</a>
Transistor - NPN	/	1,72	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/756">http://www.adafruit.com/products/756</a>
LED Basic Green 3mm	/	0,31	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9650">https://www.sparkfun.com/products/9650</a>
Wall Adapter power supply	5,25	5,25	5,25	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12889">https://www.sparkfun.com/products/12889</a>
DC Barrel jack adapter	0,84	0,84	0,84	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10811">https://www.sparkfun.com/products/10811</a>
Headers	/	1,32	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/116">https://www.sparkfun.com/products/116</a>
Jumper wire kit	6,13	6,13	6,13	<a href="https://www.sparkfun.com/products/124">https://www.sparkfun.com/products/124</a>
resistor kit	7,01	7,01	7,01	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10969">https://www.sparkfun.com/products/10969</a>
<b>Totale kostprijs<sup>6</sup></b>	<b>96,94</b>	<b>96,16</b>	<b>52,27</b>	

<sup>6</sup> Prijzen incl. btw, excl. evt. verzendingskosten en taksen

## Kalibratiemeting

Doordat er tijdens het schrijven van deze thesis nog geen gekalibreerde stofsensor beschikbaar was, is er geen kalibratiemeting uitgevoerd kunnen worden. In hoofdstuk 4 worden er enkele metingen kritisch besproken.

### 3.2.3 CO<sub>2</sub> datalogger <sup>7</sup>

#### Sensor

Voor de CO<sub>2</sub> datalogger werd er ook gebruik gemaakt van een Arduino Pro Mini. De CO<sub>2</sub> sensor is een K-30 10,000ppm CO<sub>2</sub> sensor (Figuur 31). Deze sensor is een lage kost sensor special ontwikkeld om te dienen als extra component op een externe microprocessor. Deze sensor is ook uitermate geschikt om te gebruiken in woningen, commerciële en industriële plaatsen en ventilatiekanalen. In Tabel 17 zijn de belangrijkste eigenschappen van de K-30 CO<sub>2</sub> sensor te vinden [31].



SE-0018

Figuur 31: K-30 CO<sub>2</sub> sensor [31]

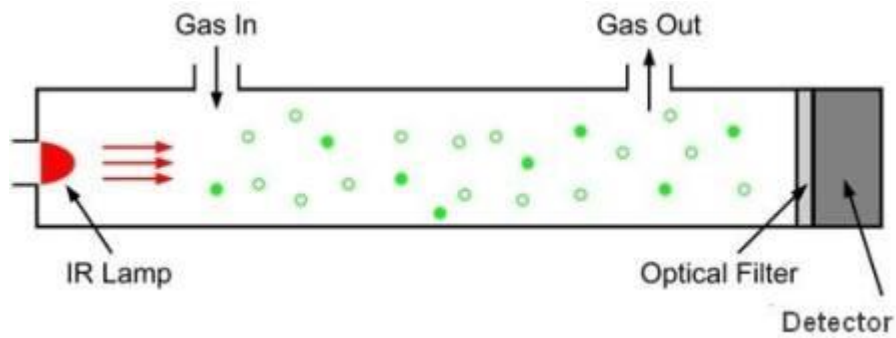
Tabel 17: eigenschappen K-30 CO<sub>2</sub> sensor

Eigenschappen K-30 CO <sub>2</sub> sensor <sup>8</sup>	
Werkgebied temperatuur	0 ~ +50°C
Werkgebied relatieve vochtigheid	0 ~ 95%
Meetgebied	0 ~ 10.000 ppm
Nauwkeurigheid	±30ppm (±3%)

Een CO<sub>2</sub> sensor werkt op basis van infraroodstraling. Gassen die uit minstens 2 ongelijke atomen bestaan absorberen infraroodstraling elk op een unieke manier. Een infrarood lamp zendt een lichtgolf door een buisje gevuld met lucht. De gassen in het buisje absorberen de golflengtes die even groot zijn als het deeltje. Een optische filter, die vlak voor de detector zit, absorbeert alle golflengtes die niet gerelateerd aan het CO<sub>2</sub> gas. De detector zal dan meten hoeveel procent van het uitgezonden infrarood licht effectief aankomt aan de andere kant van het buisje en dus niet geabsorbeerd is door de CO<sub>2</sub> moleculen. Uit dit percentage kan dan de hoeveelheid CO<sub>2</sub> deeltjes bepaald worden. In Figuur 32 wordt de werking voorgesteld. [47, 48]

<sup>7</sup> De code om deze datalogger te realiseren met een Arduino Pro Mini is te vinden op de CD die te vinden is in Bijlage A1: CD

<sup>8</sup> Meer informatie over deze sensor kan in de datasheet gevonden worden [30].



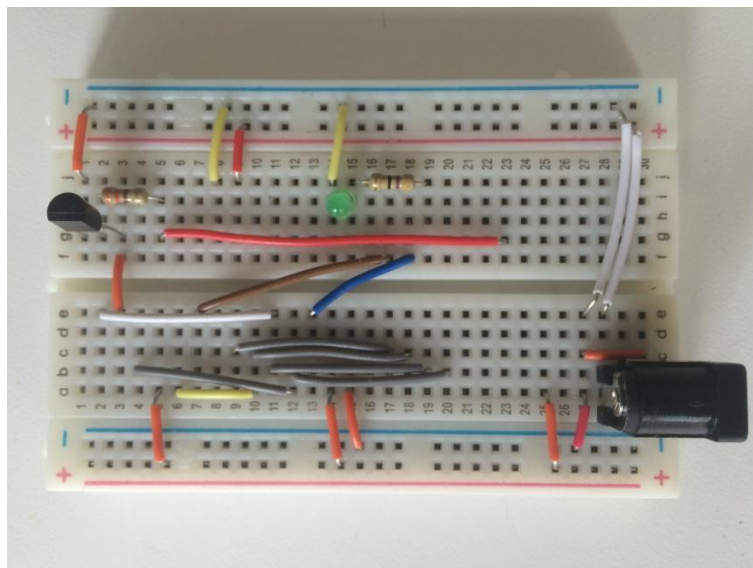
**Figuur 32: Werking infrarood CO<sub>2</sub> sensor [47]**

De CO<sub>2</sub> concentratie kan ook gemeten worden door middel van chemische sensoren. Deze zijn echter minder stabiel en hebben een kortere levensduur [48].

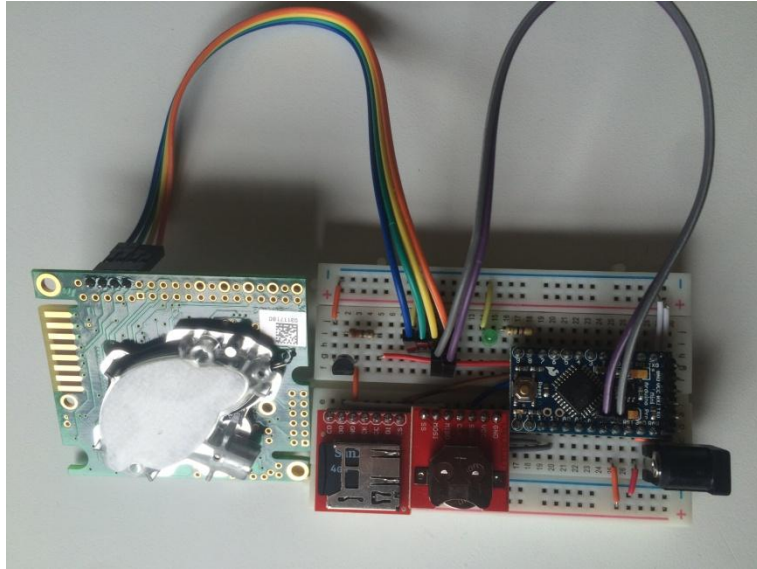
Tijdens een meting dient er ook gekeken worden naar de plaats waar de sensor komt te staan. Enkele richtlijnen zijn [48]:

- niet op plekken zetten waar mensen rechtstreeks op de sensor kunnen uitademen;
- niet in de buurt van inlaat- en/of uitlaatkokers plaatsen;
- niet vlak bij deuren en ramen plaatsen;
- in geval van vraaggestuurde ventilatie dient de sensor zo dicht mogelijk bij de te monitoren ruimte geplaatst te worden;

Om de datalogger te laten werken dienen de draden en kleine elektronica componenten volgens Figuur 33 geplaatst te worden op het breadboard. In Figuur 34 is te zien hoe alle componenten aangesloten dienen te worden.



**Figuur 33: Bedrading CO<sub>2</sub> datalogger**



**Figuur 34: CO<sub>2</sub> datalogger**

## Kostprijs

Zoals bij de voorgaande dataloggers is ook bij de CO<sub>2</sub> datalogger werken met een Photon de goedkoopste oplossing, dit is te zien in Tabel 18. Hier wordt het verschil in kostprijs wel kleiner is. Het verschil in kostprijs zit dan ook volledig in de extra componenten die nodig zijn indien er gebruik gemaakt wordt van een Arduino bord.

Tabel 18: Kostprijs CO<sub>2</sub> datalogger

Component	Arduino Uno [€]	Arduino Pro Mini [€]	Photon [€]	URL
<b>Open-source componenten</b>				
open-source hardware	21,66	8,78	16,55	
FTDI Basic Breakout 3.3V	/	13,19	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9873">https://www.sparkfun.com/products/9873</a>
<b>Elektronica componenten</b>				
CO <sub>2</sub> sensor: K-30	75,00	75,00	75,00	<a href="http://www.co2meter.com/products/k-30-co2-sensor-DeadOn">http://www.co2meter.com/products/k-30-co2-sensor-DeadOn</a>
RTC DS3234	17,60	17,60	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10160">https://www.sparkfun.com/products/10160</a>
CR1225 Coin cell battery	1,72	1,72	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/337">https://www.sparkfun.com/products/337</a>
SparkFun microSD Shield	13,22	/	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12761">https://www.sparkfun.com/products/12761</a>
MicroSD Transflash	/	8,78	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/544">https://www.sparkfun.com/products/544</a>
microSD memory card 4GB	7,02	7,02	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/102">http://www.adafruit.com/products/102</a>
<b>Schakel componenten</b>				
Breadboard	3,97	3,97	3,97	<a href="http://www.adafruit.com/products/1609">http://www.adafruit.com/products/1609</a>
Transistor - NPN	/	1,72	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/756">http://www.adafruit.com/products/756</a>
LED Basic Green 3mm	/	0,31	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9650">https://www.sparkfun.com/products/9650</a>
Wall Adapter power supply	5,25	5,25	5,25	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12889">https://www.sparkfun.com/products/12889</a>
DC Barrel jack adapter	0,84	0,84	0,84	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10811">https://www.sparkfun.com/products/10811</a>
Headers	/	1,32	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/116">https://www.sparkfun.com/products/116</a>
Jumper wire kit	6,13	6,13	6,13	<a href="https://www.sparkfun.com/products/124">https://www.sparkfun.com/products/124</a>
resistor kit	7,01	7,01	7,01	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10969">https://www.sparkfun.com/products/10969</a>
<b>Totale kostprijs<sup>9</sup></b>	<b>159,42</b>	<b>158,64</b>	<b>114,75</b>	

<sup>9</sup> Prijzen incl. btw, excl. evt. verzendingskosten en taksen



## Kalibratiemeting

Het handige aan deze sensor is dat deze reeds gekalibreerd is. Indien er toch kalibratie nodig blijkt te zijn kan dit zelf gedaan worden. Hierbij wordt dan aangenomen dat de buitenlucht 450ppm CO<sub>2</sub> bevat. Enkel in zeer erge omstandigheden (100% RV gedurende minimum 8uur) kan het gebeuren dat de sensor opnieuw gekalibreerd moet worden.

Voor de kalibratiemeting is gebruik gemaakt van de SD800 datalogger van Extech (Figuur 35). De eigenschappen zijn weergegeven in Tabel 19 [49].



Figuur 35: SD800 datalogger [49]

Tabel 19: Eigenschappen SD800 CO<sub>2</sub> sensor [49]

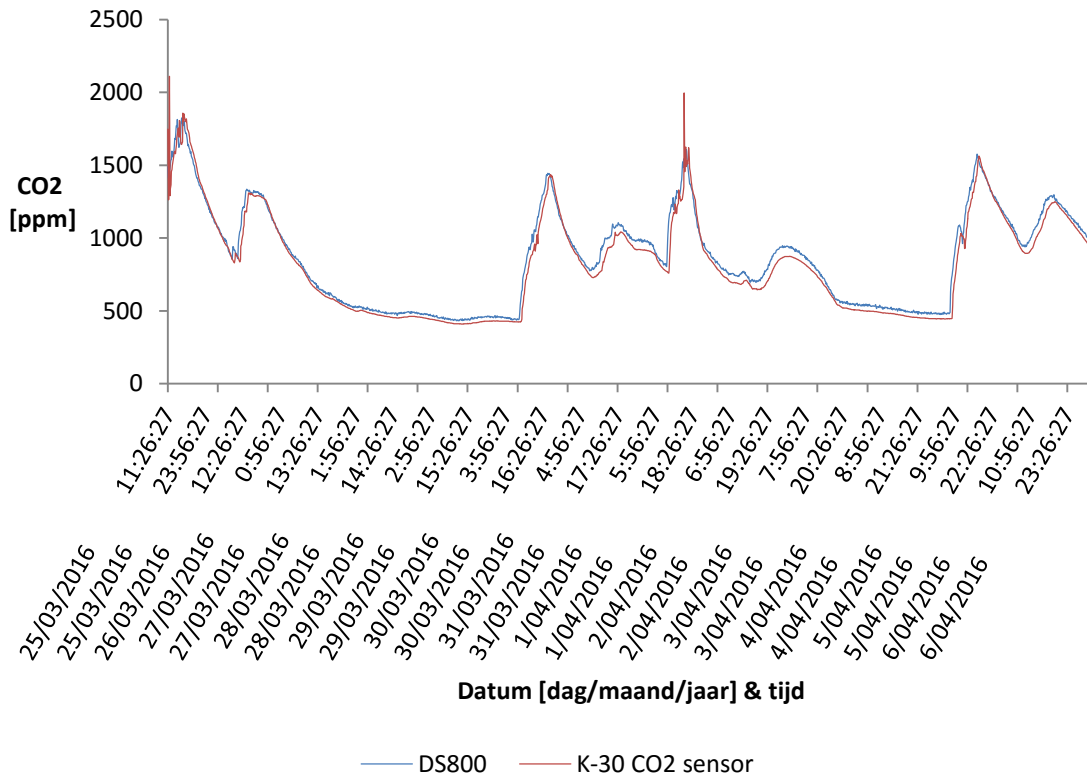
Eigenschappen SD800 CO <sub>2</sub> sensor <sup>10</sup>	
Werkgebied temperatuur	0 ~ +50°C
Werkgebied relatieve vochtigheid	10 ~ 90%
Meetgebied	0 ~ 4.000 ppm
Nauwkeurigheid	±40ppm

In Figuur 36 wordt de kalibratiemeting weergegeven. Ook hier is duidelijk te zien dat beide verlopen elkaar zeer goed benaderen. In Figuur 37 is gekeken of de waarden van de K-30 sensor binnen de bovengrens en ondergrens van de DS800 waarden zou vallen. Deze grenzen werden berekend door de nauwkeurigheid van 40ppm op te tellen en af te trekken van de gemeten waarden. Bij 75% van de metingen vallen de waarden van de *open-source* datalogger binnen de grenzen. De overige metingen vertonen slechts een kleine afwijking.

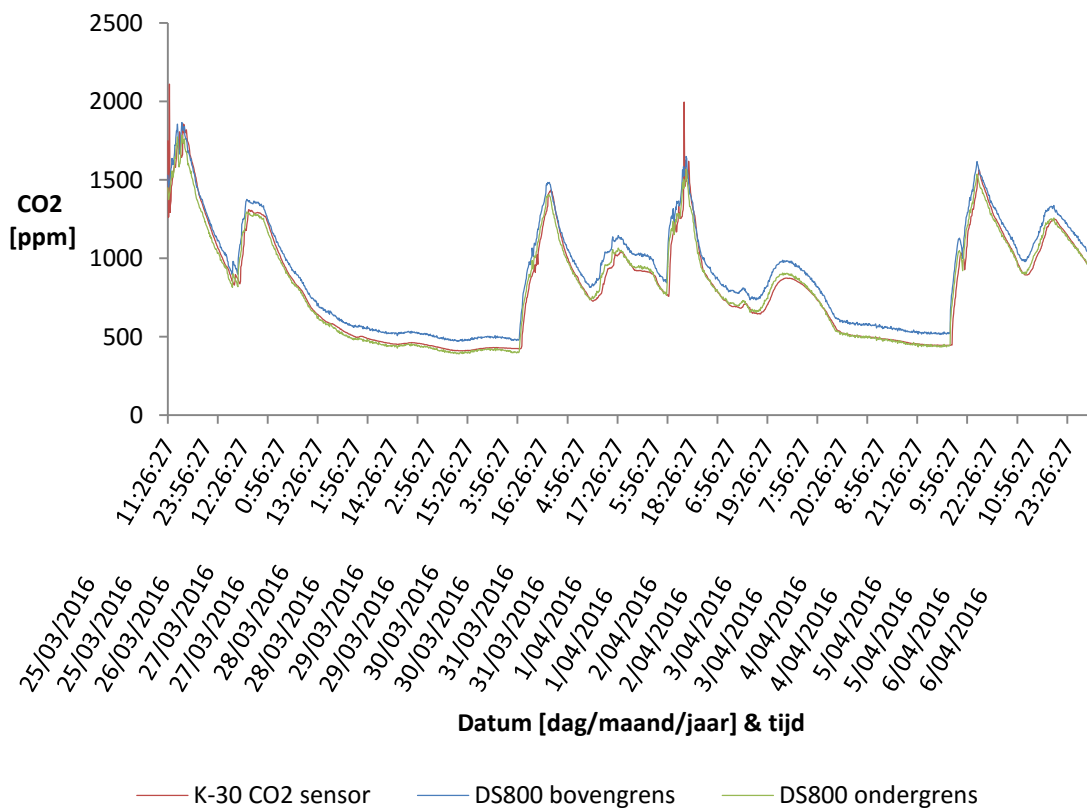
Er zijn 2 pieken op het begin en in de helft van de meting door de *open-source* datalogger gemeten. De effectieve oorzaak is hiervan onbekend. Mogelijke oorzaken hiervan zijn een slechte positionering van de sensors; te dicht uitademen bij de sensor; etc. doordat deze slechts 2 keer optreden op 2 weken wordt er aan deze afwijking geen verdere aandacht gegeven.

Ook bij deze datalogger kunnen we concluderen dat er geen verdere kalibratie nodig is om valabele meetresultaten te verkrijgen.

<sup>10</sup> Meer informatie over deze sensor kan in de datasheet gevonden worden [48].



**Figuur 36: CO<sub>2</sub> meting DS800 t.o.v. K-30 sensor**



**Figuur 37: DS800 onder- en bovengrens i.f.v. K-30 CO<sub>2</sub> sensor**

### 3.2.4 VOS datalogger<sup>11</sup>

Bij deze datalogger dient allereerst opgemerkt te worden dat deze nog in realisatie is tijdens het schrijven van deze thesis. Voor deze datalogger is er geen tutorial beschikbaar. Doordat de elektrische karakteristieke en de poorten van de gebruikte VOS en CO<sub>2</sub> sensor identiek zijn is de VOS datalogger gebaseerd op de tutorial van de CO<sub>2</sub> datalogger. Op dit moment is er nog een probleem in het programma voor de communicatie tussen de Arduino en de sensor. Om dit op te lossen is er contact opgenomen met de mensen van OSBSS . Doordat zij zelf nog allemaal werken en studeren was er op dit moment niet veel tijd om te kijken naar de fouten van mijn kant. Vanaf het moment dat zij tijd hebben gaan ze kijken wat er fout loopt met de communicatie tussen de sensor en de Arduino Pro Mini. Indien de sensor valabele resultaten produceert willen zij een tutorial van de VOS datalogger op hun website zetten.

#### **Sensor**

De gebruikte VOS sensor is een iAQ-core (Indoor Air Quality Sensor Module) van AMS. Figuur 38 toont de VOS sensor. In Tabel 20 zijn de belangrijkste eigenschappen gegeven [50]. Van de nauwkeurigheid zijn geen waarden vrijgegeven. Deze sensor is ideaal te gebruiken in HVAC toepassingen



Figuur 38: VOS sensor IAQ core

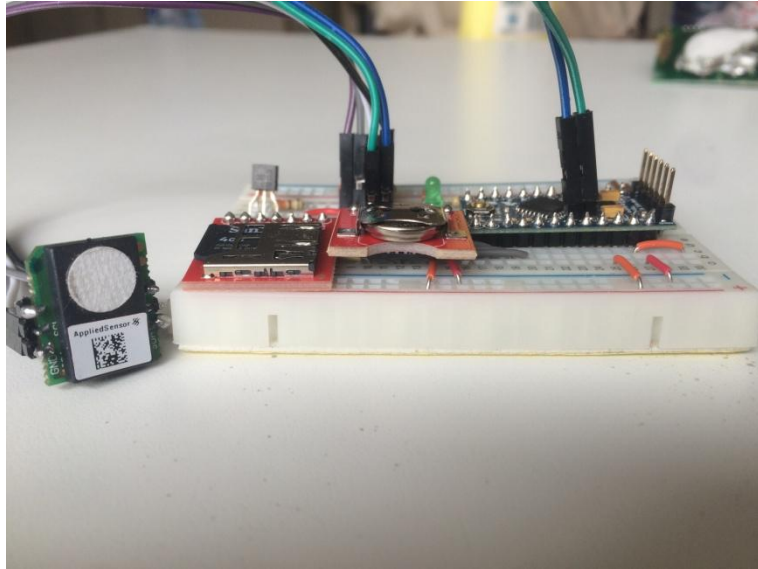
Tabel 20: Eigenschappen IAQ core sensor

<b>Eigenschappen IAQ core sensor<sup>12</sup></b>	
Werkgebied temperatuur	0 ~ +50°C
Werkgebied relatieve vochtigheid	5 ~ 95%
Meetgebied	450 ~ 2000ppm CO <sub>2</sub> equivalent 125 ~ 600ppb TVOC equivalents

De bedrading van de VOS datalogger gebeurt op identiek dezelfde wijze als voor de CO<sub>2</sub> datalogger. Figuur 39 toont de gemaakte VOS datalogger.

<sup>11</sup> De code, die tot nu toe geschreven is om deze datalogger te realiseren met een Arduino Pro Mini is te vinden op de CD die te vinden is in Bijlage A1: CD

<sup>12</sup> Meer informatie over deze sensor kan in de datasheet gevonden worden [49].



**Figuur 39: VOS datalogger**

## Kostprijs

Doordat de schakeling voor een VOS datalogger identiek is aan die van de CO<sub>2</sub> datalogger zal het verschil in kostprijs hier enkel van de sensor zelf afkomstig zijn. In Tabel 21 is te zien dat de VOS sensor ongeveer 22 euro kost. Dit is 53 euro minder dan de gebruikte CO<sub>2</sub> sensor. Door deze lagere prijs is het interessanter woningen te monitoren op basis van de VOS concentratie in de binnenlucht.

Tabel 21: Kostprijs VOS datalogger

Component	Arduino Uno [€]	Arduino Pro Mini [€]	Photon [€]	URL
<b>Open-source componenten</b>				
<i>open-source</i> hardware	21,66	8,78	16,55	
FTDI Basic Breakout 3.3V	/	13,19	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9873">https://www.sparkfun.com/products/9873</a>
<b>Elektronica componenten</b>				
VOS sensor: IAQ core-c DeadOn RTC DS3234 Breakout	21,65	21,65	21,65	<a href="http://ams.com/eng/Products/Environmental-Sensoren">http://ams.com/eng/Products/Environmental-Sensoren</a>
CR1225 Coin cell battery	17,60	17,60	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10160">https://www.sparkfun.com/products/10160</a>
SparkFun microSD Shield	1,72	1,72	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/337">https://www.sparkfun.com/products/337</a>
MicroSD Transflash breakout	/	/	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12761">https://www.sparkfun.com/products/12761</a>
microSD memory card 4GB	13,22	/	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/544">https://www.sparkfun.com/products/544</a>
	/	8,78	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/102">http://www.adafruit.com/products/102</a>
	7,02	7,02	/	
<b>Schakel componenten</b>				
Breadboard	3,97	3,97	3,97	<a href="http://www.adafruit.com/products/1609">http://www.adafruit.com/products/1609</a>
Transistor - NPN	/	1,72	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/756">http://www.adafruit.com/products/756</a>
LED Basic Green 3mm	/	0,31	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9650">https://www.sparkfun.com/products/9650</a>
Wall Adapter power supply	5,25	5,25	5,25	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12889">https://www.sparkfun.com/products/12889</a>
DC Barrel jack adapter	0,84	0,84	0,84	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10811">https://www.sparkfun.com/products/10811</a>
Headers	/	1,32	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/116">https://www.sparkfun.com/products/116</a>
Jumper wire kit	6,13	6,13	6,13	<a href="https://www.sparkfun.com/products/124">https://www.sparkfun.com/products/124</a>
resistor kit	7,01	7,01	7,01	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10969">https://www.sparkfun.com/products/10969</a>
<b>Totale kostprijs<sup>13</sup></b>	<b>106,07</b>	<b>105,29</b>	<b>61,4</b>	

<sup>13</sup> Prijzen incl. btw, excl. evt. verzendingskosten en taksen

### 3.2.5 All-in-one datalogger

Doordat er gewerkt wordt met een *open-source* platform is het tevens mogelijk om alle sensoren aan 1 bord te koppelen. Door dit te doen dienen er geen afzonderlijke Arduino's of Photons aangekocht te worden. Dit doet de prijs logischerwijs ook weer dalen. De prijs van zo een all-in-one datalogger wordt weergegeven in Tabel 22. De gebruikte PM<sub>2,5</sub>, CO<sub>2</sub> en VOS sensoren kunnen zowel een analoog als digitaal outputsignaal genereren. Hierdoor is het mogelijk om met een Arduino Pro Mini toch een all-in-one datalogger te maken. Met de Arduino Uno en Photon is het dan natuurlijk ook mogelijk om deze datalogger te maken.

Tabel 22: Kostprijs all-in-one datalogger (T&RV; PM<sub>2,5</sub>; CO<sub>2</sub>; VOS)

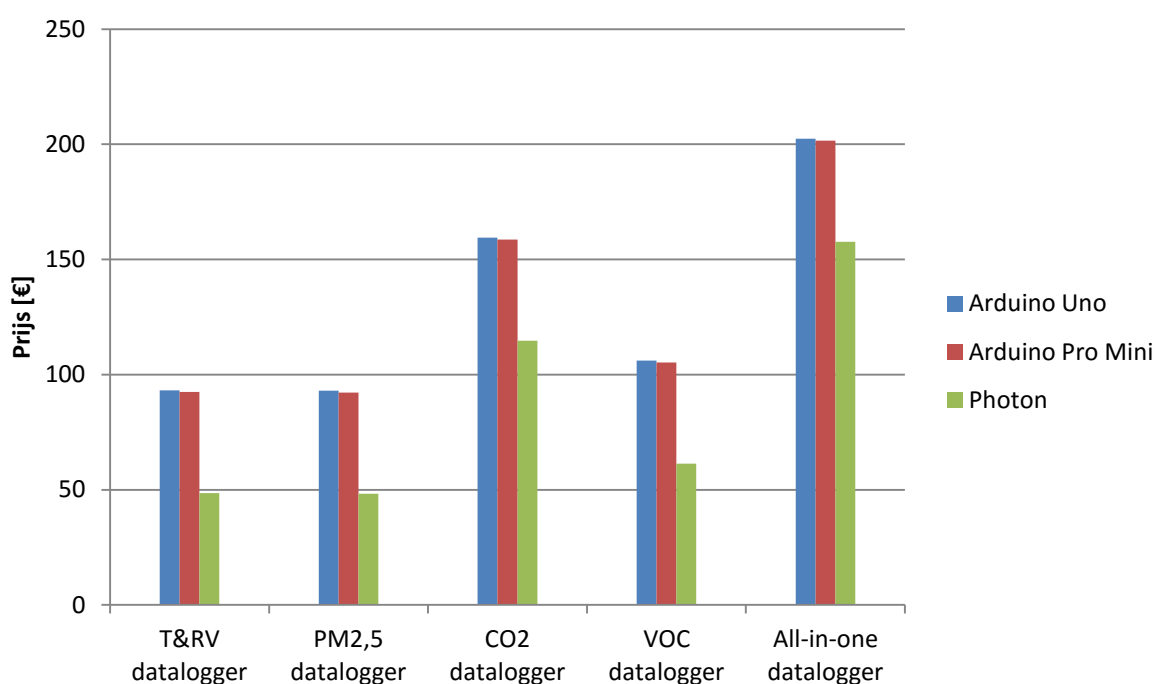
Component	Arduino Uno [€]	Arduino Pro Mini [€]	Photon [€]	URL
<b>Open-source componenten</b>				
open-source hardware	21,66	8,78	16,55	
FTDI Basic Breakout 3.3V	/	13,19	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9873">https://www.sparkfun.com/products/9873</a>
<b>Elektronica componenten</b>				
T&RV sensor: DHT22	8,80	8,80	8,80	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10167">https://www.sparkfun.com/products/10167</a>
Stofsenor: DSM501a	8,55	8,55	8,55	<a href="http://www.elecrow.com/dust-sensor-dsm501a-p-854.html">http://www.elecrow.com/dust-sensor-dsm501a-p-854.html</a>
CO <sub>2</sub> sensor: K-30 10,000ppm	75,00	75,00	75,00	<a href="http://www.co2meter.com/products/k-30-co2-sensor-module">http://www.co2meter.com/products/k-30-co2-sensor-module</a>
VOS sensor: IAQ core-c	21,65	21,65	21,65	<a href="http://ams.com/eng/Products/Environmental-Sensoren">http://ams.com/eng/Products/Environmental-Sensoren</a>
DeadOn RTC DS3234 Breakout	17,60	17,60	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10160">https://www.sparkfun.com/products/10160</a>
CR1225 Coin cell battery	1,72	1,72	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/337">https://www.sparkfun.com/products/337</a>
SparkFun microSD Shield	13,22	/	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12761">https://www.sparkfun.com/products/12761</a>
MicroSD Transflash breakout	/	8,78	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/544">https://www.sparkfun.com/products/544</a>
microSD memory card 4GB	7,02	7,02	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/102">http://www.adafruit.com/products/102</a>
<b>Schakel componenten</b>				
Breadboard (2x)	7,94	7,94	7,94	<a href="http://www.adafruit.com/products/1609">http://www.adafruit.com/products/1609</a>
Transistor - NPN	/	1,72	/	<a href="http://www.adafruit.com/products/756">http://www.adafruit.com/products/756</a>
LED Basic Green 3mm	/	0,31	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/9650">https://www.sparkfun.com/products/9650</a>
Wall Adapter power supply	5,25	5,25	5,25	<a href="https://www.sparkfun.com/products/12889">https://www.sparkfun.com/products/12889</a>
DC Barrel jack adapter	0,84	0,84	0,84	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10811">https://www.sparkfun.com/products/10811</a>
Headers	/	1,32	/	<a href="https://www.sparkfun.com/products/116">https://www.sparkfun.com/products/116</a>
Jumper wire kit	6,13	6,13	6,13	<a href="https://www.sparkfun.com/products/124">https://www.sparkfun.com/products/124</a>
resistor kit	7,01	7,01	7,01	<a href="https://www.sparkfun.com/products/10969">https://www.sparkfun.com/products/10969</a>
<b>Totale kostprijs<sup>14</sup></b>	<b>202,39</b>	<b>201,61</b>	<b>157,72</b>	

<sup>14</sup> Prijzen incl. btw, excl. evt. verzendingskosten en taksen

Een duidelijk beeld van de verschillende prijzen van elke datalogger is te vinden in Tabel 23 en Figuur 40. Hierin is duidelijk te zien dat indien er gewerkt wordt met Particle als *open-source* platform de goedkoopste dataloggers te realiseren zijn. Ook is hier nog eens duidelijk te zien dat keuze tussen een Arduino Uno en Arduino Pro Mini zo goed als geen verschil in kostprijs met zich mee brengt.

Tabel 23: overzicht prijzen *open-source* dataloggers

Type Datalogger	Arduino Uno [€]	Arduino pro mini [€]	Photon [€]
T&RH	93,22	92,44	48,55
PM <sub>2,5</sub>	96,94	96,16	52,27
CO <sub>2</sub>	159,42	158,64	114,75
VOC	106,07	105,29	61,4
T, RH, PM <sub>2,5</sub> , CO <sub>2</sub> , VOC	202,39	201,61	157,72



Figuur 40: Prijzen dataloggers



## **4 Vergelijkende studie *open-source* en *ready-made* sensoren/dataloggers**

In dit hoofdstuk wordt er een vergelijking tussen enkele *ready-made* sensoren/dataloggers die zo gekocht kunnen worden om de binnenluchtkwaliteit te beoordelen. Deze vergelijking zal voornamelijk gemaakt worden op basis van de prijs, nauwkeurigheid en aanpasbaarheid. Bij bepaalde sensoren/dataloggers zullen er belangrijke eigenschappen en voor- en/of nadelen extra benadrukt en uitvoerig besproken worden.

Zoals al eerder aangehaald is dient niet elke ruimte op basis van dezelfde parameters beoordeeld te worden. Daarom wordt er ook een onderscheid gemaakt tussen de T&RV, PM, CO<sub>2</sub> en VOS dataloggers. Daarna zal er ook een vergelijking gemaakt worden tussen dataloggers die meer dan één parameter meten. Voor elke datalogger wordt eerst een korte beschrijving gegeven gevolgd door een indicatie van de prijs, het meetbereik en de nauwkeurigheid. De nauwkeurigheid is belangrijk om betrouwbare resultaten te verkrijgen. Binnen een ventilatiesysteem is het ook belangrijk om nauwkeurige sensoren te gebruiken. Indien deze te onnauwkeurig zijn kan er ofwel te veel geventileerd worden, wat leidt tot meer energieverliezen of tot te weinig ventilatie, wat dan weer resulteert in een slechter binnenluchtklimaat. Bij de prijs van de toestellen dient ook opgemerkt te worden dat deze geldig is voor particulieren. Voor bedrijven kunnen er dus andere prijzen van toepassing zijn.

Er zullen geen vergelijkingen gemaakt worden met toestellen die enkel de metingen weergeven zonder ze op te slaan. Uiteraard gaan deze sensoren iets goedkoper uitvallen. Doordat er achteraf geen metingen beschikbaar zijn kunnen deze echter niet gebruikt worden om oorzaken te zoeken van bepaalde problemen die gerelateerd kunnen zijn aan de binnenluchtkwaliteit in de woning. Deze zouden eventueel wel gebruikt kunnen worden om een ventilatiesysteem aan te sturen op basis van de gegevens die op dat moment beschikbaar zijn.

## 4.1 Vergelijking temperatuur en relatieve vochtigheid dataloggers

In de volgende 4 tabellen (Tabel 24, Tabel 25, Tabel 26, Tabel 27) zijn enkele vergelijkbare dataloggers besproken.

Tabel 24: DVM171THD temperatuur en relatieve vochtigheid datalogger

### DVM171THD

#### Beschrijving

De DVM171THD datalogger (Figuur 41) lijkt in veel opzichten op de Arduino *open-source* dataloggers. Bij deze datalogger gebeurt de dataopslag ook op een lokaal station en is niet bereikbaar tijdens het monitoren. Ook is er geen display om de metingen visueel weer te geven. Het is wel mogelijk om de tijd tussen twee metingen zelf in te stellen. datalogger bezit geen mogelijkheid om uit te breiden en is dus niet geschikt om te implementeren in andere systemen.



Figuur 41: DVM171THD

#### Prijs [€]

94

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
Temperatuur	-40 ~ 70°C	±1°C
Relatieve vochtigheid	0 ~ 100%	± 3,0%

#### URL

<http://artonelectronics.be/product/vochtigheidsmeter-datalogger-voor-temperatuur-en-vochtigheidsgraad-velleman-dvm171thd/>

Tabel 25: HOBO UX100-003 datalogger

## HOBO UX100-003

### Beschrijving

De hobo datalogger is ook een gelijkaardige datalogger. Een extra optie van deze datalogger is het display die de metingen in real time weergeeft. Op het eerste zicht lijkt deze datalogger goedkoop uit te vallen. Er dient echter wel nog software aangekocht te worden om de data te verwerken. Hierdoor is deze datalogger geen goedkopere oplossing meer. Deze datalogger slaat de metingen op een lokale schijf op.



Figuur 42: HOBO UX100-003

### Prijs [€]

79 + 65 (voor software)

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
Temperatuur	-20 ~ 70°C	±0,21°C
Relatieve vochtigheid	15 ~ 95%	± 3,5%

### URL

<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-003>

<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers-sensors/temperature-relative-humidity-rh>

Deze datalogger is ook in nauwkeurigere uitvoering beschikbaar. De relatieve vochtigheid wordt dan gemeten met een nauwkeurigheid van 2,5%. Voor deze sensor dien je dan €110 + €65 te betalen. Voor een uitvoering met *bluetooth* om data door te sturen kost €120.

Tabel 26: LogTag HAXO-8 Humidity & temperature logger

---

**LogTag HAXO-8 Humidity & temperature logger**

---

**Beschrijving**

Het voordeel aan deze datalogger is de waarschuwing die gegeven wordt indien een vooraf ingestelde grens van relatieve vochtigheid of temperatuur overschreden wordt. Voor de rest is deze ook weer gelijkaardig aan de *open-source* datalogger. Ook hier is het niet mogelijk om de datalogger te integreren in andere systemen.

---



Figuur 43: LogTag HAXO-8 Humidity & temperature logger

---

**Prijs [€]**

---

60,00 + optioneel: 85 (voor kalibratiecertificaat)

---

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
Temperatuur	-40 ~ 85°C	±0,5°C
Relatieve vochtigheid	0 ~ 100%	± 3,0%

---

**URL**

<https://www.microdaq.com/logtag-humidity-temperature-data-logger.php>

---

Tabel 27: ATV-11 datalogger

**ATV-11**

**Beschrijving**

De ATV-11 is een datalogger die het dichtst aansluit bij de mogelijkheden van de gemaakte *open-source* datalogger. Deze datalogger beschikt wel over analoge uitgangen die gebruikt gemaakt kunnen worden om een ventilatiesysteem aan te sturen. Daarnaast beschikt de datalogger ook over een LCD scherm op de metingen weer te geven. Er is wel een maar beperkt geheugen beschikbaar om metingen op te slaan.



Figuur 44: ATV-11

**Prijs [€]**

330,00

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
Temperatuur	-30 ~ 70°C	±0,4°C
Relatieve vochtigheid	0 ~ 100%	± 2,5%

**URL**

<https://www.microdaq.com/logtag-humidity-temperature-data-logger.php>

In Tabel 28 wordt de vergelijking tussen de *open-source* en *ready-made* dataloggers gemaakt. Hierbij zijn nog enkele andere dataloggers opgenomen zonder deze uitgebreider te bespreken. Er zijn natuurlijk nog tal van andere merken op de markt. Er is een evenwichtige keuze gemaakt voor de dataloggers die in deze tabel zijn opgenomen. Er is gekeken dat er van elke prijsklasse en elk type dataopslag ten minste 1 datalogger in de tabel vermeld staat.

Tabel 28: Vergelijkende tabel open-source - ready-made dataloggers

Naam	Prijs [€]	Nauwkeurigheid	Dataopslag	URL
<b>Open-source dataloggers</b>				
Arduino Uno	93,22	T: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 2\%$	Lokaal	
Arduino Pro Mini	92,44	T: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 2\%$	Lokaal	
Photon	48,55	T: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 2\%$	Cloud (wifi)	
<b>Ready-made dataloggers</b>				
ATV-11	330,00	T: $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 2,5\%$	Lokaal	<a href="http://www.atal.nl/01-datarecorders-dataloggers/03_temperatuur-rv/ATV-11_temperatuur-rv-dauwpunt-datalogger-interne-sensor.html">http://www.atal.nl/01-datarecorders-dataloggers/03_temperatuur-rv/ATV-11_temperatuur-rv-dauwpunt-datalogger-interne-sensor.html</a>
DVM171THD	94,00	T: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 3\%$	Lokaal	<a href="http://artonelectronics.be/product/vochtigheidsmeter-datalogger-voor-temperatuur-en-vochtigheidsgraad-velleman-dvm171thd/">http://artonelectronics.be/product/vochtigheidsmeter-datalogger-voor-temperatuur-en-vochtigheidsgraad-velleman-dvm171thd/</a>
HOBO UX100-003	79,00 (+65) <sup>15</sup>	T: $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 3,5\%$	Lokaal	<a href="http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-003">http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/ux100-003</a>
HOBO MX1101 Bluetooth Temperature and Humidity Data Logger	120,00 (+65) <sup>*</sup>	T: $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 3,5\%$	Data gedeeld via bluetooth	<a href="https://www.microdaq.com/onset-hobo-bluetooth-humidity-data-logger.php">https://www.microdaq.com/onset-hobo-bluetooth-humidity-data-logger.php</a>
LogTag HAXO-8 Humidity & temperature logger	60,00	T: $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 3\%$	lokaal	<a href="https://www.microdaq.com/logtag-humidity-temperature-data-logger.php">https://www.microdaq.com/logtag-humidity-temperature-data-logger.php</a>
Model EL-USB-2+	100,00	T: $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 2\%$	Lokaal	<a href="http://www.dataq.com/products/lascar/el-usb/el-usb-2-plus-data-logger.html">http://www.dataq.com/products/lascar/el-usb/el-usb-2-plus-data-logger.html</a>
EL-WiFi-TH	140,00	T: $\pm 1^{\circ}\text{C}$ RV: $\pm 3\%$	Cloud (wifi)	<a href="http://www.dataq.com/products/lascar/el-wifi/el-wifi-th-data-logger.html">http://www.dataq.com/products/lascar/el-wifi/el-wifi-th-data-logger.html</a>

<sup>15</sup> \* Software

Als we kijken naar de dataloggers die tot nu toe besproken zijn zien we dat de prijs van dataloggers niet zoveel afwijkt van die van een Arduino T&RV datalogger. De Photon T&RV datalogger is wel altijd goedkoper. Om de temperatuur en de relatieve vochtigheid te meten zal dus best altijd beroep gedaan worden op een Photon. De datalogger die het meest op de Photon datalogger lijkt (EL-WiFi-TH) staat onderaan in Tabel 28. Deze datalogger is minstens 2,5 keer duurder. Als er gekeken wordt naar dataloggers die een ventilatiesysteem kunnen aansturen (ATV-11) zien we dat de prijs 3 tot 6 keer hoger ligt dan bij een *open-source* datalogger.

Uit deze tabel kunnen we besluiten dat er op dit moment geen dataloggers beschikbaar zijn die goedkoper zijn dan een T&RV Photon datalogger. Voor de Arduino dataloggers zijn er wel goedkopere varianten op de markt. De andere dataloggers liggen in dezelfde prijsklasse. Ook is gebleken dat er geen dataloggers op de markt zijn die vrij aan te passen zijn om in een ander systeem te integreren. Om sensoren te vinden die ventilatiesystemen kunnen aansturen moet er gezocht worden bij de fabrikanten van ventilatie-eenheden.

Ook op het vlak van nauwkeurigheid scoort de DHT22 zeer goed. Alle nauwkeurigheden liggen ongeveer op het zelfde niveau. De dataloggers die een betere nauwkeurigheid hebben zijn ook duurder dan de DHT22 sensor.

Als we een vergelijking maken op vlak van dataopslag is er wel een groot prijsverschil te zien. De *ready-made* dataloggers die beschikken over een wifi of bluetooth verbinding zijn minsten dubbel zo duur als de Photon T&RV datalogger. Dit maakt dat de *open-source* datalogger op basis van Photon de beste keuze is. Dataloggers met een lokale dataopslag liggen over het algemeen in dezelfde prijscategorie als een Arduino T&RV datalogger.

## 4.2 Vergelijking fijnstof dataloggers

Om voor de fijnstof dataloggers een vergelijking te maken wordt dezelfde methode toegepast als voor de T&RV dataloggers. Er zijn wel opmerkelijk minder fijnstof dataloggers op de markt dan voor andere binnenluchtkwaliteit parameters .

Tabel 29: Sujing Y09-PM2.5 Air Quality Monitor

### Sujing Y09-PM<sub>2.5</sub> Air Quality Monitor

#### Beschrijving

Deze PM<sub>2.5</sub> datalogger kan iets kleinere deeltjes meten dan de gebruikte sensor in de *open-source* dataloggers. De sensormethode is bij beide sensoren de *laser scattering* methode. Dit maakt dat beide dataloggers met elkaar vergeleken mogen worden. Bij deze datalogger is er een scherm aanwezig waar de gemeten fijnstof concentratie op vermeld wordt. Een nadeel aan deze datalogger is dat het aantal deeltjes niet vermeld wordt. Deze extra info kan handig zijn bij verdere verwerking van data. Tevens heeft deze datalogger slechts een beperkt intern geheugen. Hierdoor is het niet mogelijk om lange meetcampagnes uit te voeren zonder een aantal keren ter plekken moeten gaan. Een ander nadeel van deze datalogger is dat er geen tijd gedurende de metingen wordt bijgehouden. Deze zullen achteraf handmatig aangevuld moeten worden.



Figuur 45: Sujing Y09-PM<sub>2.5</sub> Air Quality Monitor

#### Prijs [€]

442,56

	Meetrage	Meetbereik	Nauwkeurigheid
PM <sub>2.5</sub>	0,5µm – 2,5 µm	0 - 500µg/m <sup>3</sup>	Niet gegeven

#### URL

<http://www.fijnstofmeter.com/Sujing.html>



Tabel 30: Dylos DC1100-PRO

**DC1700-PRO Air Quality Monitor**

**Beschrijving**

Deze fijnstof datalogger heeft het voordeel ook  $PM_{10,0}$  te meten. Hierdoor zijn er meer gegevens beschikbaar gedurende één meetcampagne die symptomen kunnen verklaren. Bij deze datalogger is er wel meer intern geheugen beschikbaar. Deze datalogger werkt ook volgens de *light scattering* methode.



**Figuur 46: DC1100-PRO Air Quality Monitor**

**Prijs [€]**

799,99

	<b>Meetrange</b>	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
$PM_{2,5}$ & $PM_{10,0}$	0,5 $\mu$ m – 10 $\mu$ m	0 - 500 $\mu$ g/m <sup>3</sup>	Niet gegeven

**URL**

<http://www.fijnstofmeter.com/DC1700.html>

Tabel 31: AIR-PM<sub>2,5</sub> datalogger

**Air – PM<sub>2,5</sub>**

**Beschrijving**

Naast de lagere prijs is er ook een ander voordeel bij deze datalogger. Afhankelijk van de concentratie fijnstof gaan er leds oplichten. Door deze waarschuwing gaat men actief meer ventileren en de binnenluchtkwaliteit op peil houden.



Figuur 47: AIR-PM<sub>2,5</sub>

**Prijs [€]**

249,00

	Meetrange	Meetbereik	Nauwkeurigheid
PM <sub>2,5</sub>	0,5µm – 2,5 µm	0 - 600µg/m <sup>3</sup>	Niet gegeven

**URL**

[http://www.atal.nl/07-co2-metersluchtkwaliteit/55\\_fijnstof](http://www.atal.nl/07-co2-metersluchtkwaliteit/55_fijnstof)

Indien we dit nu vergelijken met de prijzen deze van de *open-source* dataloggers zien we dat er een enorm prijsverschil is (zie Tabel 32). In de laatste kolom wordt integreerbaarheid van de datalogger in een ander systeem beoordeeld. Afgaande op de prijs is het zeker aan te raden om te werken met *open-source* dataloggers. Doordat er geen kalibratiemeting is kunnen uitgevoerd worden kan er geen conclusie getrokken worden op basis van de nauwkeurigheid. Het is wel zo dat alle *ready-made* dataloggers een iets grotere meetrange hebben (0,5µm i.p.v. 1 µm als kleinste meetbare deeltje). Het meetbereik van de drie types sensoren is groot genoeg voor binnenhuis toepassingen. Dit zal dus geen verdere rol spelen in de keuze van de datalogger. Tevens is het zeer moeilijk om een fijnstof datalogger te vinden die integreerbaar is in een ventilatiesysteem.

Tabel 32: vergelijking PM<sub>2,5</sub> *open-source* met *ready-made* dataloggers

Naam	Prijs [€]	Nauwkeurigheid	Dataopslag	J/N
<b>Open-source dataloggers</b>				
Arduino Uno	96,9	Niet gegeven	Lokaal	JA
Arduino Pro Mini	96,2	Niet gegeven	Lokaal	JA
Photon	52,3	Niet gegeven	Cloud (wifi)	JA
<b>Ready-made dataloggers</b>				
Sujing Y09-PM <sub>2,5</sub> Air Quality Monitor	442,56	Niet gegeven	lokaal	NEE
DC1100-PRO Air Quality Monitor	521,87	Niet gegeven	lokaal	NEE

Air PM <sub>2,5</sub>	249,00	±10µg	lokaal	NEE
-----------------------	--------	-------	--------	-----

### 4.3 Vergelijking CO<sub>2</sub> dataloggers

De meeste CO<sub>2</sub> dataloggers die beschikbaar zijn hebben ook een temperatuur- en relatieve vochtigheidssensor. Daarom wordt er, voor een correcte vergelijking te maken, de prijs van een DHT22 sensor bij de totale kostprijs van de CO<sub>2</sub> datalogger geteld.

Tabel 33 : SD800 CO<sub>2</sub> datalogger

SD800
<b>Beschrijving</b>
De SD800 is de datalogger die gebruikt is voor de kalibratiemeting en is vooral geschikt om controlemetingen uit te voeren. Deze sensor is niet aan te sluiten op een ventilatiesysteem. Qua functies is deze datalogger volledig gelijkaardig aan de zelfgemaakte. De tijd tussen elke metingen is zelf instelbaar. De metingen worden ook lokaal opgeslagen op een SD kaart. Beide sensoren werken ook volgens hetzelfde principe (infrarood). De relatieve vochtigheid dient best onder de 90% te blijven. In zeer vochtige ruimtes is deze sensor dus minder geschikt.



Figuur 48: SD800 CO<sub>2</sub> datalogger

Prijs [€]		
374,95		
	Meetbereik	Nauwkeurigheid
CO <sub>2</sub>	0 – 4.000ppm	±40ppm
T	0 – 50°C	±0,8°C
RV	0 – 90%	±4%
URL		
<a href="http://www.atal.nl/02-portable-meters/04_co2/EX-SD800_extech-temperatuurrvc02-meterdatalogger-externe-probe-met-dataopslag-op-sd-kaart.html">http://www.atal.nl/02-portable-meters/04_co2/EX-SD800_extech-temperatuurrvc02-meterdatalogger-externe-probe-met-dataopslag-op-sd-kaart.html</a>		

Tabel 34 : *SensAir tSENSE*

***SensAir tSENSE***

**Beschrijving**

Deze datalogger beschikt over drie uitgangen die gebruikt kunnen worden om een ventilatiesysteem aan te sturen. Om dit te kunnen doen dient er wel software en een speciale USB kabel aangekocht te worden.

Daarnaast is er ook een LCD *touchscreen* display om metingen weer te geven in tabel- of grafiekvorm. Er verschijnt ook een waarschuwing op dit scherm indien vooraf ingestelde grenswaarden overschreden wordt.

Het grote nadeel aan deze datalogger is het beperkte CO<sub>2</sub> meetbereik (tot 2000ppm). Indien er een correct werkend ventilatiesysteem aanwezig is, zou de CO<sub>2</sub> concentratie deze waarde normaal gezien nooit mogen bereiken. Indien het systeem echter niet correct werkt worden concentraties hoger dan 2000ppm niet meer gemeten. Dit betekent een verlies aan waardevolle informatie bij het bepalen van de fouten in het ventilatiesysteem.



**Figuur 49:** *SensAir tSENSE*

**Prijs [€]**

302,43 (hardware)

48,40 (software + USB communicatiekabel)

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
CO <sub>2</sub>	0 – 2.000ppm	±30ppm
T	0 – 50°C	±0,5°C
RV	0 – 100%	±5%

**URL**

<http://www.co2indicator.nl/datalogger.html>

<http://www.senseair.com/wp-content/uploads/2014/06/PSH109-14.pdf>

Tabel 35 : *SensAir eSENSE*

**SensAir eSENSE**

**Beschrijving**

Deze datalogger is de goedkopere variant van de hierboven besproken datalogger. Het grote verschil zit in het scherm. Bij de eSENSE versie is er geen LCD scherm meer aanwezig. Dit doet de prijs gevoelig zakken.

Het grote nadeel aan deze datalogger is dat de data niet meer lokaal opgeslagen wordt. Via een uitgangssignaal moet de data op een externe computer opgeslagen worden. Deze zit niet bij de prijs inbegrepen. Om een ventilatiesysteem te laten werken is deze sensor wel zeer geschikt.



Figuur 50: *SensAir eSENSE*

**Prijs [€]**

115,08 (hardware)

48,40 (software + USB communicatiekabel)

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
CO <sub>2</sub>	0 – 2.000ppm	±30ppm
T	0 – 50°C	±0,5°C
RV	0 – 100%	±5%

**URL**

<http://www.co2meter.com/collections/fixed-wall-mount/products/esense-ii-wall-mounted-co2-transmitter>

Tabel 36 : HOBO MX1102

## HOBO MX1102

### Beschrijving

De HOBO MX1102 datalogger is enkel geschikt om metingen uit te voeren. De metingen worden via bluetooth gedeeld met smartphones en computers. Voor de data op een computer te verwerken dient er een extra software pakket aangekocht te worden.

Het grote nadeel van deze datalogger is dat de meting van de relatieve vochtigheid beperkt is tot 70% als de CO<sub>2</sub> concentratie gemeten wordt. In vochtige ruimtes is deze sensor dus minder geschikt.



Figuur 51: HOBO MX1102

### Prijs [€]

530,81 (hardware)

66,91 (software )

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
CO <sub>2</sub>	0 – 5.000ppm	±50ppm
T	0 – 50°C	±0,21°C
RV	0 – 70%	±2%

### URL

<http://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1102>

Tabel 37 : Wöhler CDL210 CO<sub>2</sub> datalogger

### Wöhler CDL210 CO<sub>2</sub> datalogger

#### Beschrijving

De CO<sub>2</sub> datalogger van Wöhler meet tegelijkertijd CO<sub>2</sub> concentraties, de temperatuur en de relatieve luchtvochtigheid. Een extra functie bij deze datalogger is het akoestisch alarm dat afgaat bij overschrijden van vooraf ingestelde grenswaarde. Deze datalogger heeft geen uitgangssignalen ter beschikking waardoor ze niet gebruikt kan worden in ventilatiesystemen.



Figuur 52: Wöhler CDL210 CO<sub>2</sub> datalogger

#### Prijs [€]

149,00

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
CO <sub>2</sub>	0 – 10.000ppm	±50ppm
T	-10 – 60°C	±0,6°C
RV	0 – 95%	±3%

#### URL

<http://www.woehler.de/shop/nl/cdl-210-co2-datalogger-299.html>

Tabel 38 : CM-0212

**CM-0212**

**Beschrijving**

.De CM-0212 is de datalogger die het meest lijkt op de gemaakte Arduino *open-source* dataloggers. In deze datalogger zit precies dezelfde CO<sub>2</sub> sensor. Tevens heeft deze datalogger ook geen enkele andere functie dan het meten en opslaan van CO<sub>2</sub>, temperatuur en relatieve vochtigheid. De opslag van data gebeurt op een lokale SD kaart die achteraf pas kan geraadpleegd worden.



CM-0212  
CM-0018AA

**Figuur 53: CM-0212**

**Prijs [€]**

302,43

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
CO <sub>2</sub>	0 – 10.000ppm	±30ppm
T	-40 – 60°C	±0,4°C
RV	0 – 100%	±3%

**URL**

<http://www.co2meter.com/collections/data-loggers/products/wireless-co2-temp-rh-environmental-logger>



In Tabel 39 wordt een overzicht gegeven van de besproken dataloggers en de *open-source* dataloggers. De laatste kolom (J/N) staat voor te integreerbaarheid van de sensor in een ventilatiesysteem.

Tabel 39: Overzicht geselecteerde CO<sub>2</sub> dataloggers

Naam	Prijs [€]	Nauwkeurigheid	Meetbereik	Dataopslag	J/N
<b><i>Open-source dataloggers</i></b>					
Arduino Uno	168,22	±30ppm	0 - 10.000ppm	lokaal	JA
Arduino Pro Mini	167,44	±30ppm	0 - 10.000ppm	lokaal	JA
Photon	123,55	±30ppm	0 - 10.000ppm	Cloud (wifi)	JA
<b><i>Ready-made dataloggers</i></b>					
SD800	374,95	±40ppm	0 – 4.000ppm	lokaal	NEE
SensAir tSENSE	350,83	±30ppm	0 – 2.000ppm	lokaal	JA
SensAir eSENSE	163,48	±30ppm	0 – 2.000ppm	n.v.t.	JA
HOBO MX1102	597,72	±50ppm	0 – 5.000ppm	Bluetooth	NEE
Wöhler CDL210 CO <sub>2</sub> datalogger	149,00	±50ppm	0 - 10.000ppm	lokaal	NEE
CM-0212	302,43	±30ppm	0 - 10.000ppm	lokaal	NEE

Hierin is te zien dat alle *ready-made* dataloggers duurder zijn dan een Photon CO<sub>2</sub> datalogger. Er zijn wel enkele dataloggers goedkoper dan een Arduino CO<sub>2</sub> datalogger. Hierbij dient echter wel opgemerkt te worden dat deze dataloggers oftewel geen metingen opslaan (SensAir eSENSE) oftewel niet geïntegreerd kunnen worden in een ventilatiesysteem (Wöhler CDL210 CO<sub>2</sub> datalogger). Er zijn nog bepaalde goedkopere dataloggers op de markt. Doordat deze een zeer slechte nauwkeurigheid hebben (±100ppm) zijn deze niet geschikt om binnenluchtkwaliteit te meten en dus niet opgenomen in deze vergelijking.

Op vlak van meetbereik en nauwkeurigheid is de gebruikte sensor in de *open-source* dataloggers (K-30 CO<sub>2</sub> sensor) de beste keuze. Bij de andere sensoren is of wel de nauwkeurigheid minder goed of wel een kleiner meetbereik. Zeker de meetbereiken tot 2.000ppm zijn vrij klein om te gebruiken in een woning.

Alle factoren in rekening genomen mag er geconcludeerd worden dat de *open-source* CO<sub>2</sub> dataloggers een betere keuze zijn dan vergelijkbare *ready-made* dataloggers.

#### 4.4 Vergelijking VOS dataloggers

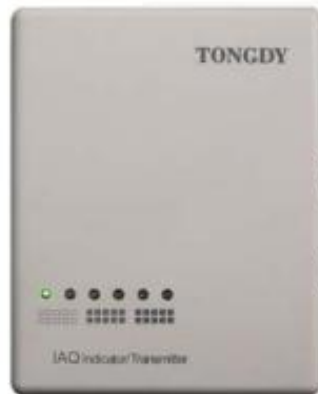
Ook voor VOS dataloggers is een vergelijking gemaakt met bestaande dataloggers. Voor de VOS sensoren wordt bijna nooit een nauwkeurigheid gegeven. Hierdoor kan er geen vergelijking gemaakt worden op basis van deze parameter.

Tabel 40 : CM-0212

##### **Tongdy VOS detector**

##### **Beschrijving**

De Tongdy VOS datalogger is vooral geschikt voor het aansturen van ventilatiesystemen. Om effectief als datalogger is er te weinig opslagcapaciteit aanwezig. Deze datalogger geeft door middel van gekleurde LEDs aan of er nood is aan ventilatie of niet. Daarnaast wordt ook de temperatuur en relatieve vochtigheid gemeten.



Figuur 54: Tongdy VOS detector

##### **Prijs [€]**

177,53

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
VOS	0 – 30ppm	Niet gegeven
T	0 – 50°C	Niet gegeven
RV	0 – 95%	Niet gegeven

##### **URL**

<http://www.co2meter.com/products/tongdy-iaq-detector-with-indicator-lights>

Tabel 41 : VOS monitor

**VOS monitor**

**Beschrijving**

Deze datalogger werkt bijna hetzelfde als de vorige die besproken is. Het grote verschil is dat deze niet kan aangesloten op een ventilatiesysteem. Deze datalogger heeft dan wel weer een LCD display en een geluidsalarm ter beschikking. Bij hoge relatieve vochtigheden (>95%) zal de VOS sensor geen correcte resultaten geven.



Figuur 55: VOS monitor

**Prijs [€]**

126,89

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
VOS	0 – 30ppm	Niet gegeven
T	0 – 50°C	Niet gegeven
RV	0 – 99%	Niet gegeven

**URL**

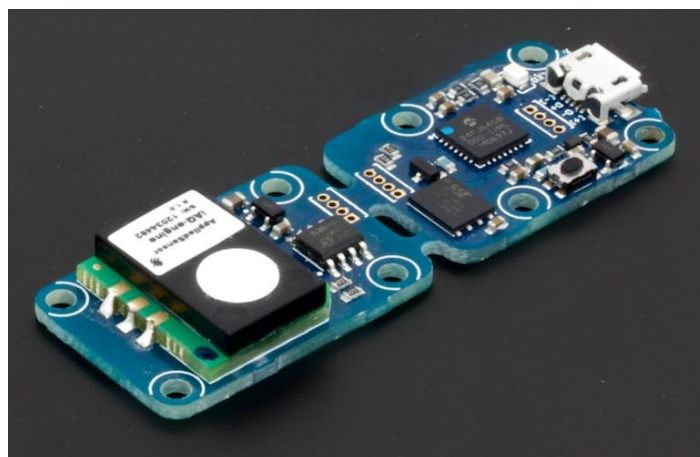
[http://www.airsensor.co.uk/shop.html?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=9&category\\_id=1](http://www.airsensor.co.uk/shop.html?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=9&category_id=1)

Tabel 42 : Yocto-VOC

**Yocto-VOC**

**Beschrijving**

De Yocto-VOC maakt gebruik van dezelfde sensor als gebruikt wordt bij de *open-source* datalogger. Ondanks de nog beschikbare uitgangen kan deze datalogger geen ventilatiesysteem aansturen. Dit komt doordat de fabrikant het niet toelaat de code te wijzigen. Met een meerkost van ongeveer 100 euro kan deze datalogger verbinding maken met internet. Alleen dit bord al kost meer dan een VOS datalogger gemaakt met Photon. Een ander nadeel is dat deze datalogger de VOS concentratie enkel in CO<sub>2</sub> equivalente geeft.



Figuur 56: Yocto VOC

**Prijs [€]**

126,83

	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
VOS	450 – 65.000 CO <sub>2</sub> equivalent	Niet gegeven
T	0 – 50°C	Niet gegeven
RV	0 – 95%	Niet gegeven

**URL**

<http://www.yoctopuce.com/EN/products/usb-sensoren/yocto-VOC>

Tabel 43 : BAPI-Stat 3 Unit

### BAPI-Stat 3 Unit

#### Beschrijving

De BAPI-Stat 3 unit is een zeer handige VOS datalogger. Bij de bestelling kan er zelf een configuratie van het toestel gekozen worden. Zo kan men kiezen voor een scherm; een extra outputsignaal op basis van de relatieve luchtvochtigheid, type sensor; etc. Hierdoor heeft men een ruime keuzemogelijkheid om verschillende type dataloggers te kopen.

Voor onderstaande prijs is er een scherm in rekening gebracht en een outputsignaal op basis van de VOS concentratie.



Figuur 57: BAPI-Stat 3 Unit

#### Prijs [€]

454,98

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
VOS	0 -2.000 CO <sub>2</sub> equivalent	Niet gegeven
T	0 – 50°C	2%
RV	0 – 100%	2%

#### URL

<http://www.bapihvac.com/product/voc-room-voc-transmitter-in-bapi-stat-3-enclosure/#documents>

In

Tabel 44 wordt er een samenvatting gegeven van de eerder besproken VOS dataloggers. Doordat er vrij weinig bekend is over de nauwkeurigheid van een VOS sensor kunnen hier geen conclusies uit getrokken worden. Puur op basis van prijs en integreerbaarheid binnen een ander systeem zien we dat *open-source* dataloggers goedkoper zijn dan de *ready-made*. Er valt wel op te merken dat er ook binnen de *ready-made* dataloggers een groot verschil in prijs optreedt.

Tabel 44: vergelijking VOS dataloggers

Naam	Prijs [€]	Integreerbaar JA/NEE	Dataopslag
<b><i>Open-source dataloggers</i></b>			
Arduino Uno	106,07	JA	lokaal
Arduino Pro Mini	105,29	JA	lokaal
Photon	61,4	JA	Cloud (wifi)
<b><i>Ready-made dataloggers</i></b>			
Tongdy VOC detector	177,53	JA	lokaal
VOC monitor	126,89	NEE	lokaal
Yocto-VOC	126,83	NEE	lokaal
BAPI-Stat 3 Unit	454,98	JA	lokaal

## 4.5 Vergelijking IAQ systemen

In dit deel worden enkele *all-in-one ready-made* dataloggers voorgesteld en vergeleken. Als laatste puntje wordt er gekeken naar ontwikkelingen binnen de *open-source* techniek op het vlak van binnenklimaat

### Ready-made dataloggers

Tabel 45 : Tongdy CO<sub>2</sub> + VOC + RH/T Monitor & Alarm w. Relay

Tongdy CO <sub>2</sub> + VOC + RH/T Monitor & Alarm w. Relay
<b>Beschrijving</b>
Allereerst wordt er een datalogger besproken die de temperatuur, relatieve luchtvochtigheid, CO <sub>2</sub> concentratie en VOS gehalte meet. Met deze datalogger is het mogelijk om een ventilatiesysteem aan te sturen. Deze datalogger geeft ook aan de bewoners aan welk type binnenluchtklimaat er op dat moment heerst. Indien er echter gekeken wordt naar de nauwkeurigheid zien we dat deze datalogger minder nauwkeurig is dan de gemaakte <i>open-source</i> dataloggers. De prijs van deze <i>ready-made</i> datalogger ligt wel hoger dan deze van de drie typen <i>open-source</i> dataloggers



Figuur 58: Tongdy CO<sub>2</sub> + VOC + RH/T Monitor & Alarm w. Relay

<b>Prijs [€]</b>		
355,99		
	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
T	-20 – 60°C	±0,5%
RV	0 – 100%	4,5%
CO <sub>2</sub>	0 – 5.000 ppm	±60ppm
VOS	0 - 30 ppm	Niet gegeven
<b>URL</b>		
<a href="http://www.co2meter.com/products/co2-voc-rht-monitor-and-alarm">http://www.co2meter.com/products/co2-voc-rht-monitor-and-alarm</a>		

Tabel 46 : Blueair Aware

**Blueair Aware**

**Beschrijving**

Het tweede all-in-one systeem dat hier besproken wordt is de Blueair Aware. Deze datalogger meet de temperatuur, relatieve vochtigheid, PM<sub>2,5</sub> concentratie en het CO<sub>2</sub> en VOS gehalte in de binnenlucht. De blauwe lijn in Figuur 59 is een indicatie voor de binnenluchtkwaliteit. Indien deze lijn oranje of rood kleurt worden bepaalde grenswaarde overschreden.

Deze datalogger lijkt het meest op de Photon datalogger. In beide gevallen worden de metingen via wifi doorgestuurd naar een server. Bij deze datalogger hoort ook een app voor op een smartphone. Hiermee wordt de metingen grafisch weergegeven en wordt er een alarmsignaal gegeven indien de ruimte waar het toestel staat geventileerd moet worden.

Met de Blueair Aware is het wel niet mogelijk om een ventilatiesysteem rechtstreeks aan te sturen. Via een andere computer is het wel mogelijk om een systeem aan te sturen.

Op vlak van meetbereik en nauwkeurigheid is het beter om een Photon datalogger te nemen. Ook op basis van de prijs (€157,72 i.p.v. €229,00) is het beter om de *open-source* datalogger te gebruiken.



Figuur 59: Blueair Aware

<b>Prijs [€]</b>		
229,00		
	<b>Meetbereik</b>	<b>Nauwkeurigheid</b>
T	0 – 50°C	±1°C
RV	0 – 75%	5,5%
PM <sub>2,5</sub>	0 - 500µg/m <sup>3</sup>	Niet gegeven
CO <sub>2</sub>	450 – 5.000 ppm	Niet gegeven
VOS	0 -1000 ppm	Niet gegeven
<b>URL</b>		
<a href="http://www.bapihvac.com/product/voc-room-voc-transmitter-in-bapi-stat-3-enclosure/#documents">http://www.bapihvac.com/product/voc-room-voc-transmitter-in-bapi-stat-3-enclosure/#documents</a>		



## Open-source toepassing

De laatste jaren zijn er ook al enkele *open-source* toepassingen op de markt verschenen. Enkele voorbeelden hiervan worden in dit deel opgesomd.

Tabel 47 : Air quality eggs

Air quality egg
<b>Beschrijving</b>
<p>De Air quality egg zijn eiervormige dataloggers (Figuur 60) en werken op basis van <i>open-source</i> hardware. Op dit moment zijn er drie soorten dataloggers beschikbaar: NO<sub>2</sub> en CO; O<sub>3</sub> en SO<sub>2</sub> en fijnstof. Elke datalogger meet ook temperatuur en relatieve vochtigheid. Met deze ‘eieren’ worden dus vooral de minder bekende, maar daarom niet minder belangrijke parameters van de binnenlucht gemeten.</p> <p>Deze dataloggers zijn eigenlijk bedoeld om de buitenluchtkwaliteit te meten. Steeds meer mensen gebruiken de dataloggers ook om de binnenlucht te monitoren.</p> <p>Er is 1 zaak speciaal aan deze dataloggers. Alle metingen worden opgeslagen op een centrale server. Hierdoor is alle data, van alle Air quality eggs over de hele wereld, publiekelijk toegankelijk. Dit maakt dat wetenschappers van over de hele wereld informatie kunnen krijgen over de binnenluchtkwaliteit in woningen en andere gebouwen. Hierdoor kunnen persoonlijke metingen vergeleken worden met andere metingen op andere plaatsen in de wereld.</p>



Figuur 60: Air quality eggs

---

**Prijs [€]**

215,00 (zelfde prijs voor verschillende typen)

---

**URL**

<http://shop.wickeddevice.com/product-category/air-quality-egg/>  
<http://airqualityegg.com/>

---

Tabel 48 : AirSensor CO<sub>2</sub> shield

### AirSensor CO<sub>2</sub> shield

#### Beschrijving

Een laatste systeem dat wordt besproken is de AirSensor CO<sub>2</sub> shield. Dit shield kan op een Arduino Uno geplaatst worden en zo gebruikt worden als T/RV&CO<sub>2</sub> meter. Bij dit shield zit ook al code die op een Arduino gezet moet worden om te laten werken.

Het grote nadeel aan dit shield is de afwezigheid van een wifi-verbinding of lokaal opslagsysteem. Dit dient zelf achteraf nog op de Arduino Uno aangesloten worden.

Op vlak van nauwkeurigheid zijn de sensoren volledig gelijkaardig als de gekozen sensoren voor de *open-source* datalogger. Voordeel is wel dat er nu niet meer zelf gesoldeerd dient te worden. Dit verkleint natuurlijk de kans op fouten.

De prijs die gegeven wordt is enkel voor het beschreven shield. Om te kunnen werken dient er ook nog een Arduino Uno van ongeveer 20 euro aangekocht te worden. Op basis van deze prijs is het niet aan te raden om gebruik te maken van deze shield. Enkel het bord en een Arduino Uno kosten al meer dan de volledige Arduino Uno CO<sub>2</sub> datalogger die in deel 3.2.3 beschreven wordt.



Figuur 61: AirSensor CO<sub>2</sub> shield

#### Prijs [€]

161,81

	Meetbereik	Nauwkeurigheid
T	-40 – 120°C	±0,5°C
RV	0 – 100%	±3%
CO <sub>2</sub>	0-5.000ppm	±30ppm

#### URL

[http://www.airsensor.co.uk/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=17&vmcchk=1&option=com\\_virtuemart&Itemid=2](http://www.airsensor.co.uk/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=17&vmcchk=1&option=com_virtuemart&Itemid=2)

## 4.6 Conclusie

Uit voorgaande vergelijkingen blijkt dat het meestal goedkoper is om met een zelfgemaakte *open-source* datalogger de woning te monitoren. De *ready-made* sensoren die goedkoper waren, zijn meestal veel onnauwkeuriger en kunnen niet geïmplementeerd worden in een ventilatiesysteem. Tevens is gebleken dat de gebruikte sensoren voor de *open-source* dataloggers goed scoren op vlak van nauwkeurigheid. Voor de temperatuur en relatieve vochtigheid sensor zijn er betere varianten op de markt maar zullen de prijs dan uiteraard doen toenemen. In een woning is het echter niet de bedoeling om de deze parameters 100% exact te kennen. Daarom is de DHT22 een goede optie om als low-cost sensor te gebruiken in woningen. De gebruikte CO<sub>2</sub> sensor is wel een zeer goede sensor. Er is geen enkele sensor op de markt met een groter meetbereik en nauwkeurigheid. Het meetbereik van deze sensor is wel vrij groot op te gebruiken in woningen. Door een andere sensor, met kleiner bereik, te kiezen kan de prijs wel nog zakken. Voor de PM<sub>2,5</sub> en VOS sensor zijn er door gebrek aan gegevens geen conclusies te trekken uit deze vergelijking.

## 5 Meetresultaten

Om de sensoren nu ook effectief al eens te kunnen testen in een woning werden er metingen gedaan in oudere woning. Hierbij werd aan de bewoners gevraagd om in de mate van het mogelijke bij te houden welke activiteiten er gebeurde, wanneer er geventileerd werd, hoeveel mensen aanwezig waren, etc. Aan de hand van deze gegevens kan dan bekeken worden welke maatregelen genomen kunnen worden om een betere binnenluchtkwaliteit te bekomen.

### 5.1 Meetmethode

Aan de universiteit van West Ontario (Canada) is er een tool ontwikkeld om de luchtkwaliteit te onderzoeken. Deze bestaat uit volgende stappen [51]:

1. Een inspectie van de te onderzoeken ruimte om mogelijke bronnen van verontreinigingen op te sporen. Deze zijn bijvoorbeeld: printers en kopieerapparaten, isolatie, gebruikte poetsproducten, etc.
2. Meting van temperatuur, relatieve vochtigheid, en andere comfort parameters
3. Meting van de CO<sub>2</sub> concentratie om het ventilatiesysteem te controleren
4. Meting van VOS, formaldehyde, CO, Ozon en fijnstof deeltjes
5. Onderzoek naar de luchtdistributie van het ventilatiesysteem en eventuele aanwezigheid van biologisch organisme en water in het ventilatiesysteem.

Indien al deze stappen doorlopen worden kan men de juiste oorzaken opsporen die een slechte binnenlucht kwaliteit veroorzaken en de meest gepaste maatregelen nemen.

### 5.2 Monitoren van een slaapkamer

Een eerste meetcampagne werd uitgevoerd in een slaapkamer van een woning die gebouwd is in 1998. In dit huis is er geen ventilatiesysteem voorzien, ook is er geen spouwmuurisolatie aanwezig.

In deze kamer is er één nacht doorgebracht zonder dat er enige vorm van gewilde ventilatie aanwezig was. Enkel door kieren en spleten in de bouwschil kan er dus verse lucht de woning in geraken. De dag erop is er bewust geen ventilatie toegelaten in deze ruimte. De tweede nacht was er wel een vorm ventilatie aanwezig. Dit door middel van een klein venster dat op kip stond. Deze slaapkamer is een rechthoekige kamer met een volume van 37,5m<sup>3</sup>. 2 muren van deze kamer zijn buitengevels, de andere 2 zijn binnenmuren Er is 1 raam en 1 deur die uitkomt op een gang. Doordat dit al een ouder gebouw is, zijn er bij de bouw geen speciale maatregelen genomen om de luchtdichtheid te verbeteren. Het lekdebiet voor dit type woning ligt daardoor tussen de 6 en 12m<sup>3</sup>/(h.m<sup>2</sup>). Wanneer er wel maatregelen genomen waren lag dit lekdebiet tussen de 2 en 6 m<sup>3</sup>/(h.m<sup>2</sup>) [52]. De metingen zijn uitgevoerd in het begin van de maand mei. Door de dag schommelde de buitentemperatuur rond de 17°C, 's nachts daalde de temperatuur tot een 5°C [53].

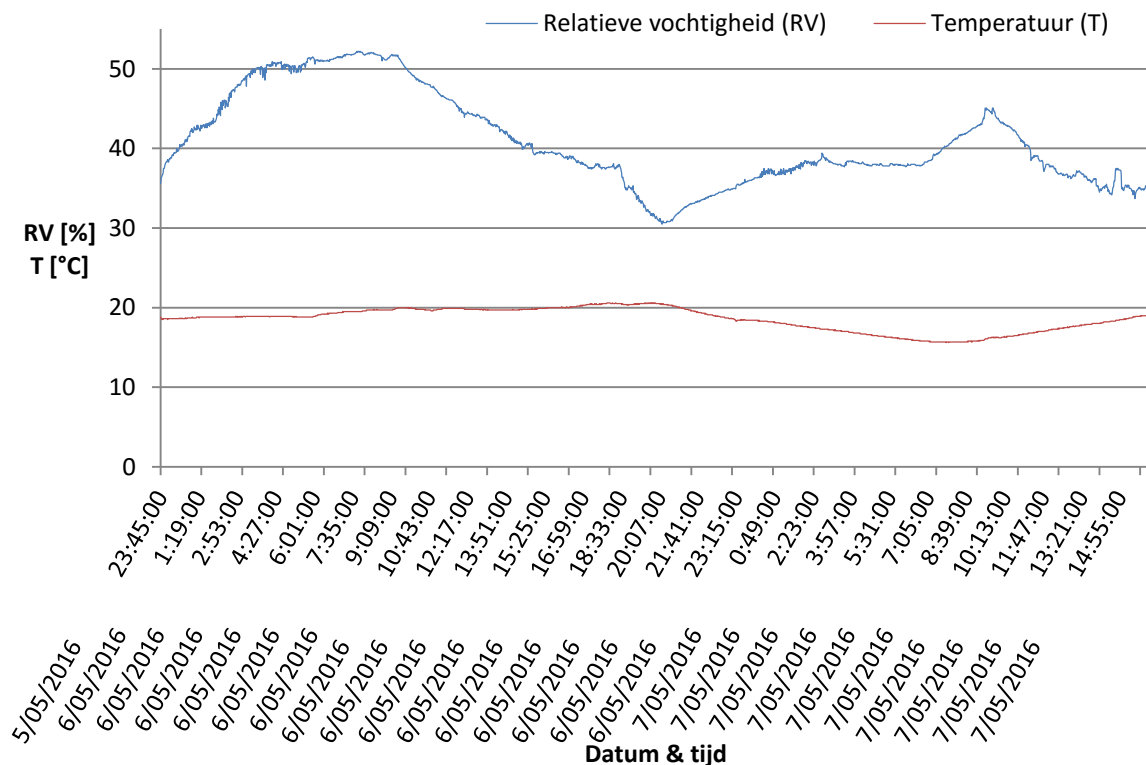
Allereerst is er gekeken naar mogelijke verontreinigingbronnen in de slaapkamer. In deze slaapkamer zijn is enkel de aanwezigheid van een mens als bron vastgesteld.

## Temperatuur en relatieve vochtigheid

De eerste parameters die gemonitord werden zijn de temperatuur en relatieve vochtigheid. Gedurende anderhalve dag zijn de parameters om de minuut gemeten. In Figuur 62 is deze meting te zien. Het monitoren is begonnen op het moment dat de slaapkamer gebruikt werd om te gaan slapen.

Op het vlak van temperatuur zijn er weinig opmerkingen te maken. In die niet geventileerde toestand loopt de temperatuur lichtjes op ten gevolge van de lichaamstemperatuur van de temperatuur die aanwezig is in de kamer. Indien er wel geventileerd wordt daalt de temperatuur doordat de buitentemperatuur ook daalt. 's Morgens begint de temperatuur dan ook weer toe te nemen. De temperatuur ligt tussen de 16 en 20°C. 16°C is op volgens de grenzen van het adaptief comfort te koud. 's Nachts wordt deze temperatuur echter als aangenaam ervaren. 20°C ligt wel binnen de grenzen. Op het vlak van temperatuur is er dus geen probleem in deze slaapkamer.

Aan de curve van de relatieve vochtigheid is wel duidelijk de invloed van ventilatie te zien. In de eerste nacht is te zien dat de relatieve vochtigheid blijft toenemen zolang er geen ventilatie is. Op een gegeven moment treedt er een evenwicht op tussen de vochtproductie en het vochttransport ten gevolge van de natuurlijke ventilatie die er toch nog aanwezig is. Indien een persoon in diepe slaap komt gaat hij minder uitademen en dus minder vocht produceren. Door de natuurlijke ventilatiegraad neemt de relatieve vochtigheid doorheen de dag weer af. Kort voor de 2<sup>de</sup> nacht (6/05 rond 20:00) is het venster korte tijd groot opengezet. Dit is te zien aan de sterke daling van de relatieve vochtigheid. Op 7 mei is er een piek te zien in de relatieve vochtigheid. Dit is te verklaren door de aanwezigheid van een persoon die pas gedoucht was en natte haren had. Doordat deze haren drogen stijgt de relatieve vochtigheid.



Figuur 62: Meting temperatuur en relatieve vochtigheid

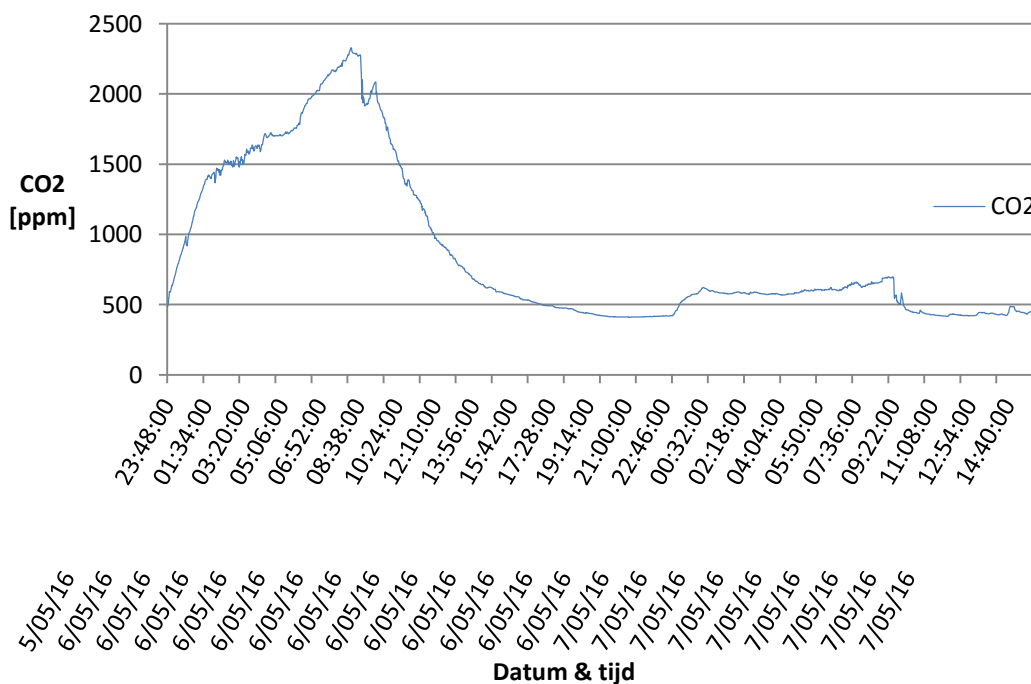
## CO<sub>2</sub> concentratie

Tegelijkertijd is er ook een meting uitgevoerd van de CO<sub>2</sub> concentratie in de binnenlucht. Deze meting wordt getoond in Figuur 63. Hierin staan de concentratie CO<sub>2</sub> in functie van de tijd. Op het moment dat de ruimte in gebruik werd genomen was er een concentratie van ongeveer 500ppm in de ruimte. Dit komt overeen met een zeer goede luchtkwaliteit. Door het uitblijven van ventilatie treedt er direct een stijging op in het CO<sub>2</sub> gehalte in de lucht. Vanaf 1100ppm is het aan te raden om te ventileren. Deze waarde is al na 1 uur en 10 minuten bereikt. Vanaf 1500ppm is het volgens de norm verplicht om te ventileren. Dit moment treedt op na 2 uur en 30 minuten. De rest van de nacht wordt er geslapen in lucht van slechte kwaliteit. Dit is ook te merken aan het gevoel bij het opstaan. De persoon die hier geslapen had 's morgens hoofdpijn en het gevoel slecht geslapen te hebben.

Direct na het opstaan is de deur naar de gang enkele minuten opengestaan. Dit is te zien aan de directe daling van de CO<sub>2</sub> concentratie. Nadien zijn de deur en het venster bewust dicht gehouden om de natuurlijke ventilatiegraad doorheen de bouwschil te bepalen. Op de grafiek is te zien dat er ongeveer een halve dag nodig is om de volledige ruimte te ventileren en de binnenconcentratie gelijk te krijgen aan die van buiten.

Bij de 2<sup>de</sup> nacht (6 mei 2016, van 23uur) bleef het venster wel op kip staan om ventilatie te hebben gedurende de nacht. Gedurende korte tijd stijgt de concentratie tot ongeveer 600ppm. Daarna blijft deze ongeveer constant. Dit wijst erop dat de mate van ventilatie en CO<sub>2</sub> productie ongeveer gelijk zijn.

Uit deze grafiek kan geconcludeerd worden dat het CO<sub>2</sub> gehalte geen probleem zal vormen indien het raam op kip kan openstaan gedurende de nacht. In de winter echter kan het door een te lage buitentemperatuur echter niet aangenaam zijn om het venster open te laten. In dit geval zouden er maatregelen genomen moeten worden om de binnenlucht te verversen.



Figuur 63: Meting CO<sub>2</sub>

Aan de hand van tracer-gas-decay-methode die besproken werd in 2.3 kan het ventilatiedebiet bepaald worden op het moment dat de ruimte verlaten wordt. Alle CO<sub>2</sub> bronnen vallen rond 9u26 's morgens. Op dit moment bedraagt de CO<sub>2</sub> concentratie 2085ppm. De meting stopt als de ruimte volledig geventileerd is en de binnenconcentratie ongeveer gelijk is aan die van buiten, in dit geval 416ppm. Dit is om 20u10 's avonds.

De concentraties dienen uitgedrukt te zijn in m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, 1 ppm is gelijk aan 1µl/l. De ppm-concentratie dient dus maal 10<sup>-6</sup> gedaan te worden om m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> te bekomen

$$\bar{A} = \frac{\ln C_2 - \ln C_1}{(t_2 - t_1)} = \frac{\ln(2085 * 10^{-6}) - \ln(416 * 10^{-6})}{(20,17 - 9,43)} = 0,15/h$$

**Vergelijking 9: gemiddelde ventilatievoud d.m.v. de tracer-gas-decay-methode**

$$\bar{Q} = \bar{A} * V_{zone} = 0,15 * 37,5 = 6,05m^3/h$$

De natuurlijke ventilatiegraad van deze kamer bedraagt 6,05m<sup>3</sup>/h. Als we naar de ventilatienorm kijken zien we dat er een minimaal debiet van 25m<sup>3</sup>/h of 3,6m<sup>3</sup>/(h.m<sup>2</sup>) (54m<sup>3</sup>/h voor deze slaapkamer) moet zijn in een slaapkamer [54]. De natuurlijke ventilatie die hier aanwezig is, is dus ruim onvoldoende om te voldoen aan de ventilatie-eis.

## **Conclusie**

Uit de deze vergelijkingen kan dus besloten dat temperatuur en relatieve vochtigheid geen problemen vormen in deze slaapkamer indien er gedurende ±12 uur geen ventilatie voorzien is. Voor het CO<sub>2</sub> gehalte is dit echter een ander verhaal. Indien er een persoon aanwezig is stijgt het CO<sub>2</sub> gehalte tot ongezonde concentraties (>1600ppm). Het is dus aan te raden om altijd ventilatie te voorzien indien er iemand zich in deze ruimte bevindt. Hierbij dient natuurlijk opgemerkt te worden dat de grote van de slaapkamer een grote rol speelt. Indien de ruimte veel kleiner is gaat de CO<sub>2</sub> concentratie veel sneller toenemen en zal er dus rapper nood zijn aan ventilatie.

Er is ook gebleken dat de natuurlijke ventilatiegraad onvoldoende is om de ruimte op een efficiënte manier te ventileren.

## **5.3 Monitoren van een badkamer**

In de badkamer van dezelfde woning werd de relatieve vochtigheid en CO<sub>2</sub> concentratie gemeten. Deze parameters worden tegen elkaar afgewogen om te kijken wat de maatgevende parameter is in een (normaal gezien) vochtige ruimte. De badkamer heeft een vulome van ...m<sup>3</sup> en heeft 1 dakvenster en 1 deur. In de periode dat er gemeten werd waren de gemiddelde dag- en nachttemperatuur respectievelijk 19°C en 8°C.

### **Temperatuur en relatieve vochtigheid**

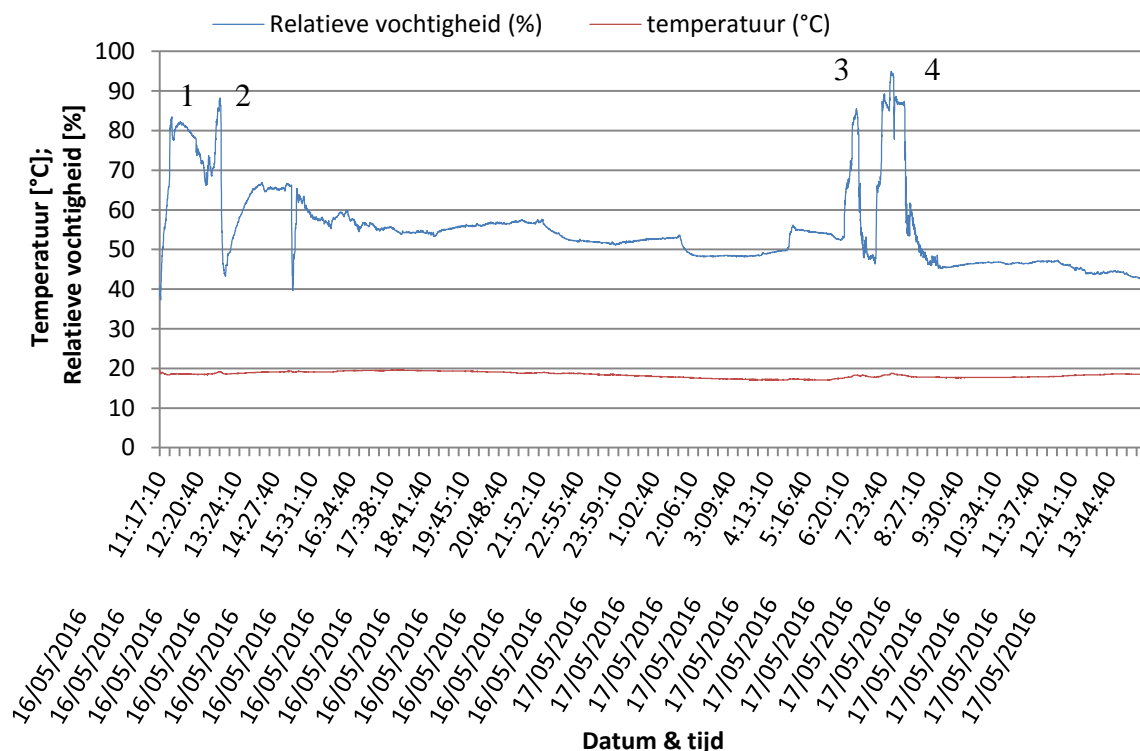
In Figuur 64 is de meting van de temperatuur en relatieve vochtigheid te zien. We zien dat de temperatuur tijdens het douchen vrij constant blijft. We zien net als bij de meting in de slaapkamer dat enkel de 's nachts de temperatuur lichtjes afneemt. Doordat in beide gevallen

deze afname aan temperatuur zo gering is kan er besloten worden dat er weinig warmteverliezen doorheen de bouwschil optreden wanneer het verschil tussen de binnen- en buitentemperatuur eerder beperkt is.

Aan de curve van de relatieve vochtigheid zien we wel de invloed van het gebruik van de badkamer. Op het moment dat de meting begint gaat er net iemand douchen (nr. 1). Er is een onmiddellijke stijging van de relatieve vochtigheid te zien. Er is te zien dat de vochtigheid stijgt tot boven de 80%. Indien de relatieve vochtigheid zich boven dit punt bevindt is er al de mogelijkheid tot schimmelvorming. Nadat er gedoucht werd was er geen ventilatie aanwezig. Door condensatie tegen koude oppervlakken en ongewilde ventilatie door de bouwschil neemt de vochtigheid gestaag af.

Rond half 2 wordt er opnieuw gedoucht (nr. 2). Doordat de relatieve vochtigheid nog rond de 70% lag stijgt deze nu tot meer dan 90%. Dit was in de badkamer zelf ook goed te zien aan de condensatie op de spiegels en vochtvorming op de buitenmuren. Hierna is er wel ventilatie voorzien door de deur naar de gang korte tijd open te doen. Dit resulteert in een directe daling. Na het sluiten van de deur begint de vochtigheid weer te stijgen door de verdamping van het gecondenseerd vocht. Rond 13:24 is dit vocht terug verdampt en begint door ongewilde ventilatie de relatieve vochtigheid terug te dalen. Op dit moment bedraagt de relatieve vochtigheid 65%, wat op zich problemen met zich meebrengt.

Op 17/05 tussen 6:20 en 8:30 zijn dezelfde waarneming gedaan. Tijdens het douchen (nr. 3 en 4) stijgt de relatieve vochtigheid zeer snel tot boven de 80%. Is er daarna ventilatie daalt deze ook weer snel tot gezonde hoogtes.



Figuur 64: Temperatuur en relatieve vochtigheidsmeting in badkamer

In deze badkamer is er ook een visuele inspectie geweest. In een hoek boven de douche is er schimmel aangetroffen (Figuur 65). Dit komt doordat de wandtemperatuur in de hoek lager



ligt dan in de badkamer zelf. Doordat de douche de grootste bron van vocht is en de luchttemperatuur er lokaal verhoogd wordt door warm water is deze hoek heel gevoelig voor condensatie en schimmelgroei. Beide factoren zorgen ervoor dat er condensatie optreedt in de hoek en schimmelgroei veroorzaakt.



**Figuur 65: schimmelgroei in badkamer**

Aan het dakvenster is er aantasting van het hout waargenomen. Ook hier is er condensatie door een lagere temperatuur van het glas. Doordat het water in contact komt met het hout treedt er degradatie van het hout op. De aantasting van het raamprofiel is te zien in Figuur 66.



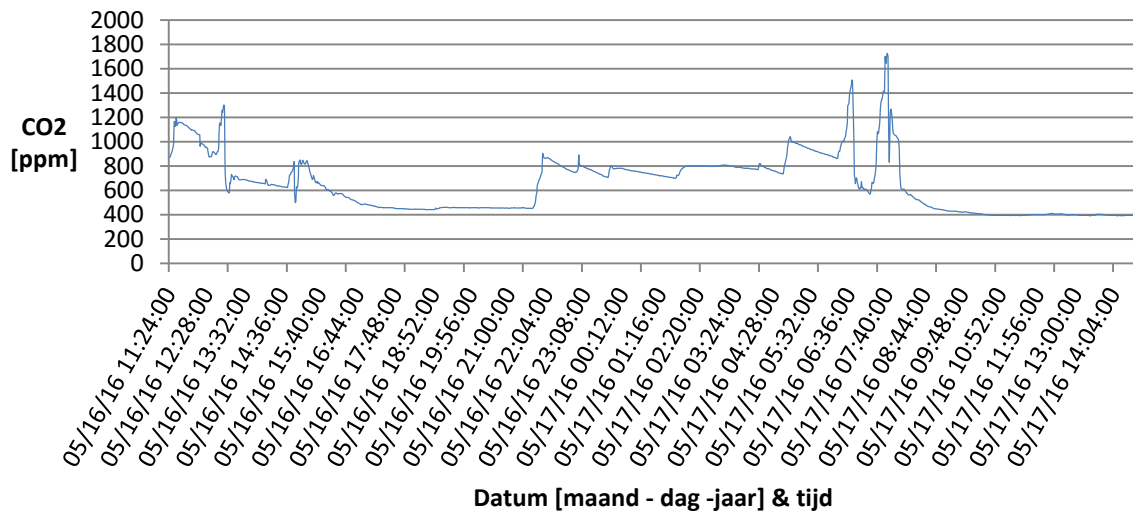
**Figuur 66: Aantasting houten dakvenster in badkamer**

### ***CO<sub>2</sub> concentratie***

In de badkamer werd simultaan met temperatuur en de relatieve vochtigheid de CO<sub>2</sub> concentratie gemeten. De meting hiervan is te zien in Figuur 67. We zien dat Op de momenten dat er iemand aanwezig was in de badkamer de CO<sub>2</sub> concentraties toenam. Op 16/05 was er telkens maar 1 persoon aanwezig in de ruimte. Door de korte verblijftijd bleef de CO<sub>2</sub> concentratie beperkt. Op dit moment was er een aanvaardbare binnenluchtkwaliteit (1100ppm < CO<sub>2</sub> concentratie < 1600ppm).

Op de tweede dag van de meting werd de badkamer 's morgens intensief gebruikt en waren er op verschillende momenten meerdere personen in de badkamer aanwezig. Omdat dit een kleinere ruimte is stijgt de CO<sub>2</sub> concentratie zeer snel. Op dit moment steeg de CO<sub>2</sub> concentratie wel tot niet-aanvaardbare hoogtes (>1600ppm).

Op de momenten dat er geventileerd werd door een openstaand deur daalde de concentratie onmiddellijk terug tot op naar een gezond binnenluchtklimaat.



Figuur 67: CO<sub>2</sub> concentratie in een badkamer

## Conclusie

Uit deze twee metingen en de waarnemingen in de badkamer blijkt dat de vochtigheid de maatgevende factor is een badkamer (vochtige ruimte). Door de beperkte verblijftijd ( $\pm 30$ min per persoon) blijft de stijging van CO<sub>2</sub> deeltjes beperkt. Voor het ventilatiesysteem en het monitoren van een badkamer wordt dus best gebruik gemaakt van een vochtigheidsensor. Hiermee wordt schimmelgroei en aantasting van materialen vermeden.

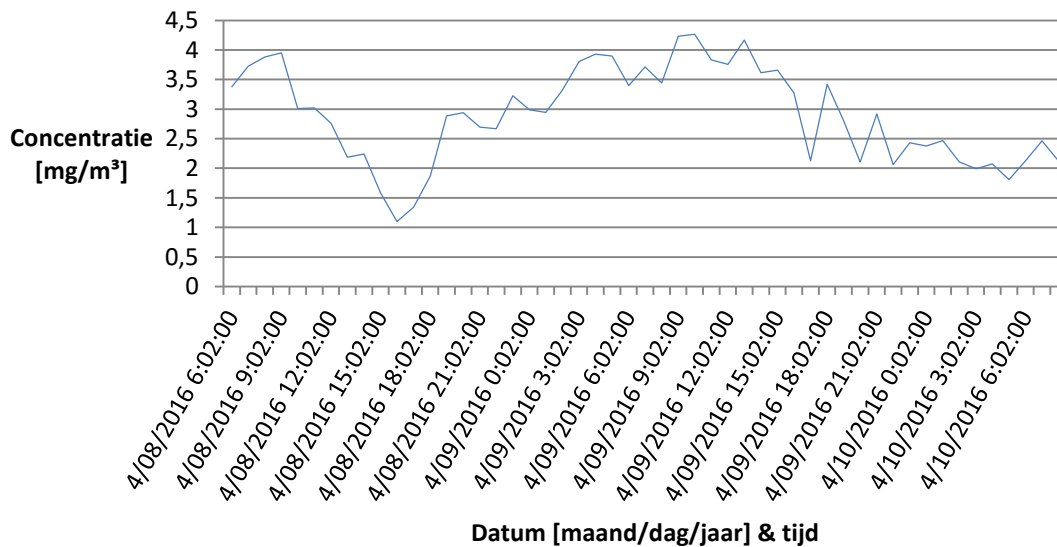
## 5.4 Fijnstof metingen

Om de fijnstof datalogger toch te kunnen testen werden er 2 metingen uitgevoerd in de voorgenoemde woning. Er werd een meting uitgevoerd in een open keuken en één in een slaapkamer. Het probleem dat opgetreden is bij het verwerken van de metingen is de eenheid van de concentratie. Volgens de datasheet zou de eenheid in milligram per kubieke meter zijn [46]. De daggemiddelde waarde bij een meting in de keuken zou dan  $3\text{mg/m}^3$  oftewel  $3000\mu\text{g/m}^3$  bedragen. Indien de PM<sub>2,5</sub> waarde groter is dan  $47\mu\text{g/m}^3$  spreekt men al van een zeer slechte binnenluchtkwaliteit. De enige verklaring hiervoor is dat de eenheid  $\mu\text{g/m}^3$  moet zijn. Indien dit zo zou zijn worden er wel logische waarde gemeten. Uit de uitgevoerde metingen kan wel de invloed van bepaalde handeling bepaald worden

### Slaapkamer

De datalogger werkt zo dat er een meting om de dertig seconden gebeurt. Tussen de metingen zit er een zeer grote variatie waardoor er uurgemiddelde zijn gegeneerd. De uurgemiddelde PM<sub>2,5</sub> concentratie in de slaapkamer is weergegeven in Figuur 68. Hierop is te zien dat er op een 8 april een daling aan fijnstof optreedt. Op dit moment was er niets aanwezig in slaapkamer dat fijnstof kon produceren of doen rondzweven. 's Avonds werd de ruimte terug

in gebruik genomen. Dit is goed te zien aan de directe stijging aan fijnstof. Vanaf dat moment is de ruimte continue in gebruik geweest om te slapen en te studeren. De nacht van 8 april en de voormiddag van 9 april was er geen ventilatie voorzien in de ruimte. Dit komt naar voren in de globale stijging van fijnstof. Rond 3 uur 's middags (9 april) is er een venster opengezet. Onmiddellijk daalt de concentratie fijnstof. De nacht van 10 april is er wel ventilatie voorzien. Dit is ook te zien aan het relatief constante niveau van het fijnstof gehalte.



Figuur 68: PM<sub>2.5</sub> in slaapkamer - uurgemiddelde

Om de binnenluchtkwaliteit te kunnen beoordelen dient de daggemiddelde of 24-uur gemiddelde waarde berekend te worden. Deze zijn voor deze slaapkamer gegeven in Tabel 49. Deze is voor de 2 dagen vrij constant

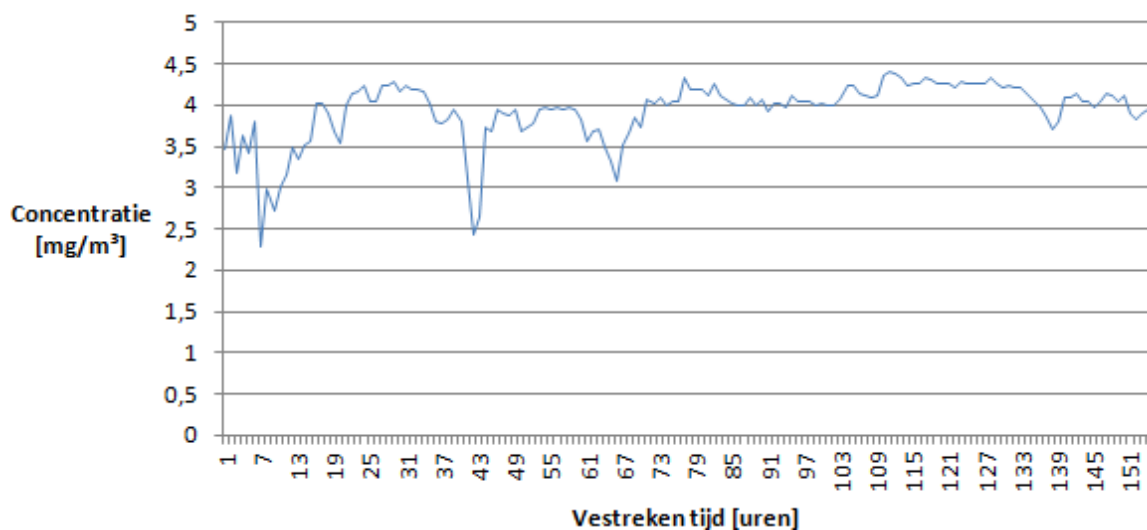
Tabel 49: PM<sub>2.5</sub> 24-uurgemiddelde in slaapkamer

Dag	PM <sub>2.5</sub> 24-uurgemiddelde [mg/m <sup>3</sup> ]
08/04/2016 – 09/04/2016	2,9
09/04/2016 – 10/04/2016	3,0

Bij een tweede meting op de slaapkamer is er iets misgelopen met de opslag van de data naar de SD kaart. Hierdoor kan er in Figuur 69 enkel gekeken worden naar uurgemiddelde zonder echte tijdsaanduiding. De begintijd ligt ergens rond 12 uur middernacht. Doordat de tijd van de meting niet precies is het ook moeilijker om uitschieters te verklaren. Aangezien de plotse dalingen van het fijnstof gehalte 's morgens en 's avonds optreden zijn deze vermoedelijk veroorzaakt door het ventileren van de ruimte. Doordat de tijd tussen de metingen wel gekend zijn kon er wel een 24-uurgemiddelde opgesteld worden. Deze zijn te vinden in Tabel 50. Er valt op te merken dat deze altijd rond de 4 mg/m<sup>3</sup> schommelen.

Tabel 50: 2de meting PM<sub>2.5</sub> in een slaapkamer

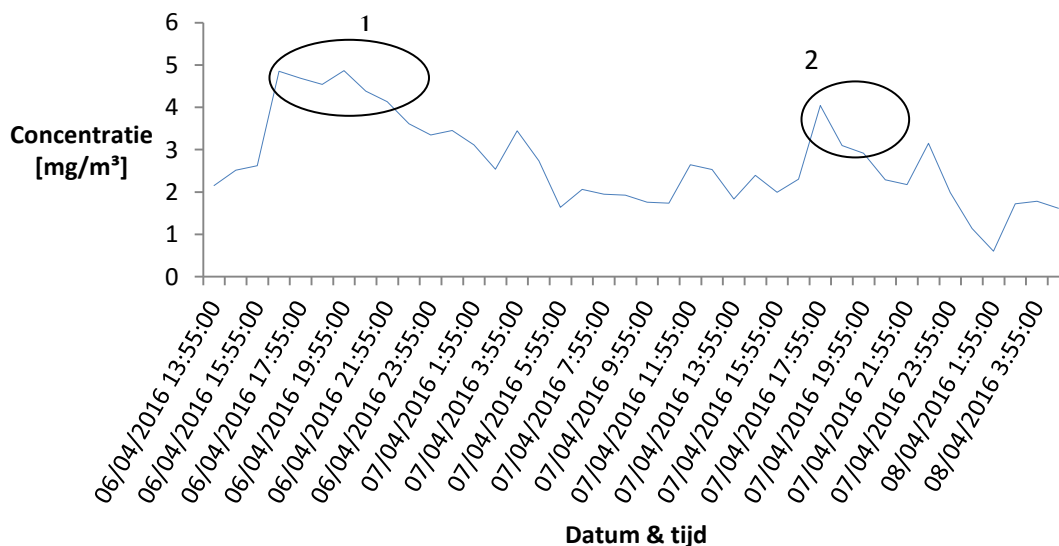
Dag	PM <sub>2.5</sub> 24-uurgemiddelde [mg/m <sup>3</sup> ]
Dag 1	3,5
Dag 2	3,8
Dag3	3,8
Dag4	4,1
Dag 5	4,2
Dag 6	4,1



Figuur 69: PM<sub>2,5</sub> meting slaapkamer

### Keuken

Een tweede meting vond plaats in een open keuken van een gezinswoning. De concentratie PM<sub>2,5</sub> is te zien in Figuur 70. Een eerste piek (nr. 1) wordt veroorzaakt door 2 honden die binnen rond beginnen lopen. Deze brengen stofdeeltjes met zich mee naar binnen en doen stof dat al aanwezig is opwaaien. De tweede piek treedt op wanneer er gekookt wordt. In deze woning wordt gebruik gemaakt van een gasvuur. Door de verbranding van gas treedt er een verhoging aan fijnstof op.



Figuur 70: PM<sub>2,5</sub> in keuken - uurgemiddelde

In de keuken duurde de meting 1,5 dag. De 24-uurgemiddelde concentratie bedraagt hier 3mg/m<sup>3</sup>.

## **Conclusie**

Uit deze metingen kan dus geconcludeerd worden dat de fijnstof datalogger eerst nog een kalibratiemeting nodig heeft om de waarde uit de metingen correct te interpreteren. Uit de meting in de slaapkamer is te concluderen dat de fijnstof concentratie vrij constant is doorheen de tijd. Uit de meting van de keuken is af te leiden dat koken op een gasvuur een verhoging van fijnstof met zich meebrengt. Ook een hond die binnen rondloopt is een bron van fijnstof

## **5.5 Opmerking bij metingen**

Na uitvoeren van de metingen ben ik op een enkele belangrijk probleem gestuit bij het verklaren van de optreden stijgingen en dalingen van de verschillende parameters. Indien men een verklaring voor elke verandering wil vinden is het zeer belangrijk om te weten welke handelingen er uitgevoerd zijn op welke tijd uitgevoerd zijn. Dit bevestigt dus de gevonden bevindingen in de literatuurstudie dat de mens de grootste invloed heeft op de binnenluchtkwaliteit. Om een woning te monitoren is het dus belangrijk dat de inwoners actief meewerken aan de monitoring door bij te houden wanneer en met hoeveel ze aanwezig waren in een bepaalde ruimte. Daarnaast dienen ze ook bij te houden welke handelingen ze uitgevoerd hebben.



## 6 Conclusie

Na uitvoeren van alle onderzoekstaken worden hier de belangrijkste conclusies nog eens overlopen.

Uit de literatuurstudie is gebleken dat de er verschillende oorzaken zijn van een slecht binnenklimaat. De hoofdoorzaken van vervuilingen in de binnenlucht zijn de menselijke activiteiten en de emissie uit de gebruikte materialen. De maatgevende parameters om binnenluchtkwaliteit in woningen te bepalen zijn de temperatuur, relatieve vochtigheid, fijnstof concentratie, koolstofdioxide concentratie, en vluchtige organische stoffen. Daarnaast zijn er ook enkele schadelijke stoffen die in mindere mate voorkomen in woningen zoals, koolstof monoxide, ozon en radon.

De binnenluchtkwaliteit kan op basis van de temperatuur en relatieve vochtigheid kan niet eenduidig bepaalt worden. Het adaptief comfort is voornamelijk afhankelijk van de mens. Iedere persoon heeft een andere verwachting van de temperatuur in een ruimte. De grenzen die aangenomen worden door de Belgische norm zijn afhankelijk van de seizoenen. In de winter dient de binnentemperatuur tussen 20 en 24°C te liggen, in de zomer tussen de 22 en 26°C

Voor de relatieve vochtigheid in een gebouw wordt er gebruik gemaakt van binnenklimaatklasse (I – IV) om grenzen op te stellen. Omdat er in elk gebouw een andere mate van vochtproductie heerst worden er grenswaarden voor de dampdrukken in een gebouw opgelegd. Voor een goed geventileerde woning dient de dampdruk binnen de 1.165 en 1.370 Pa. Om schimmelvorming te vermijden dient de relatieve vochtigheid onder de 80% te blijven. Dit is ook tevens de bovengrens die gegeven wordt door de Belgische norm.

Fijnstof deeltjes worden opgedeeld in 3 verschillende fracties oop basis van de grote van de deeltjes: ultrafijnstof (<0,1µm, PM<sub>0,1</sub>), fijnstof (<2,5µm, PM<sub>2,5</sub>) en grofstof (<10 µm, PM<sub>10,0</sub>). Vooral de ultrafijnstof en fijnstof deeltjes die schadelijk zijn voor de menselijke gezondheid. De belangrijkste bronnen van fijnstof deeltjes in een woning zijn afkomstig van de verbranding in een open haard (26%) en roken (14%) in een woning. Daarnaast zijn koken, stofzuigen, tapijten, etc. ook een bron van fijnstof.

Normen voor binnenlucht zijn voor de fijnstof concentratie in 2016 nog niet aanwezig. Voorlopig wordt de zelfde norm als voor de buitenlucht toegepast in gebouwen. De grenswaarden voor fijnstof worden opgesteld voor 24-uurgemiddelde en jaargemiddelde. De richtlijnen van de Europese gemeenschap en de Wereldgezondheidsorganisatie komen vrij goed overeen.

Koolstofdioxide is op zich niet schadelijk voor de menselijke gezondheid. Deze parameter is wel een goede indicator voor andere schadelijke stoffen. De voornaamste bron van CO<sub>2</sub> is de mens. Om de binnenluchtkwaliteit te bepalen aan de hand van de CO<sub>2</sub> concentratie wordt gebruikt gemaakt van IDA klasse (indoor air). Bij elke klasse hoort een bepaalde grenswaarde van het CO<sub>2</sub> gehalte. In TABEL worden de verschillende IDA klasse nog eens gegeven.

Tabel 51: classificatie binnenluchtkwaliteit [25, 26]

Klasse	Beschrijving	grenswaarde
IDA 1	Hoge binnenluchtkwaliteit	< 400ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau
IDA 2	Middelmatige binnenluchtkwaliteit	400 – 600ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau
IDA 3	Aanvaardbare binnenluchtkwaliteit	600 – 1000ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau
IDA 4	Lage binnenluchtkwaliteit	> 1000ppm CO <sub>2</sub> boven het buitenniveau

Door het CO<sub>2</sub> gehalte continue te monitoren kan het benodigde ventilatiedebiet bepaald. In dit geval spreekt men van vraaggestuurde ventilatie. Ook is het mogelijk om de ventilatiegraad van een ruimte te bepalen. Dit kan door middel 2 methodes: de evenwichts-CO<sub>2</sub>-analyse en de *tracer-gas-decay-methode*. Het grote verschil tussen de 2 methoden is de continue aanvoer van CO<sub>2</sub> bij de eerste methode. De totale CO<sub>2</sub> productie die precies gekend moet zijn is tevens de grote moeilijkheid. Daarom is deze methode minder geschikt om te gebruiken in woningen. Bij de *tracer-gas-decay-methode* mag er geen CO<sub>2</sub> productie aanwezig zijn, de woning moet met andere woorden volledig leeg zijn er er mag geen verbranding van brandstoffen optreden.

Vluchtige organische stoffen (VOS) zijn ook een belangrijke bron van verontreinigingen in een woning. VOS zijn afkomstig van menselijke activiteiten en emissie uit bouwmaterialen. Doordat er zeer veel verschillende soorten VOS zijn is het moeilijk om een onderscheidt te maken tussen de schadelijke en niet-schadelijke VOS. De belangrijkste emissiestof uit bouwmaterialen is formaldehyde. Op de dag van vandaag zijn er ecolabels en bepaalde materialen op de markt die de emissie van VOS beperken. Voor VOS zijn er nog geen normen beschikbaar. Hierdoor wordt de VOC concentratie vaak uitgedrukt in CO<sub>2</sub>-equivalente en deze getoetst aan de CO<sub>2</sub> norm.

Afhankelijk van het type ruimte is er een andere parameter maatgevend. In Tabel 52 worden de belangrijkste parameters per ruimte gegeven

Tabel 52: Maatgevende parameter in woningen, vertaald uit [5]

Toepassing	Residentieel			
	Keuken	leefruimte	slaapkamer	badkamer
<b>Meest voorkomende bronnen</b>	gassen, vocht	adem, gassen	adem, gassen	vocht
Vochtsensor	voldoende	zwak	voldoende	uitstekend
CO <sub>2</sub> sensor	zwak	goed	goed	zwak
VOS sensor	uitstekend	uitstekend	uitstekend	voldoende

Omdat de bestaande dataloggers vaak duur en weinig flexibel zijn is er onderzocht of *open-source* dataloggers minstens even goed werken. Als open-source platform is er gebruik gemaakt van Arduino en Particle. Beide platformen hebben specifieke voor- en nadelen. Bij Particle hardware is er standaard een wifiverbinding ter beschikking. Hierdoor zijn er bij Arduino borden meer elektronica componenten nodig om dit systeem als efficiënte datalogger te laten werken. Hierdoor zijn Particle dataloggers goedkoper uit te voeren. Tevens zijn de metingen van dit type te allen tijde online beschikbaar. Bij een Arduino datalogger dient er ter plaatse gegaan te worden om de meetwaarde uit te lezen. In Tabel 53 worden de verschillende prijzen nog eens op een rij gezet.



Tabel 53: overzicht prijzen *open-source* dataloggers

Type Datalogger	Arduino Uno [€]	Arduino pro mini [€]	Photon [€]
T&RH	93,22	92,44	48,55
PM <sub>2,5</sub>	96,94	96,16	52,27
CO <sub>2</sub>	159,42	158,64	114,75
VOC	106,07	105,29	61,4
T, RH, PM <sub>2,5</sub> , CO <sub>2</sub> , VOS	202,39	201,61	157,72

Doordat de kostprijs van een VOS sensor lager ligt dan die van een CO<sub>2</sub> sensor is het ook beter om ruimtes te monitoren met een VOS datalogger dan met een CO<sub>2</sub> datalogger.

Uit kalibratiemetingen van de T&RH datalogger en CO<sub>2</sub> datalogger is gebleken dat de gebruikte sensor geen verdere kalibraties nodig hebben om correcte meetresultaten te generen. Voor de PM<sub>2,5</sub> datalogger is er geen kalibratiemeting uitgevoerd kunnen worden. Uit metingen in een woning bleek dat de fijnstof concentratie in de grootorde van mg/m<sup>3</sup> terwijl grenswaarde uitgedrukt worden in µg/m<sup>3</sup>. Hierdoor is er besloten dat er voor deze sensor zeker kalibratiemetingen nodig zijn om te kijken of deze sensor wel correcte resultaten geeft.

Uit dit onderzoek is ook gebleken dat *open-source* dataloggers algemeen gezien goedkoper uit te voeren zijn met eenzelfde nauwkeurigheid. Ook zijn er zeer weinig *ready-made* dataloggers op de markt die in een ventilatiesysteem geïntegreerd kunnen worden. De *ready-made* sensoren die goedkoper waren, zijn meestal veel onnauwkeuriger en kunnen niet geïmplementeerd worden in een ventilatiesysteem. Tevens is gebleken dat de gebruikte sensoren voor de *open-source* dataloggers goed scoren op vlak van nauwkeurigheid. Voor de temperatuur en relatieve vochtigheid sensor zijn er betere varianten op de markt maar zullen de prijs dan uiteraard doen toenemen. In een woning is het echter niet nodig om de deze parameters 100% exact te kennen. Een kleine afwijking is met andere woorden zeker aanvaardbaar. Daarom is de DHT22 een goede optie om als low-cost sensor te gebruiken in woningen. De gebruikte CO<sub>2</sub> sensor is wel een zeer goede sensor. Er is geen enkele sensor op de markt met een groter meetbereik en nauwkeurigheid. Het meetbereik van deze sensor is wel vrij groot op te gebruiken in woningen. Door een andere sensor, met kleiner bereik, te kiezen kan de prijs wel nog zakken. Voor de PM<sub>2,5</sub> en VOS sensor zijn er door gebrek aan gegevens geen conclusies te trekken uit deze vergelijking.

Na het realiseren van de datalogger zijn er metingen uitgevoerd geworden in een oudere woning zonder ventilatiesysteem. Aan de hand van deze metingen werden bepaalde bevinding uit de literatuurstudie nogmaals bevestigd. Na het uitvoeren van deze metingen is er gebleken dat het verklaren van de optredende vervuilingen zeer afhankelijk zijn van de activiteiten die gebeuren in de woning. Belangrijk is ook op te merken dat metingen specifiek voor een bepaalde woning zijn. Na uitvoeren van zeer veel metingen kan pas een globaal beeld opgesteld worden over een bepaald type woning.

Aan de hand van de resultaten die uit dit onderzoek naar voren zijn gekomen kan er verder onderzoek gebeuren. Er zou zeker nog verder gewerkt moeten worden met de VOS sensor om deze dan te kunnen testen. Indien deze valabele metingen geeft kunnen woningen op een nog goedkopere manier gemonitord worden. Hiermee is het dan ook mogelijk om residentiële gebouwen te gaan testen. Nu gebleken is dat de gerealiseerde dataloggers goed werken kan met deze sensoren invloeden van bepaalde handelingen en gebruikte materialen verder onderzoeken.



## Literatuurlijst

- [1] P. Rui, M. Goncalo en C. Filipe, „Monitoring Indoor Air Quality to Improve Occupational Health,” Portugal, 2016.
- [2] „Camfil,” [Online]. Available: [www.camfil.nl/Luchtfiltertechnologie/IAQ-binnenluchtkwaliteit/Productiviteit/](http://www.camfil.nl/Luchtfiltertechnologie/IAQ-binnenluchtkwaliteit/Productiviteit/). [Geopend 09 04 2016].
- [3] B. S. Tiffanie Ramos, „Tools to improve built environment data collection for indoor,” *Building and Environment*, p. 15, 2014.
- [4] R. J. S. E. C. C. O. T. D. J. M. Ulla Haverinen-Shaughnessy, „An assessment of indoor environmental quality in schools,” *Building and Environment*, p. 6, 2014.
- [5] AMS, *Air Quality Solutions*, 72770 Reutlingen, Germany, 2015.
- [6] WHO, „WHO air quality guidelines - global update 2005,” Bonn, Germany, 2005.
- [7] n. e. e. Departement leefmilieu, „lne,” [Online]. Available: <http://www.lne.be/campagnes/bouw-gezond/bouw-gezond/materialen>. [Geopend 12 05 2016].
- [8] S. M. Joshi, „The sick building syndrom,” *Indian Journal of Occupational & Environmental Medicine*, vol. 2008, p. 4, 2008.
- [9] Y. Gypsum, „yoshino gypsum,” [Online]. Available: <http://yoshinogypsum.com/en/product/sickhouse/sickhouse01.html>. [Geopend 27 04 2016].
- [10] A. v. d. Linden, A. Boerstra, A. Raue, S. Kurvers en R. d. Dear, „Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate,” *Energy and Buildings*, p. 10, 2016.
- [11] *Belgisch staatsblad 19.10.2004*, 2004.
- [12] „Joostdevree,” [Online]. Available: [http://www.joostdevree.nl/shtmls/relatieve\\_vochtigheid.shtml](http://www.joostdevree.nl/shtmls/relatieve_vochtigheid.shtml). [Geopend 10 04 2016].
- [13] A. Vandepitte, „Analyse van binnenklimaatmetingen,” Gent, 2006.
- [14] WTCB, *TV 251 hellende daken*, 2014.
- [15] „ideg.info,” [Online]. Available: <http://www.ideg.info/media/docs/upload/Nieuwsbrief%20ODE%20Woningventilatie.pdf>. [Geopend 10 04 2016].
- [16] „airsain,” [Online]. Available: <http://www.airsain.be/vocht-regelen-met-bevochtigingen-ontvochtiging>. [Geopend 24 04 2016].
- [17] U. o. Twente, „utwente,” [Online]. Available: [https://www.utwente.nl/hr/vgm/gezondheid/werkplek\\_binnenmilieu/temperatuurvochtigheid/](https://www.utwente.nl/hr/vgm/gezondheid/werkplek_binnenmilieu/temperatuurvochtigheid/). [Geopend 26 03 2016].
- [18] W. D. F. P. Fang L, „Sick Building Syndrome symptoms caused by low humidity,” *Healthy building*, vol. 2003, nr. 3, p. 6, 2003.
- [19] Camfil, „Camfil,” [Online]. Available: <http://www.camfil.nl/Luchtfiltertechnologie/IAQ-binnenluchtkwaliteit/Luchtvervuiling-en-gezondheid/>. [Geopend 30 04 2016].
- [20] fijnstofmeter, „fijnstofmeter,” [Online]. Available: <http://www.fijnstofmeter.com/>. [Geopend 30 04 2016].
- [21] A. Hunt, J. Crawford, P. Rosenbaum en J. Abraham, „Levels of household particulate matter and environmental tobacco smoke exposure in the first year of life for a cohort at

- risk for asthma in urban Syracuse, NY,” *Environment International*, vol. 2011, nr. Volume 37, Issue 7, p. 10, 2011.
- [22] Kennislink, „Kennislink,” [Online]. Available: <http://www.kennislink.nl/publicaties/normen-luchtkwaliteit-ontoereikend>. [Geopend 30 04 2016].
- [23] E. Unie, „RICHTLIJN 2008/50/EG VAN HET EUROPEES PARLEMENT EN DE RAAD van 28 mei 2008 betreffende de luchtkwaliteit en schonere lucht voor europa,” Europees parlement en ede raad van de Europese Unie, 2008.
- [24] [Online]. Available: <http://www.fijnstofmeter.com/DC1700.html>. [Geopend 17 04 2016].
- [25] *NBN EN 13779*, 2010.
- [26] F. Descamps, *Duurzaam energiegebruik in kantoorgebouwen : een optimalisatieproces met*, 2006.
- [27] *Ventilatie van niet-residentiële gebouwen: Bijlage VI en NBN EN 13779:*, 2016.
- [28] gezondheidmilieu, „gezondheidmilieu,” [Online]. Available: <http://www.gezondheidmilieu.be/nl/subthemas/koolstofdioxide-533.html>. [Geopend 28 3 2016].
- [29] A. Kalkman, P. O. 'l. Veld en E. Willems, „Onderzoek eisen ventilatie in scholen,” Rotterdam, 202.
- [30] M. Stranger, K. D. Brouwere, R. Swinnen, R. Bormans en e. al, „Binnenlucht in basisscholen,” Mol, België, 2010.
- [31] CO2meter, „CO2meter.com,” [Online]. Available: <http://co2meters.com/Documentation/Datasheets/DS30-01%20-%20K30.pdf>. [Geopend 08 11 2015].
- [32] i. E. Willems en i. v. d. A. A., „CO2 sensortechnologie voor vraaggestuurde ventilatie,” *verwarming & ventilatie*, vol. 2003, p. 4, 2003.
- [33] T. Stavrou, J.-F. Muller, I. D. Smedt, M. V. Roozendael, G. R. v. d. Werf, L. Giglio en A. Guenther, „Evaluating the performance of pyrogenic and biogenic emission,” *Atmospheric*, p. 24, 2009.
- [34] J. C en B. J, „THE EFFECT OF BUILDING PLANNING ASPECTS ON INDOOR AIR QUALITY,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 2, p. 20, 2013.
- [35] V. V. D. V. E. L. FEDERALE OVERHEIDSDIENST VOLKSGEZONDHEID, *8 MEI 2014. — Koninklijk besluit tot vaststelling van de drempelniveaus*, Brussel: BELGISCH STAATSBLAD , 2014.
- [36] U. Schlinka, M. Rehwagen, M. Dammb, M. Richtera, M. Borte en O. Herbarth, „Seasonal cycle of indoor-VOCs: comparison of apartments and cities,” *Atmospheric Environment*, p. 10, 2004.
- [37] f. a. v. n. controle, „fanc.fgov,” [Online]. Available: <http://www.fanc.fgov.be/nl/page/hebt-u-een-vraag-in-verband-met-radon-het-fanc-geeft-u-het-antwoord-meer-weten/650.aspx>. [Geopend 07 05 2016].
- [38] W. Wenjuan, R. Olivier en M. Corinne, „Indoor air quality requirements in green building certifications,” *Building and Environment*, p. 10, 2015.
- [39] Y. Tsang-Chu en L. Chung-Chih, „An intelligent Wireless Sensing and Control System to Improve Indoor Air Quality: Monitoring, Prediction, and Preaction,” *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2015, p. 9, 2015.
- [40] A. Gibbs, *Building Open Source Hardware: DIY Manufacturing for Hackers and*

- Makers, New-York: Addison-Wesley, 205, pp. 253-277.
- [41] OSBSS, „OBSS,” [Online]. Available: <http://www.osbss.com/>. [Geopend 06 10 2015].
- [42] J. Blum, Exploring Arduino: Tools and Techniques for Engineering Wizardry, John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [43] Arduino, „Arduino,” [Online]. Available: <https://store.arduino.cc/product/A000058>. [Geopend 5 Mei 2016].
- [44] L. Aosong Electronics Co. en T. Liu, *Digital-output relative humidity & temperature sensore/module DHT22*.
- [45] Velleman, „Velleman,” [Online]. Available: <http://www.velleman.eu/products/view/?country=be&lang=nl&id=376086>. [Geopend 20 04 2016].
- [46] L. Samyoung S&C Co., *Datasheet Dust sensor Module DSM501*, Korea.
- [47] CO2meter, „CO2meter,” [Online]. Available: <http://www.co2meter.com/blogs/news/6010192-how-does-an-ndir-co2-sensor-work>. [Geopend 4 05 2016].
- [48] Vaisala, „Vaisala - Hoe koolstofdioxide meten,” [Online]. Available: <http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/Application%20notes/CEN-TIA-Parameter-How-to-measure-CO2-Application-note-B211228NL-A.pdf>. [Geopend 4 05 2016].
- [49] Extech. [Online]. Available: <http://www.extech.be/contents/nl/p68.html>. [Geopend 14 05 2016].
- [50] AMS, *AMS Datasheet iAQ-Core Indoor Air Quality Sensor Module*, 2015.
- [51] o. h. a. s. r. centre, „NCBI,” [Online]. Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2796751/>. [Geopend 26 03 2016].
- [52] WTCB, „wtcb,” [Online]. Available: <http://www.wtcb.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=bbri-contact&pag=Contact33&art=503>. [Geopend 26 05 2016].
- [53] KMI, „KMI,” [Online]. Available: <http://www.meteo.be/meteo/view/nl/123763-Huidige+maand.html>. [Geopend 27 05 2016].
- [54] VEA, „vlaanderen.be,” [Online]. Available: <http://www2.vlaanderen.be/economie/energiesparen/epb/doc/overzichtventilatiegebietenwonon.pdf>. [Geopend 27 05 2016].
- [55] V. Klima, Technisch handboek, Eindhoven: VDL Klima.
- [56] „sanderpianoservice,” [Online]. Available: <http://sanderpianoservice.com/caringforyourpiano.html>. [Geopend 26 03 2016].
- [57] L. Brussel, „De fijne deeltjes (PM10, PM2,5),” Brussel, 2010.
- [58] yoshino-gypsum, „yoshino-gypsum,” [Online]. Available: <http://yoshino-gypsum.com/en/product/sickhouse/sickhouse01.html>.



## Bijlage

### 6.1 Bijlage A1: CD

Op deze CD zijn alle bestanden te vinden die nodig zijn om de dataloggers te laten werken. In Arduino is het mogelijk om bepaalde code in '*libraries*' te schrijven. Deze code kan dan altijd opnieuw gebruikt worden in volgende programma's zonder deze effectief opnieuw te moeten schrijven. De gebruikte *libraries* zijn ook te vinden op CD. Op de CD is ook een korte gebruikshandleiding te vinden om de datalogger te programmeren.

# Auteursrechtelijke overeenkomst

Ik/wij verlenen het wereldwijde auteursrecht voor de ingediende eindverhandeling:

**Monitoring van gezinswoningen op basis van low-cost open-sources sensortechnieken**

Richting: **master in de industriële wetenschappen: bouwkunde**

Jaar: **2016**

in alle mogelijke mediaformaten, - bestaande en in de toekomst te ontwikkelen - , aan de Universiteit Hasselt.

Niet tegenstaand deze toekenning van het auteursrecht aan de Universiteit Hasselt behoud ik als auteur het recht om de eindverhandeling, - in zijn geheel of gedeeltelijk -, vrij te reproduceren, (her)publiceren of distribueren zonder de toelating te moeten verkrijgen van de Universiteit Hasselt.

Ik bevestig dat de eindverhandeling mijn origineel werk is, en dat ik het recht heb om de rechten te verlenen die in deze overeenkomst worden beschreven. Ik verklaar tevens dat de eindverhandeling, naar mijn weten, het auteursrecht van anderen niet overtreedt.

Ik verklaar tevens dat ik voor het materiaal in de eindverhandeling dat beschermd wordt door het auteursrecht, de nodige toelatingen heb verkregen zodat ik deze ook aan de Universiteit Hasselt kan overdragen en dat dit duidelijk in de tekst en inhoud van de eindverhandeling werd genotificeerd.

Universiteit Hasselt zal mij als auteur(s) van de eindverhandeling identificeren en zal geen wijzigingen aanbrengen aan de eindverhandeling, uitgezonderd deze toegelaten door deze overeenkomst.

Voor akkoord,

**Meesters, Joren**

Datum: **5/06/2016**