

Auteur F. Nafezarefi, Ph.D., Ing. P.H.J. Joosten MBA

Oplossingen voor zuivere lucht in gesloten ruimtes

De recente verspreiding van het pandemisch coronavirus (SARS-CoV-2) heeft tot bezorgdheid geleid over het ontwerp en de werking van gebouwen als het gaat om beheersing van de luchtkwaliteit, met name infectiebeheersing. Er zijn veel vragen gesteld. Welke rol speelt ventilatie? Hoe schoon zijn onze gebouwen? Hoe kunt u de verspreiding van virussen in een ruimte met een groot aantal mensen beheersen? Hoe kunnen we de luchtbehandelingssystemen van de huidige gebouwen aanpassen op een manier die kosteneffectief is en een meer steriele omgeving biedt [Hayashi et al., 2020]. Wat zijn de alternatieve oplossingen als het verwijderen of aanpassen van recirculatie of onveilige warmteterugwinning niet mogelijk is? Wat zijn de beschikbare technologieën om in het luchtbehandelingssysteem te integreren om de lucht te zuiveren en het risico op overdracht van ziekten te verminderen?

In dit artikel bespreken we mogelijke oplossingen gebruikmakend van beschikbare technologieën om de lucht te zuiveren, de luchtkwaliteit in gebouwen te verbeteren en het risico op overdracht van virussen in de lucht te verminderen. De volgende onderwerpen komen aan bod: mechanische luchtfilters, UV-lampen, bipolaire ionisatiegeneratoren, ozon genererende luchtreinigers en elektrostatische filters (EPS).

Het virus verspreidt zich het beste in gesloten ruimtes zonder of met slechte ventilatie, en waar veel mensen zijn en die lang bij elkaar blijven. De tijd dat mensen binnen verblijven lijkt verband te houden met de besmettingsgraad [Yan, 2020]. De hoeveelheid verse lucht dat van buitenaf wordt aangezogen is belangrijk, want via luchtuitwisselingen met buitenlucht kunnen aerosolen uit de lucht worden verwijderd. De hoeveelheid buitenlucht moet zoveel mogelijk worden vergroot. [REHVA 2020]. REHVA (Federation European Heating, Ventilation and Air Condition Association) raadt aan om de luchttoevoer en -afvoer te vergroten en de bedrijfstijden van de ventilatie te verlengen. Het algemene advies is om zoveel mogelijk buitenlucht aan te voeren als redelijkerwijs mogelijk is

[REHVA 2020]. Het belangrijkste aspect is de hoeveelheid verse lucht die per vierkante meter vloeroppervlak wordt aangevoerd. Als het aantal inzittenden afneemt, concentreer dan de overige inzittenden niet in kleinere ruimtes, maar behoud of vergroot de fysieke afstand (minimaal 2-3 m tussen de personen) tussen hen om het verdunningseffect van ventilatie te verbeteren [REHVA 2020]. De ventilatie mag 's nachts en in het weekend niet worden uitgeschakeld, maar mag in plaats daarvan met een lagere snelheid opereren.

Virusdeeltjes uit de afgezogen lucht kunnen onder bepaalde omstandigheden het gebouw weer binnendringen. Warmteterugwinningsapparatuur kan via lekken virus, dat aan deeltjes is gehecht, van de afvoerszijde naar de toevoerszijde overbrengen. Om die reden raadt REHVA aan om roterende warmtewisselaars met een te hoge lekkage uit te schakelen [REHVA 2020]. Virusdeeltjes in retourkanalen kunnen ook opnieuw een gebouw binnenkomen wanneer gecentraliseerde luchtbehandelingskasten zijn uitgerust met recirculatiesectoren. Het wordt daarom aanbevolen om centrale recirculatie tijdens of na de epidemie te vermijden door de recirculatiekleppen te sluiten, hiermee wordt het infectierisico verminderd [REHVA 2020].

Voordat we ingaan op de beschikbare opties om luchtbehandelingssystemen in gebouwen aan te passen en te upgraden, beginnen we met enkele basisprincipes om te begrijpen waarom we onze luchtbehandelingssystemen moeten aanpassen.

Wat zijn micro-organismen?

Micro-organisme of microbe is een organisme dat microscopisch is. Micro-organismen zijn onder meer bacteriën, schimmels en andere soorten [Taylor, 2001]. Alleen wanneer virussen een gastheer cel binnendringen, begint het virus zich te vermenigvuldigen. Sommigen beweren dat virussen om deze reden geen micro-organismen zijn [Yamane, 2011].

Virussen: ze zijn gespecialiseerd in het infecteren van een specifiek gastheerorganisme. Ze zijn tussen 20 tot 400 nm groot en worden gegroepeerd naar hun structuur en het type genetisch materiaal [Taylor, 2001].

Bacteriën: ze zijn verantwoordelijk voor de afbraak van organische materialen binnen het ecosysteem [Taylor, 2001]. Ze zijn complexe variabele microben en komen voor in verschillende vormen: bolvormig, staafvormig, boogvormig en spiraalvormig [Zhou, 2015].

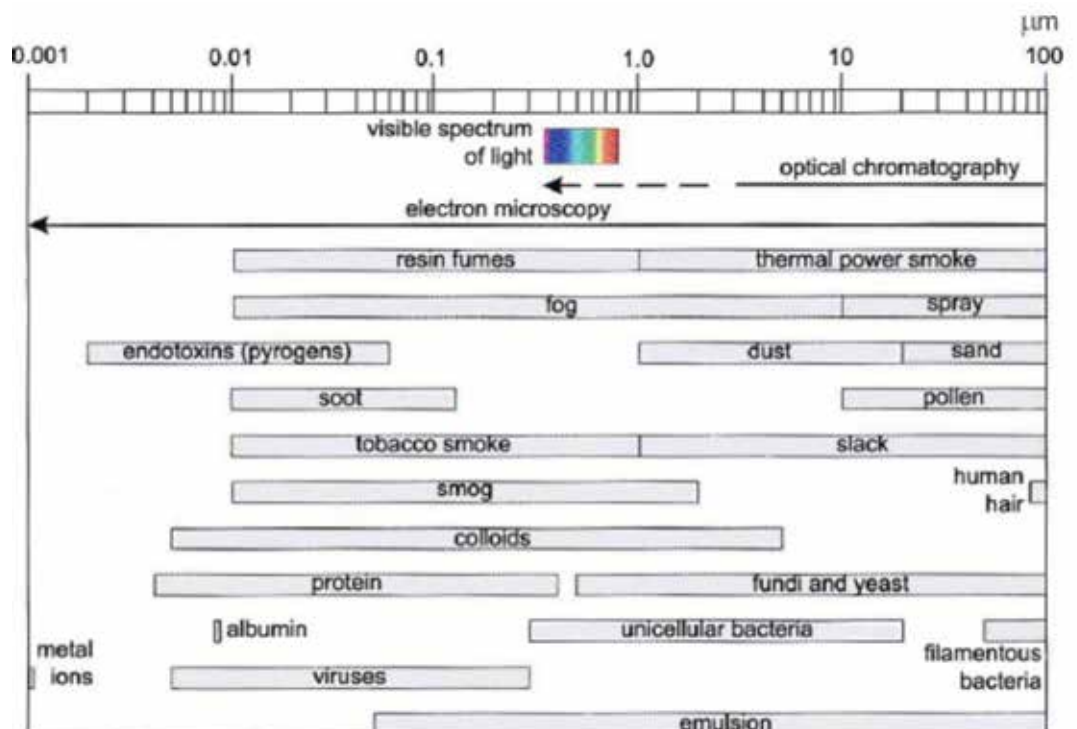
Schimmels: schimmels spelen een belangrijke rol bij de afbraak van organisch afval (dode planten en dieren) en daarmee bij het weer beschikbaar stellen van essentiële voedingsstoffen voor nieuw leven [Jane Taylor 2001]. Ze zijn meestal meercellig en variëren in grootte van microscopisch kleine gisten tot paddenstoelen [Roday, 1998].

Andere soorten: protozoa zijn eencellige eukaryoten (organismen waarvan iedere cel een celkern bevat) [Artiola et al., 2004]. Ze zijn macroscopisch van aard en leven in vochtige leefomgevingen zoals de bodem, rivieren, de zee en lichaamsvloeistoffen van dieren [Taylor, 2001]. Eencellige groene algen en wieren komen voor in zoetwater en in zeewater als plankton [Taylor, 2001]. Ze kunnen hun eigen voedsel produceren, net als planten [Roday, 1998].

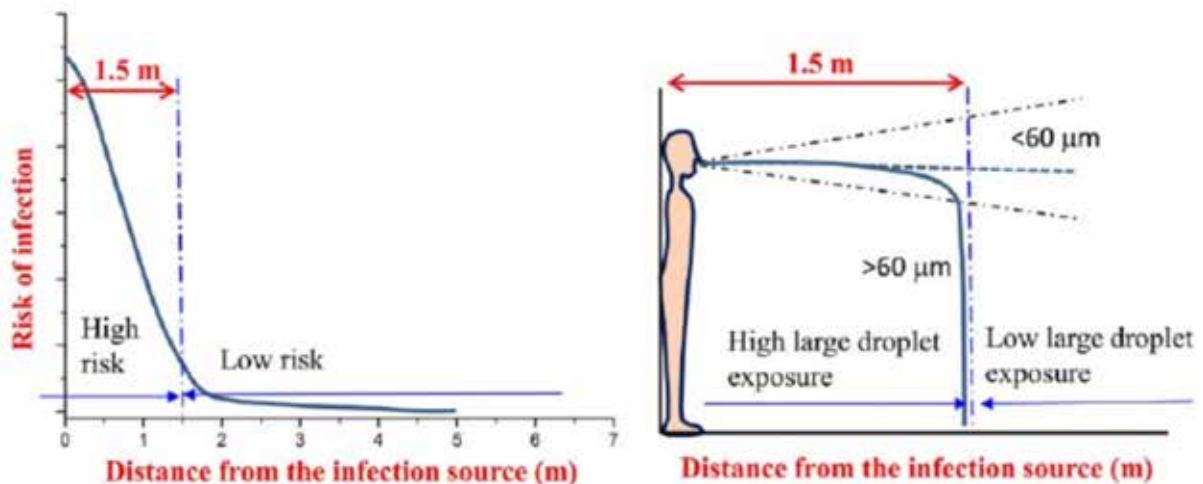
Micro-organismen zoals bacteriën en virussen zijn aanwezig in de lucht die we inademen [Pan et al., 2019]. Figuur 1 toont de aard van onzuiverheden

in lucht en toont hun grootte in micrometers. Voldoende kennis van de deeltjesgrootte en de oorsprong ervan is belangrijk voor het begrijpen van virustransport via aerosolen. De grootte van een coronavirusdeeltje is 80-160 nanometer [Monto, 1974] en blijft vele uren of een paar dagen actief op oppervlakken, tenzij er specifieke reiniging plaatsvindt [Doremalen et al., 2020]. Overdracht van virussen in de lucht vindt voornamelijk plaats via drie routes of een combinatie daarvan: (1) gecombineerde overdracht van druppeltjes en lucht in een gebied van 1 tot 2 meter bij nauw contact, veroorzaakt door druppeltjes en aerosolen die worden uitgestoten bij niezen, hoesten, zingen, schreeuwen, praten en ademen; (2) transmissie over lange afstanden in de lucht (op basis van aerosolen); en (3) oppervlak contact via de handen. De manieren om met deze routes om te gaan zijn fysieke afstand houden om nauw contact te vermijden, ventilatie om overdracht via de lucht te vermijden en handhygiëne om contact met het oppervlak te vermijden [REHVA, 2020].

Eenvoudige theoretische analyse bevestigt dat grote druppeloverdracht meestal binnen de eerste 1,5 meter zal plaatsvinden. Zoals getoond in figuur 2 links zal de concentratie van druppelkernen snel afnemen binnen de eerste 1-1,5 meter vanaf de uitademing van een persoon. Dit effect wordt verklaard door de aerodynamica van de uitademing en de omgeving waarin de persoon zich bevindt [Liu, et al., 2017]. De verdeling van de druppelkernen hangt af van de positie van mensen, de snelheid van de luchtverversing, het type luchtbeheersysteem,



Figuur 1: Onzuiverheden in de lucht [Fedotov, 2010].



Figuur 2: Het onderscheid tussen gecombineerde druppel- en aerosoltransmissie via nauw contact (links) en aerosoltransmissie over lange afstand (rechts) die kan worden gecontroleerd met ventilatie die de virusconcentratie verlaagt tot een laag niveau [Liu, et al., 2017]

zoals menging, verplaatsing of persoonlijke ventilatie en andere luchtstromen in de ruimte. Hierdoor zorgt nauw contact binnen de eerste 1,5 meter voor een hoge blootstelling aan zowel grote druppels als druppelkernen [Liu, et al., 2017]. Kleinere aerosoldeeltjes leggen grotere afstanden af en blijven gedurende langere tijd in de lucht, waardoor ze naar andere locaties kunnen worden getransporteerd. Ze kunnen in de onderste delen van de longen terechtkomen en ziekten veroorzaken met ernstige resultaten. Dit in tegenstelling tot de meeste grotere uitgestoten druppeltjes, die door de zwaartekracht aangetrokken worden om dichterbij de bron te landen en bij inademing opgevangen worden in de bovenste luchtwegen [Pan et al., 2019].

De grootte van het SARS-CoV-2 virus is gemiddeld ongeveer 100 nm. Dit is qua grootte vergelijkbaar met het SARS-CoV-1 coronavirus, dat ook 100 nm is. De gewone griep is ook gemiddeld 100 nm. Omdat het virus kan hechten aan deeltjes van minder dan 100 nm, kan de kleinste grootte van het corona-virus en zijn drager nog steeds ongeveer 100 nm zijn [Leung & Sun, 2020].

Mechanische luchtfilters

Luchtfilters worden gebruikt om verontreinigingen uit de luchtstroom te verwijderen. Het type luchtreiniger dat wordt gebruikt is afhankelijk van verschillende factoren, zoals het type luchtverontreiniging dat moet worden verwijderd, de concentratie van de verontreiniging in de lucht, hoeveel verontreiniging er moet worden verwijderd om te voldoen aan de standaarden, het vereiste

deeltjesgroottebereik, eisen aan energieverbruik, enzovoorts. Verschillende toepassingsgebieden vereisen een verschillende mate van doeltreffendheid van de luchtreiniging. Filters in residentiële of commerciële luchtbehandelingsystemen worden meestal geïnstalleerd bij een luchtinlaat of -uitlaat of in het centrale luchtbehandelingsstelsel [ASHRAE, 2016].

De Internationale Organisatie voor Standaardisatie (ISO) heeft een nieuwe wereldwijde standaard luchtfiltratie gecreëerd. De nieuwe ISO vervangt EN 779. De ISO16890 definieert de classificatie- en testprocedures voor luchtfilters in algemene ventilatiesystemen. Volgens de ISO 16890-norm worden filters geclassificeerd op basis van hun efficiëntie met betrekking tot de deeltjesfracties PM_{10} , $PM_{2,5}$ en PM_1 . De PM staat voor fijnstof en is de som van alle vaste en vloeibare deeltjes die in lucht zweven. In de ISO16890-norm zijn de luchtfilters onderverdeeld in vier groepen: e PM_1 , e $PM_{2,5}$, e PM_{10} en ePM grof. De ISO 16890-beoordelingen zijn gebaseerd op hoe ver deeltjes in de menselijke longen gaan (Figuur 3).

De vraag is nu wat de veranderingen zijn tussen de nieuwe norm en EN 779. Er zijn veel filters die gekwalificeerd zijn volgens de oude norm en nog aanwezig zullen zijn in diverse installaties en voorraden [Eurovent, 2017]. De directe conversie van EN 779 naar ISO 16890 standaard is niet mogelijk. Om een indicatieve vergelijking te maken, met name om bestaande filters te vervangen, heeft de Eurovent Association een tabel ontwikkeld die voldoet aan de EN 779- en EN ISO 16890-standaarden die voor dezelfde filters zijn getest. De vergelijking toont de overlap tussen de EN 779 en EN ISO 16890 standaarden. Deze is ontwikkeld op basis van testgegevens van 91 filters geleverd door Eurovent Certita Certification [Eurovent, 2017].

De nieuwe ISO 16890-norm omvat geen filters van de klasse EPA, HEPA en ULPA. Filters van de klasse EPA, HEPA en ULPA worden onder

andere gebruikt in ventilatie- en airconditioningsystemen voor cleanrooms. Deze zeer efficiënte filters zijn geclassificeerd en getest volgens de ISO 29463 en/of Europese norm EN 1822. De norm richt zich op de prestaties van het filter voor de meest penetrerende deeltjesgrootte (MPPS) (Figuur 4). Daarmee wordt de afmeting aangeduid van het deeltje dat het moeilijkst te vangen is. Om een filter te kunnen testen zal allereerst de MPPS bepaald moeten worden. Daarna worden, afhankelijk van de filterklasse, de totale efficiëntie en de lokale efficiëntie bepaald. Idealiter zal ISO 29463 in de toekomst wereldwijd worden gebruikt, maar het moet nog geaccepteerd worden in Noord-Amerika en in Europa moet het nog gebruikt worden in combinatie met EN 1822.

Er moet aandacht worden besteed aan het installeren en onderhouden van geschikte luchtbehandelingsfilters. Luchtverontreinigende stoffen hopen zich na verloop van tijd op in het systeem om een mogelijk gevaar te creëren. Goed systeemonderhoud, inclusief het vervangen van luchtfilterelementen, is minstens zo belangrijk als een juiste filterselectie en systeemontwerp [Sparks, 2016]. Een overzicht van het typische groottes van veelvoorkomende luchtverontreinigende stoffen en het verwijderingsbereik van het luchtfilter wordt getoond in Figuur 5. De ULPA-filters (bijv. U15) dekken een breed scala aan virusdeeltjes af en hebben een verwijdering van 99,9995% op MPPS. Door het effect van het diffusiemechanisme zal de efficiëntie op kleinere deeltjes dan MPPS hoger zijn dan 99,9995%. HEPA-filters hebben een classificatie van 99,95% tot 99,9955 op MPPS (meest penetrerende deeltjesgrootte). Bij deze deeltjesgrootte heeft het filter het laagste rendement. Voor

Filter groep	Vereiste minimale prestatie			Deeltjesgrootte (µm)
	ePM ₁ , min	ePM _{2,5} , min	ePM ₁₀	
ISO ePM ₁	≥ 50%			0,3 ≤ x ≤ 1
ISO ePM _{2,5}		≥ 50%		0,3 ≤ x ≤ 2,5
ISO ePM ₁₀			≥ 50%	0,3 ≤ x ≤ 10
ISO Coarse			< 50%	0,3 ≤ x ≤ 10

Tabel 1: Filterclassificatie [Eurovent, 2017].

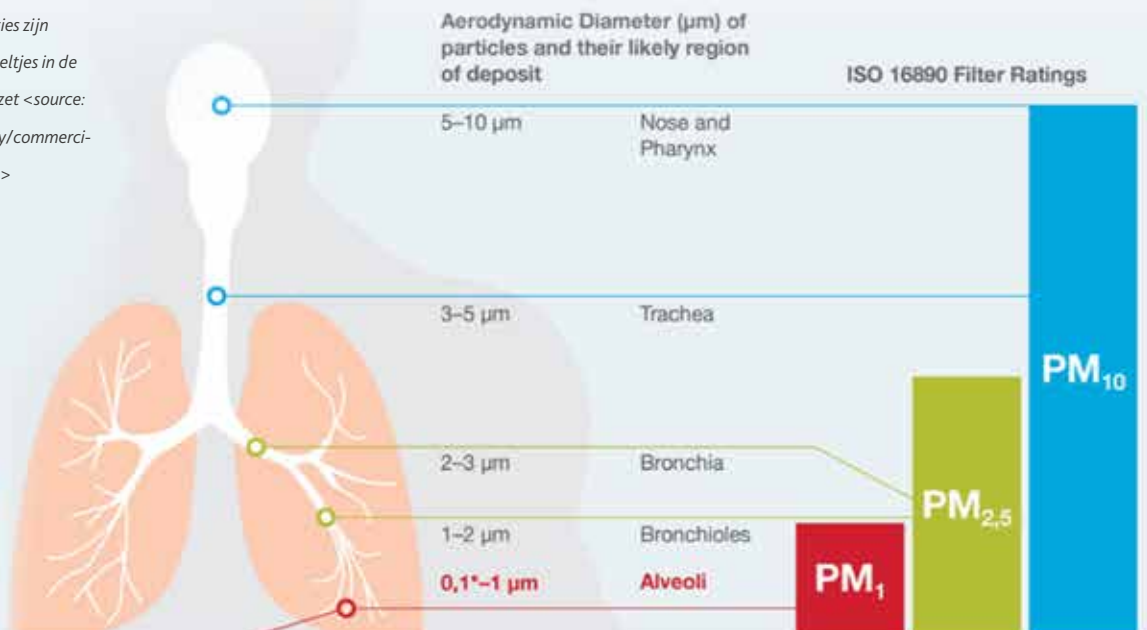
EN 799: 2012	EN ISO 16890 - bereik van werkelijk gemeten gemiddelde efficiëntie		
Filter Classes	ePM ₁	ePM _{2,5}	ePM ₁₀
M5	5% - 35%	10% - 45%	40% - 70%
M6	10% - 40%	20% - 50%	60% - 80%
F7	40% - 65%	65% - 75%	80% - 90%
F8	65% - 90%	75% - 95%	90% - 100%
F9	70% - 90%	85% - 95%	90% - 100%

Tabel 2: Vergelijking ISO 16890 en EN 779 [Eurovent, 2017].

kleinere deeltjesgroottes tot 0,01 µm neemt de efficiëntie van het HEPA-filter toe tot 99,98 +% voor deeltjes tussen 0,12 µm en 0,01 µm [NV5, 2020].

REHVA beveelt voor buitenluchtinlaat een minimale filterefficiëntie aan van > 65% ePM₁ (oude F8 van EN 779) of tot het hoogst haalbare efficiëntieniveau en dit is een belangrijke factor bij het verminderen van de verspreiding van het corona-virus. Denk hierbij aan een 2e fase filtratie

Figuur 3: ISO 16890 classificaties zijn gebaseerd op de plaats waar deeltjes in de menselijke longen worden afgezet <source: <https://www.aafintl.com/en-my/commercial/solutions-offered/iso-16890>>



aan de perszijde in het luchtbehandelingsysteem of toevoerluchtkanaal (bijv. 90% ePM₁₀), een verhoging van de systeemdruk is dan wenselijk.

Meer geavanceerde maatregelen, zoals bijvoorbeeld HEPA-filters, lijken voornamelijk niet noodzakelijk voor het filteren van buitenlucht. Eventueel is het wel een oplossing voor het hergebruiken van afgezogen lucht (recirculatie). Hierbij is een zorgvuldige evaluatie vereist. In bestaande systemen is vaak onvoldoende systeemdruk aanwezig om de drukval over HEPA-filters te overbruggen.

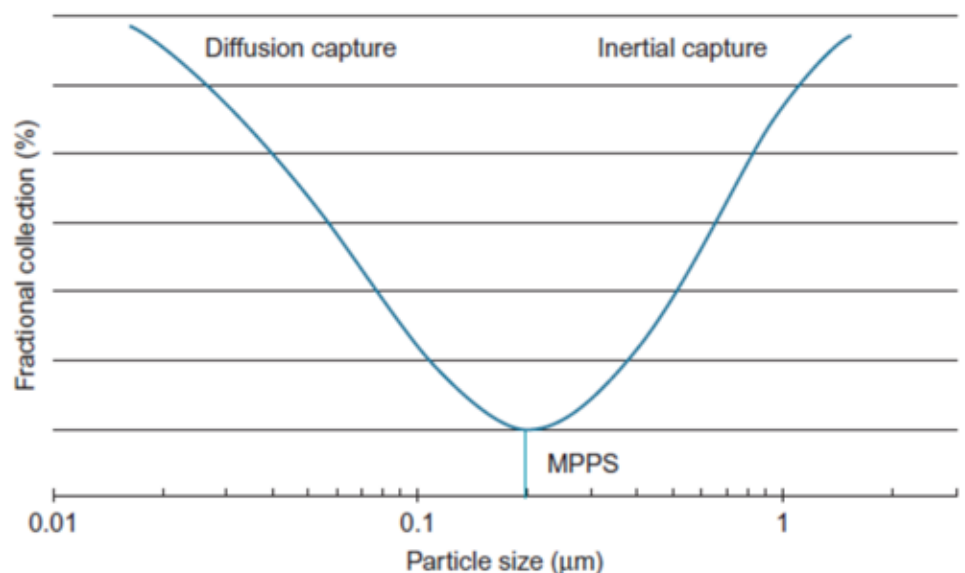
Studies hebben de hogere effectiviteit van filtratie ten opzichte van verhoogde ventilatie bevestigd bij het verminderen van het risico op overdracht van virussen in de lucht [Emmerich, 2013; Ben-David 2018]. Bijvoorbeeld, de auteur van een artikel uit 2013 over strategieën om de verspreiding van besmettelijke agentia in de lucht in zorginstellingen te verminderen, beschrijft dat de luchtfiltratie een aanzienlijke bescherming kan bieden tegen de verspreiding van infectieziekten [Emmerich, 2013]. Het gebruik van meer ventilatielucht zonder filtratie en luchtzuivering kan resulteren in de vervanging van de ene set verontreinigende stoffen (intern gegenereerd) door een andere set (extern gegenereerd) met alle bijbehorende negatieve gevolgen voor de gezondheid [ASHRAE, 2016].

Permanente luchtfilters zijn echter meestal niet eenvoudig te installeren in bestaande systemen. Als dit niet mogelijk is kan draagbare zeer efficiënte luchtfiltratie (Portable High Efficiency Air Filtration, PHEAF) een alternatieve oplossing zijn [CDC, 2003; NV5, 2020]. Het PHEAF-apparaat is een ander type filteroptie waarbij een draagbaar ventilatorsysteem, uitgerust met HEPA of ULPA filters, met opties voor interne UV-lampen wordt gebruikt. Ze kunnen worden gebruikt om de sterk gefilterde en UV-behandelde toevoerlucht te recirculeren in grote ruimtes zoals vergaderzalen, cafés, en in gangen [NV5, 2020].

Ultraviolet germicidal irradiation (UVGI)

UVGI is een desinfectiemethode waarbij gebruik wordt gemaakt van ultraviolet licht met korte golflengte om micro-organismen en pathogenen zoals bacteriën en virussen te inactiveren of te doden (Lau, et al., 2009). In de gezondheidszorg worden twee systemen van UVGI gebruikt: UVGI-lampen in HVAC-luchtkanalen en mobiele oplossingen voor luchtstraling. In buisbestralingssystemen worden UV-lampen in kanalen geplaatst die lucht uit kamers verwijderen om de lucht te desinfecteren voordat deze wordt gerecirculeerd [CDC, 2003].

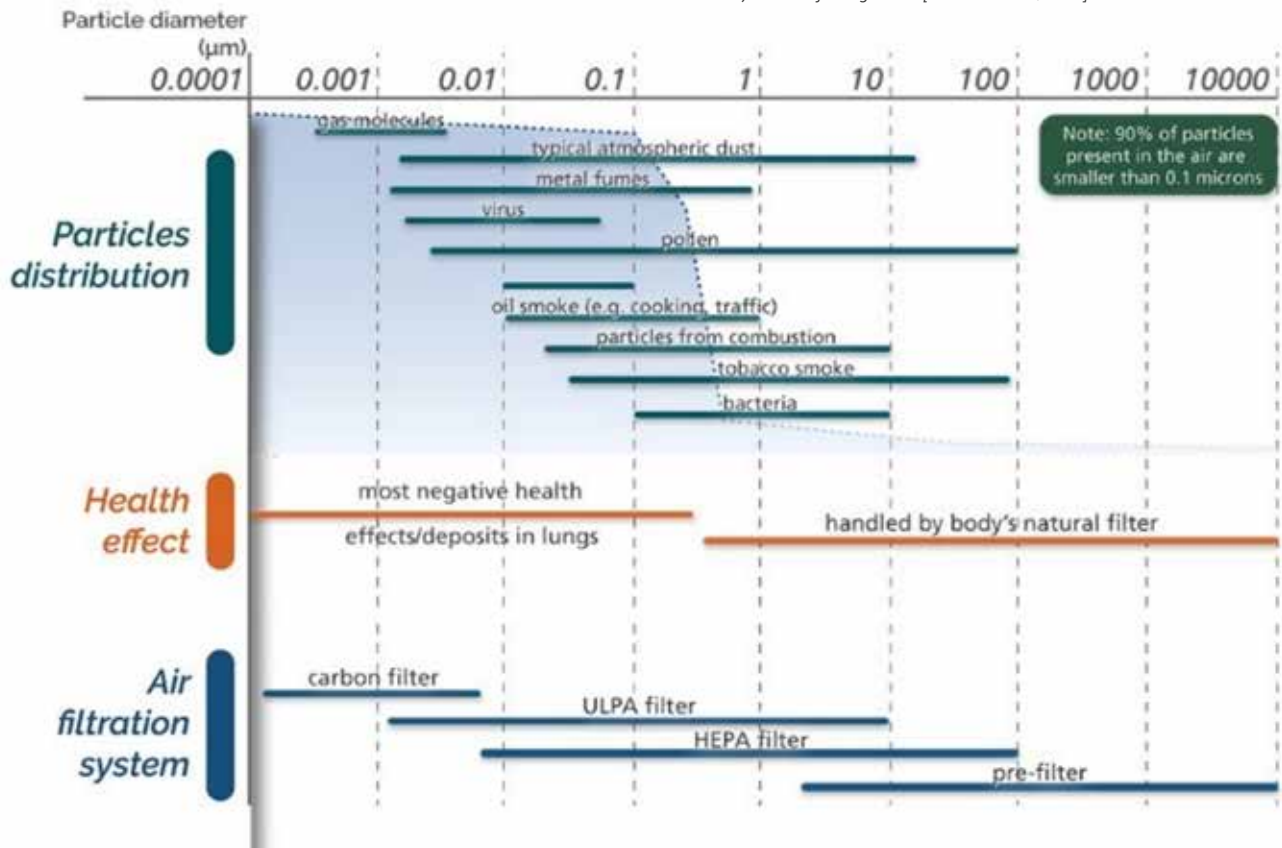
Toepassingsondersteuning voor UVGI-technologieën groeit, niettemin: Er is geen specifieke standaard testmethode om de effectiviteit van UVGI-reinigers die zijn geïnstalleerd in HVAC-systemen of mobiele luchtreinigers te beoordelen en te vergelijken. Typische UVGI-luchtreinigers die zijn ontworpen voor gebruik in woningen, leveren niet voldoende UV-doses om ziekmakers, zoals virussen en bacteriën, in de lucht te doden [EPA, 2009]. Het is moeilijk om de UV-dosis voor elke microbe te beoordelen, maar de gemiddelde UV-dosis kan worden bepaald door de "inactivation rate and a known microbial susceptibility". Vermindering van de concentratie van micro-organismen na desinfectie is en hoe gemakkelijk micro-organismen kunnen worden gedood door UV-licht [ISO 15714: 2019]. De reden hiervoor is dat de effectiviteit van UVGI is gebaseerd op de tijd dat een micro-organisme wordt blootgesteld aan UV en op de intensiteit en golflengte van de UV-straling [ISO 15714: 2019]. Dit gezegd hebbende, UVGI kan worden gebruikt in combinatie



Figuur 4: Een voorbeeld van een deeltjesgrootte-efficiëntiecurve (in dit geval is ongeveer 0,2 µm de MPPS).

Grotere deeltjes worden opgevangen door traagheidsmechanismen, terwijl kleinere deeltjes worden vastgehouden door interceptie en diffusie [Sparks, 2016].

Figuur 5: Typisch groottebereik van veel voorkomende deeltjesverontreinigingen in de lucht en luchtfilterverwijderingsbereik [Esco Micro Pte., 2018].



met HEPA-filtratie en als aanvullende luchtreinigingsmaatregel, maar het kan HEPA-filtratie niet vervangen. Het gebruik van UVGI in HEPA-filters wordt niet aanbevolen door de CDC [CDC, 2003].

Bipolaire ionisatiegeneratoren

Bipolaire ionisatie treedt op wanneer een wisselstroombron wordt aangesloten op een speciale buis met twee elektroden. De productie van zowel positieve als negatieve ionen zuivert de lucht. De opgewekte geladen ionen vormen een cluster rond schadelijke virussen, schimmels, bacteriën etc. Vervolgens vindt er een chemische reactie plaats, die schadelijke micro-organismen doodt en deze kunnen worden verwijderd door HVAC-systeemfilters of op de grond vallen [Tierno, 2017].

Het voordeel van deze technologie is dat deze kan worden geïntegreerd in nieuw of bestaande HVAC-systemen [Tierno, 2017]. Het nadeel is dat het een potentieel

ozonbijproduct heeft [Schafer, 2020]. Deze toepassing lijkt derhalve geen geschikte oplossing.

Ozon genererende luchtreinigers

Dit zijn apparaten die opzettelijk hoge concentraties ozon produceren om de lucht in een kamer te reinigen. Ozon doodt micro-organismen door hun eiwitstructuur af te breken. Het neutraliseert pathogene en niet-pathogene ziektekiemen, evenals vele organische en anorganische geuren, zowel gassen als kleine deeltjes [NV5, 2020]. Onderzoek toont aan dat secundaire aerosolen binnenshuis ontstaan door ozonreacties in woonomgevingen en kunnen bijdragen aan de menselijke blootstelling aan dergelijke deeltjes wanneer ozongeneratoren binnenshuis worden gebruikt [Hubbard et al., 2005].

Vanwege de effecten op de menselijke gezondheid hebben verschillende federale instanties gezondheidsnormen of aanbevelingen opgesteld om de blootstelling van mensen aan ozon te beperken. Het National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) en Occupational Safety and Health Administration (OSHA) hebben waarden van 0,1 ppm vastgesteld voor een gemiddelde blootstellingstijd van 8 uur, hoewel de eerste organisatie zijn waarde uitdrukt als een plafonddimiet en de laatste

organisatie als een toegestane blootstelling limiet [ANSI / ASHRAE, 2004]. Wetenschappelijk onderzoek toont aan dat de ozonconcentratie de gezondheidsnormen ver zou moeten overschrijden om overleving en regeneratie van de organismen te voorkomen [Dyas, et al., 1983; Foarde et al., 1997]. Zelfs bij hoge concentraties kunnen verontreinigingen die zijn ingebed in poreus materiaal niet worden gedood of geneutraliseerd. [Foarde et al., 1997]. Om deze redenen is ozongeneratie geen geschikte oplossing.

Elektrostatische filters (EPS)

EPS ioniseert de lucht door hoogspanning op de elektroden aan te brengen. Stofdeeltjes krijgen een lading door de geïoniseerde lucht en verzamelen op de tegengestelde geladen verzamelplaten. De verzamelde deeltjes kunnen als droog materiaal van de collectorplaten worden verwijderd (droge ESP's), of ze kunnen met water van de platen worden gewassen (natte ESP's). De ESP's zijn in staat tot een inzamelrendement van meer dan 99 procent [McKenna, 2008]. Niettemin zijn ze minder efficiënt

in het verwijderen van PM (fijnstof). ESP's zijn gemakkelijk schoon te maken en minder duur in gebruik in vergelijking met HEPA-filtratie. Het gebruik van een ESP in combinatie met een HEPA-filter kan de drukval als gevolg van deeltjesophoping op de HEPA aanzienlijk verminderen, en kan ook de bedrijfskosten verlagen door de levensduur van HEPA-filters te verlengen [Day et al., 2018]. Echter, het rendement van deze toepassing is nog onvoldoende om HEPA-filters te vervangen.

Conclusie

Het belang van het verbeteren van de luchtkwaliteit in gebouwen wordt duidelijker met de huidige corona-pandemie. Het verhogen van de ventilatiehoeveelheden met buitenlucht is de algemene aanbeveling. Recirculatie moet worden vermeden. Om besmetting uit gerecirculeerde lucht te verwijderen of te vernietigen, moet men proberen het buitenlucht buitenluchtaandeel te maximaliseren en mechanische luchtfilters (HEPA- of ULPA-filtratie) te gebruiken of kiemdodende ultraviolette bestraling (UVGI) toepassen. Indien mogelijk, verdient het de voorkeur om filters van een hogere klasse te installeren.

Referenties

- ASHRAE, 2016. Chapter 29. Air cleaners for particulate contaminants, viewed 24 July 2020. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/covid-19/i-p_s16_ch29aircleanersforparticulates.pdf
- ANSI/ASHRAE, 2004. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, INC, 1791 Tullie Circle NE, Atlanta, GA 30329
- Artiola, J., Pepper, I. L., Brusseau, M. L., 2004. Environmental Monitoring and Characterization. Elsevier.
- ATMOSAIR solutions, 2019. How AtmosAir™ Bi-Polar Ionization Air Purification Works, Copyright Clean Air Group, viewed 24 July 2020. <https://atmosair.com/technology/how-atmosair-works/>
- Ben-David, T., Waring, M. S., 2018. Interplay of ventilation and filtration: Differential analysis of cost function combining energy use and indoor exposure to PM 2.5 and ozone. *Building Environment*, 128 (2018), pp. 320-335
- CDC (Centers for Disease Control and Prevention), 2003. Guidelines for Environmental Infection Control in Health-Care Facilities, viewed 24 July 2020. <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/pdf/guidelines/environmental-guidelines-P.pdf>
- Day, D. B. et al., 2018. Combined Use of an Electrostatic Precipitator and a High-Efficiency Particulate Air Filter in Building Ventilation Systems: Effects on Cardiorespiratory Health Indicators in Healthy Adults. *Indoor Air*, 28(3), pp. 360-372.
- Doremalen et al., 2020. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*. 382:1564-1567.
- Dyas, A.; Boughton, B.J.; Das, B.C. 1983. Ozone Killing Action Against Bacterial and Fungal Species; Microbiological Testing of a Domestic Ozone Generator. *Journal of Clinical Pathology*. 36:1102-1104.
- Emmerich, S. et al., 2013. Multizone Modeling of Strategies to Reduce the Spread of Airborne Infectious Agents in Healthcare Facilities. *Building and Environment*. February 2013; Volume 60; 105-115.
- Esco Micro Pte., 2018. In-Depth Comparison Between HEPA and ULPA Filters in Biosafety Cabinets, viewed 24 July 2020. <http://www.escoglobal.com/news/in-depth-comparison-between-hepa-and-ulpa-filters-in-biosafety-cabinets/1958/>
- EN 1822-1: 2019 - High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) - Part 1: Classification, performance testing, marking
- EPA Indoor Environments Division , 2009. Residential Air Cleaners: A Technical Summary, 3rd Edition Portable Air Cleaners, Furnace and HVAC Filters. viewed 24 July 2020. https://19january2017snapshot.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/residential-air-cleaners-second-edition-summary-available-information_.html
- Eurovent, 2017. selection of en iso 16890 rateD air filter classes for general Ventilation applications. viewed 24 August 2020. <https://eurovent.eu/sites/default/files/field/file/Eurovent%20REC%204-23%20-%20Selection%20of%20EN%20ISO%2016890%20rated%20air%20filter%20classes%20-%202017.pdf>
- Fedotov A., 2010. Cleanrooms and Clean Zones in Hospitals" 41st R3-Nordic Symposium, Cleanroom technology, contamination control and cleaning
- Foarde, K., van Osdell, D. and Steiber, R. 1997. Investigation of Gas-Phase Ozone as a Potential Biocide. *Applied Occupational Environmental Hygiene*. 12(8): 535-542.
- Hayashi, M. et al. 2020. Measures against Covid-19 Concerning Summer Indoor Environment in Japan, *JAPAN Architectural Review*, (20200822)
- Hubbard, H. F. et al. 2005. Effects of an Ozone-Generating Air Purifier on Indoor Secondary Particles in Three Residential Dwellings. *Indoor Air*, 15(6), pp. 432-444.
- ISO 15714 : 2019. (en) Method of evaluating the UV dose to airborne microorganisms transiting in-duct ultraviolet germicidal irradiation devices
- ISO 16890-1: 2016. Air filters for general ventilation — Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM). viewed 24 July 2020. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16890:-2:ed-1:v1:enl>
- ISO 29463 (all parts), High-efficiency filters and filter media for removing particles in air
- Lau, J., Bahnfleth, W. and Freihaut, J., 2009. Estimating the Effects of Ambient Conditions on the Performance of Uvgi Air Cleaners. *Building and Environment*, 44(7), pp. 1362-1370.
- Leung, W. W. F. and Sun, Q., 2020. Electrostatic Charged Nanofiber Filter for Filtering Airborne Novel Coronavirus (covid-19) and Nano-Aerosols. *Separation and Purification Technology*, 250
- Liu, G. et al., 2017. A Review of Air Filtration Technologies for Sustainable and Healthy Building Ventilation. *Sustainable Cities and Society*, 32, pp. 375-396.
- McKenna, J. D., et al., 2008. Fine particle (2.5 microns) emissions : regulation, measurement, and control. John Wiley & Sons.
- Monto, 1974. Medical reviews. Coronaviruses. *The Yale Journal of Biology and Medicine* 47(4): 234-251.
- NV5, 2020. COVID-19 (Novel Coronavirus) airside Sterilization technology for safer postcovid-19 building occupancy [White paper]. <https://www.nv5.com/wp-content/uploads/2020/05/NV5-Airside-Sterilization_COVID-19-White-Paper_Final.pdf>
- Pan, M., Lednicky, J. A. and Wu, C.-Y., 2019. Collection, Particle Sizing and Detection of Airborne Viruses. *Journal of Applied Microbiology*, 127(6), pp. 1596-1611.
- REHVA (federation of european heating ventilation and air conditioning associations), 2020. COVID-19 guidance document. viewed 05 August 2020 https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID-19_guidance_document_V3_03082020.pdf
- Roday, S., 1998. Food Hygiene and Sanitation. Tata McGraw-Hill Education
- Sparks, T. et al., 2016. Filters and filtration handbook. Sixth edition / edn. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.
- Schafer, D., 2020. Infection control technologies for buildings design [White paper]. Henderson engineers. https://www.hendersonengineers.com/insight_article/infection-control-technologies-for-building-design/
- Taylor J., 2001. Microorganisms and Biotechnology. Nelson Thorne
- Tierno, P. M., 2017. Cleaning Indoor Air using AtmosAir Bi-Polar Ionization Technology, New York University School of Medicine http://atmosair.com/wp-content/uploads/2020/03/Cleaning-Indoor-Air-Using-Bi-Polar-Ionization-Technology_Dr.-PhilTierno_NYU-SchoolMedicine_2017.pdf
- Yamane, H. 2011. Interpreting TRIPS: Globalisation of Intellectual Property Rights and Access to Medicines. Bloomsbury Publishing, pp. 367
- Yan, Z. and Lan, Y. 2020. Modeling Covid-19 Infection in a Confined Space, *Nonlinear dynamics*, 1-9, pp. 1-9.
- Zhou, X. and Li, Y., 2015. Atlas of Oral Microbiology: From Healthy Microflora to Disease. Elsevier Science