

Auteurs

Iain Walker, Woody Delp and Brett Singer, Lawrence Berkeley National Laboratory, vertaald door Hester Thoen en Arjen Raue, bba binnenmilieu

Zijn goedkope sensoren geschikt voor het beheersen van de luchtkwaliteit?

De huidige richtlijnen en technieken voor het reduceren van de concentratie verontreinigende stoffen in de binnenlucht richten zich vrijwel altijd op het beheersen van bepaalde, continu vrijkomende verontreinigingen door verdunning met buitenlucht (bijv. ASHRAE Standard 62.2-2016). Sommige normen omschrijven CO₂-metingen (bijv. EN 13779 (CEN 2007) en NEN 8088 (NEN 2011)) - dit is echter niet omdat CO₂ zelf een zorgwekkende verontreiniging is, maar omdat het kan worden gebruikt als bezettingsindicator of als stof die correleert met bioeffluenten. In het ideale geval zouden we de verontreinigingen rechtstreeks meten en ventileren om de concentraties binnen acceptabele grenzen te houden. Dit zou garanderen dat de concentraties niet te hoog worden. Daarnaast kan, als de concentraties laag zijn, energie bespaard worden door het ventilatiedebiet te verlagen. Tot voor kort was directe beheersing van verontreinigingen in woon- (en de meeste kantoor-)gebouwen niet haalbaar vanwege de hoge kosten en onderhoudsvereisten voor monitoringsapparatuur. In de afgelopen jaren zijn goedkopere sensoren ontwikkeld voor enkele relevante verontreinigingen – waarvan die voor fijnstof (PM_{2,5}) een belangrijk voorbeeld zijn. Deze sensoren worden al op grote schaal toegepast in luchtkwaliteitsmonitors die voor minder dan USD 250 worden verkocht. Dit biedt mogelijkheden voor de directe regeling van ventilatie en filtersystemen op basis van fijnstof. Maar zijn deze monitors in de praktijk betrouwbaar genoeg om toe te passen voor de regeling van een ventilatiesysteem?

In deze studie zijn laboratoriumexperimenten uitgevoerd om de resultaten van zeven goedkope monitors te vergelijken met meetresultaten van professionele meetapparatuur en met referentie-instrumentarium. Bij de laboratoriumtesten hebben we diverse bronnen gebuikt om te bepalen of de monitors betrouwbaar de deeltjesemissies kunnen detecteren bij enkele veelvoorkomende huishoudelijke activiteiten. Het

Serie over luchtkwaliteit-monitoring

Dit is deel 1 in een serie artikelen over luchtkwaliteit-monitoring in gebouwen d.m.v. online sensornetwerken. Dit artikel is vertaald door Hester Thoen en Arjen Raue van bba binnenmilieu en geplaatst met medewerking van de eerste auteur, Iain Walker.

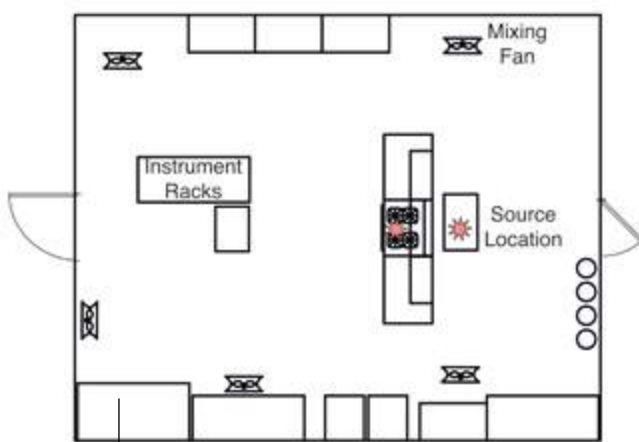
Online sensornetwerken hebben de toekomst. De maatschappelijke belangstelling voor de gezondheidseffecten van onvoldoende luchtkwaliteit groeit. Er is bijvoorbeeld steeds meer bekend over de schadelijke effecten van fijnstof in het binnenmilieu. Ondertussen maken Internet of Things en steeds betrouwbaardere sensoren het mogelijk om verschillende parameters voortdurend te monitoren via online sensornetwerken. De kosten van zulke netwerken dalen snel. Sensornetwerken passen bovendien bij de eisen die internationale certificeringsmethoden zoals WELL en RESET stellen aan (de monitoring van) het binnenmilieu. bba volgt deze ontwikkelingen op de voet en heeft al verschillende projecten uitgevoerd met online-sensornetwerken in binnen- en buitenland.

moet opgemerkt worden dat een belangrijk aspect van dit werk het vaststellen van de deeltjesgrootte is. De huidige opvatting is dat deeltjes met een diameter van minder dan 2,5 microns (PM_{2,5}) het meest zorgwekkend zijn voor de gezondheid. Er zijn wat zorgen dat kleinere deeltjes (kleiner dan 0,1 microns in diameter) ook een gezondheidsrisico kunnen vormen, hoewel het bewijs voor deze kleinere deeltjes als een significant gezondheidsrisico niet zo sterk is. De meeste monitors die voor dit onderzoek zijn geëvalueerd, kunnen de resultaten niet direct uitsplitsen naar deeltjesgrootte (voor de monitors die dat wel

kunnen, hebben we toch het deeltjesaantal gebruikt en de resultaten niet uitgesplitst). In plaats daarvan gebruiken ze kalibraties of signaalconditionering om de ruwe output van een deeltjessensor te vertalen in een gerapporteerde deeltjesconcentratie. Daarom bevatten onze resultaten zowel de directe output van de deeltjessensor als de kalibratie die door de fabrikanten van de luchtkwaliteitsmonitors is gebruikt. De verhoudingen tussen de deeltjesgroottes verschillen per huishoudelijke activiteit, zoals zal worden getoond in onze resultaten. De resultaten kunnen worden gebruikt om te beoordelen of deze monitors in staat zijn om een redelijk regelsignaal voor een ventilatiesysteem te leveren. De resultaten van dit onderzoek worden in detail besproken in Singer en Delp (2018), samen met meer informatie over de prestaties van individuele monitors en de discussie van potentiële bronnen van fijnstof in de binnenlucht.

Laboratoriumonderzoek

De experimenten zijn uitgevoerd in een laboratorium van 120m³ met een oppervlak van 5,8m bij 7,1m, zoals weergegeven in figuur 1. De lucht in de ruimte werd continu gemengd met vaste en zwenkende ventilatoren. Deeltjesmonitors voor consumenten en voor professioneel gebruik zijn samen met referentie-instrumenten in het centrale gebied op een draadrek geplaatst, voldoende ver verwijderd van bronactiviteiten zodat metingen de gemiddelde ruimtelucht in plaats van geconcentreerde pluimen zouden weergeven. In een aparte reeks experimenten zijn filtermonsters verzameld voor in de tijd geïntegreerde, gravimetrische massabepaling. Tijdens bronactiviteiten waren de mechanische ventilatiesystemen uitgeschakeld en was er hooguit luchttoevoer door



Figuur 1: Plattegrond van testlaboratorium.

natuurlijke infiltratie. Nadat de bronactiviteit was beëindigd, lieten we de deeltjes op natuurlijke wijze bezinken. In de meeste experimenten werden na ongeveer 1 uur bezinken de buitendeuren aan weerszijden van het laboratorium geopend om de ruimte snel te ventileren en resterende deeltjes en andere verontreinigende stoffen te verwijderen. Tijdens de experimenten werd met een tracergasmethode het ventilatievoud gemeten, dat varieerde van 0,5 tot 1,1 h⁻¹ met een mediaan van 0,7 h⁻¹. Voorafgaand aan elke bronactiviteit werden nulmetingen uitgevoerd. Deze basiswaarden zijn van de meetresultaten van de bronactiviteit afgehaald en geïntegreerd over tijd om massa-integratie-metingen voor de bron te berekenen.

Deeltjesbronnen

Het doel van deze studie was om de meetresultaten van consumenten- en professionele monitors te vergelijken met referentie-instrumenten bij typische binnenshuis gegenereerde aerosolen. Daarom hebben we niet geprobeerd de bronemissies nauwkeurig te beheersen. In plaats daarvan hebben we bronnen gebruikt die vaak in een huis voorkomen. Er waren 16 verschillende bronnen: brandbare bronnen zoals kaarsen, sigaretten en wierook; minerale bronnen zoals een ultrasone luchtbevochtiging zonder filter, Arizona (AZ) teststof en het schudden van een stofzwabber; kookbronnen zoals olie in een stalen wok op gas- of elektrische branders, spek bakken en vier boterhammen roosteren in een broodrooster en sperziebonen roerbakken in olie op een gasbrander. Kookbronnen die grote aantallen deeltjes produceerden met lage tot gemiddelde massaconcentraties en bijna allemaal onder 0,3 µm zijn, waren het verwarmen van water in een afgedekte pan op een gasfornuis, het verwarmen van de gasoven, het bakken van pizza in de gasoven, het bakken van pannenkoeken in een licht geoliede pan op middelhoog vuur en brood roosteren in een al vaak gebruikte elektrische broodrooster.

Elke bron was ongeveer 10-15 minuten actief.

De hoogst gemeten (5-minuten) massaconcentratie, gecorrigeerd voor de basiswaarde, (aangepaste Mini-WRAS-gegevens) varieerde van 21 µg m⁻³ voor de pannenkoeken tot 721 µg m⁻³ voor een van de experimenten met het roerbakken van sperziebonen. De piekaantalconcentraties varieerden van de AZ teststof- en stofzwabberexperimenten (bij 2-5 x 10³ cm⁻³) tot het spek- en toast-experiment bij 2 x 10⁵ cm⁻³. De vijf experimenten met de laagste piekmassaconcentratie (pannenkoeken, pannen op gasbranders, oven, pizza, verbrande toast) bevonden zich midden in de verdeling van de piekaantalconcentraties (6^e tot 18^e van de 32 experimenten).

Deeltjesmonitors

Een Grimm Mini Wide Range Aerosol Spectrometer Model 1.371 (Mini-WRAS) is als referentie gebruikt voor de metingen (interval per 1 minuut) en ook voor de verdeling van deeltjesaantallen en massaconcentraties. De Mini-WRAS combineert een elektrische mobiliteitsanalysator, die deeltjes in 10 formaatgroepen van 10 tot 200 nm telt, met een lasergebaseerde optische deeltjesteller die deeltjestellingen levert in 15 formaatgroepen van 0,2 mm (200 nm) tot 2,5 mm plus 16 groepen van 2,5 tot 35 mm. De Grimm schat de volumeconcentratie door aan te nemen dat de deeltjes bolvormig zijn en berekent vervolgens de massa uitgaande van een dichtheid van $1,68 \text{ g cm}^{-3}$. De dichtheid is een door de gebruiker te definiëren parameter waarmee de Mini-WRAS aerosolen met verschillende samenstelling kan meten.

Voor de test zijn zeven monitors van consumenten-kwaliteit geselecteerd. Alle monitors waren begin 2017 op de markt in de VS en zijn eerder getest door de US EPA of AQ-SPEC voor gebruik buitenshuis. Daarnaast gaat het om monitors waarvan het onderzoeksteam heeft gehoord over het gebruik ervan in een of meerdere citizen science projecten. We hebben ook twee monitors van onderzoekskwaliteit getest die vaak worden gebruikt in veld- en laboratoriumstudies. Overzichts-informatie voor de apparaten is weergegeven in tabel 2. Alle monitors hebben een datarapportage-interval dat geschikt is om een ventilatiesysteem op te regelen: meestal is 5 à 10 minuten kort genoeg.

Voorbeelddata

Figuur 2 toont enkele voorbeeldresultaten die de verschillende tijd- en grootte-reacties van de monitors illustreren. De afbeelding toont twee zeer grote bronnen - kaarsen en olie verwarmd op een gasbrander - die duidelijke en substantiële, hoewel niet volledig kwantitatieve reacties van alle apparaten opleverden. De Egg, Awair en Speck rapporteerden allemaal slechts een klein deel van de werkelijke massaconcentratie. Emissies van de stofzwabber, die met

Tabel 1: Deeltjesbronnen.

Naam bron	Beschrijving
Humidifier	Ultrasonische luchtbevochtiger, filter verwijderd
Incense	Wierookstokje (Shanthimalai Red Ng Champa)
AZ Dust	Arizona teststof (0-3micron) handmatig uit de zak geblazen
Beans	150g bevroren sperziebonen, 15g canola-olie geroerbakt in stalen wok op gasfornuis
Toast	Eén boterham, halfdonker geroosterd in gebruikte broodroosteroven
Bacon+Toast	280g spek gebakken op gasfornuis; 4 boterhammen halfdonker geroosterd in broodrooster
GB Oil	15g canola-olie borrelend in stalen wok op gasfornuis
Burnt toast	Boterham, donker geroosterd in gebruikte elektrische gloeispiraal-broodrooster
Dust mop	Wild schudden van een stofzwabber van 90 cm breed
Candles	5 ongeparfumeerde dinerkaarsen, aangestoken met butaan-aansteker
Gas+Pots	Twee afgedekte vijfliterpannen, half gevuld met water, verwarmd op gasfornuis
Oven	Gasoven in 12 min verwarmd tot 204°C (daarvoor circa 4 jaar niet gebruikt)
Pancakes	Twee porties pancakes gebakken in een licht geoliede koekenpan op gasbrander
Pizza	Gasoven in 14 minuten verwarmd tot 204°C; bevroren pizza gebakken
Cigarettes	3 sigaretten aangestoken met butaan aansteker, smeulend tot ze vanzelf doofden
Electric Oil	15g canola-olie borrelend in koekenpan op een elektrische kookplaat

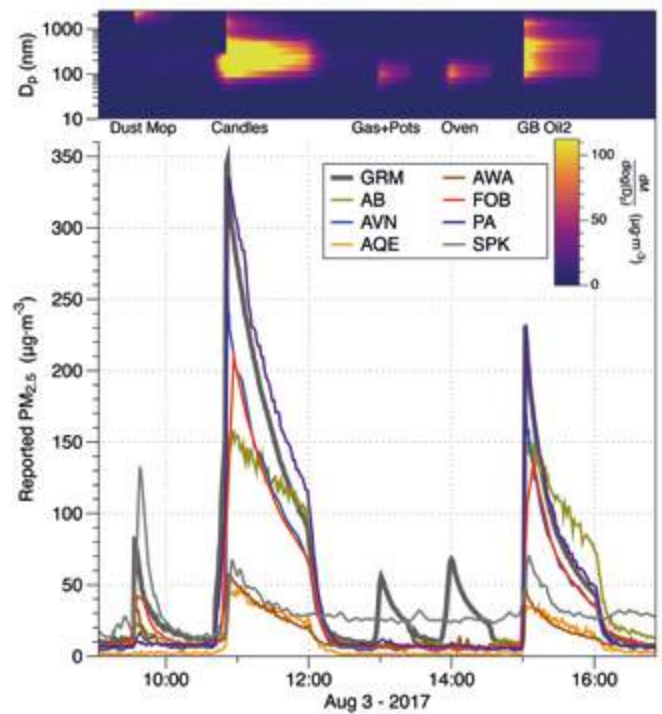
Tabel 2: Consumenten- en professionele monitors die deel uitmaakten van deze studie.

Apparaat [Code]	Kosten (\$US)	Data interval	Deeltjessensor	Opmerkingen
AirBeam [AB]	\$249	1 sec	Shinyei PPD60PV	Volledige schema's en programma's beschikbaar op github https://github.com/HabitatMap/AirCastingAndroidClient/tree/master/arduino/aircasting Website vermeldt $\text{PM}_{2,5}$ meerdere keren, maar geeft geen lijst van de specificaties
Air Quality Egg [AQE]	\$280	1 min	Shinyei PPD42	Noemt $\text{PM}_{2,5}$, maar geeft een bereik van 0,5-10 μm weer
AirVisual [AVN]	\$200	10 sec	AVPM25b	Sensor ontwikkeld door AirVisual. Rapporteer normaaliter $\text{PM}_{2,5}$ voor deeltjes 0,3-2,5 μm
Awair [AWA]	\$199	10 sec	Sharp GP2Y-1010AU0F	Productinformatie beschrijft meting als "PM". Bereik van 0-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. (Dit komt overeen met lineair bereik voor spanningsoutput zoals gespecificeerd in productinformatie van Sharp-sensoren)
Foobot [FOB]	\$199	5 min	Sharp GP2Y-1010AU0F	Productspecifiek 'leer'-algoritme toegepast op het signaal. Productinformatie beschrijft $\text{PM}_{2,5}$ -meetbereik voor 0,3-2,5 μm als 0-1.300 $\mu\text{g}/\text{m}^3 \pm 4 \mu\text{g}$ of $\pm 20\%$
PurpleAir PA-II [PA]	\$229	80 sec	Plantower PMS1003	Rapporteert aantallen in 6 categorieën; PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} . Gekalibreerd op buitenlucht in Beijing. Tel-efficiëntie: 50% @0,3 μm 98% $\geq 0,5 \mu\text{m}$ Consistentiefout: $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ @0-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, $\pm 10\%$ 100-500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Speck [SPK]	\$200	1 min	Syhitech DS-M501A	Gekalibreerd met AZ teststof. Machine learning algoritmen toegepast op sensorsignaal. Productinformatie beschrijft bereik van 0,5-3 μm
Thermo pDR-1500 [PDR]	~\$6.000	20 sec	Productspecifiek	Gekalibreerd met SAE fijn AZ teststof. Precisie: $\pm 0,5\%$ van lezen of $\pm 0,0015 \text{ mg}/\text{m}^3$, welke groter is, gemiddelde over een interval van 10 sec. Nauwkeurigheid: $\pm 5\%$ van lezen \pm precisie
MetOne BT-645 [BT]	~\$3.000	1 min	Productspecifiek	Gekalibreerd met 0,54mm diameter polystyreen latex bolletjes. Nauwkeurigheid: 5%

name bestaan uit de grootste deeltjes, veroorzaakten reacties van sommige maar niet alle monitors; hoewel voor deze bron de Speck-reactie aanzienlijk hoger was dan de schatting van de werkelijke massaconcentratie. Het gebruik van de gaskookplaatbranders om water in afgedekte pannen te verwarmen en het verwarmen van de lege oven resulteerde in een Mini-WRAS-sig-naal (GRM) dat duidde op grote aantallen deeltjes onder 100 nm en lage massaconcentraties, maar resulteerde in geen waarneembare reactie bij de andere monitors. Opmerkelijk is dat de Speck-basislijn lijkt te zijn verschoven na het experiment waarbij de kaars als bron is gebruikt.

Voor apparaten die vaker dan elke minuut een monster nemen, zijn gegevens gemiddeld over intervallen van 1 minuut. Het bovenste gedeelte van de grafiek is afkomstig van de GRM en toont de massaverdeling per deeltjesgrootte, waarbij dM staat voor *differential Mass*. De *Dust Mop* geeft voornamelijk grote deeltjes af, terwijl de *Candles* vooral deeltjes uitstoten met een grootte van 100 tot 500nm.

Figuren 3 t/m 7 geven een samenvatting van de testresultaten voor de monitors, uitgesplitst naar het type bron. De inzetgrafiek in elke figuur toont



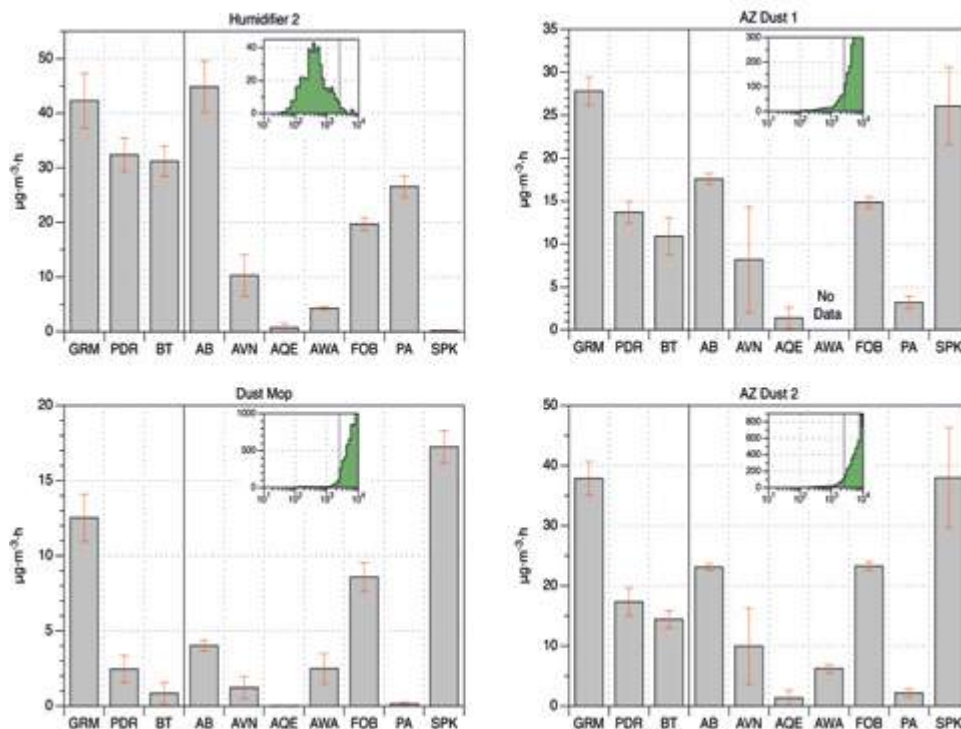
Figuur 2: Voorbeeld van resultaten uit vijf experimenten met verschillende bronnen.

de deeltjesgrootteverdeling. Dit is belangrijk omdat deze resultaten aantonen dat de sensoren gevoelig zijn voor deeltjesgrootte - in het bijzonder voor de <0,3 micron deeltjes van verbranding en koken (in figuur 7).

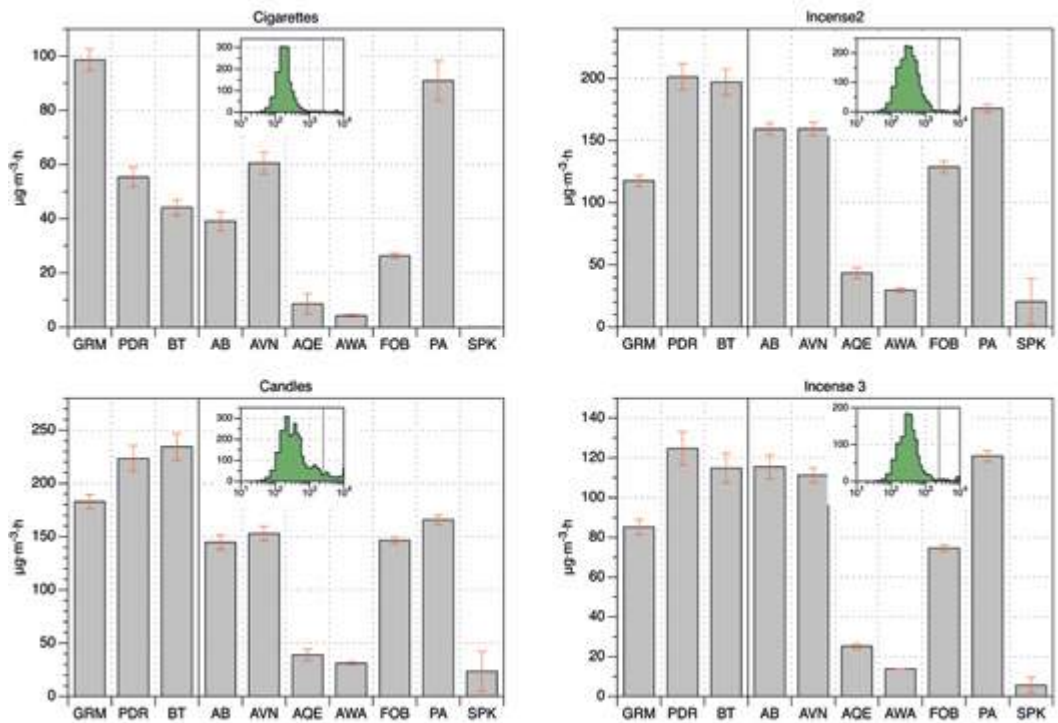
Discussie

De resultaten laten zien dat de meetapparatuur van professionele kwaliteit goed werkte, met uitzondering van activiteiten die vooral kleine submicrondeeltjes vormen. Dit was te verwachten vanwege de optische sensoren in deze apparaten, die dergelijke kleine deeltjes niet kunnen detecteren.

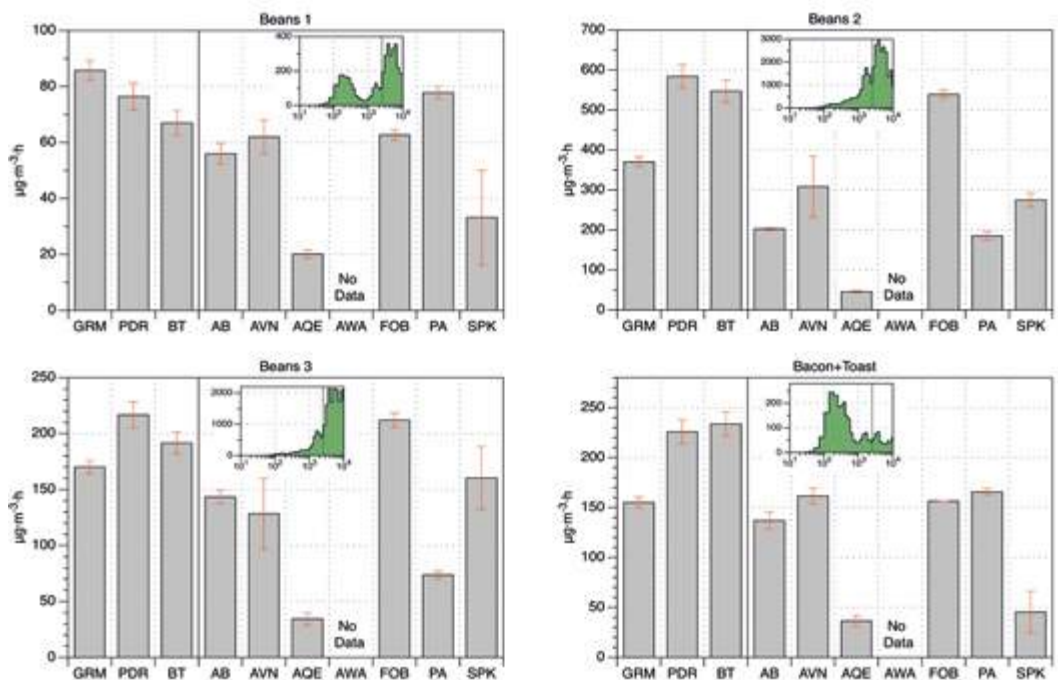
Onder de monitors van consumentenkwaliteit vertoonden de Egg en Speck de meeste problemen. De Egg had zeer beperkte reacties tijdens een breed scala aan activiteiten. De Speck had een inconsistente correlatie. De Awair had een behoorlijke correlatie maar gaf ook meetwaarden die consistent



Figuur 3: Reactie op stofbronnen en de luchtbevochtiger (meestal grotere deeltjes).



Figuur 4: Reactie op verbrandingsproducten.



Figuur 5: Reactie op bakken en roosteren.

een factor te laag waren. De AirBeam, AirVisual, Foobot en PurpleAir waren beter in het detecteren van een breed scala aan bronnen, waarbij de Foobot en PurpleAir over het algemeen de meest nauwkeurige reacties vertoonden. De uitzondering voor de PurpleAir was een verminderde respons op activiteiten die werden gedomineerd door grote deeltjes, zoals het Arizona teststof en de stofzwabber. Voor zowel de Speck als Awair beweert de fabrikant de sensor te hebben geüpgraded sinds deze experimenten zijn uitgevoerd.

Als groep misten de monitors over het algemeen bronnen waarvan het grootste deel van de massa onder de 0,3 micron was, waaronder het gebruik van een gasoven of kookplaat met uitzondering van bakken met olie. De uitzondering was de PurpleAir, die lage reacties maar hoge correlaties gaf, wat suggereert dat het de activiteiten wel waarnam, maar niet kwantitatief. Merk op dat PurpleAir een deeltjesteller is, die gevoeliger is voor lage niveaus.

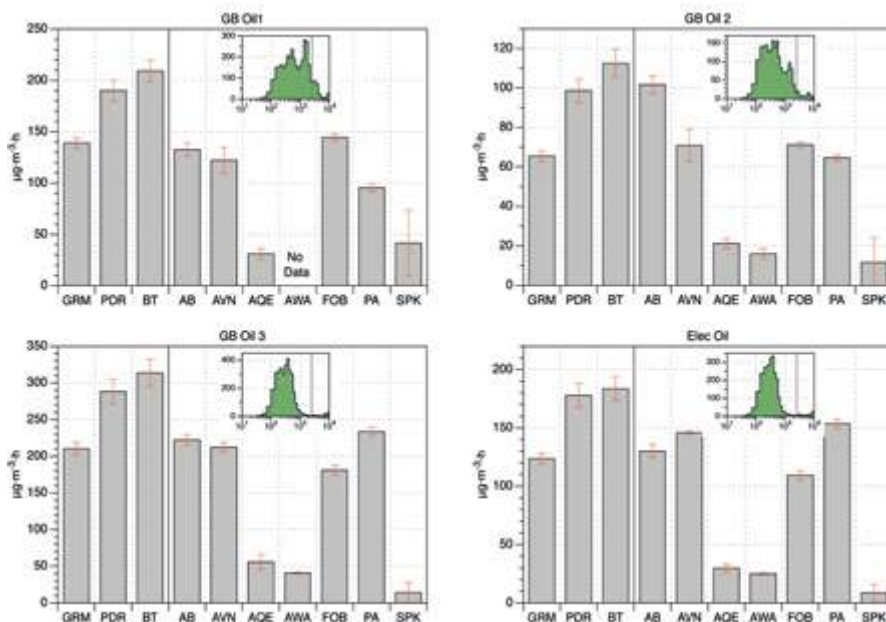
Conclusie

Over het algemeen wijzen deze resultaten erop dat de goedkope monitors belangrijke bronnen van ultrafijne deeltjes en bronnen die kunnen bijdragen aan PM_{2,5}-massablootstellingen in huizen missen, en daarom kunnen we in zijn algemeenheid niet zeggen dat deze monitors geschikt zijn voor het aansturen van ventilatiesystemen. Vier monitors waren echter acceptabel voor het identificeren van bronnen die veel PM_{2,5} uitstoten: AirBeam,

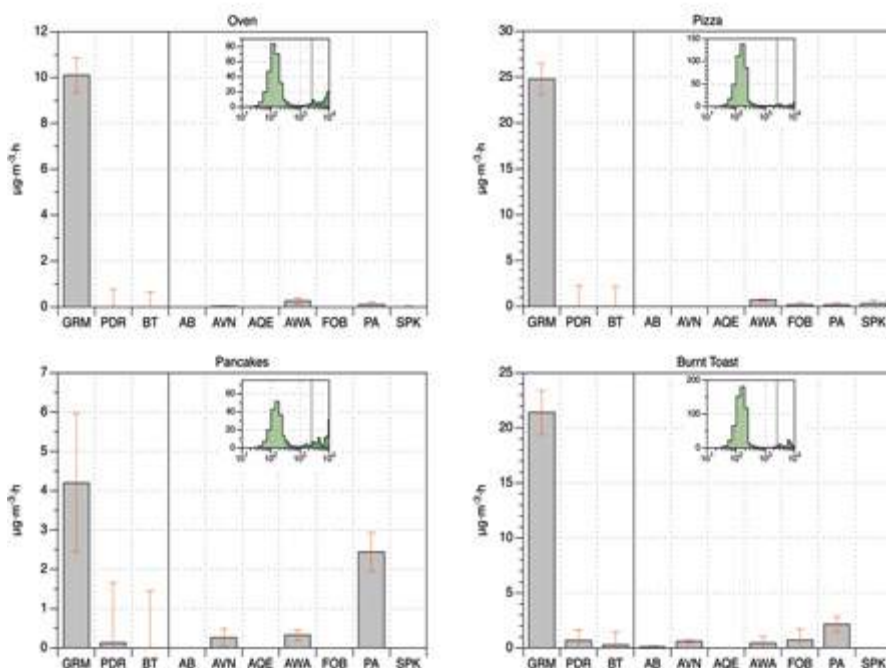
AirVisual, Foobot en PurpleAir. Deze monitors kunnen helpen bij het gebruik van de hulpboostfunctie om ventilatie te verhogen tijdens activiteiten met veel deeltjes, maar niet als een primaire aansturing voor een ventilatiesysteem. Ze kunnen ook worden gebruikt om zelfstandige filtereenheden te bedienen.

Dankwoord

Het project is gefinancierd door het U.S. Dept. of Energy Building Technologies Program, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy onder DOE-contract nr. DE-AC02-05CH11231; door het U.S. Dept. of Housing and Urban Development Office of Healthy Homes and Lead Hazard Control via Interagency Agreement I-PHI-01070, door het U.S. Environmental Protection Agency via Interagency Agreement DW-89-9232201-7. De auteurs danken Bill Roe van USA Operations Grimm Technologies voor het verstrekken van de Mini-WRAS tijdens de testperiode. Simon Walker hielp bij het uitvoeren van veel van de experimenten en assisteerde bij het vastleggen van gegevens.



Figuur 6: Reactie op verhitten van olie op gas- en elektrische kookplaten.



Figuur 7: Reactie op kookactiviteiten die vooral kleine deeltjes uitstoten.

Referenties

1. CEN, 2007. NF EN 13779. Ventilation des bâtiments non résidentiels – exigences de performances pour les systèmes de ventilation et de conditionnement d'air.
2. NEN, 2011. NEN 8088-1:2011 nl Ventilatie en luchtdoorlatendheid van Gebouwen - Bepalingsmethode voor de toevoerluchttemperatuur gecorrigeerde ventilatie- en infiltratieluchtvolumestromen voor energieprestatieberekeningen - Deel 1: Rekenmethode.
3. Singer, B. C., & Delp, W. W. (2018). Response of consumer and research grade indoor air quality monitors to residential sources of fine particles. *Indoor Air*, 44, 1539–16. <http://doi.org/10.1111/ina.12463>.