Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Meerwaarde van mobiele luchtreinigers in verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 – een literatuurstudie

RIVM-briefrapport 2022-0134
L.C. Vermeulen | A.A. Bartels

Rijksinstituut voor Volksgezondheid
en Milieu
*Ministerie van Volksgezondheid,
Welzijn en Sport*

Meerwaarde van mobiele luchtreinigers in verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 – een literatuurstudie

RIVM-briefrapport 2022-0134
L.C. Vermeulen | A.A. Bartels

Colofon

© RIVM 2022
Delen uit deze publicatie mogen worden overgenomen op voorwaarde van bronvermelding: Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), de titel van de publicatie en het jaar van uitgave.

Het RIVM hecht veel waarde aan toegankelijkheid van zijn producten. Op dit moment is het echter nog niet mogelijk om dit document volledig toegankelijk aan te bieden. Als een onderdeel niet toegankelijk is, wordt dit vermeld. Zie ook www.rivm.nl/toegankelijkheid.

DOI 10.21945/RIVM-2022-0134

L.C. Vermeulen (auteur), RIVM
A.A. Bartels (auteur), RIVM

Contact:
Lucie Vermeulen
Zoönosen en Omgevingsmicrobiologie, Centrum Infectieziektebestrijding
lucie.vermeulen@rivm.nl

Dit onderzoek werd verricht in opdracht van het Ministerie van VWS in het kader van de Motie van het Tweede kamerlid Van Den Berg C.S. - Nr. 1071

Dit is een uitgave van:
Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu
Postbus 1 | 3720 BA Bilthoven
Nederland
www.rivm.nl

Publiekssamenvatting

Meerwaarde van mobiele luchtreinigers in verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 – een literatuurstudie

Het ministerie van VWS vraagt zich af of verplaatsbare luchtreinigers helpen om de overdracht van het coronavirus SARS-CoV-2 te verkleinen. Het RIVM heeft naar antwoorden gezocht in wetenschappelijke publicaties. Gekeken is of deze apparaten meerwaarde hebben als ze in geventileerde publieke ruimtes zoals scholen en winkels worden gebruikt. Met meerwaarde wordt bedoeld dat de luchtreinigers er voor zorgen dat minder mensen ziek worden dan als er alleen geventileerd wordt. Ook mogen luchtreinigers geen negatieve gevolgen voor de gezondheid hebben.

Er blijkt te weinig wetenschappelijk onderzoek te zijn gedaan om te kunnen stellen dat luchtreinigers in publieke ruimtes ervoor zorgen dat minder mensen COVID-19 krijgen. Er zijn geen artikelen gevonden waarin dit vraagstuk voor corona of andere virussen is uitgezocht. Enkele studies tonen dat mobiele luchtreinigers bacteriën en schimmels uit de lucht verwijderen, maar het is niet duidelijk of daardoor minder mensen ziek worden. Zo bleek in 2016 het ziekteverzuim in schoollokalen met en zonder luchtreiniger hetzelfde te zijn, terwijl de luchtreiniger het aantal bacteriën in de lucht had verminderd.

Verder blijkt dat mobiele luchtreinigers alleen veilig en goed werken als ze regelmatig worden onderhouden. Als dat niet gebeurt, neemt de werking af en kunnen micro-organismen op filters groeien die in de ruimte kunnen worden verspreid. Ook kan sommige apparatuur schadelijke stoffen in de ruimte brengen, zoals ozon. Meer onderzoek is nodig om te bepalen wat voor effect deze stoffen op de lange termijn op de gezondheid hebben.

Vanwege bovenstaande redenen is er onvoldoende wetenschappelijke onderbouwing om te adviseren mobiele luchtreinigers in alle publieke ruimtes te plaatsen. Meer onderzoek is nodig. Ondertussen kan worden overwogen om ze uit voorzorg tijdelijk als aanvullende maatregel in bepaalde ruimtes te plaatsen in een periode waarin veel mensen corona hebben. Het gaat dan om ruimtes waar kwetsbare mensen langere tijd verblijven, zoals in verpleeghuizen. Of in ruimtes waar de kans dat het virus via de lucht wordt overgedragen groter is, zoals in drukke cafés. De keuze voor een veilig apparaat en goed onderhoud is dan wel belangrijk.

Internationaal zijn experts het erover eens dat mensen op korte afstand (binnen 1,5 meter) de meeste kans hebben om met het coronavirus besmet te raken via (kleine) druppels in de lucht. Het virus kan ook over langere afstand en tijd door de lucht worden verspreid, vooral in slecht geventileerde ruimtes waar veel mensen langere tijd verblijven. Ook heeft de soort activiteiten invloed op de verspreiding, bijvoorbeeld of iemand die besmettelijk is veel schreeuwt of zingt.

Kernwoorden: corona, SARS-CoV-2, aerosolen, mobiele luchtreinigers

Synopsis

Added value of mobile air cleaners in reducing SARS-CoV-2 transmission – a literature study

The ministry of VWS has enquired whether mobile air cleaners help reduce transmission of the coronavirus SARS-CoV-2. RIVM has sought answers in the scientific literature. It was studied whether these appliances have added value when used in ventilated public spaces like schools and shops. In this case, added value means that these air cleaners reduce the number of people that fall ill more than ventilation alone would. Also, air cleaners should not have negative effects on people's health.

There is not enough scientific literature to state that air cleaners in public spaces reduce the number of people that get COVID-19. No studies were found that directly researched this for the coronavirus or other viruses. Several studies show that mobile air cleaners remove bacteria and fungi from the air, but it is unclear whether this would reduce the number of people falling ill. In a study from 2016, sick leave in classrooms with and without air cleaners was the same, while the air cleaners did reduce the number of bacteria in the air.

Additionally, maintenance is a prerequisite for air cleaners to work optimally and safely. When improperly maintained they do not work as well, and micro-organisms could grow on filters and spread through the air. Also, some appliances could release harmful substances like ozone into the air. More research is needed to determine the long-term effects these substances could have on people's health.

For the reasons mentioned above, there is insufficient scientific evidence to advise placing mobile air cleaners in all public places. More research is needed. Meanwhile, as precaution it could be considered to place them temporarily in some rooms during periods where many people contract COVID. Examples of these rooms include rooms where vulnerable people spend a longer time together, like in nursing homes, or rooms where the probability that the virus spreads through the air is higher, like in busy cafes. However, selecting a safe unit and ensuring proper maintenance is important.

Internationally, experts agree that within a short distance (within 1.5 meters) from each other people have the highest chance of getting infected with the coronavirus via (small) droplets in the air. The virus can also be spread over longer distances and a longer time through the air, especially in badly ventilated rooms where many people spend a longer time. Furthermore, the type of activity has an influence, like whether someone who is infectious shouts or sings a lot.

Keywords: corona, SARS-CoV-2, aerosols, mobile air cleaners

Inhoudsopgave

Samenvatting — 9

1 Inleiding — 11
1.1 Aanleiding onderzoek — 11
1.2 Doelstelling — 11
1.3 Aanpak onderzoek — 12
1.4 Kader onderzoek — 12
1.4.1 Mobiele vs. gebouwgebonden systemen — 12
1.4.2 Ventilatie — 13
1.4.3 Besmettingswegen — 13
1.4.4 Studies waarbij micro-organismen of virussen anders dan SARS-CoV-2 of aerosoldeeltjes zonder micro-organismen of virussen zijn onderzocht — 14

2 Overzicht van mobiele luchtreinigingstechnieken — 17
2.1 Filters — 17
2.2 UVC-straling — 17
2.3 Ionisatoren — 18
2.4 Andere technieken — 18

3 Effectiviteit van mobiele luchtreinigers — 21
3.1 Bestaande reviews — 21
3.2 Bewijs voor effectiviteit luchtreinigers aanvullend op ventilatie in een praktijksituatie — 22
3.3 Filters — 29
3.3.1 Effectiviteit van HEPA-filters voor het verwijderen van virusdeeltjes — 29
3.3.2 Effectiviteit van HEPA-filters voor het verwijderen van aerosolen in aanvulling op ventilatie — 30
3.3.3 Filters met coatings — 32
3.3.4 Andersoortige filters — 32
3.4 UVC-technieken — 32
3.4.1 Upper room UVC-installaties (254 nm) — 32
3.4.2 Losstaande UVC-luchtreinigers (254 nm) — 35
3.4.3 UVC-straling in combinatie met fotokatalyse — 35
3.4.4 Toepassingen van ‘ver UVC’ (222 nm) — 35
3.5 Ionisatoren — 36
3.6 Hybride technieken — 38
3.7 Belang van de positie van een luchtreiniger in de ruimte — 38
3.8 Nederlandse richtlijnen over luchtreinigingstechnieken in de zorg — 40
3.9 Internationale richtlijnen en adviezen — 41

4 Aandachtspunten voor gebruik van luchtreinigers in de publieke ruimte — 43
4.1 Geen vervanging voor ventilatie — 43
4.2 Veiligheid en vorming bijproducten — 43
4.2.1 Filters — 44
4.2.2 UVC-straling — 44
4.2.3 Ionisatie — 45
4.3 Onderhoud — 46

4.4 Geluid — 46
4.5 Luchtstromen — 47
4.6 Verwijderen overige aerosoldeeltjes — 47
4.7 Kosten — 48

5 Discussie — 49
5.1 Effectiviteit van mobiele luchtreinigers — 49
5.2 Aandachtspunten — 51

6 Conclusie — 53

7 Beleidsadviezen — 55

8 Literatuur — 57

Bijlage — 65
Definities — 65
Zoekstrategie — 67

Samenvatting

Via een literatuuronderzoek is onderzocht of mobiele luchtreinigers een meerwaarde hebben in het verminderen van transmissie (overdracht) van SARS-CoV-2 in publieke locaties zoals scholen, kantoren en winkels. In dit rapport is *meerwaarde* gedefinieerd als aanvullend gebruik van een luchtreiniger in een ruimte die geventileerd wordt volgens de geldende regelgeving en (arbo)richtlijnen en waarbij aandachtspunten die kunnen leiden tot negatieve effecten, zoals onderhoud, veiligheid en geluid worden meegewogen. Zowel ventilatie als luchtreiniging worden gezien als preventieve maatregel om aerogene transmissie, hier gedefinieerd als overdracht op verdere afstand en over langere tijd, te verminderen. Internationale consensus is dat aerogene transmissie van SARS-CoV-2 vooral kan plaatsvinden in slecht geventileerde ruimtes waar relatief veel mensen voor langere tijd verblijven. Het is niet bekend wat voor aandeel aerogene transmissie heeft ten opzichte van andere transmissieroutes, zoals directe transmissie (transmissie op korte afstand via druppels en aerosolen) en transmissie via oppervlakken. De huidige internationale consensus is dat directe transmissie de voornaamste route is.

Er zijn geen artikelen gevonden waar het effect van luchtreinigers op het verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 is vastgesteld. Er is één studie gevonden waar is gekeken naar vermindering van het ziekteverzuim op een school door gebruik van een mobiele luchtreiniger, en deze is uitgevoerd vóór de COVID-19-pandemie. Dit betreft algemeen ziekteverzuim, dus niet alleen door (respiratoire) infectieziekten. Uit deze studie bleek dat er geen vermindering van het ziekteverzuim kon worden vastgesteld. De luchtreiniger zorgde er wel voor dat het aantal bacteriën in de lucht verminderde maar virussen werden niet onderzocht. Ook enkele andere artikelen beschrijven dat mobiele luchtreinigers die aanvullend gebruikt worden op ventilatie meer micro-organismen kunnen verwijderen uit de lucht dan als er alleen wordt geventileerd, maar ook hier werden virussen niet onderzocht. Studies naar verwijderen of inactiveren van virussen uit de lucht in publieke ruimtes door luchtreinigers zijn daarom gewenst. Echter, ook als er wordt aangetoond dat virussen worden verwijderd in een ruimte door luchtreinigers dan is nog niet de vraag beantwoord of dit ook leidt tot minder respiratoire infectieziektes zoals COVID-19. Dit is naar verwachting locatie- én situatie-afhankelijk. Bijvoorbeeld of er een verhoogd risico is op aerogene transmissie in een ruimte en of de al aanwezige ventilatievoorziening het risico naar een beheersbaar niveau kan verlagen.

Uit de literatuur blijkt verder dat aandacht voor onderhoud en veiligheid van belang is. Bij achterstallig onderhoud kunnen op filters micro-organismen gaan groeien en mogelijk in de ruimte worden verspreid. Ionisatoren kunnen bijproducten vormen zoals ozon. Deze bijproducten kunnen bij langdurige blootstelling schadelijk zijn voor de gezondheid. Bij luchtreinigingstechnieken die gebruik maken van UVC-straling is van belang dat er geen sprake is van directe blootstelling. Voor alle technieken geldt dat bij achterstallig onderhoud de effectiviteit

vermindert. Een ander aandachtspunt is geluid. Uit studies blijkt dat sommige luchtreinigers geluidsnormen voor bijvoorbeeld scholen overschrijden. Dit kan er mogelijk toe leiden dat het als hinderlijk wordt ervaren en dat luchtreinigers op een lagere stand worden gezet waardoor de effectiviteit afneemt. Tot slot kunnen er luchtreinigers zijn waarbij de luchtstromen als hinderlijk worden ervaren en mogelijk ook kunnen bijdragen aan verdere verspreiding van aerosolen.

Luchtreinigers zijn geen vervanging voor ventilatie. Met ventileren wordt verse lucht van buiten naar binnen gebracht en worden gassen in de binnenruimte verwijderd die niet door luchtreinigers kunnen worden verwijderd. Ook zijn er voor ventileren eisen opgenomen in het bouwbesluit en gelden (arbo)richtlijnen. De meerwaarde van mobiele luchtreinigers in ruimtes die geventileerd worden volgens de geldende regelgeving en (arbo)richtlijnen kon met deze literatuurstudie niet worden vastgesteld. Mogelijk dat een goed opgezet onderzoek naar het verminderen of inactiveren van virusdeeltjes en verminderen van transmissie door luchtreinigers hier wel antwoord op kan geven. Vanwege de mogelijke negatieve effecten bij (langdurig) gebruik en ontbreken van studies waaruit blijkt dat transmissie wordt verminderd is er op dit moment onvoldoende onderbouwing om het continu toepassen van mobiele luchtreinigers te adviseren in alle publieke ruimtes. In afwachting van resultaten van verder wetenschappelijk onderzoek, kan uit voorzorg worden overwogen om in binnenruimtes waar een verhoogd risico is op aerogene transmissie of mensen uit de risicogroep langdurig bij elkaar verblijven mobiele luchtreinigers als tijdelijke aanvullende maatregel toe te passen in periodes met toenemende besmettingen. Het is dan wel van belang om een onderhoudsprotocol te volgen en geen luchtreiniger te gebruiken waarmee schadelijke bijproducten in de ruimte komen of mensen blootstelt aan UVC-straling.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding onderzoek

Het ministerie van VWS heeft het RIVM opdracht gegeven een literatuurstudie uit te voeren naar *de meerwaarde van mobiele luchtreinigers in binnenruimtes om transmissie van SARS-CoV-2 te verminderen*. Deze vraag is gesteld vanwege de Motie van het Tweede kamerlid Van Den Berg C.S. - Nr. 1071:
"(…) verzoekt de regering, praktijkonderzoek uit te laten voeren naar de vraag of en, zo ja, onder welke voorwaarden technische innovaties zoals het gebruik van luchtreinigers de transmissie van het coronavirus in binnenruimtes verminderen, en de Kamer hierover voor de zomer te informeren, (….)"

In de motie is nog de volgende tekst opgenomen: "overwegende dat technische innovaties kunnen bijdragen aan het tegengaan van overdracht van het coronavirus in binnenruimtes zoals in de horeca, het mkb en sportscholen; constaterende dat uit onderzoek van de Technische Universiteit Eindhoven is gebleken dat met een combinatie van ventilatie en luchtreiniging ruim 85% van de lucht in binnenruimtes gereinigd kan worden, en dat Duits onderzoek zelfs nog hogere percentages laat zien; constaterende dat het RIVM aangeeft dat dit effect echter alleen met een rekenmodel is berekend, en dat het de voorkeur zou hebben om de combinatie van ventilatie en luchtreiniging ook in de praktijk te meten;"

Dit literatuuronderzoek is de eerste fase van een onderzoek naar de meerwaarde van luchtreinigers in de praktijk. Voor het uitvoeren van praktijkonderzoek is eerder door het RIVM in opdracht van ministerie van VWS een voorstel gemaakt met aandachtspunten (RIVM, 2021b). Dit voorstel kan door universiteiten en instituten met technische en epidemiologische kennis gebruikt worden om te bepalen of luchtreinigers een meerwaarde hebben in de praktijk.

In de Bijlage bevindt zich een lijst met in dit rapport gehanteerde definities.

1.2 Doelstelling

Het doel van deze literatuurstudie is onderzoeken of er voldoende onderbouwing is dat mobiele luchtreinigers in publieke ruimtes een meerwaarde hebben in het verminderen van transmissie van SARS-CoV-2.

Met 'meerwaarde' wordt in dit rapport bedoeld: in ruimtes waar geventileerd wordt volgens de geldende eisen en (arbo)richtlijnen, in het rapport ook 'correct geventileerde ruimte' genoemd, zorgt het toevoegen van een luchtreiniger voor aantoonbaar minder transmissie van SARS-CoV-2, waarbij ook rekening gehouden wordt met mogelijke nadelige effecten van het toevoegen van dit systeem aan een ruimte. Vanwege de motie ligt de focus in dit rapport op publieke locaties zoals kantoren, scholen en winkels. In de literatuurstudie zijn echter ook

artikelen en richtlijnen van zorglocaties zoals ziekenhuizen meegenomen.

Hoewel de onderzoeksvraag gericht is op de effectiviteit van luchtreinigers m.b.t. transmissie van SARS-CoV-2, spelen verschillende andere aspecten mee in de afweging of gebruik van een mobiele luchtreiniger een meerwaarde heeft als aanvullende maatregel naast ventileren. Daarom zal deze studie daarnaast een aantal aandachtspunten bespreken zoals veiligheid, comfort, onderhoud en mogelijke bijkomende effecten.

1.3 Aanpak onderzoek

De wetenschappelijke literatuur is doorzocht op 16 februari 2022, gebruikmakend van de databases Embase en Scopus. De zoekstrategie is opgenomen in de Bijlage. Hierin zijn termen gecombineerd die betrekking hebben op luchtreiniging en op virustransmissie. Opinieartikelen en editorials zijn geëxcludeerd, evenals artikelen in andere talen dan Engels en Nederlands, artikelen die niet peer-reviewed zijn en artikelen waarvan de volledige tekst niet gevonden kon worden. Middels de sneeuwbalmethode en kennis van experts zijn hieraan nog studies toegevoegd. Ook zijn enkele recentere relevante artikelen die onder de aandacht kwamen tijdens het schrijven van dit rapport nog meegenomen. De artikelen zijn vervolgens ingedeeld op basis van de volgende criteria:

- Er is onderzocht of in een geventileerde ruimte transmissie van SARS-CoV-2 en/of andere aerogene pathogenen is verminderd door het plaatsen van één of meerdere luchtreinigers;
- Er is onderzocht of door het plaatsen van een luchtreiniger in een ruimte duidelijk meer (inactieve) virussen of micro-organismen uit de lucht worden verwijderd dan wanneer er alleen wordt geventileerd;
- Er is onderzocht of door het plaatsen van een luchtreiniger in een ruimte duidelijk meer aerosolen (zonder te bepalen of virussen of micro-organismen aanwezig zijn) uit de lucht worden verwijderd dan wanneer er alleen wordt geventileerd;

De focus ligt hierbij op studies uitgevoerd in een praktijksituatie, in plaats van een laboratorium.

1.4 Kader onderzoek

1.4.1 Mobiele vs. gebouwgebonden systemen

Het literatuuronderzoek is beperkt tot mobiele luchtreinigingstechnieken (ook wel luchtzuiveraars genoemd) en strekt niet uit tot andere mogelijk beschikbare technische innovaties. Het ministerie van VWS is vroegtijdig op de hoogte gebracht van deze keuze. De toepassing van mobiele luchtreinigers in privé en publieke ruimtes krijgt sinds de COVID-19 pandemie steeds meer aandacht. De (Kamer)vragen gaan veelal over deze installaties, getuige ook de toelichting bij de motie. Onder mobiele luchtreinigingstechnieken worden in dit rapport technieken verstaan die in een ruimte lucht aanzuigen en de lucht die door het apparaat gaat grotendeels ontdoen van aerosoldeeltjes, en/of micro-organismen en virussen in deze lucht inactiveren (ook wel luchtdesinfectie of –zuivering). Naast verplaatsbare luchtreinigers in een ruimte worden in

dit rapport onder 'mobiel' ook luchtreinigingsproducten geschaard die in een ruimte worden bevestigd op de muur of het plafond en waarmee micro-organismen en virussen worden geïnactiveerd.

Er zijn ook vergelijkbare technieken die in luchtbehandelingsinstallaties van grote gebouwen worden gebruikt, bijvoorbeeld in ziekenhuizen en kantoortorens. Deze luchtbehandelingsinstallaties worden ook wel 'Heating, Ventilation and Air Conditioning' (HVAC-)-installaties genoemd. In deze installaties wordt gebruikgemaakt van luchtkanalen om de lucht te transporteren van en naar een (centrale) luchtbehandelingsinstallatie. Deze installaties vallen buiten de scope van dit rapport.

1.4.2 Ventilatie

In het Bouwbesluit zijn minimale capaciteitseisen opgenomen met betrekking tot luchtverversing (ventilatie), spuivoorzieningen (mogelijkheden voor luchten) en thermisch comfort (luchtstromen/tocht) (Bouwbesluit, 2012; afdeling 3.6 en 3.7). De minimale eisen voor luchtverversing zijn verschillend voor bestaande bouw en 'nieuwbouw'. Het onderzoek gaat uit van locaties waar minimaal wordt voldaan aan de geldende eisen uit het Bouwbesluit en dat de voorzieningen ook correct worden gebruikt. Luchtreiniging (zuivering van binnenlucht door recirculatie) is geen vervanging voor luchtverversing (vervangen van binnenlucht met lucht van buiten). De vraag die dus wordt beantwoord is of het toepassen van mobiele luchtreinigers een aantoonbare meerwaarde heeft op locaties waar aan de ventilatie-eisen en -richtlijnen wordt voldaan. Hiermee is niet gezegd dat de ventilatie-eisen voldoende of onvoldoende zijn om transmissie van SARS-CoV-2 tot het gewenste risico te verminderen. Wel is de consensus dat ventilatie helpt om het aantal besmettingen door aerogene transmissie te beperken. De kans op aerogene transmissie wordt lager wanneer er meer geventileerd wordt, maar het effect wordt steeds minder groot (Bartels et al., 2021). Echter, ook bij een zeer hoge ventilatievoud van 30 luchtverversingen per uur ('air changes per hour'; ACH) blijft de kans op besmetting door aerogene transmissie aanwezig (Bartels et al., 2021). *Hoe* er wordt geventileerd draagt waarschijnlijk ook bij aan de efficiëntie waarmee pathogenen kunnen worden verwijderd (de Gids and Opperhuizen, 2004). Dit valt echter buiten de scope van dit rapport. In dit rapport is onderzocht of er studies zijn naar het effect van luchtreinigers in een correct geventileerde ruimte. Ventilatie helpt aerogene transmissie van SARS-CoV-2 te beperken maar tot hoeveel minder zieken dit leidt is onbekend omdat niet duidelijk is hoe groot het aandeel is van aerogene transmissie ten opzichte van andere transmissieroutes (zie ook 1.4.3). Ook is onduidelijk welke ventilatie-hoeveelheid nodig is om overdracht op publieke plekken te verminderen waarbij er een juiste balans is met andere eisen en doelstellingen zoals goed thermisch comfort, proportionele kosten en doelstellingen voor energiebesparingen. Het beantwoorden van deze openstaande vragen is ook gewenst.

1.4.3 Besmettingswegen

Ventileren en eventueel aanvullend gebruik van luchtreinigers worden vooral geadviseerd als preventieve maatregel om aerogene transmissie te verminderen (Centers for Disease Control and Prevention, 2021b; World Health Organization, 2021b). Onder aerogene transmissie wordt

verstaan indirecte overdracht van een pathogeen over lange(re) afstand en tijd. Infectieuze virusdeeltjes in aerosolen blijven zweven in de ruimte waardoor personen in de ruimte kunnen worden besmet. De besmettelijke persoon hoeft ook niet meer in de ruimte aanwezig te zijn. Hoe groot de rol is van de aerogene route voor SARS-CoV-2 ten opzichte van andere routes is vooralsnog onduidelijk. Wel lijkt er een verhoogd risico in ruimtes met te weinig ventilatie en veel mensen die voor langere tijd in de ruimte verblijven (Bartels et al., 2021; RIVM, 2021a). De huidige internationale epidemiologische consensus is dat transmissie van SARS-CoV-2 voornamelijk op korte afstand (binnen 1,5 meter) van een besmettelijk persoon plaatsvindt. Druppeltjes met infectieus virus die tijdens praten, zingen, niezen en hoesten gevormd worden door een besmettelijk persoon, worden door andere personen ingeademd of komen op de slijmvliezen (mond, ogen, neus) (Centers for Disease Control and Prevention, 2021a; World Health Organization, 2021a). Dit wordt ook wel directe transmissie of druppeltransmissie genoemd (RIVM, 2021a). Ook transmissie via besmette oppervlakken en voorwerpen is mogelijk, maar de rol hiervan lijkt beperkt te zijn (RIVM, 2021a). Het effect van mobiele luchtreinigers (en ventilatie) op transmissie binnen 1,5 meter is vermoedelijk beperkt, omdat er sprake is van directe continue blootstelling en ventilatie deze blootstelling onvoldoende kan verdunnen (Liu et al., 2017). Luchtreinigers (en ventilatie) worden daarom niet gezien als de enige preventieve maatregel om transmissie van COVID-19 te verminderen (Centers for Disease Control and Prevention, 2021a; RIVM, 2022; World Health Organization, 2021b). Andere maatregelen zijn nodig om besmetting via bijvoorbeeld directe transmissie en via oppervlakken te verminderen. Omdat het relatieve belang van de verschillende transmissieroutes nog niet volledig opgehelderd is en waarschijnlijk verschilt per praktijksituatie, zou onderzoek naar de effectiviteit van mobiele luchtreinigers op transmissie in praktijksituaties informatief zijn.

1.4.4 Studies waarbij micro-organismen of virussen anders dan SARS-CoV-2 of aerosoldeeltjes zonder micro-organismen of virussen zijn onderzocht

De focus in dit rapport ligt op het verminderen van transmissie van SARS-CoV-2. Echter, omdat COVID-19 een nieuwe infectieziekte is zijn er nog maar een beperkt aantal studies naar het verminderen van transmissie door luchtreinigers. Er zijn daarom ook studies meegenomen die hebben onderzocht of mobiele luchtreinigers andere infectieziektes verminderen of andere micro-organismen of virussen in de lucht van een ruimte verminderen.

Aerosoldeeltjes kunnen bestaan uit verschillende materialen en afkomstig zijn van verschillende bronnen in het binnen- en buitenmilieu. Mensen scheiden aerosolen uit tijdens bijvoorbeeld ademen, spreken, hoesten en niezen. Wanneer mensen geïnfecteerd zijn met SARS-CoV-2, kunnen deze aerosolen virusdeeltjes bevatten waarmee andere mensen geïnfecteerd kunnen worden. Deze worden ook wel ‘infectieuze aerosolen’ genoemd. Wanneer relevant zijn er ook studies meegenomen naar de verwijdering van aerosolen zonder micro-organismen of virussen door luchtreinigers. Voorzichtigheid is wel geboden bij de vertaling wat dit betekend voor preventie van COVID-19. Voor andere micro-organismen of virussen geldt bijvoorbeeld een andere mate van besmettelijkheid. Op basis van studies naar desinfectie van SARS-CoV-2

en de eigenschappen van het virus kan wel gesteld worden dat SARS-CoV-2 goed te desinfecteren is met verschillende desinfectietechnieken (Viana Martins et al., 2022). In deze literatuurstudie is niet gekeken naar mogelijke positieve effecten van luchtreinigers op het beperken van allergieën of luchtwegklachten door verwijderen van onder meer allergenen en fijnstof. Dat valt buiten de scope van dit rapport.

2 Overzicht van mobiele luchtreinigingstechnieken

Er bestaan verschillende soorten technieken die worden toegepast in mobiele luchtreinigers. Hier worden de meest voorkomende technieken kort geïntroduceerd. Voor een uitgebreide beschrijving van de technieken kan het TNO-rapport 'Literatuurstudie naar de toepassing van verschillende luchtreinigingsmethoden voor inactivatie van microbiologische verontreinigingen' worden geraadpleegd (Kompatscher and Traversari, 2022). Sommige mobiele luchtreinigers maken gebruik van een combinatie van technieken (Bischoff et al., 2019). Bijvoorbeeld een filter gecombineerd met UVC-straling of ionisatietechniek. In dit hoofdstuk worden de technieken alleen separaat besproken.

2.1 Filters

Filters vangen aerosoldeeltjes uit de lucht die via een ventilator door de mobiele luchtreiniger wordt getrokken. Er bestaan verschillende soorten filters. Veel gebruikte filters zijn 'high-efficiency particulate air' (HEPA)-filters. HEPA-filters worden ingedeeld in klassen op basis van hun verwijdingsefficiëntie volgens de Europese norm NEN-EN 1822. Een HEPA-filter (H13) houdt minimaal 99,95% alle aerosolen van 0,3 µm tegen (Kompatscher and Traversari, 2022). Deze 0,3 µm is de 'most penetrating particle size' (MPPS), wat betekent dit formaat het meest door een filter heen komt. Aerosoldeeltjes die kleiner of groter zijn worden effectiever afgevangen (Kompatscher and Traversari, 2022). HEPA filters zijn geschikt om vrijwel alle ziekteverwekkers uit de lucht die door het filter gaat te verwijderen, en worden ook al jarenlang om deze reden toegepast in (centrale) luchtbehandelingssystemen van bijv. ziekenhuizen en laboratoria (Federatie Medisch Specialisten, 2022).

2.2 UVC-straling

UV-straling is elektromagnetische straling, waarvan het deel met de kortste golflengten UVC wordt genoemd. UVC wordt weer onderverdeeld in "lang" UVC, met golflengten van ongeveer 230–280 nm, en "ver" UVC, met kortere golflengten van ongeveer 100-230 nm. De grens van 230 nm is hierbij niet scherp. De term 'UVGI', die staat voor 'ultraviolet germicidal irradiation', wordt ook regelmatig gebruikt in de context van UVC-technieken. Bij voldoende lange blootstelling inactiveert deze hoogenergetische straling micro-organismen en virussen. UVC-inactivatie gebeurt door beschadiging van het genetisch materiaal (DNA of RNA) en van eiwitten van het organisme. Ditzelfde principe kan ook leiden tot gezondheidsrisico's voor de mens (den Outer et al., 2021).

UVC-lampen zenden, net als de meeste lichtbronnen, straling met meerdere golflengten uit (een spectrum). Een veelgebruikte UVC-lamp is de kwiklamp, waarbij de piek van de uitgezonden straling bij 254 nm ligt ('lang' UVC). Een andere UVC-bron is de krypton-chloor (KrCl)-lamp, waarbij de piek rond 222 nm ligt ('ver' UVC). Speciale filters kunnen kortere en langere golflengten tegenhouden, waardoor alleen straling van 222 nm overblijft (den Outer et al., 2021). Deze ver-UVC-lampen staan momenteel sterk in de belangstelling, omdat deze kortere golflengten nauwelijks in de huid kunnen doordringen en daardoor

minder schadelijk voor de mens zouden zijn (Buchan et al., 2020). Het gebruik van deze 'ver' UVC-lampen wordt daarom ook geadviseerd in ruimtes waarin mensen aanwezig zijn en continu worden blootgesteld aan deze UVC-straling (Buonanno et al., 2020).

Mobiele luchtreinigers die gebruikmaken van UVC-straling kunnen losstaande apparaten zijn, of zogenaamde 'upper room' installaties. Losstaande apparaten zuigen lucht aan waarna bestraling in het apparaat gebeurt. 'Upper room'-installaties worden aan het plafond of muur bevestigd en bestralen het bovenste deel van de ruimte waarin ze hangen, terwijl straling naar beneden wordt afgeschermd. Hierbij wordt geen lucht aangezogen, alhoewel soms ventilatoren worden toegepast om grotere menging van de onderste en bovenste luchtlagen in de ruimte te bewerkstelligen. De toegestane limiet voor menselijke blootstelling aan UVC-straling is omschreven in NEN-EN-ISO 15858. Deze norm is van toepassing op zowel losstaande als 'upper room'-installaties. In principe zijn deze installaties dusdanig ontworpen dat mensen niet direct blootgesteld worden aan de straling van de UVC-lampen.

Er zijn ook UVC-luchtreinigingstechnieken die gebruik maken van fotokatalyse als (extra) desinfectietechniek. Door een oppervlak waarop een coating is aangebracht van bijvoorbeeld titaniumdioxide (TiO_2) te belichten met UV-straling worden radicalen gevormd (Kompatscher and Traversari, 2022). Deze radicalen kunnen, bij voldoende contacttijd, ziekteverwekkers inactiveren.

2.3 Ionisatoren

Luchtreiniging op basis van ionisatie wordt toegepast in verschillende types luchtreinigerstechnologieën: ionengeneratoren, elektrostatische filters en plasma. Ionisatoren produceren een stroom van geladen deeltjes (ionenstroom) in de lucht die (fijn)stofdeeltjes in de omgeving doen neerslaan (de Meer et al., 2010). Dit kan een oppervlak in de omgeving zijn, zoals muren, in het geval van een ionengenerator, of bijvoorbeeld een filter in het apparaat zelf in het geval van een elektrostatisch filter (Berry et al., 2022). Niet-thermisch (koud) plasma maakt gebruik van hoogspanningsontladingen in een ionisatiebuis. Dit kan resulteren in vorming van positief en negatief geladen ionen, clusters van zuurstofionen, zuurstofhoudende radicalen, UVC-straling, ozon en een reeks gecombineerde effecten (Kompatscher and Traversari, 2022).

2.4 Andere technieken

HEPA-filters, UVC-straling en ionisatie zijn de meest gebruikte technieken in mobiele luchtreinigers. In navolging van het eerder genoemde TNO-rapport (Kompatscher and Traversari, 2022) focust dit rapport ook op deze drie technieken.

Daarnaast zijn er voorbeelden in de literatuur van andersoortige filters en technieken die worden toegepast in mobiele luchtreinigers, zoals actieve koolfilters en ozongeneratoren. Actieve koolfilters zijn gericht op het verwijderen van geuren en vluchtige organische stoffen, en zijn niet gericht op het verwijderen van ziekteverwekkers uit de lucht. Soms

worden filters gecoat met een stof die tot extra werkzaamheid zou moeten leiden (Kim et al., 2021). Er zijn ook mobiele luchtreinigers op de markt die werken met ozon als desinfecterend middel (ozongenerators). Deze producten lijken vooral gericht te zijn op geurverwijdering, maar soms wordt ook inactivatie van ziekteverwekkers geclaimd. Deze technieken worden buiten beschouwing gelaten in dit rapport, aangezien wetenschappelijke literatuur over de effectiviteit van toepassing in mobiele luchtreinigers ontbreekt. Voor een discussie over ozon dat als bijproduct wordt gevormd, zie sectie 4.2.

3 Effectiviteit van mobiele luchtreinigers

In dit rapport staat de verwijderende of inactiverende werking van een luchtreinigingstechniek die correct werkt niet ter discussie. HEPA-filters houden micro-organismen en virussen tegen. UVC-straling en ionisatie kunnen bij voldoende blootstelling micro-organismen en virussen inactiveren. Dit geldt echter alleen voor de lucht die door de luchtreiniger wordt getrokken of de lucht die lang genoeg wordt blootgesteld aan UVC-straling. Hiermee is echter nog niet de vraag beantwoord of dit ook leidt tot minder transmissie van SARS-CoV-2 dan wanneer er alleen wordt geventileerd in verschillende praktijksituaties. Dit is onder meer afhankelijk van het aandeel aerogene transmissie in de ruimte (zie paragraaf 1.4.3) en wat voor effect ventilatie in deze ruimte heeft bij het voorkomen van aerogene transmissie (zie 1.4.2).

3.1 Bestaande reviews

Er zijn een aantal relevante recente reviews en rapporten gevonden, bevindingen daaruit worden hier kort besproken. Geen hiervan beantwoord echter de onderzoeksvraag van deze studie, daarom wordt in sectie 3.2-3.7 aanvullende literatuur besproken.

TNO heeft een rapport uitgebracht ‘Literatuurstudie naar de toepassing van verschillende luchtreinigingsmethoden voor inactivatie van microbiologische verontreinigingen’ (Kompatscher and Traversari, 2022). Zij concluderen dat de beschikbare literatuur veelal laboratoriumstudies betreft die niet representatief zijn voor een praktijksituatie. Ook trekken weinig studies conclusies over de effectiviteit met betrekking tot inactivatie van microbiologische verontreinigingen. TNO stelt daarom dat er geen eenduidige conclusies te trekken zijn over de effectiviteit van de onderzochte luchtreinigingstechnologieën in een praktijksituatie.

Hammond et al. (2021) hebben een review geschreven om de vraag te beantwoorden of in de thuis- en werksituatie commercieel beschikbare verplaatsbare luchtfilters zouden moeten worden geplaatst om de overdracht van SARS-CoV-2 en andere luchtweginfecties tegen te gaan. De auteurs hebben twee studies gevonden die ‘proof of principle’ geven dat luchtfilters bacteriën in de lucht kunnen afvangen (Bischoff et al., 2019; Guo et al., 2020), maar stellen dat onderzoek naar transmissie ontbreekt en een belangrijk kennishiaat is. Studies naar virussen werden niet gevonden door Hammond et al.. Ook deze literatuurstudie heeft geen onderzoek gevonden waarin het effect van mobiele luchtfilters op transmissie in de praktijk is onderzocht. Wel zijn er enkele studies naar het effect van luchtfilters op SARS-CoV-2 of surrogaatvirus, en meer studies naar het effect van luchtfilters op aerosoldeeltjes in de lucht, al dan niet in aanwezigheid van ventilatie. Deze worden in sectie 3.3 besproken.

Liu et al. (2022) hebben een systematische review gedaan over de effectiviteit van mobiele HEPA luchtfilters voor het verwijderen van SARS-CoV-2 uit het binnenmilieu. Alle tien de studies, die zij hebben

gevonden die aerosoldeeltjes in vergelijkbare grootte als SARS-CoV-2 virusdeeltjes hebben onderzocht, vonden dat mobiele HEPA luchtreinigers effectief waren in het reduceren van aerosoldeeltjes in de lucht. Mobiele HEPA filters waren effectief in aanvulling op andere strategieën, zoals ventilatie.

Nguyen et al. (2022) hebben een systematische review gedaan naar het effect van 'luchtdesinfectietechnieken' op aerogene bacteriële ziekteverwekkers. Luchtdesinfectietechnieken hebben ze breed gedefinieerd, naast UVC en filtratie omvatte dit ook het gebruik van mondneusmaskers en ventilatie. Hoewel meer dan 80% van de gevonden studies een effect van de techniek ten opzichte van de baseline vond, stellen de auteurs dat de generaliseerbaarheid van de bevindingen naar praktijksituaties onduidelijk is, door het gebrek aan onderzoek hiernaar.

SARS-CoV-2 kan, evenals andere coronavirussen, geïnactiveerd worden door UVC-straling (Beggs and Avital, 2020; Bhardwaj et al., 2021). Heßling et al. (2020) hebben in hun review van de beschikbare literatuur bepaald dat de bovengrens van de log-reductie dosis (de UV-dosis die leidt tot inactivatie van 90% van het virus) ongeveer 10,6 mJ / cm^2 (mediaan) is, en de echte waarde wordt geschat rond 3,7 mJ/cm^2 (mediaan). Hiermee is toepassen van UVC-straling in principe een geschikte desinfectiemethode voor SARS-CoV-2, die voor verschillende desinfectiedoeleinden wordt toegepast (o.a. van oppervlakken).

De literatuur is echter niet eenduidig over of het toepassen van UVC-straling in luchtreiniging ook effectief is, en of het in de praktijk transmissie voorkomt. Bhardwaj et al. (2021) concluderen in een review dat, alhoewel UVC-straling effectief is tegen coronavirussen, er nog niet aangetoond is dat het afdoende werkt voor het tegengaan van aerogene transmissie. De grootste uitdaging wat betreft inactiveren van ziekteverwekkers in de lucht is, volgens de auteurs, het toedienen van een voldoende hoge UVC-dosis om grote hoeveelheden lucht te kunnen desinfecteren onder verschillende omgevingsomstandigheden m.b.t. temperatuur en relatieve luchtvochtigheid. De auteurs stellen daarom dat de technologie meer ontwikkeling nodig heeft voordat deze wijdverspreid toegepast wordt. Een hoge luchtvochtigheid kan ertoe leiden dat water-bevattende aerosolen niet uitdrogen, waardoor UV straling minder effectief kan doordringen naar de micro-organismen en virussen in de druppeltjes, een effect dat o.a. is aangetoond voor influenzavirus (Dumyahn and First, 1999; McDevitt et al., 2012).

3.2 Bewijs voor effectiviteit luchtreinigers aanvullend op ventilatie in een praktijksituatie

Verschillende factoren zijn van belang bij het inschatten van de effectiviteit van mobiele luchtreinigers in publieke ruimtes. Logischerwijs is de verwijderings- en/of inactivatie-efficiëntie van de luchtreiniger van belang. Relatief veel onderzoek is hierop gericht, veelal onder gecontroleerde omstandigheden. Daarnaast speelt het ruimtelijke aspect een rol: is de luchtreiniger in staat om de gehele ruimte waarin hij geplaatst wordt te bestrijken, of wordt slechts lokaal de lucht gereinigd?

Dit is context-afhankelijk, en daarom is deze vraag lastiger te beantwoorden.

De belangrijkste vraag in dit literatuuronderzoek betreft de toegevoegde waarde van de luchtreiniger in de praktijksituatie, in aanvulling op de minimale geldende Nederlandse eisen en (arbo)richtlijnen voor ventilatie. Vermindert het plaatsen van een luchtreiniger ook daadwerkelijk transmissie van infecties? Tabel 1 toont een overzicht van de gevonden studies waarin de effectiviteit van luchtreinigers is onderzocht in een praktijksituatie waar ook wordt geventileerd. Er is slechts één studie is gevonden waarin een maat van transmissie is onderzocht. Er zijn vier studies gevonden waarin het verwijderen en/of inactiveren van bacteriën en/of schimmels is onderzocht. Er werden geen studies gevonden naar virussen. De overige studies in Tabel 1 hebben gekeken naar verwijdering van aerosoldeeltjes (zonder micro-organismen of virussen). Secties 3.3 - 3.6 bespreken de effectiviteit van verschillende technieken (HEPA filters, UVC, ionisatoren, en hybride technieken) en sectie 3.7 gaat in op het belang van de positie van luchtreinigers in de ruimte. In sectie 3.3 - 3.7 worden ook studies besproken die niet in een praktijksituatie maar in een mock-up of laboratorium zijn uitgevoerd, deze zijn niet in Tabel 1 opgenomen. Kanttekening bij Tabel 1 is dat het merendeel internationale studies betreft. In andere landen kunnen lagere minimale ventilatie-eisen gelden of de waarden zijn niet te vergelijken omdat de Nederlandse regelgeving uitgaat van ‘liter per seconde per persoon’ (L/s/p) in plaats van een ventilatievoud. Echter, uitgaande van Nederlandse richtlijnen voor de zorg en berekeningen in de studie van Bartels et al. (2021) is de ventilatievoud in de geciteerde artikelen vergelijkbaar of hoger. De ventilatiewaarde van de enige Nederlandse geïncludeerde studie (Blocken et al., 2021) voldoet aan de Nederlandse regelgeving.

Tabel 1 Gevonden studies waarbij de meerwaarde van luchtreinigers ten opzichte van ventilatie in een praktijksituatie is onderzocht. Studies waarbij alleen gemodelleerd is zonder praktijkmetingen, of waarbij alleen metingen in een laboratorium zijn verricht, zijn in dit overzicht niet meegenomen.

Artikel	Gebruikte luchtreinigingstechniek(en)	Bron van aerosolen	Situatie	Verminderen transmissie onderzocht	Verwijderen en/of inactiveren micro-organismen of virussen onderzocht	Verwijderen aerosoldeeltjes (geen micro-organisme of virus) onderzocht	Onderzochte ventilatie-omstandigheden	Behaald effect
Su et al. (2016)	Upper room UVC	Aanwezige personen	Klaslokalen	Ja	Ja	Nee	Mechanische ventilatie, een warmtepompventilatiesysteem met MERV-7 filters. Luchttoevoer van 1600 – 2100 m^3/uur, inhoud lokalen 250-260 m3, ventilatievoud ongeveer 6-8 ACH of 17-31 l/s/p afhankelijk van de bezettingsgraad. Het is echter niet volledig duidelijk uit de studie of hier ook gerecirculeerde lucht bij zit.	Geen effect gevonden op ziekteverzuim leerlingen, wel is er een afname van kweekbare bacteriën en schimmels in de lucht geobserveerd bij gebruik van UVC-installaties.

Artikel	Gebruikte luchtrei-nigingstechniek(en)	Bron van aerosolen	Situatie	Verminderen trans-missie onderzocht	Verwijderen en/of inactiveren micro-organismen of virussen onderzocht	Verwijderen aerosoldeeltjes (geen micro-organisme of virus) onderzocht	Onderzochte ventilatie-omstandigheden	Behaald effect
Menzies et al. (2003)	Losstaand UVC en upper room UVC	Aanwezige personen die sputum-inductie ondergingen	Sputum-inductie (ziekenhuis)	Nee	Ja	Nee	Mechanische ventilatie, 31,7 ACH. Instromende lucht vanuit de hal, mogelijk ook aanvoer van bacteriën hiermee.	Het omlaagbrengen van de concentraties bacteriën in de lucht ging sneller wanneer UVC werd toegevoegd aan ventileren. De mobiele UVC-reiniger was effectiever dan de plafond UVC-installatie.
Bergeron et al. (2007)	Plasma	Aanwezige personen	Ziekenhuis	Nee	Ja	Ja	Een operatiekamer met mechanische ventilatie 11 ACH, en een afdeling waarvan de ventilatievoud niet vermeld is.	In de operatiekamer halveerde de luchtconcentratie totale mesofiele flora bij gebruik van de luchtreiniger in aanvulling op ventilatie. Kweekbare schimmels werden niet meer gemeten bij gebruik van de luchtreiniger. De aerosolmetingen lieten lagere concentraties zien bij gebruik van de luchtreinigers in aanvulling op ventilatie dan bij alleen ventileren. Op de

Artikel	Gebruikte luchtrei-nigingstechniek(en)	Bron van aerosolen	Situatie	Verminderen trans-missie onderzocht	Verwijderen en/of inactiveren micro-organismen of virussen onderzocht	Verwijderen aerosoldeeltjes (geen micro-organisme of virus) onderzocht	Onderzochte ventilatie-omstandigheden	Behaald effect
								afdeling was het aantal kweekbare schimmels van opportunistisch ziekteverwekkende soorten in een ruimte met luchtreiniging met 75% afgenomen in vergelijking met een controleruimte.
Fennelly et al. (2021)	Plasma	Aanwezige personen	Ziekenhuis	Nee	Ja	Nee	Mechanische ventilatie met warmteterugwinning en HEPA-filter, 12 ACH.	Geen significant verschil in kweekbare bacteriën en schimmels in de lucht tussen het gebruik van de luchtreiniger en de controlesituatie.
Blocken et al. (2021)	Plasma	Aanwezige personen	Sportschool	Nee	Nee	Ja	Mechanische ventilatie, 2,2 ACH.	Wanneer 6 luchtreinigers werden gebruikt aanvullend op ventilatie, nam de aerosolconcentratie af met 90-95%
Buising et al. (2021)	HEPA filter	Eenmalige uitstoot van	Ziekenhuis	Nee	Nee	Ja	Mechanische ventilatie via HVAC systeem, 12 ACH.	Twee luchtreinigers zorgden voor ongeveer 3x zo snelle afname van

Artikel	Gebruikte luchtrei-nigingstechniek(en)	Bron van aerosolen	Situatie	Verminderen trans-missie onderzocht	Verwijderen en/of inactiveren micro-organismen of virussen onderzocht	Verwijderen aerosoldeeltjes (geen micro-organisme of virus) onderzocht	Onderzochte ventilatie-omstandigheden	Behaald effect
		glycerine rook						aerosolconcentratie dan alleen ventilatie; 99% afname in 5,5 min versus 16 min
Lindsley et al. (2021)	HEPA filter	Een continue bron van KCl-oplossing aerosolen	Vergaderzaal	Nee	Nee	Ja	Mechanische ventilatie via HVAC systeem, 2 ACH.	De blootstelling aan aerosolen was 49-65% lager, afhankelijk van de opstelling, wanneer luchtreiniging werd gebruikt aanvullend op ventilatie.
Abraham (1999)	HEPA filter	Aanwezige personen	Woonhuis	Nee	Nee	Ja	Natuurlijke ventilatie en luchttoevoer via luchtverwarmingsstelsel. ACH niet vermeld.	Gebruik van een luchtreiniger leidde tot 62-76% lagere aerosolconcentraties dan in een ruimte in dezelfde woning zonder luchtreiniger.
Duill et al. (2021)	HEPA filter	Aanwezige personen, en een eenmalige uitstoot van di-ethyl hexyl	Klaslokalen	Nee	Nee	Ja	Natuurlijke ventilatie, ACH niet vermeld.	Natuurlijke ventilatie leidde tot toename aerosolconcentratie door netto instroom, toevoegen van luchtreiniging leidde tot lagere concentraties.

Artikel	Gebruikte luchtrei-nigingstechniek(en)	Bron van aerosolen	Situatie	Verminderen trans-missie onderzocht	Verwijderen en/of inactiveren micro-organismen of virussen onderzocht	Verwijderen aerosoldeeltjes (geen micro-organisme of virus) onderzocht	Onderzochte ventilatie-omstandigheden	Behaald effect
		sebacate (DEHS)						
Rutala et al. (1995)	HEPA filter	Een eenmalige uitstoot van minerale olie aerosolen	Ziekenhuis	Nee	Nee	Ja	Mechanische ventilatie, 6,5 ACH gebaseerd op instroom, 12,2 ACH gebaseerd op uitstroom.	De tijd tot 90% aerosolverwijdering (≥0,3 µm) was 12 tot 16 minuten bij alleen ventilatie, en 5 tot 12 minuten bij combineren van ventilatie en luchtreiniging
Ren et al. (2021)	HEPA filter	Een eenmalige uitstoot van aerosolen door wierook te branden	Tandarts	Nee	Nee	Ja	Mechanische ventilatie, 3 - 45 ACH.	De tijd tot 95% aerosolverwijdering (0,3 µm) was 7 tot >30 minuten bij alleen ventilatie, en 3 tot 9 minuten bij combineren van ventilatie en luchtreiniging

De hoeveelheid aerosoldeeltjes die mensen genereren door bijv. te ademen en te spreken is relatief klein in vergelijking met de deeltjesconcentraties die typisch aanwezig zijn in het buiten- en binnenmilieu (Blocken et al., 2021). Er zijn veel verschillende bronnen van aerosolen, in zowel het buiten- als binnenmilieu, bijvoorbeeld: verkeer en industrie, koken en verbrandingsprocessen binnenshuis, roken, chemische reacties en stof. Het verschilt per locatie wat de voornaamste bronnen zijn en of deze in het buiten- of binnenmilieu liggen (Morawska et al., 2017). Ondanks dat mensen kleine hoeveelheden aerosoldeeltjes genereren, zijn het deze deeltjes die van belang zijn m.b.t. infectieziekten. Hierbij moet bedacht worden dat deze uitgescheiden deeltjes normaalgesproken niet tot besmetting leiden bij andere mensen. Alleen als mensen besmettelijk zijn en voldoende SARS-CoV-2 uitscheiden kunnen deze aerosoldeeltjes andere mensen besmetten. Deze aerosoldeeltjes met infectieuze virussen worden ook wel 'infectieuze aerosolen' genoemd. In veel gevonden studies waar de concentratie aerosolen in de lucht gemeten wordt, wordt gebruik gemaakt van een kunstmatige deeltjesbron. Afhankelijk van de studieopzet moet bij interpretatie van de resultaten rekening worden gehouden met het feit dat naast de door deze bron gegenereerde aerosoldeeltjes, ook de achtergrondconcentratie van aerosolen gemeten wordt. De hoogte van deze achtergrondconcentratie is afhankelijk van de lokale omstandigheden. Bijvoorbeeld Duill et al. (2021) betreft een studie met natuurlijke ventilatie, waarbij er sprake was van een instroom van aerosoldeeltjes door bronnen uit het buitenmilieu. De interpretatie van het effect van luchtreiniging in aanvulling op ventilatie met betrekking tot door mensen gegenereerde (infectieuze) aerosoldeeltjes wordt daarmee vertroebeld, omdat mensen een continue bron van aerosolen in het binnenmilieu zijn, en m.b.t. SARS-CoV-2 geen (significante) aanvoer van buiten te verwachten is. Dat luchtreiniging aerosolconcentraties doet afnemen onder verschillende ventilatieomstandigheden blijkt duidelijk uit Tabel 1, maar hoe groot precies dat effect is in verhouding tot het effect van ventilatie, is niet goed te duiden.

3.3 Filters

HEPA-filters hebben een volgens de NEN-EN 1822 vastgestelde minimale verwijderingsefficiëntie van aerosoldeeltjes uit de lucht die door het filter wordt getrokken, waarmee ziekteverwekkers goed verwijderd kunnen worden. De effectiviteit van mobiele luchtreinigers met HEPA-filters in publieke ruimtes hangt met name af van de vraag of de apparaten de lucht in de gehele ruimte weten te bereiken met een voldoende hoog debiet, en of dit in aanvulling op ventilatie nog meerwaarde heeft.

3.3.1 Effectiviteit van HEPA-filters voor het verwijderen van virusdeeltjes

Er zijn enkele studies die specifiek naar virussen in de lucht gekeken hebben. Twee studies hebben gekeken naar aanwezigheid van RNA van SARS-CoV-2. Rodríguez et al. (2021) onderzochten de lucht en oppervlakken in negen huishoudens waar een COVID-19 patiënt woonde, op de aanwezigheid van SARS-CoV-2 RNA. Voorafgaand aan het gebruik van een mobiele HEPA-luchtreiniger testten alle 7 luchtmonsters genomen in woningen met symptomatische COVID-19 patiënten positief op SARS-CoV-2 RNA. Na gebruik van de luchtreiniger

waren, op dezelfde meetdag, 6 luchtmonsters negatief en 1 positief voor SARS-CoV-2 RNA. De woningen in deze studie hadden alleen natuurlijke ventilatie en waren volgens de auteurs niet goed geventileerd, omdat de verwarming aanstond en ramen en deuren werden gesloten. Verder detail over de aanwezige ventilatie is niet beschreven. Myers et al. (2022) onderzochten de lucht van 16 woningen waar een COVID-19 patiënt verbleef, op dagen met en zonder gebruik van een HEPA luchtreiniger op SARS-CoV-2 RNA. Zij troffen het RNA van het virus in 7 van 16 woningen aan zonder de luchtreiniger, en 4 van 16 met de luchtreiniger. Dit verschil was echter niet significant ($p = 0,229$). De luchtreiniger was gebruikt op de laagste stand, om een comfortabel geluidsniveau te waarborgen. Het is niet beschreven of de woningen ook geventileerd werden. Zargar et al. (2022) hebben de effectiviteit van twee HEPA + UV-luchtreinigers getest op de bacteriofagen Phi6 en MS2. Phi6 is een enveloped virus, waarmee het een surrogaat is voor bijv. influenza en SARs-CoV-2, en MS2 is een non-enveloped virus, een surrogaat voor bijv. norovirus. Het betrof een ongeventileerde testruimte met een inhoud van 25 m^3. De tijd waarin 99.9% verwijdering (3 log reductie) werd bereikt, was voor MS2 respectievelijk 7,4 en 63 minuten voor apparaat 1 en 2. Voor Phi6 werd 99.9% verwijdering bereikt in 11 minuten met apparaat 1, en werd maximaal 97% verwijdering bereikt in 86 minuten met apparaat 2. Details over de verschillen tussen de apparaten worden niet gegeven in de studie.

3.3.2 Effectiviteit van HEPA-filters voor het verwijderen van aerosolen in aanvulling op ventilatie

Naast studies die de effectiviteit van HEPA-luchtreinigers voor het verwijderen van micro-organismen en virussen in de lucht meten, zijn ook studies bekeken die de verwijdering van niet-infectieuze aerosolen hebben getest. Er zijn geen logische redenen, noch enig bewijs uit onderzoek, om aan te nemen dat verwijderingsefficiëntie voor virussen/SARS-CoV-2 anders zou zijn dan dat van niet-infectieuze aerosoldeeltjes van dezelfde grootte en vorm. Dus studies over verwijdering van aerosoldeeltjes door HEPA filters lijken een goede proxy voor verwijdering van bacteriën en virussen, mits een eventuele natuurlijke achtergrondconcentratie of instroom van deeltjes via ventilatie de interpretatie van de resultaten niet verstoort, zoals eerder besproken. Miller-Leiden et al. (1996) hebben dit ook aangetoond met praktijkmetingen, zij vonden dat mobiele HEPA-luchtreinigers even effectief zijn voor bacteriële aerosolen als voor aerosolen zonder bacteriën erin.

Verschillende studies hebben gevonden dat mobiele HEPA-luchtreinigers leiden tot snellere afname van aerosoldeeltjes en/of lagere aerosolconcentraties in ruimtes wanneer deze gebruikt worden in aanvulling op ventilatie. Dit betreft onderzoek in allerlei verschillende situaties, zowel (mock-ups van) praktijksituaties als laboratoria, en met verschillende types aerosolen, zowel artificieel als door mensen gegenereerd.

Buising et al. (2021) vonden dat het neerzetten van twee mobiele luchtreinigers met HEPA-filters in een patiëntenkamer de concentratie artificieel aerosol met 99% verminderde in 5,5 minuut. Dit was in aanvulling op het HVAC-systeem, welke ook aanstond. Deze combinatie

was effectiever dan alleen het HVAC-systeem (ventilatievoud van 12 per uur), deze deed er 16 minuten over om 99% verwijdering te bereiken. Garzona-Navas (2021) vonden dat wanneer een mobiele HEPA-luchtreiniger gebruikt werd in toevoeging op HVAC, dat de verwijdering van aerosolen 47% sneller ging. Dit betrof een eenmalige uitstoot van aerosolen gemaakt door een ultrasone luchtbevochtiger, waarna de afnamesnelheid van de concentratie bepaald werd, in een laboratoriumsetting. Gill et al. (2022) vonden dat het gebruik van HEPA-filters, in dit geval gebruikt rond patiënten die een neusendoscopie ondergingen, ervoor zorgde dat de aerosolconcentratie twee keer zo snel terug naar achtergrondconcentratie ging. Lee et al. (2022) vonden dat gebruik van mobiele HEPA-filters, in aanvulling op HVAC systemen, zorgde voor snellere afname van aerosolconcentratie. Zij genereerden een eenmalige uitstoot van theaterrook (glycol oplossing, gemiddelde deeltjesgrootte 1µm), en keken hoe snel de concentratie aerosoldeeltjes omlaag ging onder verschillende omstandigheden in mock-up ziekenhuisruimtes. Zelfs in ruimtes met een zeer hoge ventilatievoud (14 per uur), zorgde het toevoegen van twee luchtreinigers voor een driemaal zo snelle afname van aerosolconcentratie. Lindsley et al. (2021) vonden dat het gebruik van mobiele HEPA-filters de aerosolblootstelling verminderde in een vergaderzaal (49-65%), wanneer gebruikt in aanvulling op HVAC (ventilatievoud van 2 per uur) in een ruimte met goed gemengde lucht. Ook Miller-Leiden et al. (1996), in hun onderzoek in een testruimte met 7 verschillende mobiele HEPA-reinigers, vonden dat deze de aerosolconcentratie met 30-90% verlaagden wanneer gebruikt in een ruimte waar ook geventileerd werd (ventilatievoud van 2 per uur). Abraham (1999) heeft de toepassing van een mobiele luchtreiniger in de thuissituatie onderzocht, en vond dat deze tot 62-76% lagere concentraties aerosoldeeltjes in de lucht leidde dan een ruimte in dezelfde woning zonder de luchtreiniger. Abraham merkt op dat er waarschijnlijk een continue toevoer van aerosolen is van buiten, vanuit de ventilatieschachten en vanuit bronnen binnenshuis.

Verschillende studies geven hun resultaten weer als tijd tot een bepaalde verwijdering is bereikt. Duill et al. (2021) maten de aerosolconcentratie in de lucht bij gebruik van luchtreinigers in klaslokalen, in aanvulling op elke 20 min 5 min luchten. Gebruik van de luchtreinigers leidde tot lagere concentraties aerosoldeeltjes in de lucht, en ventileren zorgde voor een toename van de deeltjesconcentratie doordat deze van buiten naar binnen kwamen. Experimenten met aerosolgenerator zonder leerlingen vonden dat 90% deeltjesverwijdering werd bereikt in 25-35 min. Rutala et al. (1995) testten drie verschillende HEPA-luchtreinigers. Zij vonden dat in een ongeventileerde ruimte deze er 5-31 minuten over deden om 90% verwijdering van aerosoldeeltjes te bereiken, versus >171 minuten zonder luchtreinigers. In een geventileerde ruimte was de tijd tot 90% verwijdering van aerosoldeeltjes (≥ 3µm) 5-12 minuten, versus 12-16 minuten zonder luchtreiniger. Enkele studies vonden heel hoge verwijdering; bijv. Pirkle et al. (2021) gebruikten een mobiele HEPA-filterunit op de maximale stand (vergelijkbaar met een ventilatievoud van 46,7 ACH in de onderzochte kleine ruimte van 18 m^3) en bereikten daarmee 92-96% aerosoldeeltjesverwijdering in 6 minuten en >99% aerosoldeeltjesverwijdering in 12 minuten. Dit was gemeten op twee punten in de ruimte, in de buurt van de instroom en de uitlaat van het

apparaat, maar op beide locaties was de verwijdering vergelijkbaar. Ren et al. (2021) onderzochten de aerosoldeeltjesverwijdering door mobiele HEPA-reinigers in aanvulling op ventilatie. De tijd tot 95% aerosoldeeltjesverwijdering (0,3 µm) was 7 tot >30 minuten bij alleen ventilatie, en 3 tot 9 minuten bij combineren van ventilatie en luchtreiniging. De experimentduur was 30 minuten en de aerosolen werden geproduceerd door het verbranden van wierook. De spreiding van onderzochte ventilatievoud was groot in deze studie (3 – 45 ACH). De auteurs merken hierbij op dat de relatieve effectiviteit van de reinigers hoger was in slecht geventileerde ruimtes, en de toegevoegde waarde dus invers gecorreleerd met de ventilatievoud.

3.3.3 Filters met coatings

Verschillende studies beschrijven hoe het coaten van (HEPA-)filters met bepaalde stoffen kan leiden tot extra effectiviteit. Dit betreft vaak studies in de onderzoeksfase en nog geen commercieel beschikbare luchtreinigers. Bijvoorbeeld Kim et al. (2021) beschrijven dat een filter met looizuur tot twee ordes van grootte meer verwijdering van influenza virus leidt in een laboratoriumexperiment. Welk verschil zulk soort coatings in een praktijksituatie kunnen maken, is onduidelijk.

3.3.4 Andersoortige filters

De meeste gevonden literatuur betreft luchtfilters van HEPA-kwaliteit. Er zijn echter ook luchtfilters met een minder hoge aerosoldeeltjesverwijdering op de markt, één studie in een praktijksituatie werd gevonden. Scheepers et al. (2012) onderzochten een high efficiency 'HEPA-achtig' filter. Scheepers et al. testten mobiele luchtreinigers in klaslokalen in de winter- en zomerperiode, en vergeleken de luchtkwaliteit in opeenvolgende weken waarin de reiniger aan of uit stond. De resultaten zijn niet eenduidig te interpreteren, de luchtreinigers leken niet effectief in de winter maar wel in de zomer (reductie van PM10 42% en van PM2.5 83%). De luchtreinigers leken effectiever in lege klaslokalen dan in klaslokalen met leerlingen aanwezig. De auteurs stellen dat er verschillende externe factoren zijn die de metingen hebben kunnen beïnvloeden, zoals de luchtkwaliteit buiten, het gebruik van de verwarming en het activiteitenpatroon van de aanwezigen.

Door de veelheid aan soorten filtermaterialen en apparaten die niet volgens HEPA-kwaliteit zijn gecertifieerd, en het gebrek aan onderzoek naar de effectiviteit hiervan op transmissie, is het niet mogelijk een eenduidig antwoord te geven op de vraag hoe effectief deze zijn.

3.4 UVC-technieken

3.4.1 Upper room UVC-installaties (254 nm)

Verschillende studies stellen dat upper room UVC-installaties een goede interventie m.b.t. COVID-19 zouden kunnen zijn. Beggs et al. (2020) concluderen uit een haalbaarheidsstudie op basis van literatuurgegevens over inactivatie en berekeningen over stralingsdoses, dat upper room UV-installaties op 254 nm potentie hebben als interventie om COVID-19-transmissie te verminderen. Nardell (2021) stelt dat upper room UV-installaties zeer nuttig kunnen zijn om COVID-19 verspreiding tegen te gaan, omdat SARS-CoV-2 gevoelig is voor UVC-straling en UVC-

luchtreiniging in verschillende situaties reeds effectief en economisch wordt toegepast. Echter, praktijkstudies met UVC-installaties en COVID-19 ontbreken.

Eén studie heeft gekeken naar het gebruik van upper room UVC-installaties in klaslokalen over een langere tijdsperiode, en heeft hierbij ook een gezondheidsuitkomst meegenomen (ziekteverzuim van leerlingen). Su et al. (2016) onderzochten of het plaatsen van upper room UVC-installaties in klaslokalen leidde tot afname in kweekbare bacteriën en schimmels in de lucht, en of er een verband was met ziekteverzuim van leerlingen. Dit betreft algemeen ziekteverzuim, dus niet alleen door (respiratoire) infectieziekten. Gedurende een periode van ongeveer 1,5 jaar zijn zes klassen op een basisschool met en zonder upper room UVC-installatie vergeleken. De onderzoekers vonden een significante afname van kweekbare bacteriën in de lucht in de lokalen met UVC-installatie wanneer gemeten werd direct nadat leerlingen het lokaal verlaten hadden. Echter, er werd geen statistisch significant verschil gevonden tussen de klassen in ziekteverzuim.

Er is een aantal studies dat onderzoek heeft gedaan naar het effect van UVC-luchtreinigers op de transmissie van tuberculose (TB) met behulp van dierproeven. Mphaphlele et al. (2015) deden experimenten met cavia's blootgesteld aan al dan niet met upper room-UVC-installaties behandelde lucht afkomstig van een TB-afdeling in een ziekenhuis. Over een periode van 7 maanden waren er in de UV-groep 16/90 dieren ziek geworden, en in de controlegroep 58/90 dieren: een hazard ratio van 4,9. De lucht werd gemengd door ventilatoren, en er vond continue ventilatie plaats (ventilatievoud van 6 ACH). Mphaphlele et al. bevelen op basis van hun experimenten aan om een totale output van de installaties (niet wattage van de lampen zelf) van 15-20 mW/m^3 totaal ruimtevolume te installeren, of een gemiddeld totale ruimte UV-irradiantie (bestralingssterkte) van 5-7 mW/cm^2. Ook Escombe et al. (2009) hebben transmissieproeven gedaan met cavia's en TB. Cavia's werden blootgesteld aan lucht afkomstig uit een ziekenhuisafdeling waar TB-patiënten lagen, en deze lucht was al dan niet behandeld met een upper room UVC-installatie of een ionisator. De proeven hadden een looptijd van 535 dagen. Van de controlegroep kreeg 35% (106/304) van de cavia's een TB infectie, en dit nam af tot 14% (43/303) door luchtbehandeling met ionisatoren en tot 9,5% (29/307) door luchtbehandeling met UVC-straling (beide $p< 0,0001$).
Furuya (2013) heeft, voortbordurend op het werk van Escombe et al., transmissiemodellering gedaan voor TB bij mensen bij langdurig verblijf in zorginstellingen. Furuya schat in dat het reproductiegetal van TB 68-77% gereduceerd wordt door gebruik van upper room UV-installaties, en 63-75% door gebruik van ionisatoren. Ook Ko et al. (2001) modelleren het TB-transmissierisico bij gebruik van upper room UVC-installaties in wachtruimtes van klinieken, en schatten in dat deze het risico 1,6-4,1 keer kunnen verminderen. Küsel et al. (2019) beschrijven ook een experiment en aansluitende risicomodellering van TB-transmissie naar cavia's, al dan niet onder invloed van een upper room UVC-installatie. Dit experiment gaf echter geen significant verschil in het aantal infecties in de ruimtes met en zonder de upper room UVC-installatie. De onderzoekers hebben niet kunnen achterhalen waarom dit was, aangezien de modellering wel een effect voorspelde.

De effectiviteit van upper room UVC-luchtreiniging is afhankelijk van de luchtbewegingen in de ruimte (Ko et al., 2001). In de meeste ruimtes is er beweging tussen de luchtlagen bovenin en onderin, waardoor aerosolen worden blootgesteld aan de upper room UVC-lamp (Beggs and Sleigh, 2002). De aanwezigheid van ventilatoren, aan het plafond of losstaand in de ruimte, kan door het vergroten van luchtbewegingen zorgen voor grotere effectiviteit van upper room UVC-installaties (Dumyahn and First, 1999; Menzies et al., 2003). Doordat de behuizing van de lamp, bedoeld om blootstelling van mensen aan UVC-straling te beperken, een deel van de straling tegenhoudt, kan de stralingswaarde van de lampen zelf niet direct geïnterpreteerd worden als de effectieve dosis die bij aerogene ziekteverwekkers terecht komt. Deze is veel lager, lieten Dumyahn and First (1999) zien.

Verschillende studies hebben modellen gebruikt om de toegevoegde waarde van UVC-installaties ten opzichte van ventilatie in te schatten. De toegevoegde waarde van UVC-installaties is groter naarmate er minder goed geventileerd wordt. Beggs et al. (2002) vonden bijvoorbeeld in hun modelstudie, dat bij een ventilatievoud van 2 per uur, het toevoegen van upper room UVC de concentratie actieve micro-organismen met een factor vier deed afnemen. Noakes et al. (2006) hebben middels modellering het effect van verschillende parameters op de UVC-dosis afkomstig van upper room UVC-installaties onderzocht. Zij bevonden dat bij een ventilatievoud van 6 de locatie van ventilatie in- en uitblaasopeningen en de plaatsing van de UVC-lampen in de ruimte effect hadden op de dosis die de lucht in de ruimte ontvangt. Dit was afhankelijk van de luchtstromingen in de ruimte. In de onderzochte ruimte bleek een inlaat laag bij de grond en afzuiging hoog in de ruimte effectiever dan andersom. Het gebruik van een verwarming had geen negatief effect op de UVC-dosis, door de toegenomen luchtmenging kon het zelfs positief bijdragen in sommige scenario's.

Ook is er een experimentele studie, in een labsetting, die het effect van upper room UVC en ventilatie op de concentratie micro-organismen in de lucht onderzocht. Ko et al. (2002) onderzochten de inactivatie van in kunstmatig speeksel geaerosoliseerde bacteriën *Serratia marcescens* and *Mycobacterium bovis* bacille Calmette-Guérin (BCG) onder invloed van UVC in een testruimte van 4,5 x 3 x 2,9 m^3. De ruimte bevatte upper room UVC-installaties (een plafond-UVC-installatie van 10W, en een muur-UVC-installatie van 5W), en ook kon de ruimte geventileerd worden en de lucht gemengd met behulp van ventilatoren. Het gebruik van de UVC-installaties zonder ventilator leidde tot een afname van de concentratie *S. marcescens* in de lucht van 46% bij een ventilatievoud van 2 ACH, en 53% bij 6 ACH. Het toevoegen van de ventilator verhoogde dit tot respectievelijk 62% en 86%. Wanneer alleen de upper room UVC-installatie werd gebruik voor BCG-aerosolen bij 6 ACH leidde dit tot 52% afname van de concentratie, wanneer zowel de plafond- als de muur-installatie werden gebruik leidde dit tot 64% afname. Statistische analyse van de data liet zien dat het aantal UVC-installaties, het gebruik van de ventilator, en het ventilatievoud, alle drie significant beïnvloedden hoe effectief de UVC-installatie was voor het doen afnemen van de concentratie in de lucht. Ook bevonden Ko et al. dat een hogere luchttemperatuur leidde tot grotere afname van de concentratie aerosolen, wat zou kunnen komen door zowel de

gevoeligheid van de bacteriën als de effectiviteit van de UVC-lampen. Er werd geen significant effect van luchtvochtigheid gevonden.

3.4.2 Losstaande UVC-luchtreinigers (254 nm)

Over losstaande UVC-luchtreinigers is minder onderzoek te vinden dan over upper room UVC-installaties.

Menzies et al. (2003) onderzochten het effect van een mobiele UVC-luchtreiniger in vergelijking met een upper room UVC-installatie op de concentratie van bacteriën in de lucht tijdens sputuminductie (een medische procedure waarbij hoesten opgewekt wordt om sputum te verzamelen voor onderzoek). Zij bevonden dat de mobiele reiniger effectiever was dan de upper room UVC-installatie. Ventilatie (31,7 ACH) was het minst effectief in het omlaag brengen van de concentratie, maar dit beeld kon vertekend zijn doordat lucht aangezogen vanuit de hal ook bacteriën bevatte, geven de auteurs aan. Nardell stelt echter dat upper room UVC-installaties over het algemeen veel effectiever zijn dan losstaande luchtreinigers, omdat de gehele bovenste zone van de ruimte een desinfectiezone is, terwijl een losstaande luchtreiniger altijd lucht vanuit een punt moet aanzuigen (Nardell, 2016, 2021). Daarbij is meer risico op recirculatie en het ontstaan van dode hoeken, zeker in een grotere ruimte, terwijl een goed geïnstalleerde upper room UVC-installatie een veel ruimer bereik heeft. Bij een losstaande UVC-luchtreiniger zijn niet alleen de stralingssterkte van de lamp en de luchtbewegingen in de ruimte van belang voor de UV-dosis die de pathogenen krijgen, maar ook de stroomsnelheid van lucht door een apparaat (Moreno et al., 2021). Deze zal verschillen per apparaat en de stand waarop deze gebruikt wordt. Dit zijn dezelfde principes die ook gelden bij andere losstaande luchtreinigers, zoals met HEPA-filters.

Corrêa et al. (2021) hebben zelf een UVC-luchtreiniger gebouwd, die gebruikmakend van een ventilator 780 m^3/uur lucht aanzuigt en langs UVC-lampen leidt met een straling van 2,08 mW/cm^2. In een praktijksituatie in drie verschillende ruimtes in een ziekenhuis werd ruim 1 log reductie van het aantal micro-organismen in de lucht gevonden wanneer de luchtreiniger gebruikt werd gedurende 24 uur. Dit was tijdens normale bedrijfsvoering dus in aanwezigheid van mensen, hoe er geventileerd werd is niet vermeld.

3.4.3 UVC-straling in combinatie met fotokatalyse

Fotokatalysatoren zijn chemische verbindingen die het effect van UVC-inactivatie kunnen verbeteren. Bestraling van bijvoorbeeld een coating van titaniumdioxde (TiO_2) met UVC-straling zorgt voor vorming van radicalen die micro-organismen kunnen inactiveren (Kompatscher and Traversari, 2022). Desoubeaux et al. (2014) onderzochten het effect van een luchtreiniger die UVC-straling combineert met titanium fotokatalyse op *Aspergillus* schimmels in de lucht van een experimentele ruimte in afwezigheid van ventilatie. Dit apparaat leidde tot een 95% afname in concentratie in de lucht in 18 minuten.

3.4.4 Toepassingen van 'ver UVC' (222 nm)

Ver-UVC-lampen staan momenteel sterk in de belangstelling, omdat deze kortere golflengten minder schadelijk voor de mens zouden zijn (Buchan et al., 2020). Deze UVC-lampen worden daarom ook

geadviseerd in ruimtes waarin mensen aanwezig zijn en continu worden blootgesteld aan deze UVC-straling (Buonanno et al., 2020). Heßling et al. (2021) hebben een review geschreven over de impact van ver-UVC-straling op pathogenen, en op menselijke cellen, huid en ogen. Op basis van meer dan 100 studies over het onderwerp, concluderen ze dat ver-UVC, met nam de 222 nm KrCl-lampen, sterke antimicrobiële eigenschappen heeft. De gemiddelde log-reductie-doses (doses benodigd voor 90% afname) zijn 1,3 keer hoger dan bij 254 nm straling. Een dosis van 100 mJ/cm^2 kan pathogenen verschillende ordes van grootte doen inactiveren zonder schade aan menselijke cellen, wanneer filters de golflengten boven 230 nm blokkeren. Heßling et al. concluderen dat de aanpak veelbelovend is, met name voor tijdelijke toepassingen, maar waarschuwen ook dat de data nog zeer schaars is. Met name studies met hogere doses en over langere tijd ontbreken, en studies over het effect op menselijke ogen zijn ook nog niet uitgevoerd. De veiligheid van deze techniek is daarmee nog niet gegarandeerd, en grootschalige toepassing op korte termijn daarmee niet waarschijnlijk.

Voor de effectiviteit van ver-UVC op geaerosoliseerde humane coronavirussen hebben Buonanno et al. (2020) gevonden dat 1,7 en 1,2 mJ/cm^2 leidt tot inactivatie van 99,9% van alpha HCoV-229E en beta HCoV-OC43 respectievelijk. Voor 222 nm wordt aanbevolen om een dosislimiet van 22,4 mJ/cm^2 aan te houden voor blootstelling binnen een tijdsvenster van 8 uur (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004). Volgens Buonanno et al. (2020) zou daarom continue bestraling op een voor mensen geaccepteerd niveau van 3 mJ/cm^2/uur, op basis van de beta HCoV-OC43 resultaten, kunnen leiden tot 90% virusinactivatie in ongeveer 8 minuten. Over deze aanbevolen dosislimiet is momenteel discussie, mogelijk zijn deze te scherp gesteld (Sliney and Stuck, 2021).

Buchan et al. (2020) hebben een model ontwikkeld om ver-UVC-desinfectie in geventileerde ruimtes te modelleren. De gemodelleerde ruimte was een patiëntenkamer met 1 bed, en scenario's met een ventilatievoud van 0,8 en 8 ACH en een eenmalige of continue virusbron zijn getest, met continue bestraling rond de hierboven genoemde blootstellingslimiet. De tijd tot 90% virusinactivatie was 12 minuten bij alleen ventilatie (8 ACH) en halveerde naar 6 minuten bij gelijktijdig gebruik van de ver-UVC-lampen. Bij een continue virusbron en continue verwijdering door ventilatie / inactivatie bereiken concentraties in de ruimte op gegeven moment een evenwicht. Het model laat zien dat deze evenwichtsconcentratie actief virus bij gebruik van ver-UVC als aanvulling op ventilatie ongeveer 57% lager is dan bij alleen ventilatie (8 ACH).

3.5 Ionisatoren

Blocken et al. (2021) hebben aerosolmetingen gedaan rond sportende mensen in een sportschool, en gekeken naar het effect van ventilatie en luchtreiniging op de concentraties aerosolen in de lucht. Dit betrof een luchtreiniger met plasma en elektrostatische componenten. Gedurende 30 minuten waren 35 mensen aan het sporten in de testruimte. Sportende mensen produceren meer aerosolen dan mensen in rust. Zowel ventilatie (ventilatievoud van 2,2 per uur) als luchtreiniging (twee

apparaten die lucht aanzogen met een hoeveelheid van 617 m^3/uur, wat overeenkwam met een ventilatievoud van 1,4 per uur) konden niet voorkomen dat aerosolconcentraties toenamen tijdens de onderzoeksperiode. Wanneer de sporters de ruimte verlieten, was zowel ventilatie als luchtreiniging wel effectief om de concentraties omlaag te brengen. Modellering in dezelfde studie suggereerde dat de combinatie van ventileren en luchtreiniging wel tot een afname van 80-90% van de aerosolconcentratie zou kunnen leiden in deze situatie, en wanneer het aantal luchtreinigers verhoogd werd tot 6 een afname van 90-95%.

Fennelly et al. (2021) en Bergeron et al. (2007) onderzochten de effectiviteit van plasma-luchtreinigers in een ziekenhuissetting, tijdens normale bedrijfsvoering. Fennelly et al. (2021) onderzochten het gebruik van plasma-luchtreinigers op een zaal met vier bedden waar een ventilatiesysteem met HEPA-filter en warmteterugwinning een ventilatievoud van 12 ACH haalde. Ze hebben gedurende 28 dagen kweekbare bacteriën en schimmels in de lucht gemeten, en vonden geen significant verschil in aantallen tussen het gebruik van de luchtreiniger en de controleperiode. De auteurs concluderen dat niet kon worden aangetoond dat de luchtreinigers een meerwaarde hadden, maar dat de complexe ziekenhuisomgeving en -activiteiten dit onderzoek bemoeilijkten. Bergeron et al. (2007) onderzochten het gebruik van plasma-luchtreinigers in een operatiekamer en op een kinderhematologie-afdeling waar patiënten verbleven. De operatiekamer had een ventilatievoud van 11 met HEPA-filter gereinigde lucht. Er is niet vermeld welke ventilatievoud de kinderhematologie-afdeling had. Ze hebben gedurende 12 dagen kweekbare bacteriën en schimmels in de lucht gemeten, en ook aerosolen groter dan 0,5 µm geteld om de concentraties over de tijd in kaart te kunnen brengen. De luchtreiniger werd gebruikt met een debiet van 650 m^3/uur. In de operatiekamer halveerde de concentratie totale mesofiele flora bij gebruik van de luchtreiniger in aanvulling op ventilatie. Kweekbare schimmels werden niet meer gemeten bij gebruik van de luchtreiniger. Ook de aerosolmetingen lieten lagere concentraties zien bij gebruik van de luchtreinigers in aanvulling op ventilatie dan bij alleen ventileren. Op de kinderhematologie-afdeling was het aantal kweekbare schimmels van opportunistisch ziekteverwekkende soorten in een ruimte met luchtreiniging met 75% afgenomen in vergelijking met een controleruimte.

Kujundzic et al. (2006) onderzochten verschillende luchtreinigers in een testruimte waarin bacteriën en schimmelsporen werden verneveld. De verschillende experimenten bevatten *Mycobacterium parafortuitum*, *Micrococcus luteus* en *Aspergillus versicolor*, en werden uitgevoerd in een ruimte waar de lucht goed gemengd was. De in deze studie geteste luchtreinigers die HEPA-filters met UVC-straling combineerden werkten het beste, gevolgd door een elektrostatische precipitator, een elektrostatisch filter met een UVC-lamp. De geteste negatieve ionengenerator en ionisator werkten het minst goed. De HEPA-luchtreinigers in deze studie hadden ook de hoogste luchtstroom van alle reinigers, wat mogelijk de reden is voor de beste prestatie. Ook Mølgaard et al. (2014) en Waring et al. (2008) vonden dat een ionisator minder goed presteerde dan een elektrostatische precipitator of filtergebaseerde reinigers. Of deze vergelijkingen tussen verschillende

types luchtreinigers kunnen worden gegeneraliseerd is echter onduidelijk, omdat er grote verschillen kunnen zitten tussen individuele apparaten.

Grinshpun et al. (2007) onderzochten het effect van een luchtreiniger, die ionengeneratie combineert met fotokatalytische oxidatie, op bioaerosolen in een ongeventileerde testruimte. Deze luchtreiniger verwijdert aerosolen (door de ionengeneratie) en inactiveert daarnaast ook micro-organismen en virussen (door de fotokatalyse). De concentratie aerosolen van 0,1 en 1 µm nam tijdens 1 uur gebruik af met een factor 28 en 10, respectievelijk. De fotokatalytische oxidatie leidde tot 90% afname van geaerosoliseerd MS2 virus in 10 minuten, en 90% afname van *Bacillus subtilis* sporen in 60 minuten. De afname van MS2 virus na 60 minuten was gelijk aan die na 10 minuten, wat suggereert dat ongeveer 10% van deze virussen resistent waren voor de behandeling. Een controlemeting zonder de luchtreiniger toonde 20% afname van MS2 gedurende 60 minuten, en voor *B. subtilis* werd geen significante afname gevonden.
Zoals in sectie 3.4 uitgebreider beschreven, vonden Escombe et al. (2009) in hun tuberculose transmissieproeven met cavia's, dat gebruik van ionisatoren leidde tot een afname van infecties van 35% in de controlegroep tot 14% in de interventiegroep. De transmissiemodellering van Furuya (2013) suggereert, voortbordurend op het werk van Escombe et al., dat het reproductiegetal van TB 68-77% gereduceerd kan worden door gebruik van upper room UVC-installaties, en 63-75% door gebruik van ionisatoren. Gezien de verschillen tussen individuele apparaten, is het onduidelijk in hoeverre dit gegeneraliseerd kan worden naar deze types luchtreinigers in het algemeen.

Een aandachtspunt in het geval van een ionisator die ionen genereert, maar zelf geen aerosolen afvangt (zoals een elektrostatisch filter wel doet), is dat virussen en bacteriën vanuit de lucht neerslaan op oppervlakken in de ruimte zoals muren en meubels, maar niet noodzakelijk geïnactiveerd zijn (Berry et al., 2022). Dit zou mogelijk transmissie via oppervlakken kunnen doen toenemen.

3.6 Hybride technieken

Verschillende studies beschrijven luchtreinigers die een combinatie van verschillende technieken gebruiken (Bischoff et al., 2019; Kujundzic et al., 2006; Nicolò et al., 2022). Uit deze studies komen vergelijkbare bevindingen als hierboven besproken in sectie 3.3-3.5, deze worden daarom niet in verder detail besproken.

3.7 Belang van de positie van een luchtreiniger in de ruimte

Verschillende studies hebben het belang van de positie van de luchtreiniger in de ruimte onderzocht, en dit lijkt te verschillen per onderzochte situatie. Bijna al deze studies betreffen HEPA-luchtreinigers.

Bluyssen et al. (2021) onderzochten de effectiviteit van mobiele HEPA-filters in vergelijking met natuurlijk en mechanische ventilatie in een mock-up klaslokaal in hun SenseLab. Zeepbubbels waren hier proxy

voor aerosolen in de lucht. In de meeste geteste situaties verwijderden de HEPA filters meer zeepbubbels dan natuurlijke ventilatie, en soms ook dan mechanische ventilatie. De auteurs merkten hierbij wel op de dat de plaatsing in de ruimte bepalend was, en dat full mixing van de lucht in de ruimte niet werd bereikt waardoor de resultaten verschilden voor verschillende zones in de ruimte. De auteurs concluderen dat HEPA-filters een goede toegevoegde maatregel zouden kunnen zijn in situaties waar alleen natuurlijke ventilatie beschikbaar is.
Ook Szabadi et al. (2022) lieten in hun experimenten met mobiele HEPA filters in een kantoor, klaslokaal en seminarzaal, zien dat in grotere zalen de plaatsing van de luchtreinigers uitmaakt en de effectiviteit niet uniform is. De auteurs zeggen dat dit waarschijnlijk komt door niet optimale menging van de lucht waardoor de lucht dichterbij de reinigers beter gefilterd wordt dan verder weg. Tobisch et al. (2021) vonden in hun experimenten met verschillende oriëntatie van HEPA-filters in een ongeventileerde collegezaal dat deze gemiddeld tot 61-86% lagere aerosoldeeltjesconcentratie in de lucht konden leiden. Lindsley et al. (2021) vonden, afhankelijk van de positie van de luchtreinigers in de ruimte, een afname van 49% (luchtreinigers links en rechts in verhoogde positie) tot 65% (middenin de ruimte vlakbij de bron).
Ook het aantal luchtreinigers aanwezig in een ruimte kan van belang zijn. Curtius et al. (2021) deden metingen met het plaatsen van 3 of 4 mobiele luchtreinigers in klaslokalen. Wanneer meerdere kleine reinigers in een ruimte werden geplaatst, was er een snelle en homogene afname van gemeten aerosoldeeltjes in de lucht. Het plaatsen van slechts 1 luchtreiniger is niet onderzocht. Echter, de studie van Rutala et al. (1995) vond dat de plaatsing van de luchtreiniger in de ruimte níet uitmaakte voor het resultaat. Dit geeft weer dat de resultaten van luchtreinigers in de praktijksituatie in aanvulling op ventilatie context-afhankelijk zullen zijn. Ook Küpper et al. (2019) vonden nauwelijks invloed van de positie van de luchtreiniger (met elektrostatisch filter) in een kantoorruimte, tenzij deze bewust op een zeer ongunstige plaats werd gezet, namelijk onder een bureau. Qian et al. (2010) lieten zien dat het gebruik van een mobiele luchtreiniger met HEPA-filter de luchtstromingen de ruimte sterk kan beïnvloeden, met name wanneer deze op de hoogste stand werd gebruikt. De hoogste stand was het meest effectief in het aanzuigen van lucht en het voorkomen van ‘dode hoeken’ in de ruimte waarvan de lucht het filter niet bereikt.

Feng et al. (2021) hebben middels een modelstudie met een ‘computational fluid dynamics’ (CFD) model de effectiviteit van UVC-luchtreinigers in een patiëntenkamer onderzocht in verschillende scenario’s, met als bron aerosolen van een hoestende of niezende patiënt. Lucht werd aangezogen met een hoeveelheid van 210 of 1.050 m^3/uur door de UVC-luchtreiniger, al dan niet in aanwezigheid van ventilatie. Feng et al. vonden dat alhoewel het gebruik van een luchtreiniger, met name op hoge stand, de verwijdering van aerosolen kan bevorderen, deze ook de convectie in de ruimte kan veranderen en daarmee mogelijk aerosolen sneller verder verspreid in de kamer. De relatieve posities van de patiënt, de luchtreiniger en de ventilatie-openingen waren een belangrijke factor in hoe effectief de luchtreiniger functioneerde.

Castellini et al. (2022) onderzochten middels modellering wat het effect was van de relatieve posities van luchtreinigers en een bron van aerosolen (bijvoorbeeld een geïnfecteerde persoon) in een ruimte. Zij concluderen onder andere dat mensen die zich dichtbij de bron bevinden, of tussen de bron en een ventilatie-opening waar lucht naar buiten stroomt, een bovengemiddelde blootstelling hebben. Ook de luchtstromingen afkomstig van een luchtreiniger kunnen als effect hebben dat aerosolen zich verspreiden door de ruimte en daarmee blootstelling vergroten voor (een deel van) de aanwezigen. Szabadi et al. (2022) bevonden dat het gebruik van een luchtreiniger niet kon voorkomen dat hoge concentraties aerosolen vlak bij de aerosolbron gevonden werden.

3.8 Nederlandse richtlijnen over luchtreinigingstechnieken in de zorg

Voor inzichten met betrekking tot de effectiviteit van luchtreiniging is ook gekeken naar Nederlandse richtlijnen voor infectiepreventie in de zorg (WIP-richtlijnen). Voor onder meer ziekenhuizen en tuberculose-afdelingen zijn er richtlijnen voor infectiepreventie gericht op voorkomen van infecties via de lucht. Naast een minimale ventilatievoud per uur worden daarin ook luchtreinigingstechnieken genoemd.
In ziekenhuizen worden luchtbehandelingssystemen gebruikt in plaats van mobiele luchtreinigingsapparaten. In de onlangs gepubliceerde FMS-richtlijn 'Luchtbehandeling in operatiekamers en Behandelkamers' (Federatie Medisch Specialisten, 2022) wordt de volgende ventilatievoud per uur (ACH) aangehouden:
Operatiekamers klasse 1(+)[1]: ≥ 20 ACH;
Operatiekamers klasse 2: ≥ 6 ACH;
Zelfstandige behandelkamers: ≥ 4 ACH.
Daarnaast wordt voor het luchtbehandelingssysteem van alle operatiekamers minimaal een HEPA-filters H13 geadviseerd. Voor zelfstandige behandelkamers wordt geen aanvullende luchtreinigingstechniek zoals een HEPA-filter geadviseerd. In de richtlijn wordt gesteld dat het gebruik van HEPA-filters al geruime tijd wordt gehanteerd voor operatiekamers. In hoeverre hiermee infecties worden voorkomen wordt niet toegelicht. Wel wordt met betrekking tot effect van luchtbehandeling als geheel gesteld: "Luchtbehandeling is een van de mogelijkheden om luchtreinheid te beïnvloeden. Hoe groot de bijdrage van luchtbehandeling hieraan is, is - vergeleken met andere hygiënemaatregelen - niet bekend."
In de WIP-richtlijn 'Tuberculose: preventie van aerogene transmissie' (Werkgroep Infectie Preventie, 2016) wordt een minimale ventilatievoud van 6 ACH geadviseerd voor ruimtes waar TB-patiënten komen. Voor nieuwbouw wordt 12 ACH geadviseerd voor onderzoeksruimten. Gebruik van UVC-luchtreinigers wordt in deze richtlijn niet aanbevolen waarbij de volgende motivatie wordt gegeven: "onder experimentele omstandigheden kan UV-licht de transmissie van tuberculose beperken, maar een dergelijk effect is slechts sporadisch bevestigd onder werkomstandigheden in zorginstellingen. Daarnaast is de toegevoegde waarde van UV-licht beperkt bij voldoende ventilatie (6 ACH)." (Werkgroep Infectie Preventie, 2016). In een recenter document van de

[1] Voor een toelichting over de klassenverdeling van operatiekamers, zie: WIP-richtlijn Omstandigheden ingrepen [ZKH] | RIVM

Commissie voor Praktische TBC-bestrijding (CPT), getiteld 'Beleid Tuberculose Infectiepreventie GGD'en' (Commissie voor Praktische TBC-bestrijding, 2021), wordt UVC-straling wel genoemd als aanvulling op ventilatie. Uitgangspunt van het beleid blijft correcte ventilatie: afhankelijk van het risico wordt een ventilatievoud van 3 tot 6 ACH geadviseerd. Alleen voor de ruimtes waar aerosolvormende handelingen plaatsvinden (sputum ophoestruimte) wordt 12 ACH geadviseerd. Als het ventilatievoud niet gehaald kan worden dan wordt gebruik van UVC-reinigingstechnieken, veelal 'upper room UVC', aanbevolen voor ruimtes waar TB-patiënten verblijven zoals in de TB-wachtkamer of -spreekkamer. UVC-luchtreiniging wordt niet voor andere openbare ruimtes in het gebouw geadviseerd. Verder wordt gesteld: "Het kiemdodende effect daalt abrupt bij toename van de relatieve luchtvochtigheid boven 50-60%. Dit is voor infectiepreventie middels luchtdecontaminatie met UVGI een belangrijke beperking. De kiemvrije lucht mengt spontaan met de overige lucht door convectie, tocht en beweging van personen. Te snelle luchtbeweging beperkt het kiemdodende effect van UV. Kunstmatige luchtbeweging met ventilatoren (fans) aan plafonds kan wenselijk zijn om lucht met *M. tuberculosis* (MTB) bevattende druppelkernen te verplaatsen naar het compartiment van de ruimte waar deze gedecontamineerd wordt met UVGI."

3.9 Internationale richtlijnen en adviezen

Een uitgebreid overzicht van buitenlandse richtlijnen valt buiten de scope van dit onderzoek. Hieronder volgt wel een kort overzicht van de adviezen van de WHO, CDC en ECDC in het kader van verminderen transmissie van SARS-CoV-2 via ventilatie en luchtreiniging:
De WHO ziet luchtreiniging in kader van preventie van SARS-CoV-2 als aanvulling indien de voorgestelde minimale ventilatiehoeveelheid van 10 L/s/persoon niet gehaald kan worden (World Health Organization, 2021b). Als luchtreinigingstechniek wordt alleen luchtfiltratie geadviseerd.
De CDC ziet ventilatie ook als uitgangspunt (Centers for Disease Control and Prevention, 2021b). Een minimale ventilatiehoeveelheid wordt echter in het CDC document niet genoemd. Gesteld wordt dat mobiele HEPA-filters de reiniging van de lucht kunnen bevorderen, vooral in 'hoog risico' locaties zoals spreekkamers en andere locaties waar risicogroepen komen en/of er een verhoogd risico is op het krijgen van COVID-19. UVGI wordt geadviseerd als opties voor verhogen van de ventilatie en gebruik van filtratie beperkt zijn (Centers for Disease Control and Prevention, 2021b).
ECDC heeft in november 2020 voor het laatst een update gemaakt van de volgende richtlijn: 'Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update (europa.eu)'. In dit document stelt ECDC het volgende over mobiele luchtreinigers: *"These methods are usually relatively costly, require special maintenance, and can only treat a relatively small volume of air." (…) There is limited evidence regarding the effect of stand-alone air filtration and other air cleaning technologies on the transmission of SARS-CoV-2."* Verder stelt de ECDC dat zowel voor ionisatie- als UVC-luchtreinigingstechnieken gestandaardiseerde tests om mogelijke gezondheidsrisico's voor gebruik

in binnenruimtes te bepalen niet of beperkt aanwezig zijn (European Centre for Disease Prevention and Control, 2020).

4 Aandachtspunten voor gebruik van luchtreinigers in de publieke ruimte

Om een goede beleidsafweging te kunnen maken of het toepassen van mobiele luchtreinigers op brede schaal wenselijk is, is naast inzicht in de effectiviteit, ook meer inzicht nodig of er factoren zijn die kunnen leiden tot nadelige effecten. Hieronder enkele aandachtspunten.

4.1 Geen vervanging voor ventilatie

Mobiele luchtreinigers recirculeren de binnenlucht. Gassen zoals CO_2 en ozon worden niet verwijderd door de in dit rapport besproken luchtreinigers en kunnen zich ophopen als er niet wordt geventileerd. Voor het afvoeren van gassen zoals CO_2 en ozon is ventilatie (verversen van de binnenlucht met buitenlucht) nodig. Dit blijkt ook uit verschillende studies. Curtius et al. (2021) deden aerosolmetingen met HEPA-luchtreinigers in ongeventileerde klaslokalen, en bevonden dat tijdens een lesuur de CO_2 waardes opliepen tot boven 2.700 PPM. Ook in de studie van Duill et al. (2021) liepen CO_2 waarden op tot boven 2.000 ppm tijdens een lesuur in een klaslokaal waar een luchtreiniger gebruikt werd zonder te ventileren. CO_2-waarden worden gebruikt als een indicator of er voldoende wordt geventileerd. De Gezondheidsraad adviseert om voor basisscholen een bovengrens van 1.200 ppm CO_2 aan te houden (Gezondheidsraad, 2010). Boven deze waarde wordt de ventilatie als onvoldoende beschouwd. Ook Ruimte OK stellen in hun Handreiking voor optimaal ventileren op scholen dat de ventilatie onvoldoende is bij 1.000-1.400 ppm CO_2, en slecht boven de 1.400 ppm (Ruimte OK Kenniscentrum, 2022). In de studie van Curtius et al. werd 1.200 ppm al overschreden binnen 15 minuten les in een lokaal met de ramen en deuren gesloten.
Voor apparaten die ozon produceren is het ook van belang dat er correct wordt geventileerd. Ozon kan schadelijk zijn bij langdurige blootstelling (zie sectie 4.2). Bijvoorbeeld printers kunnen ozon produceren maar ook sommige luchtreinigers zoals ionisatoren (zie paragraaf 4.2.3.).
Voor ventilatie zijn minimale capaciteitseisen opgenomen in het Bouwbesluit en in het Arbobesluit is opgenomen dat luchtverversing plaatsvindt zodat er voldoende niet-verontreinigde lucht aanwezig is (Arbobesluit, artikel 6.2). Dit zijn eisen die moeten worden gevolgd. Het is dus niet mogelijk om in plaats van ventileren een luchtreiniger te gebruiken; gebruik van een mobiele luchtreiniger is altijd aanvullend op correct ventileren. In dit rapport wordt daarom ook niet de vraag beantwoord of een luchtreiniger tijdelijk kan worden gebruikt totdat de ventilatie voldoet aan de gestelde minimale eisen.

4.2 Veiligheid en vorming bijproducten

In deze paragraaf wordt de mogelijk vorming van bijproducten door de verschillende luchtreinigingstechnieken kort besproken. Voor een meer uitgebreide discussie over bijproducten kan het TNO-rapport 'Literatuurstudie naar de toepassing van verschillende luchtreinigingsmethoden voor inactivatie van microbiologische

verontreinigingen' worden geraadpleegd (Kompatscher and Traversari, 2022).

4.2.1 Filters

HEPA-filters produceren in principe geen chemische bijproducten. Wel kan nalatig onderhoud er mogelijk voor zorgen dat ziekmakende micro-organismen zoals op het filter gaan groeien en kunnen worden verspreid in de omgeving (Guo et al., 2020; Price et al., 2005). Daarnaast heeft nalatig onderhoud ook effect op de werkzaamheid van het filter waardoor er 'schijnveiligheid' kan ontstaan. Zie hiervoor paragraaf 4.3 over onderhoud.

4.2.2 UVC-straling

Schade aan ogen en huid zijn de meest voor de hand liggende risico's van directe blootstelling aan UVC-straling van 254 nm, dit betreft rood worden van de huid (erythema), en een oogontsteking (fotokeratitis) (Bhardwaj et al., 2021; Sliney, 2013). Daarnaast vormt de productie van ozon door UVC-straling een mogelijk risico. Ozon is een sterke oxidator die door chemische reacties in de lucht kan leiden tot o.a. de vorming van vrije radicalen. Inademing van ozon kan schadelijk zijn voor het lichaam. Deze mogelijke gezondheidseffecten van UVC-straling voor de mens worden besproken in de notitie 'UVC en gezondheid' (den Outer et al., 2021). In deze notitie adviseert het RIVM om de blootstellingslimiet vanuit de International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) te volgen (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004), en te voorkomen dat mensen direct blootgesteld kunnen worden aan UVC-straling.

Nardell et al. (2008) hebben een dubbel blinde placebo-gecontroleerde veldstudie gedaan naar nadelige gezondheidseffecten als gevolg van upper room UVC-installaties in 14 daklozenopvangcentra over een periode van 7 jaar. Er werd geen statistisch significant verschil gevonden in het de aanwezigheid van oog- en huidirritatie in de interventiegroep en de controlegroep. Hieruit concluderen de auteurs dat goed geïnstalleerde upper room UVC-installaties geen nadelige gezondheidseffecten hebben.

Ver UVC (222 nm) staat momenteel sterk in de belangstelling vanwege de notie dat deze straling minder schadelijk zou zijn, en daarom mensen aanwezig kunnen blijven terwijl de lucht in de gehele ruimte door UV lampen bestraald wordt (Buchan et al., 2020; den Outer et al., 2021). Voor 222 nm wordt aanbevolen om een dosislimiet van 22,4 mJ/cm2 aan te houden voor blootstelling binnen een 8 uur tijdsvenster (The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004). Ondanks dat ver UVC veelbelovend is, is de data nog erg schaars met name over effecten op de langere termijn. Ook ontbreekt onderzoek naar het effect op menselijke ogen. Daarom is de veiligheid van ver UVC voor grootschalige toepassing nog niet gegarandeerd (Heßling et al., 2021).

Het RIVM adviseert om open systemen (de ruimte wordt direct aan UVC-straling blootgesteld) te vermijden als mensen en dieren hierbij ook met UVC bestraald kunnen worden (den Outer et al., 2021). Dit is inclusief ver UVC-systemen. Bij gesloten UVC-systemen, waarbij er geen

blootstelling aan UVC-straling plaatsvindt buiten het system, worden geen negatieve gezondheidseffecten verwacht op de huid en ogen. Dit zal over het algemeen het geval zijn bij losstaande luchtreinigers en upper room UVC-installaties die dusdanig hoog zijn geïnstalleerd waarmee directe blootstelling wordt vermeden. Indien filtering en goede behuizing worden toegepast in het ontwerp van de lamp-module, zal ozonproductie geen probleem opleveren (den Outer et al., 2021). Deze systemen kunnen gebruikt worden, mits professioneel geïnstalleerd en onderhouden (den Outer et al., 2021).

4.2.3 Ionisatie

Ionisatoren, elektrostatische filters en plasma-luchtreinigers kunnen chemische bijproducten genereren. Hierbij valt te denken aan ozon, NO_x, en formaldehyde (Berry et al., 2022; de Meer et al., 2010; Kompatscher and Traversari, 2022; Siegel, 2016). Hoe hoog de concentratie bijproducten in de omgeving van een luchtreiniger kan worden, is afhankelijk van de emissie van de luchtreiniger, en van de omgeving waarin deze staat (zoals het ventilatievoud en volume van de ruimte). De gezondheidskundige advieswaarde voor een 8 uur durende blootstelling aan ozon is 100 µg/m^3 (World Health Organization, 2021c). Daarnaast zijn er voor ozon andere wettelijke of gezondheidskundige waarden voor de algemene populatie beschikbaar die van toepassing kunnen zijn op een specifieke blootstellingsduur en situatie. Zo geldt in Europa Richtlijn 2008/50/EG betreffende de luchtkwaliteit en schonere lucht voor Europa waarbij de streefwaarde voor ozon van een 8-uur gemiddelde op een dag niet hoger mag zijn dan 120 µg/m3. Recent is binnen het Europese kader van biocidetoelating een minimaal effect niveau afgeleid voor de algemene populatie van 50 µg/m3 (European Chemicals Agency, 2021). Deze waarde is afgeleid op basis van een humane epidemiologische studie en verschillende onderzoeken waaruit de genotoxische en carcinogene eigenschappen van ozon naar voren kwamen. In verschillende experimentele studies waarin de ozonproductie van luchtreinigers is gemeten werden waarden gevonden die in een niet of slecht geventileerde ruimte tot overschrijding van deze advieswaarden kunnen leiden (Grinshpun et al., 2007; Waring et al., 2008). Ozonproductie is een aandachtspunt bij gebruik van ionisatoren, deze luchtreinigers dienen te worden gebruikt in een goed geventileerde ruimte.

Deze bijproducten kunnen ook weer reageren met andere stoffen en daarmee leiden tot secundaire luchtvervuiling, zoals (ultra)fijnstofdeeltjes en vluchtige verbindingen (de Meer et al., 2010; Siegel, 2016). Bijvoorbeeld wanneer er in dezelfde ruimte een terpeenbron aanwezig is (zoals een luchtverfrisser) kan reactie met ozon leiden tot de vorming van (ultra)fijnstofdeeltjes (Waring et al., 2008). Onder de geteste condities met terpenen, bleken deze luchtreinigers een netto bron van aerosoldeeltjes in de lucht te zijn; d.w.z. er werden meer aerosoldeeltjes geproduceerd dan dat er werden afgevangen door de luchtreiniger. Dit onderschrijft ook Siegel (2016), luchtreinigers kunnen zowel deeltjes afvangen alsook deeltjes produceren. Siegel stelt dat er behoefte is aan onderzoek dat de gezondheidseffecten van luchtreinigers op de langere termijn in praktijksituaties evalueert, waarbij ook deze secundaire effecten worden meegenomen. Liu et al. (2021) onderzochten de gezondheidseffecten van negatieve ionen-

producerende luchtreinigers, en hun bevindingen suggereren dat de negatieve ionen een ongunstig effect op de gezondheid hebben. Het gunstige gezondheidseffect dat de luchtreinigers hadden door het afvangen van fijnstof, werd hiermee teniet gedaan.

4.3 Onderhoud

De effectiviteit van luchtfilters kan afnemen over de tijd, doordat filters kunnen verstoppen door stof en vuil (Siegel, 2016). UVC-lampen kunnen over de tijd minder straling gaan uitzenden, door veroudering en vervuiling van de lampen (First et al., 2007). First et al. maten 17-25% afname over een continue gebruiksduur van 1 jaar. Deze lampen zullen dus regelmatig gereinigd en vervangen moeten worden om optimale werking te behouden. Ook de effectiviteit van elektrisch geladen luchtfilters is niet constant. Bijvoorbeeld Raynor en Chae (2004) deden experimenten met filters voor ruim 19 weken en zagen een afname in effectiviteit tot 45%, afhankelijk van het type filter. Ook Küpper et al. (2019) vonden een sterke afname aan effectiviteit van ongeveer 75% bij een elektrostatisch filter dat kunstmatig verouderd was door behandeling met isopropanol. Elektrostatische filters kunnen ook minder effectief worden wanneer siliconen uit consumentenproducten als bijv. haarlak en cosmetica afzettingen vormen (Davidson and McKinney, 1998). Het filter moet regelmatig gereinigd worden om de effectiviteit te behouden.
Bij gebrek aan onderhoud is het ook mogelijk dat luchtfilters in de loop van de tijd een gezondheidsrisico vormen, wanneer ze een bron van micro-organismen naar de lucht worden. Guo et al. (2020) onderzochten de filters van mobiele HEPA-reinigers die 1 jaar in een kantooromgeving werden gebruikt, en suggereren dat deze als mogelijke bron moeten worden meegenomen in analyses van gezondheidsrisico's in het binnenmilieu. Ook Price et al. (2005) bevonden dat er schimmelgroei kan optreden op (HEPA)filters, met name wanneer deze in een omgeving met hoge luchtvochtigheid gebruikt worden. Onder meer *Aspergillus spp*. zijn aangetroffen. Een goed onderhoudsplan is daarom nodig om te voorkomen dat de luchtreiniger de lucht niet meer voldoende reinigt en mogelijk tot verspreiding van ziekmakende micro-organismen kan leiden.

4.4 Geluid

Mobiele HEPA-filtersystemen kunnen vrij veel geluid produceren en hiermee aanbevolen geluidsniveaus overschrijden. Blootstelling aan geluid kan nadelig zijn voor de gezondheid (Slob et al., 2019). Het kan leiden tot hinder en stress, en verstoring van slaap of dagelijkse activiteiten. Ook kan het de leerprestaties van kinderen beïnvloeden en chronische blootstelling aan te veel geluid kan leiden tot verhoogde bloeddruk en verhoogd risico op hart- en vaatziekten (Slob et al., 2019).

Het Programma van Eisen Frisse Scholen 2021 stelt dat het geluidsniveau ten gevolge van installaties in het lokaal maximaal 35 dB mag bedragen (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland, 2021). Alle gevonden studies waarin geluidsmetingen rond luchtreinigers zijn uitgevoerd, overschrijden dit geluidsniveau. Bluyssen et al. (2021) maten geluidsniveaus tussen de 40 dB (laagste stand) en 51 dB (hoogste stand) in een klaslokaal. Het testpanel in de studie van

Bluyssen et al. (2021) vond de gemeten geluidsniveaus onacceptabel hinderlijk. Duill et al. (2021) maten geluidsniveaus van 36-40 dB in een klaslokaal op een afstand van 2,5 meter voor een HEPA luchtreiniger die werd gebruikt op een aanzuigsnelheid van 1.000 m^3/uur. Echter, 8 van de 9 docenten die deze luchtreiniger 3 maanden in hun lokaal hadden, ervaarden het geluidsniveau niet als hinderlijk. Curtius et al. (2021) maten geluidsniveaus van 39-54 dB op een afstand van 1 meter boven een HEPA luchtreiniger, afhankelijk van de gebruikte stand. De leerlingen gaven aan zich niet te storen aan dit geluidsniveau, enkele docenten gaven wel aan dit storend te vinden. Ren et al. (2021) maten 70 dB op een tandartsstoel in een ruimte waar een HEPA luchtreiniger op de hoogste stand aan stond. Ook Qian et al. (2010) maten hoge geluidsniveaus, bij het gebruik van de reiniger op de hoogste stand was het geluidsniveau bij de reiniger 81 dB en 55 dB aan de andere kant van de ruimte. Het gebruik van luchtreinigers op de hoogste stand wordt door de auteurs aanbevolen i.v.m. de effectiviteit van de reiniging (Qian et al., 2010). Myers et al. (2022) maten 59 dB op 1 meter afstand van een HEPA luchtreiniger op de laagste stand. Het is aannemelijk dat wanneer mensen hinder ondervinden van het geluidsniveau van installaties, ze deze uitschakelen of op een lagere stand zetten, waardoor de effectiviteit van een interventie af kan nemen.

Voor andere luchtreinigingstechnieken is geen literatuur met geluidsmetingen gevonden. Echter, bij andere luchtreinigers die werken met aanzuigen van lucht (zoals losstaande UVC-reinigers) kan geluidsoverlast ook een mogelijk aandachtspunt vormen.

4.5 Luchtstromen

Een ander mogelijk neveneffect is het optreden van storende luchtstromingen (tocht). In het Bouwbesluit is hierover het volgende opgenomen: "de toevoer van verse lucht veroorzaakt in de leefzone van een verblijfsgebied een volgens NEN 1087 bepaalde luchtsnelheid die niet groter is dan 0,2 m/s" (Bouwbesluit, afdeling 3.6). Boven deze waarde kan de luchtstroming als 'tocht' worden ervaren. Bluyssen et al. (2021) stelden in hun experiment met mobiele HEPA-filters vast dat bij verschillende posities en standen deze waarde werd overschreden. Curtius et al. (2021) rapporteren dat er geen storende luchtstromingen optraden als gevolg van de luchtreinigers in klaslokalen. Ook Tobisch et al. (2021) beschrijven dat de filters zo opgezet kunnen worden, dat dit niet leidt tot thermisch discomfort in een klaslokaal. Deze bevindingen zijn waarschijnlijk apparaat-specifiek, en afhankelijk van o.a. de locatie van de luchtreiniger in de ruimte, de richting van de uitblaasopening, en welke stand het apparaat op gebruikt wordt. Zowel Feng et al. (2021) als Castellini et al. (2022) concludeerden dat luchtstromingen door luchtreinigers ook kan leiden tot verdere en/of snellere verspreiding van (infectieuze) aerosolen in een ruimte.

4.6 Verwijderen overige aerosoldeeltjes

Luchtfilters kunnen er ook voor zorgen dat, naast ziekteverwekkers, ook andere aerosoldeeltjes die kunnen leiden tot gezondheidsklachten grotendeels worden verwijderd. Onderzoek hiernaar valt buiten de scope van dit rapport, maar hier worden kort een aantal punten genoemd. Blootstelling aan fijnstof (PM10 en PM2.5) neemt af door het inzetten

van luchtreinigers met HEPA-filters in klaslokalen waar ramen en deuren gesloten zijn (Curtius et al., 2021). Ook blootstelling aan bijvoorbeeld allergenen in de lucht en stoffen als tabaksrook kan worden verminderd door het filteren van de lucht, en daarmee tot mogelijke gezondheidswinst leiden (Fisk, 2013). Elektrostatische reinigers vangen ook allerlei soorten deeltjes af, zoals fijnstof, pollen, tabaksrook. Ook kan blootstelling aan radondeeltjes verminderen door het gebruik van een luchtreiniger met HEPA-filter, een ionisator of een elektrostatische luchtreiniger (Sextro et al., 1986). Radon is radioactief, blootstelling kan tot longkanker leiden. Met UVC-luchtreiniging worden geen deeltjes zoals fijnstof uit de lucht verwijderd.

4.7 Kosten

Het was binnen de scope van dit literatuuronderzoek niet mogelijk een eenduidig overzicht te geven van de kosten per techniek. Er is een gebrek aan geschikte data over kosten van de verschillende technieken (Berry et al., 2022). De kosten hangen naast de techniek ook af van het specifieke product en de onderhoudsfrequentie die een leverancier hanteert. De kosten voor de aanschaf, gebruik (energiekosten) en de jaarlijkse (onderhouds)kosten zijn wel een factor om mee te wegen.

5 Discussie

5.1 Effectiviteit van mobiele luchtreinigers

Deze literatuurstudie leverde geen peer-reviewed artikelen op waaruit blijkt dat mobiele luchtreinigers een meerwaarde hebben in het verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 in geventileerde publieke ruimtes. Ook studies naar effect van luchtreinigers op verminderen van transmissie van andere pathogenen zijn beperkt. Er is slechts één artikel gevonden die een maat van transmissie heeft onderzocht, namelijk ziekteverzuim onder schoolgaande leerlingen, en deze is gepubliceerd vóór de COVID-19 pandemie (Su et al., 2016). Dit betreft algemeen ziekteverzuim, dus niet alleen door (respiratoire) infectieziekten. Deze studie vond geen effect van 'upper room' UVC-luchtreiniging op ziekteverzuim gedurende de onderzochte periode van ongeveer 1,5 jaar. Wel werd een afname van bacteriën in de lucht gevonden. Daarnaast zijn er nog drie studies gevonden waar in een praktijksituatie is gekeken naar het verminderen van micro-organismen (bacteriën en schimmels, geen virussen) in de lucht. Dit betrof een studie over UVC-luchtreiniging en twee studies over plasma-luchtreiniging, allen in een ziekenhuissetting. Een goed opgezet onderzoek naar het effect van luchtreinigers op verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 en andere virussen in publieke ruimtes is dan ook gewenst.

Door de grote variatie in de opzet van de gevonden studies is het lastig om generaliseerbare conclusies te trekken. Vanwege het gebrek aan studies naar het effect van luchtreiniging in aanvulling op ventilatie voor SARS-CoV-2 specifiek, is bredere literatuur meegenomen van andere micro-organismen en virussen. Bijvoorbeeld gecontroleerde studies waarbij is gekeken naar transmissie van tuberculose bij cavia's geven wel een indicatie dat aerogene transmissie verminderd kan worden door 'upper room' UVC-installaties. De vertaling hiervan naar verminderen van virale respiratoire infecties bij mensen is echter onduidelijk.
De meeste gevonden literatuur waarin onderzoek wordt beschreven in praktijksituaties betrof effecten van luchtreinigers op aerosoldeeltjesverwijdering in de ruimte. In deze onderzoeken is niet gekeken naar de aanwezigheid van micro-organismen en virussen in de lucht. Er is een grote variatie aan opzet van de gevonden studies. O.a. of er een kunstmatige aerosolbron was, of dit een puntbron of continue bron betrof, welk materiaal er is verneveld, hoe dit is verneveld, in wat voor ruimte metingen zijn gedaan (lab of praktijk), welke omstandigheden zijn onderzocht, wat voor meetapparatuur voor aerosoldeeltjes is gebruikt, etc. Onduidelijk is soms ook dat in studies niet altijd onderscheid wordt gemaakt tussen door de mens geproduceerde aerosolen, al dan niet met voldoende infectieuze virusdeeltjes (infectieuze aerosolen), en andere aerosolen (bijvoorbeeld fijnstof). Er zijn allerlei andere bronnen die aerosolen kunnen produceren in het binnen- en buitenmilieu, waardoor de interpretatie van de resultaten van verschillende studies m.b.t. infectieziekten wordt vertroebeld. Bijvoorbeeld Duill et al. (2021) vonden dat ventilatie leidde tot een toename van de concentratie aerosoldeeltjes, door instroom van deeltjes met bronnen in het buitenmilieu (bijv. verkeer en industrie).

Ventilatie zal dit effect niet hebben op SARS-CoV-2-bevattende aerosolen, die door geïnfecteerde personen aanwezig in de ruimte worden geproduceerd. Het algemene beeld uit de studies is desalniettemin dat luchtreiniging aerosoldeeltjesconcentraties kan doen afnemen en/of micro-organismen kan inactiveren onder verschillende ventilatieomstandigheden (Tabel 1). Echter, hoe groot dit effect van luchtreiniging voor SARS-CoV-2 bevattende aerosolen zou zijn, in verhouding tot het effect van ventilatie, is niet goed te duiden. Alle hier genoemde overwegingen maken het doen van een meta-analyse om kwantitatief resultaten te presenteren op dit moment niet mogelijk (Liu et al., 2022).
Als voorbeeld, Blocken et al. (2021) vonden in hun studie die metingen en modellering combineert dat bij optimaal ventileren (2,2 ACH) en gebruik van zes luchtreinigers in een ruimte van 886 m^3 een verwijderingspercentage van ongeveer 90-95% bereikt zou kunnen worden in een fitnessruimte met 35 sporters. Het is echter niet bekend of de gevonden reductie tot duidelijk minder transmissie leidt dan wanneer alleen zou worden geventileerd of wanneer er minder luchtreinigers worden gebruikt. Er is geen verband bekend tussen het percentage aerosolen dat (continu) wordt verwijderd (dus ook aerosolen die niet door de mens zijn geproduceerd) en de mate waarmee op deze locatie transmissie van infectieziekten wordt verminderd. Het antwoord op deze vraag is van belang om de proportionaliteit van luchtreinigers als interventie te kunnen vaststellen. Onderzoek hiernaar zal echter niet eenvoudig zijn omdat het transmissierisico van vele factoren afhangt, waaronder van eventueel aanwezige infectieuze personen in de ruimte, in welke mate deze personen virus uitscheiden (Schijven et al., 2021), het type ziekteverwekker, hoe deze personen zich bewegen ten opzichte van de andere personen in de ruimte en welke activiteiten er plaatsvinden (bijv. zingen, schreeuwen).

De effectiviteit van luchtreinigers bij het verminderen van transmissie van SARS-CoV-2 hangt samen met het relatieve belang van de verschillende transmissieroutes van SARS-CoV-2 (en van veel andere respiratoire infectieziekten). Het is op dit moment nog niet duidelijk wat de bijdrage is van de aerogene transmissieroute ten opzichte van andere transmissieroutes op populatieniveau. Internationale consensus is dat transmissie vooral plaatsvindt op korte afstand, ongeveer binnen 1,5 meter, via druppeltjes (inclusief aerosolen) die worden ingeademd of op slijmvliezen terechtkomen. Het is onduidelijk of luchtreinigers effect hebben op directe transmissie. Het lijkt onwaarschijnlijk dat het grootste deel van de lucht die door de bron wordt uitgeademd eerst de luchtreiniger zal bereiken, voordat het mensen in de buurt zal bereiken (Liu et al., 2017). Het is daarmee aannemelijk dat luchtreinigers minder invloed hebben op het verminderen van transmissie als de personen zich verplaatsen in de ruimte en veel direct contact hebben met elkaar. Het is aannemelijker dat een effect zou kunnen worden verwacht in publieke ruimtes waar mensen langdurig verblijven, een activiteit uitvoeren waarbij meer aerosolen worden gevormd dan rustig ademen of praten (bijvoorbeeld zingen, schreeuwen), er weinig direct contact is en weinig verplaatsingen zijn (Schijven et al., 2021).
Mogelijk heeft de positie van de luchtreiniger ook invloed op de effectiviteit. Verschillende studies laten zien dat de positie effect heeft op het verwijderen van aerosolen in de ruimte. Op dit moment

ontbreken studies waarin is gekeken naar het effect op het verwijderen van aerosolen tussen twee mensen die ~ 1 meter van elkaar staan en tegen elkaar praten. Zowel als de luchtreiniger geplaatst is nabij deze personen als op verdere afstand. De mate waarmee verwijdering of inactivatie plaatsvindt kan ook per product verschillen en is afhankelijk van het gebruik en de situatie in de ruimte. Zo zal een lagere stand van een luchtreiniger minder aerosoldeeltjes uit de ruimte verwijderen dan een hogere stand. Deze lagere stand kan bijvoorbeeld worden ingesteld om geluidshinder te voorkomen (zie ook 5.2).
Het is mogelijk dat de verwijderingsefficiëntie van het filter zelf niet de bepalende factor is voor de effectiviteit in de praktijk (Miller-Leiden et al., 1996). Een rekenmodel dat aanneemt dat de lucht in de ruimte goed gemengd is, laat zien dat een filter met een verwijderingsefficiëntie van 90% (onder de HEPA standaard) versus een filter met een efficiëntie van 100% weinig verschil maakt in de gerealiseerde aerosolconcentraties in de ruimte (Miller-Leiden et al., 1996). De lucht wervelt immers ook om het filter heen. Van grotere invloed zijn waarschijnlijk de positie van het filter in de ruimte en het volume lucht dat door het filter gaat per tijdseenheid. Ook merken Miller-Leiden et al. op dat er altijd sprake is van een verhoogde concentratie direct rond de bron, en dat een hogere ventilatievoud niet altijd leidde tot lagere concentraties in de ruimte, omdat de luchtstromingen en menging in de specifieke ruimte waarin gemeten werd op gegeven moment een grotere invloed hebben dan het ventilatievoud. Dat hoge concentraties aerosoldeeltjes kunnen worden gevonden nabij de aerosolbron, ondanks het gebruik van luchtreinigers, wordt ook bevestigd door het onderzoek van Szabadi et al. (2022).

5.2 Aandachtspunten

Uit studies blijkt dat achterstallig onderhoud kan leiden tot verminderde effectiviteit, en bij filters mogelijk zelfs tot verspreiding van ziekteverwekkers. Bij een hoge stand kan het geluid van de reiniger als hinderlijk worden ervaren. Ook kan er sprake zijn van ongewenste luchtstromen. Dit kan er toe leiden dat de reiniger in een lagere stand wordt gezet of verplaatst wordt waardoor ook de effectiviteit afneemt. Het lager zetten bij geluidshinder is eerder geconstateerd bij gebruik van ventilatiesystemen in woningen, kinderdagverblijven en scholen (van Holsteijn and Li, 2014; Versteeg, 2009). Luchtreinigingstechnieken die gebruikmaken van ionisatie en UVC-straling kunnen mogelijk bijproducten vormen zoals ozon. Bij een voldoende hoge concentratie en bij langdurige blootstelling in de ruimte waar de luchtreiniger staat kunnen deze bijproducten schadelijk zijn voor de volksgezondheid.

De mate waarin deze aandachtspunten een rol spelen zal verschillen per luchtreiniger. Het zijn echter wel mogelijke negatieve effecten die van belang zijn om een goede afweging te kunnen maken of het continu plaatsen van luchtreinigers in verschillende publieke ruimte wenselijk is. Een continu uit te voeren onderhoudsprotocol is noodzakelijk om een goede werking van de mobiele luchtreiniger te behouden. Hiervoor zijn er ook terugkerende (onderhouds-)kosten. Het is niet mogelijk om een algemene uitspraak te doen over de kosten omdat dit per product kan verschillen. Nader onderzoek naar mogelijke gevolgen voor de gezondheid bij het continu gebruikmaken van luchtreinigers (op de

lange termijn) is gewenst, bijvoorbeeld naar de vorming van bijproducten en gevolgen bij achterstallig onderhoud.

Nader onderzoek is ook gewenst naar de gevolgen van langdurige directe blootstelling aan 'ver UVC'. Vooral bij kinderen is het van belang te bepalen of langdurige directe blootstelling kan leiden tot gezondheidsrisico's op de (midden)lange termijn. Totdat hierover meer duidelijk is raadt het RIVM directe blootstelling aan UVC-straling, ook 'ver UVC', af (den Outer et al., 2021). Luchtreinigingstechnieken zoals 'ver UVC' waarmee direct in de ruimte wordt gestraald kunnen ook invloed hebben op micro-organismen op oppervlakken en andere organismen zoals planten (Otake et al., 2021). Hygiënedeskundigen pleiten er voor om de hygiënemaatregelen vooral te richten op het verminderen van blootstelling aan ziekmakende micro-organismen en 'gunstige' micro-organismen zoveel mogelijk te behouden voor een goede gezondheid en divers microbioom; ook wel 'targeted hygiene' genoemd (Bloomfield, 2019). Hoewel er nog wetenschappelijke discussies gaande zijn over dit onderwerp is het wel van belang dit ook mee te wegen aangezien deze luchtreinigingstechnieken via directe UVC-straling gericht zijn op het continu inactiveren van zo veel mogelijk micro-organismen in de ruimte, waaronder 'gunstige' micro-organismen.

6 Conclusie

Uit de literatuurstudie kon niet worden geconcludeerd dat mobiele luchtreinigers in publieke verblijfruimtes een meerwaarde hebben in het verminderen van transmissie van SARS-CoV-2. Er is een gebrek aan literatuur over de invloed van mobiele luchtreinigers op transmissie van infectieziekten. Er is slechts één artikel gevonden die een maat van transmissie heeft onderzocht, namelijk ziekteverzuim (in het algemeen waaronder infectieziekten) onder leerlingen, en deze is gepubliceerd vóór de COVID-19 pandemie. Deze studie vond geen effect van UVC-luchtreiniging op ziekteverzuim gedurende de onderzochte periode van ongeveer 1,5 jaar. Ook het aantal studies waar naar het effect op verminderen van micro-organismen in een verblijfsruimte is gekeken is nog zeer beperkt. Studies naar het verwijderen van virussen ontbreken. Er zijn wel verschillende studies waaruit blijkt dat dat mobiele luchtreinigers die in praktijksituatie zijn gebruikt meer aerosolen verwijderen uit de lucht dan wanneer alleen wordt geventileerd. Deze studies betroffen voornamelijk HEPA-luchtreinigers. Geconcludeerd werd dat correct gebruiken van mobiele luchtreinigers in een praktijksituatie in aanvulling op ventilatie kan leiden tot lagere concentraties aerosolen in de lucht. Het is echter nog onbekend óf en zo ja hoeveel transmissie wordt verminderd door een bepaalde verlaging van de aerosolconcentratie in de lucht. Er ontbreekt op dit moment een correlatie tussen het percentage verwijderde aerosolen en het percentage transmissie dat hiermee wordt verminderd. Dit hangt onder meer af van:

- de mate waarin aerogene transmissie een rol speelt ten opzichte van andere routes;
- van het percentage aerosolen in de ruimte die infectieus zijn, en welke ziekteverwekker en
- of deze aerosolconcentratie door ventileren onvoldoende wordt verminderd.

Gezien de huidige internationale consensus is het optreden van aerogene transmissie situatie- en locatie-specifiek; het is vooral mogelijk in ruimtes met te weinig ventilatie waar relatief veel mensen voor een langere tijd verblijven. Op kortere afstand (de meest voorname route, directe transmissie), heeft een luchtreiniger volgens de huidige inzichten weinig tot geen effect op transmissie. Ook is niet bekend wat de meerwaarde is in ruimtes waar sprake is van goede ventilatie. Daarnaast hangt de verwijderingsefficiëntie van de aerosolen in de ruimte af van onder meer het ventilatievoud, de positie in de ruimte en de stand waarop deze gebruikt wordt.

Uit de literatuurstudie blijkt verder dat aandacht voor regulier onderhoud en vorming van bijproducten van belang is. Bij verkeerd of achterstallig onderhoud neemt de effectiviteit van het apparaat af. Het is ook mogelijk dat ziekteverwekkers niet of veel minder worden geïnactiveerd waardoor een ongerechtvaardigd vertrouwen en onterecht gevoel van zekerheid ontstaat. Bij filters die slecht worden onderhouden is het ook mogelijk dat ziekteverwekkers zoals bepaalde schimmels kunnen worden verspreid. Daarnaast kunnen sommige luchtreinigers die

geplaatst worden in onvoldoende geventileerde ruimtes stoffen zoals ozon en NO_x produceren die bij langdurige blootstelling schadelijk kunnen zijn voor de volksgezondheid. Tot slot is het geluidsniveau een aandachtspunt bij luchtreinigers die lucht aanzuigen. Het geluidsniveau zal per product verschillen maar voor sommige luchtreinigers kan een hogere stand als hinderlijk worden ervaren. Dit kan er toe leiden dat luchtreinigers in een te lage stand wordt gezet voor de ruimte waarin ze worden gebruikt.

7 Beleidsadviezen

Mobiele luchtreinigingstechnieken zijn geen vervanging voor maatregelen die zorgen voor het verminderen van directe transmissie op korte afstand door infectieuze druppels/aerosolen: de route die internationaal gezien wordt als de meest voorname transmissieroute van SARS-CoV-2 (Centers for Disease Control and Prevention, 2021a; World Health Organization, 2021a). Ook zijn mobiele luchtreinigers geen vervanging voor ventilatie. Mobiele luchtreinigers recirculeren de binnenlucht. Hierdoor worden mogelijke schadelijke gassen in de binnenruimte niet verminderd. Luchtreiniging kan daarom alleen aanvullend zijn op ventileren. Ook in andere internationale richtlijnen en Nederlandse zorgrichtlijnen wordt luchtreiniging als mogelijke aanvulling gezien op ventileren (Centers for Disease Control and Prevention, 2021b; Commissie voor Praktische TBC-bestrijding, 2021; Werkgroep Infectie Preventie, 2016; World Health Organization, 2021b). De ECDC raadt het gebruik van mobiele luchtreinigers voor preventie van SARS-CoV-2 niet aan omdat gesteld wordt dat nog onbekend is of deze apparaten een effect hebben op de transmissie en er nog vragen zijn over mogelijke gezondheidsrisico's (European Centre for Disease Prevention and Control, 2020).

Het is nog niet duidelijk of het plaatsen van luchtreinigers in verschillende publieke ruimtes waar correct wordt geventileerd leidt tot minder transmissie van SARS-CoV-2. Praktijkstudies naar de meerwaarde van luchtreinigers in geventileerde ruimtes, waarbij ook rekening wordt gehouden met de aandachtspunten, zijn gewenst. Het is aan te bevelen studies naar de meerwaarde in de praktijk uit te voeren bij locaties waar de kans op aerogene transmissie het grootst is en/of veel mensen uit de risicogroep verblijven bijvoorbeeld: gezamenlijke ruimtes in verpleeghuizen, ruimtes waar koren zingen en horeca (Duval et al., 2022). Het onderzoek kan ingedeeld worden in twee fases (RIVM, 2021b): een fase waarin onderzocht wordt of tijdens de praktijksituaties waar correct wordt geventileerd SARS-CoV-2 aanwezig is in de lucht (of een surrogaat virus) en door een mobiele luchtreiniger wordt verwijderd. Vervolgens een fase waarin wordt vastgesteld dat de luchtreiniger transmissie van SARS-CoV-2 verminderd.

In afwachting van resultaten van verder wetenschappelijk onderzoek, kan bij toenemende landelijke besmettingen uit voorzorg het gebruik van mobiele luchtreinigers tijdelijk aanvullend op andere preventieve maatregelen worden overwogen bij locaties waar mensen uit de risicogroep bij elkaar verblijven (bijvoorbeeld gezamenlijke ruimte van verpleeghuizen) en/of de kans op aerogene transmissie groot is en waar geen centrale luchtreiniging aanwezig is. Voorwaarde is dat in de ruimte geen blootstelling is aan schadelijke bijproducten, onderhoud wordt uitgevoerd volgens de instructies en er geen directe blootstelling aan UVC-straling plaatsvindt.

Er is op dit moment onvoldoende onderbouwing om het continu (i.e. ongeacht aanwezig zijn van verhoogd aantal besmettingen) gebruiken van mobiele luchtreinigers in alle verblijfsruimtes waar minimaal

geventileerd wordt volgens de geldende regelgeving en (arbo)richtlijnen te adviseren in kader van infectiepreventie. Dit geldt in het bijzonder voor locaties waar kinderen verblijven zoals kinderdagverblijven en basisscholen. Hiervoor is eerst breder onderzoek gewenst naar de invloed op de verspreiding van COVID-19 en andere respiratoire infectieziekten, en ook naar de mogelijke gezondheidsrisico's (op de lange termijn) door achterstallig onderhoud, mogelijke blootstelling aan schadelijke bijproducten door ionisatie- en UVC-technieken, en gevolgen van en directe blootstelling aan UVC-straling op zowel mens als omgeving.

8 Literatuur

Abraham, M.E., 1999. Microanalysis of indoor aerosols and the impact of a compact high-efficiency particulate air (HEPA) filter system. Indoor air 9, 33-40.

Bartels, A.A., Schijven, J.F., Delmaar, J.E., Duizer, E. 2021. Effect van verschillende ventilatiehoeveelheden op aerogene transmissie van SARS-CoV-2 - Risicoschatting op basis van het AirCoV2-model
RIVM-briefrapport 2021-0207 (Bilthoven, Nederland, RIVM).

Beggs, C.B., Avital, E.J., 2020. Upper-room ultraviolet air disinfection might help to reduce COVID-19 transmission in buildings: A feasibility study. PeerJ 8.

Beggs, C.B., Sleigh, P.A., 2002. A quantitative method for evaluating the germicidal effect of upper room UV fields. Journal of Aerosol Science 33, 1681-1699.

Bergeron, V., Reboux, G., Poirot, J.L., Laudinet, N., 2007. Decreasing airborne contamination levels in high-risk hospital areas using a novel mobile air-treatment unit. Infect Control Hosp Epidemiol 28, 1181-1186.

Berry, G., Parsons, A., Morgan, M., Rickert, J., Cho, H., 2022. A review of methods to reduce the probability of the airborne spread of COVID-19 in ventilation systems and enclosed spaces. Environ Res 203, 111765.

Bhardwaj, S.K., Singh, H., Deep, A., Khatri, M., Bhaumik, J., Kim, K.H., Bhardwaj, N., 2021. UVC-based photoinactivation as an efficient tool to control the transmission of coronaviruses. Sci Total Environ 792, 148548.

Bischoff, W., Russell, G., Willard, E., Stehle, J., 2019. Impact of a novel mobile high-efficiency particulate air–ultraviolet air recirculation system on the bacterial air burden during routine care. American Journal of Infection Control 47, 1025-1027.

Blocken, B., van Druenen, T., Ricci, A., Kang, L., van Hooff, T., Qin, P., Xia, L., Ruiz, C.A., Arts, J.H., Diepens, J.F.L., Maas, G.A., Gillmeier, S.G., Vos, S.B., Brombacher, A.C., 2021. Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic. Building and Environment 193.

Bloomfield, S.F., 2019. RSPH and IFH call for a clean-up of public understanding and attitudes to hygiene. Perspectives in Public Health 139, 285-288.

Bluyssen, P.M., Ortiz, M., Zhang, D., 2021. The effect of a mobile HEPA filter system on 'infectious' aerosols, sound and air velocity in the SenseLab. Building and Environment 188.

Buchan, A.G., Yang, L., Atkinson, K.D., 2020. Predicting airborne coronavirus inactivation by far-UVC in populated rooms using a high-fidelity coupled radiation-CFD model. Sci Rep 10, 19659.

Buising, K.L., Schofield, R., Irving, L., Keywood, M., Stevens, A., Keogh, N., Skidmore, G., Wadlow, I., Kevin, K., Rismanchi, B., Wheeler, A.J., Humphries, R.S., Kainer, M., McGain, F., Monty, J., Marshall, C., 2021. Use of portable air cleaners to reduce aerosol transmission on a hospital COVID-19 ward. Infection Control and Hospital Epidemiology.

Buonanno, M., Welch, D., Shuryak, I., Brenner, D.J., 2020. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. Scientific Reports 10, 10285.
Castellini, J.E., Jr., Faulkner, C.A., Zuo, W., Lorenzetti, D.M., Sohn, M.D., 2022. Assessing the use of portable air cleaners for reducing exposure to airborne diseases in a conference room with thermal stratification. Building and Environment 207.
Centers for Disease Control and Prevention, 2012. Section 10: Chain of Infection. Date accessed: 23 August 2022. https://www.cdc.gov/csels/dsepd/ss1978/lesson1/section10.html
Centers for Disease Control and Prevention, 2021a. SARS-CoV-2 Transmission. Date accessed: 23 juni 2022. https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/science/science-briefs/sars-cov-2-transmission.html
Centers for Disease Control and Prevention, 2021b. Ventilation in Buildings. Date accessed: 23 juni 2022. https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/ventilation.html
Commissie voor Praktische TBC-bestrijding 2021. Beleid Tuberculose Infectiepreventie GGD'en (CPT).
Corrêa, T.Q., Blanco, K.C., Vollet-Filho, J.D., Morais, V.S., Trevelin, W.R., Pratavieira, S., Bagnato, V.S., 2021. Efficiency of an air circulation decontamination device for micro-organisms using ultraviolet radiation. Journal of Hospital Infection 115, 32-43.
Curtius, J., Granzin, M., Schrod, J., 2021. Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. Aerosol Science and Technology 55, 586-599.
Davidson, J.H., McKinney, P.J., 1998. Chemical Vapor Deposition in the Corona Discharge of Electrostatic Air Cleaners. Aerosol Science and Technology 29, 102-110.
de Gids, W.F., Opperhuizen, A. 2004. Reductie van blootstelling aan omgevingstabaksrook in de horeca door ventilatie en luchtreiniging - RIVM report 340450001/2004 (Bilthoven, Nederland, RIVM).
de Meer, G., Duijm, F., Hall, E.F. 2010. Briefrapport 609330004/2010 Ionisatoren en gezondheid (Bilthoven, the Netherlands, RIVM).
den Outer, P., van Dijk, A., Siegersma, D., Hagens, W. 2021. 2021-0050/VLH/WH notitie UVC en gezondheid (Bilthoven, Nederland, RIVM).
Desoubeaux, G., Bernard, M.C., Gros, V., Sarradin, P., Perrodeau, E., Vecellio, L., Piscopo, A., Chandenier, J., Bernard, L., 2014. Testing an innovative device against airborne Aspergillus contamination. Medical Mycology 52, 584-590.
Duill, F.F., Schulz, F., Jain, A., Krieger, L., van Wachem, B., Beyrau, F., 2021. The impact of large mobile air purifiers on aerosol concentration in classrooms and the reduction of airborne transmission of sars-cov-2. International Journal of Environmental Research and Public Health 18.
Dumyahn, T., First, M., 1999. Characterization of ultraviolet upper room air disinfection devices. American Industrial Hygiene Association Journal 60, 219-227.
Duval, D., Palmer, J.C., Tudge, I., Pearce-Smith, N., O'Connell, E., Bennett, A., Clark, R., 2022. Long distance airborne transmission of SARS-CoV-2: rapid systematic review. BMJ 377, e068743.

Escombe, A.R., Moore, D.A.J., Gilman, R.H., Navincopa, M., Ticona, E., Mitchell, B., Noakes, C., Martinez, C., Sheen, P., Ramirez, R., Quino, W., Gonzalez, A., Friedland, J.S., Evans, C.A., 2009. Upper-room ultraviolet light and negative air ionization to prevent tuberculosis transmissio. PLoS Medicine 6, 0312-0323.

European Centre for Disease Prevention and Control 2020. Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19: first update (Stockholm, ECDC).

European Chemicals Agency 2021. Competent authority report Ozone generated from oxygen - product types 2, 4, 5 and 11 (European Chemicals Agency).

Federatie Medisch Specialisten, 2022. Luchtbehandeling in operatiekamers en behandelkamers. Date accessed: 27 juni 2022. https://richtlijnendatabase.nl/richtlijn/luchtbehandeling_in_operatiekamers_en_behandelkamers/luchtbehandelingsystemen_in_de_operatiekamer.html

Feng, Y., Zhao, J., Spinolo, M., Lane, K., Leung, D., Marshall, D., Mlinaric, P., 2021. Assessing the filtration effectiveness of a portable ultraviolet air cleaner on airborne sars-cov-2 laden droplets in a patient room: A numerical study. Aerosol and Air Quality Research 21.

Fennelly, M., O'Connor, D.J., Hellebust, S., Murphy, N., Casey, C., Eustace, J., Plant, B.J., Sodeau, J.R., Prentice, M.B., 2021. Effectiveness of a plasma treatment device on microbial air quality in a hospital ward, monitored by culture. Journal of Hospital Infection 108, 109-112.

First, M.W., Banahan, K.F., Dumyahn, T.S., 2007. Performance of Ultraviolet Germicidal Irradiation Lamps and Luminaires in Long-Term Service. LEUKOS 3, 181-188.

Fisk, W.J., 2013. Health benefits of particle filtration. Indoor Air 23, 357-368.

Furuya, H., 2013. Estimation of environmental control measures for tuberculosis transmission in care facilities for the elderly. Tokai Journal of Experimental and Clinical Medicine 38, 135-141.

Garzona-Navas, A., Sajgalik, P., Csécs, I., Askew, J.W., Lopez-Jimenez, F., Niven, A.S., Johnson, B.D., Allison, T.G., 2021. Mitigation of Aerosols Generated During Exercise Testing With a Portable High-Efficiency Particulate Air Filter With Fume Hood. Chest 160, 1388-1396.

Gezondheidsraad 2010. Binnenluchtkwaliteit in basisscholen (Den Haag, Nederland, Gezondheidsraad).

Giesecke, J., 2017. Modern Infectious Disease Epidemiology. CRC Press.

Gill, A.S., Kaur, K., Shipman, P., Sumsion, J., Error, M., Kelly, K., Alt, J.A., 2022. Nasal endoscopy, room filtration, and aerosol concentrations during live outpatient encounters: a prospective, case-control study. International Forum of Allergy and Rhinology 12, 71-82.

Grinshpun, S.A., Adhikari, A., Honda, T., Kim, K.Y., Toivola, M., Rao, K.S.R., Reponen, T., 2007. Control of aerosol contaminants in indoor air: Combining the particle concentration reduction with microbial inactivation. Environmental Science and Technology 41, 606-612.

Guo, J., Xiong, Y., Kang, T., Xiang, Z., Qin, C., 2020. Bacterial community analysis of floor dust and HEPA filters in air purifiers used in office rooms in ILAS, Beijing. Sci Rep 10, 6417.
Hammond, A., Khalid, T., Thornton, H.V., Woodall, C.A., Hay, A.D., 2021. Should homes and workplaces purchase portable air filters to reduce the transmission of SARS-CoV-2 and other respiratory infections? A systematic review. PLoS ONE 16.
Heßling, M., Haag, R., Sieber, N., Vatter, P., 2021. The impact of far-UVC radiation (200-230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes - a collection and analysis of a hundred years of data. GMS Hyg Infect Control 16, Doc07.
Heßling, M., Hönes, K., Vatter, P., Lingenfelder, C., 2020. Ultraviolet irradiation doses for coronavirus inactivation - review and analysis of coronavirus photoinactivation studies. GMS hygiene and infection control 15, Doc08-Doc08.
Kim, S., Chung, J., Lee, S.H., Yoon, J.H., Kweon, D.H., Chung, W.J., 2021. Tannic acid-functionalized HEPA filter materials for influenza virus capture. Scientific reports 11, 979.
Ko, G., Burge, H.A., Nardell, E.A., Thompson, K.M., 2001. Estimation of tuberculosis risk and incidence under upper room ultraviolet germicidal irradiation in a waiting room in a hypothetical scenario. Risk Analysis 21, 657-673.
Ko, G., First, M.W., Burge, H.A., 2002. The characterization of upper-room ultraviolet germicidal irradiation in inactivating airbone microorganisms. Environmental Health Perspectives 110, 95-101.
Kompatscher, K., Traversari, A.A.L. 2022. Literatuurstudie naar de toepassing van verschillende luchtreinigingsmethoden voor inactivatie van microbiologische verontreinigingen (Delft, Nederland, TNO).
Kujundzic, E., Matalkah, F., Howard, C.J., Hernandez, M., Miller, S.L., 2006. UV air cleaners and upper-room air ultraviolet germicidal irradiation for controlling airborne bacteria and fungal spores. Journal of occupational and environmental hygiene 3, 536-546.
Küpper, M., Asbach, C., Schneiderwind, U., Finger, H., Spiegelhoff, D., Schumacher, S., 2019. Testing of an Indoor Air Cleaner for Particulate Pollutants under Realistic Conditions in an Office Room. Aerosol and Air Quality Research 19, 1655-1665.
Küsel, R.R., Craig, I.K., Stoltz, A.C., 2019. Modeling the Airborne Infection Risk of Tuberculosis for a Research Facility in eMalahleni, South Africa. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis 39, 630-646.
Lee, J.H., Rounds, M., McGain, F., Schofield, R., Skidmore, G., Wadlow, I., Kevin, K., Stevens, A., Marshall, C., Irving, L., Kainer, M., Buising, K., Monty, J., 2022. Effectiveness of portable air filtration on reducing indoor aerosol transmission: preclinical observational trials. Journal of Hospital Infection 119, 163-169.
Lindsley, W.G., Derk, R.C., Coyle, J.P., Martin, S.B., Mead, K.R., Blachere, F.M., Beezhold, D.H., Brooks, J.T., Boots, T., Noti, J.D., 2021. Efficacy of Portable Air Cleaners and Masking for Reducing Indoor Exposure to Simulated Exhaled SARS-CoV-2 Aerosols - United States, 2021. MMWR. Morbidity and mortality weekly report 70, 972-976.

Liu, D.T., Phillips, K.M., Speth, M.M., Besser, G., Mueller, C.A., Sedaghat, A.R., 2022. Portable HEPA Purifiers to Eliminate Airborne SARS-CoV-2: A Systematic Review. Otolaryngology–Head and Neck Surgery 166, 615-622.

Liu, L., Li, Y., Nielsen, P.V., Wei, J., Jensen, R.L., 2017. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. Indoor Air 27, 452-462.

Liu, W., Huang, J., Lin, Y., Cai, C., Zhao, Y., Teng, Y., Mo, J., Xue, L., Liu, L., Xu, W., Guo, X., Zhang, Y., Zhang, J.J., 2021. Negative ions offset cardiorespiratory benefits of PM2.5 reduction from residential use of negative ion air purifiers. Indoor Air 31, 220-228.

McDevitt, J.J., Rudnick, S.N., Radonovich, L.J., 2012. Aerosol susceptibility of influenza virus to UV-C light. Applied and Environmental Microbiology 78, 1666-1669.

Menzies, D., Adhikari, N., Arietta, M., Loo, V., 2003. Efficacy of environmental measures in reducing potentially infectious bioaerosols during sputum induction. Infection Control and Hospital Epidemiology 24, 483-489.

Miller-Leiden, S., Lobascio, C., Nazaroff, W.W., Macher, J.M., 1996. Effectiveness of in-room air filtration and dilution ventilation for tuberculosis infection control. Journal of the Air & Waste Management Association (1995) 46, 869-882.

Mølgaard, B., Koivisto, A.J., Hussein, T., Hämeri, K., 2014. A new clean air delivery rate test applied to five portable indoor air cleaners. Aerosol Science and Technology 48, 409-417.

Morawska, L., Ayoko, G.A., Bae, G.N., Buonanno, G., Chao, C.Y.H., Clifford, S., Fu, S.C., Hänninen, O., He, C., Isaxon, C., Mazaheri, M., Salthammer, T., Waring, M.S., Wierzbicka, A., 2017. Airborne particles in indoor environment of homes, schools, offices and aged care facilities: The main routes of exposure. Environment International 108, 75-83.

Moreno, E., Klochok, G., García, S., 2021. Active Versus Passive Flow Control in UVC FILTERs for COVID-19 Containment. Annals of Biomedical Engineering 49, 2554-2565.

Mphaphlele, M., Dharmadhikari, A.S., Jensen, P.A., Rudnick, S.N., Van Reenen, T.H., Pagano, M.A., Leuschner, W., Sears, T.A., Milonova, S.P., Van Der Walt, M., Stoltz, A.C., Weyer, K., Nardell, E.A., 2015. Institutional tuberculosis transmission: Controlled trial of upper room ultraviolet air disinfection: A basis for new dosing guidelines. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 192, 477-484.

Myers, N.T., Laumbach, R.J., Black, K.G., Ohman-Strickland, P., Alimokhtari, S., Legard, A., De Resende, A., Calderón, L., Lu, F.T., Mainelis, G., Kipen, H.M., 2022. Portable air cleaners and residential exposure to SARS-CoV-2 aerosols: A real-world study. Indoor Air 32, e13029.

Nardell, E.A., 2016. Transmission and institutional infection control of tuberculosis. Cold Spring Harbor Perspectives in Medicine 6.

Nardell, E.A., 2021. Air Disinfection for Airborne Infection Control with a Focus on COVID-19: Why Germicidal UV is Essential†. Photochemistry and photobiology 97, 493-497.

Nardell, E.A., Bucher, S.J., Brickner, P.W., Wang, C., Vincent, R.L., Becan-McBride, K., James, M.A., Michael, M., Wright, J.D., 2008. Safety of upper-room ultraviolet germicidal air disinfection for room occupants: Results from the Tuberculosis Ultraviolet Shelter Study. Public Health Reports 123, 52-60.

Nguyen, T.T., Johnson, G.R., Bell, S.C., Knibbs, L.D., 2022. A Systematic Literature Review of Indoor Air Disinfection Techniques for Airborne Bacterial Respiratory Pathogens. International Journal of Environmental Research and Public Health 19, 1197.

Nicolò, M.S., Rizzo, M.G., Palermo, N., Gugliandolo, C., Cuzzocrea, S., Guglielmino, S.P.P., 2022. Evaluation of Betacoronavirus OC43 and SARS-CoV-2 Elimination by Zefero Air Sanitizer Device in a Novel Laboratory Recirculation System. Pathogens 11.

Noakes, C.J., Sleigh, P.A., Fletcher, L.A., Beggs, C.B., 2006. Use of CFD modelling to optimise the design of upper-room UVGI disinfection systems for ventilated rooms. Indoor and Built Environment 15, 347-356.

Otake, M., Okamoto Yoshiyama, K., Yamaguchi, H., Hidema, J., 2021. 222 nm ultraviolet radiation C causes more severe damage to guard cells and epidermal cells of Arabidopsis plants than does 254 nm ultraviolet radiation. Photochemical & Photobiological Sciences 20, 1675-1683.

Pirkle, S., Bozarth, S., Robinson, N., Hester, W., Wagner, L., Broome, S., Allen, K., Mannepalli, S., 2021. Evaluating and contextualizing the efficacy of portable HEPA filtration units in small exam rooms. American Journal of Infection Control 49, 1506-1510.

Price, D.L., Simmons, R.B., Jr, S.A.C., Ahearn, D.G., 2005. Mold colonization during use of preservative-treated and untreated air filters, including HEPA filters from hospitals and commercial locations over an 8-year period (1996–2003). Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology 32, 319-321.

Qian, H., Li, Y., Sun, H., Nielsen, P.V., Huang, X., Zheng, X., 2010. Particle removal efficiency of the portable HEPA air cleaner in a simulated hospital ward. Building Simulation, 1-10.

Raynor, P.C., Chae, S.J., 2004. The long-term performance of electrically charged filters in a ventilation system. J Occup Environ Hyg 1, 463-471.

Ren, Y.F., Huang, Q., Marzouk, T., Richard, R., Pembroke, K., Martone, P., Venner, T., Malmstrom, H., Eliav, E., 2021. Effects of mechanical ventilation and portable air cleaner on aerosol removal from dental treatment rooms. Journal of dentistry 105, 103576.

Rijksdienst voor Ondernemend Nederland 2021. Programma van Eisen Frisse Scholen 2021 (Den Haag, Nederland, Rijksdienst voor Ondernemend Nederland).

RIVM, 2021a. Aerogene transmissie SARS-CoV-2 - Onderbouwing van de rol van aerogene transmissie van SARS-CoV-2 bij mens-tot-mens transmissie. Date accessed: 23 juni 2022. https://lci.rivm.nl/aerogene-transmissie-sars-cov-2

RIVM 2021b. Onderzoeksvoorstel naar de effectiviteit van mobiele luchtreinigers in het verminderen van transmissie van het coronavirus - In kader van MOTIE VAN HET LID VAN DEN BERG C.S. - Nr. 1071 (Bilthoven, Nederland, RIVM).

RIVM, 2022. COVID-19 Richtlijn. Date accessed: 12 juli 2022. https://lci.rivm.nl/richtlijnen/covid-19

Rodríguez, M., Palop, M.L., Seseña, S., Rodríguez, A., 2021. Are the Portable Air Cleaners (PAC) really effective to terminate airborne SARS-CoV-2? Science of the Total Environment 785.

Ruimte OK Kenniscentrum 2022. Handreiking Optimaal Ventileren in de klas met de CO2-meter - Versie 220201_001D (Ruimte OK Kenniscentrum).

Rutala, W.A., Jones, S.M., Worthington, J.M., Reist, P.C., Weber, D.J., 1995. Efficacy of portable filtration units in reducing aerosolized particles in the size range of Mycobacterium tuberculosis. Infection control and hospital epidemiology : the official journal of the Society of Hospital Epidemiologists of America 16, 391-398.

Scheepers, P.T., Cremers, R., van Hout, S.P., Anzion, R.B., 2012. Influence of a portable air treatment unit on health-related quality indicators of indoor air in a classroom. J Environ Monit 14, 429-439.

Schijven, J., Vermeulen, L.C., Swart, A., Meijer, A., Duizer, E., de Roda Husman, A.M., 2021. Quantitative Microbial Risk Assessment for Airborne Transmission of SARS-CoV-2 via Breathing, Speaking, Singing, Coughing, and Sneezing. Environ Health Perspect 129, 47002.

Sextro, R.G., Offermann, F.J., Nazaroff, W.W., 1986. Evaluation of indoor aerosol control devices and their effects on radon progeny concentrations. Environment International 12, 429-438.

Siegel, J.A., 2016. Primary and secondary consequences of indoor air cleaners. Indoor Air 26, 88-96.

Sliney, D., 2013. Balancing the risk of eye irritation from UV-C with infection from bioaerosols. Photochemistry and Photobiology 89, 770-776.

Sliney, D.H., Stuck, B.E., 2021. A Need to Revise Human Exposure Limits for Ultraviolet UV-C Radiation†. Photochemistry and Photobiology 97, 485-492.

Slob, M., van Ballegooij, M., Breugelmans, O., Esser, P., Groenewold, A., Janssen, I., Poelman, B., Schmidt, D., van de Weerdt, R., Woudenberg, F., van Overveld, A. 2019. GGD-richtlijn medische milieukunde: omgevingsgeluid en gezondheid (Bilthoven, Nederland, RIVM).

Su, C., Lau, J., Gibbs, S.G., 2016. Student absenteeism and the comparisons of two sampling procedures for culturable bioaerosol measurement in classrooms with and without upper room ultraviolet germicidal irradiation devices. Indoor and Built Environment 25, 551-562.

Szabadi, J., Meyer, J., Lehmann, M., Dittler, A., 2022. Simultaneous temporal, spatial and size-resolved measurements of aerosol particles in closed indoor environments applying mobile filters in various use-cases. Journal of Aerosol Science 160.

The International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 2004. ICNIRP Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). Health Physics 87, 171-186.

Tobisch, A., Springsklee, L., Schäfer, L.F., Sussmann, N., Lehmann, M.J., Weis, F., Zöllner, R., Niessner, J., 2021. Reducing indoor particle exposure using mobile air purifiers - Experimental and numerical analysis. AIP Advances 11.
van Holsteijn, R.C.A., Li, W.L. 2014. Resultaten van een monitoring onderzoek naar de binnenluchtkwaliteit- en energieprestaties van ventilatiesystemen in de woningbouw (Delft, Nederland, Consortium MONICAIR).
Versteeg, H. 2009. Onderzoek binnenmilieu kindercentra (Nieuwegein, Nederland, Lichtveld Buis & Partners BV).
Viana Martins, C.P., Xavier, C.S.F., Cobrado, L., 2022. Disinfection methods against SARS-CoV-2: a systematic review. J Hosp Infect 119, 84-117.
Waring, M.S., Siegel, J.A., Corsi, R.L., 2008. Ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners. Atmospheric Environment 42, 5003-5014.
Wei, J., Li, Y., 2016. Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. Am J Infect Control 44, S102-108.
Werkgroep Infectie Preventie 2016. Tuberculose: preventie van aerogene transmissie (Leiden, WIP, Leids Universitair Medisch Centrum).
World Health Organization, 2021a. Coronavirus disease (COVID-19): How is it transmitted? Date accessed: 23 juni 2022. https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/coronavirus-disease-covid-19-how-is-it-transmitted
World Health Organization 2021b. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19 (Geneva, Switzerland, World Health Organization).
World Health Organization 2021c. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide (Geneve, Zwitserland, World Health Organzation).
Zargar, B., Sattar, S.A., Kibbee, R., Rubino, J., Khalid Ijaz, M., 2022. Direct and quantitative capture of viable bacteriophages from experimentally contaminated indoor air: A model for the study of airborne vertebrate viruses including SARS-CoV-2. Journal of Applied Microbiology 132, 1489-1495.

Bijlage

Definities

In dit rapport worden de volgende definities gehanteerd:

Aerogene transmissie
Indirecte transmissie via zwevende infectieuze micro-organismen of virussen in aerosolen die over langere afstanden en tijd door de lucht kunnen worden verspreid. Transmissie is ook mogelijk als de bron niet meer in de ruimte aanwezig is (Centers for Disease Control and Prevention, 2012) of als iemand de gehele tijd op ruime afstand (meerdere meters, andere kant van de ruimte) van een besmettelijke persoon is geweest, in andere Engelstalige literatuur ook wel 'long-range airborne route' genoemd (Wei and Li, 2016). Aerogene transmissie kan ook plaatsvinden naar een andere ruimte via een ventilatiesysteem (Giesecke, 2017). Voorbeelden van infectieziekten waarbij aerogene transmissie een voorname rol speelt zijn mazelen, tuberculose en waterpokken.

Aerosolen
Een suspensie van vaste deeltjes in een gas. Aerosoldeeltjes kunnen bestaan uit verschillende materialen en afkomstig zijn van verschillende bronnen in het binnen- en buitenmilieu. Ook mensen scheiden aerosolen uit, bij bijvoorbeeld ademen, spreken, hoesten en niezen. Wanneer mensen geïnfecteerd zijn met SARS-CoV-2, kunnen deze aerosolen virusdeeltjes bevatten waarmee andere mensen geïnfecteerd kunnen worden. Deze worden ook wel 'infectieuze aerosolen' genoemd.

Desinfecteren
Het doden of inactiveren van een ziekteverwekker tot een aanvaardbaar niveau. Voor biociden geldt dat er een toelating nodig is van het 'College voor de toelating van gewasbeschermingsmiddelen en biociden' (Ctgb). Het Ctgb beoordeeld of er voldoende reductie plaatsvindt (meestal 4 tot 5 logreductie, d.w.z. 99,99 – 99,999 % afname) en of het product veilig is. Voor onder meer UVC-technieken zijn er op dit moment geen vergelijkbare eisen en kan de term 'desinfecterend' gebruikt worden als er een reductie van micro-organismen plaatsvindt.

Directe transmissie
Overdracht vindt plaats door nauw contact tussen de besmettelijke persoon en één of meerdere andere personen. Voorbeelden van directe transmissie zijn direct contact (hand geven, zoenen, omhelzen), seksuele transmissie en druppeltransmissie.

Druppeltransmissie ('druppelinfectie')
Directe transmissie van infectieuze virusdeeltjes die zich bevinden in respiratoire druppels en infectieuze aerosolen afkomstig uit de luchtwegen en welke op korte afstand (meestal < 1,5 meter) via de lucht direct van de geïnfecteerde persoon naar één of meerdere andere personen wordt overgedragen. Hieronder valt ook de druppelwolk of 'spray' die wordt gevormd door onder meer niezen, hoesten, praten en

zingen. In de geraadpleegde handboeken, de LCI-richtlijn COVID-19 en deze bijlage wordt verder geen onderscheid gemaakt in druppelafmeting bij directe transmissie zoals in sommige Engelstalige publicaties wel wordt gehanteerd met de term 'short-range airborne route' voor druppels ≤ 10 µm (Wei and Li, 2016) of < 60 µm (Liu et al., 2017). Voorbeelden van infectieziekten waarbij de zogenoemde druppeltransmissie een voorname rol speelt zijn kinkhoest, influenza en meningokokken-infectie (zie LCI-richtlijnen).

Indirecte transmissie
Overdracht van de besmettelijke persoon naar andere personen vindt plaats via onder meer voedsel, water, voorwerpen/oppervlakken of zwevende partikels in de lucht (aerosolen), veelal over een langere tijdspanne en/of afstand (aerogene transmissie). De besmettelijke persoon (reservoir/bron) hoeft niet meer aanwezig te zijn in de ruimte voor de overdracht. Voorbeelden van indirecte transmissie zijn transmissie via fomieten (besmette voorwerpen, oppervlakken) en aerogene transmissie.

Infectieuze aerosolen
Aerosolen afkomstig uit de luchtwegen van een besmette persoon, waarbij de content (virusdeeltjes) in staat is een andere persoon te besmetten (i.e. er is voldoende infectieus virus aanwezig).

Mobiele luchtreiniger
Verplaatsbaar apparaat waarmee eventueel aanwezige deeltjes (zoals virussen of bacteriën) in de lucht die door het apparaat stroomt worden tegengehouden en/of gedesinfecteerd. Dit wordt gedaan door virussen en bacteriën tegen te houden met bijvoorbeeld een HEPA-filter en/of te doden door bijvoorbeeld UVC-straling. In dit rapport worden ook UVC-luchtreinigingsapparaten die op het plafond of op de muur worden bevestigd in een ruimte geschaard onder 'mobiele' luchtreinigers.

Transmissie(route)
De wijze van overdracht van een pathogeen of besmetting. Er wordt onderscheid gemaakt in directe en indirecte transmissie. Veel infecties met een indirecte route kunnen ook direct overgedragen worden en omgekeerd.

Ventilatie
Het voortdurend verversen van lucht. De buitenlucht vervangt telkens (een deel van) de binnenlucht die vervuild is door bijvoorbeeld vocht, stof en ziekteverwekkers. Ventileren is mogelijk via natuurlijke ventilatie (bijvoorbeeld roosters of kieren) of via mechanische ventilatie (ventilatiesysteem).

Ventilatievoud (per uur)
Een maat voor de hoeveelheid ventilatie in een ruimte, weergegeven als het aantal keer per uur dat het totale volume van een ruimte vervangen wordt met verse lucht. Als eenheid wordt ook ACH gebruikt: 'air changes per hour'.

Zoekstrategie

Op 16-02-2022 zijn onderstaande zoekstrategieën uitgevoerd in Embase en Scopus.

Embase

No.	Query	Results
#20	#8 AND #17	5
#19	#17 AND #18	172
#18	'virus transmission'/exp OR 'airborne transmission'/exp OR 'aerosol'/exp OR 'disease transmission'/exp OR ((('covid*' OR 'coronavirus*' OR 'diseas*' OR 'virus*' OR 'aerosol*') NEAR/2 ('transmit*' OR 'transmission*')):ti,ab)	322643
#17	#14 OR #16	8384
#16	#13 AND #15	8067
#15	('mobile':ti,ab OR 'portabl*':ti,ab OR 'movabl*':ti,ab OR (('upper room' NEAR/3 ('uv' OR 'ultraviolet')):ti,ab)) NOT 'mobile phone':ti,ab	186744
#14	(('filter*' OR 'filtr*') NEAR/2 ('hepa' OR 'activated carbon' OR 'activated charcoal' OR 'polypropylen*' OR 'photoalkaly*')):ti	329
#13	#9 OR #10 OR #11 OR #12	200375
#12	'ozone generator'/exp OR 'ozone generator':ti	20
#11	'ionization'/exp OR 'ioniz*':ti	53477
#10	'ultraviolet radiation'/exp OR ((('uv' OR 'ultraviolet') NEAR/2 ('radiat*' OR 'germicidal*')):ti)	135470
#9	('air' NEAR/2 ('filter*' OR 'filtr*' OR 'sanitis*' OR 'treatm*' OR 'purif*' OR 'clean*' OR 'disinfect*')):ti,ab	12910
#8	#1 OR #2 OR #3 OR #4 OR #5 OR #6 OR #7	9
#7	'ultrafine particle removal and generation by portable air cleaners':ti	1
#6	'influence of a portable air treatment unit on health-related quality indicators of indoor air in a classroom':ti	2
#5	'a quantitative risk estimation platform for indoor aerosol transmission of covid-19':ti	1
#4	'bacterial community analysis of floor dust and hepa filters in air purifiers used in office rooms in ilas, beijing':ti	2
#3	'control of airborne infectious disease in buildings: evidence and research priorities':ti	1
#2	'uvc-based photoinactivation as an efficient tool to control the transmission of coronaviruses':ti	1
#1	'a review of methods to reduce the probability of the airborne spread of covid-19 in ventilation systems and enclosed spaces':ti	1

Scopus
n=78
(
TITLE(("air" W/2 ("filter*" or "filtr*" or "sanitis*" or "sanitiz*" or "clean*" or "purif*" or "disinfect*" or "treatm*")) OR (("uv" or "ultraviolet") W/2 ("germicid*" or "radiat*" or "upper ceiling*" or "upper roof*")) OR "ionis*" or "ioniz*" or "ozone generator*")
AND TITLE-ABS("mobil*" or "portabl*" or "moveabl*"))
OR TITLE-ABS(("filter*" or "filtr*") W/2 ("hepa" or "activated carbon" or "activated charcoal" or "polypropylen*" or "photoalkaly*"))
AND TITLE-ABS(("covid*" or "corona*" or "diseas*" or "virus*" or "aerosol*" or "airborn*") W/2 ("transmit*" or "transmission*"))

RIVM
De zorg voor morgen begint vandaag