

Zijn mobiele luchtreinigers de oplossing in klaslokalen?

De via de lucht overgedragen infectieuze respiratoire deeltjes (IRDs), ook wel aerosolen genoemd, zijn de primaire route van overdracht voor respiratoire infectieuze ziektes zoals COVID-19 [1]. Klaslokalen hebben een verhoogd risico op besmetting vanwege de lange en hoge bezetting [2]. Deze overdracht kan dichtbij plaatsvinden, maar ook verder weg. Tijdens een door ZonMw gefinancierd veldonderzoek naar de verspreiding van het SARS-CoV-2 virus en de binnenmilieucondities in klaslokalen [3], bleek zowel de ventilatie als de temperatuur onvoldoende te zijn. Scholen hebben behoefte aan beheersbare maar ook betaalbare oplossingen. Mobiele luchtreinigers (MLRs) zijn een mogelijke (betaalbare) oplossing om overdracht van IRDs op lange afstand te verminderen. In opdracht van het Ministerie van Onderwijs Cultuur en Wetenschap werd daarom een vervolgonderzoek gestart met de vraag: zouden mobiele luchtreinigers in een toekomstige pandemie de situatie kunnen verbeteren?

Voor het beantwoorden van deze vraag zullen eerst de kenmerken uitgezocht moeten worden waaraan mobiele luchtreinigers en hun opstelling (plaatsing in het lokaal) moeten voldoen om een effectieve reiniging van de lucht in klaslokalen te realiseren. Omdat er vele modellen van mobiele luchtreinigers op de markt zijn, vereist dit allereerst een zorgvuldige selectie van geschikte modellen en een veldtoets om de juist configuratie en werking in de praktijk vast te leggen.

Het onderzoek bestond daarom uit twee studies: 1) het selecteren van geschikte mobiele luchtreinigers middels een voorselectie, experimenten in de Experience room van het SenseLab, en validatie in een 'echt' klaslokaal, beide op de faculteit Bouwkunde van de TU Delft [4]; en 2) het testen van drie typen MLRs op scholen in een veldstudie [5].

Selectie geschikte MLRs

Voorselectie

Vanwege de grote verscheidenheid aan beschikbare MLRs (meer dan 300) werden op basis van een lijst met criteria (Tabel 1) zeven MLRs met een variëteit aan luchtreinigingstechnieken, luchtstromingspatroon, fan capaciteit en afmetingen aangeschaft en getest (Tabel 2). Deze zeven MLRs zijn in de Experience room (70 m³, ingericht als een klaslokaal) onderzocht, middels: 1) een aerosolen afname test om de verwijdering van aerosolen in de tijd en daarmee de CADR te bepalen, en 2) een paneltest om de perceptie van gebruikers van het geluid en de tocht veroorzaakt door de MLRs gecombineerd met geluid- en luchtsnelheidsmetingen te onderzoeken. Op basis van de uitkomsten werden de optimale condities (e.g. aantal benodigd, stand, en plaatsing) van elk type MLR bepaald.

Aerosolen afnametest in de Experience room

Met behulp van een aerosolen generator, die gevoed werd met kunstmatig speeksel, werden aerosolen met een gemiddeld diameter van 4 µm geproduceerd en met twee ventilatoren gemengd, totdat de deeltjesconcentratie (PM_{2,5} (deeltjes met een diameter < 2,5 µm) en PM₁₀ (deeltjes met een diameter < 10 µm)), gemeten op zes locaties in de Experience room, stabiel was (zie Foto 1). Daarna werd de productie stopgezet en de aanwezige MLRs aangezet. De opbouwfase duurde ongeveer 60 minuten, de afnamefase zo'n 90 minuten. Behalve de afnametest met de

Selectiecriteria

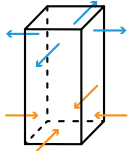
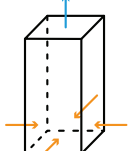
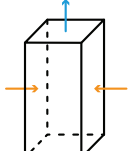
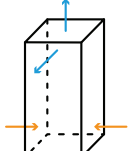
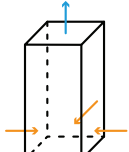
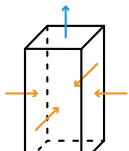
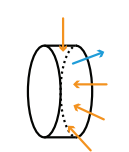
1	Geen MLRs met gebruik van UV-C.
2	Geen MLRs met een filter klasse lager dan H13.
3	Geen MLRs met een minimum geluidsniveau hoger dan 35 dB(A).
4	De MLR heeft minimaal een CADR van 250 m ³ /uur: bij maximaal 4 MLRs in een klaslokaal (op alle hoeken) en een totaal benodigde fan capaciteit, uitgedrukt in CADR (Clean Air Delivery Rate), van 1000 m ³ /uur (gebaseerd op 8.5 - 10 l/s per persoon en 30 personen).
5	Prijs per MLR vermenigvuldigd met het aantal benodigde aantal MLRs in een klaslokaal is maximaal 3000 euro (incl. BTW).

Tabel 1: Lijst met selectiecriteria.

MLRs aan, werd ook een zogeheten natuurlijke afnametest gedaan, waarbij de afname in de tijd werd gemeten zonder dat er een MLR aanstond. Na en voor elke test werd de Experience room gedurende 15 minuten geventileerd met 1200 m³ per uur (buitenlucht gefilterd met een H14 HEPA filter). Tijdens de afnametesten stond de ventilatie uit. Elke MLR werd voor verschillende configuraties (locatie en aantal) en standen getest.

Paneltest in de Experience room

Acht proefpersonen (4 man en 4 vrouw) namen deel aan de perceptietesten die in juni en juli 2023 plaatsvonden. Bij elke test werd een panel van 6 proefpersonen (3 man en 3 vrouw) gevraagd plaats te nemen in de Experience room (zie Foto 2) om vervolgens het geluid en tocht

MLR ^a	Schoonmaak- techniek ^b	Stromings- patroon	Fan capac- iteit ^b (m ³ /uur)	Standen	Gelu- ids-niveau ^b [dB(A)]	Dimensies ^b (cm x cm x cm)	Aantal nodig	Prijs (incl. BTW) ^b (€)
1	HEPA + AK		1000	1-10	30-62	19,0 x 19,6 x 101,8	2	500
2	HEPA + ES + AK		610	1-3	19-57	30,6 (Φ) x 70,5	4	480
3	ES		330	1-4	19-53	27,0 x 27,0 x 50,0	4	380
4	ES + AK		735	1-3	27-55	34,0 x 34,0 x 85,5	2	1100
5	ES + AK		1386	1-5	33-49	38,0 x 38,0 x 76,0	1	1900
6	HEPA		565	1-8	18-51	33,2 x 33,6 x 60,6	2	500
7	HEPA		750	1-8	26-65	68,8 (Φ) x 25,4	2	1500

Tabel 2: Informatie van de geselecteerde mobiele luchtreinigers.

a: MLR: mobiele lucht reiniger; b: zoals aangegeven door de producent/verkoper. HEPA = High-efficiency Particulate Air; ES = Electrostatisch; AK = geActiveerd Koolstof.

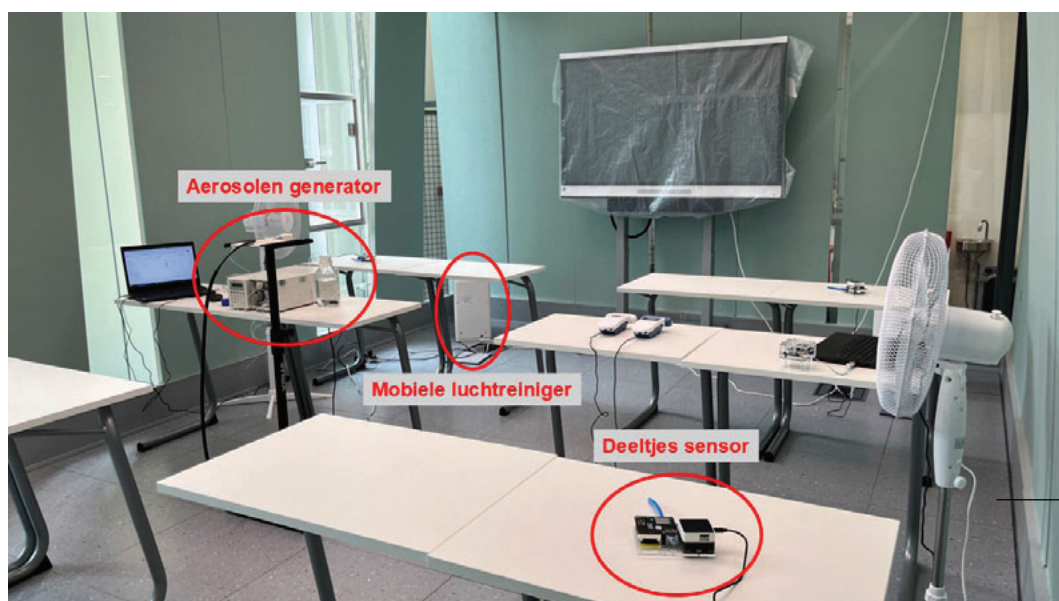


Foto 1: Opstelling aerosolen afname test in de Experience room van het SenseLab.

veroorzaakt door de verschillende MLRs te beoordelen. Bij elke beoordeling werden ze eerst gevraagd om aan te geven of ze geluid of tocht waarnamen. Indien ja, dan werden ze gevraagd om op een schaal van 1 tot 5 de intensiteit (geluid: rustig tot luid; tocht: nauwelijks tot sterk) en hun beoordeling (van slecht naar goed) daarvan aan te geven. Elke sessie bestond uit het testen van verschillende configuraties en standen voor één van de zeven MLRs in willekeurige volgorde. Met de uitkomsten werd voor iedere MLR de optimale configuratie en stand bepaald.

Test in 'echt' klaslokaal op faculteit

De uitkomst van de lab studie werd verder gevalideerd door het herhalen van de aerosolen afname test in een echt klaslokaal (139 m³) op de faculteit Bouwkunde van de TU Delft (zie Foto 3). De aerosolen afname test werd voor alle zeven MLRs onder de eerder bepaalde optimale condities per MLR uitgevoerd.

Resultaten en conclusies

De resultaten van zowel de labstudies als de test in het 'echte' klaslokaal toonden aan dat behalve MLR1, alle MLRs IRDs effectief uit de gehele ruimte konden verwijderen, ongeacht de toegepaste technologie (zie Figuur 1). Voor het

Foto 2: Panel perceptie test t.b.v. het beoordelen van het geluid en tocht geproduceerd door de verschillende mobiele luchtreinigers in de Experience room.





Foto 3: Opstelling in 'echt' klaslokaal.

behalen van een zo hoog mogelijke CADR is de door de MLR veroorzaakte luchtstroming van cruciaal belang: een MLR met een opwaartse luchtstroming (verticaal of onder een hoek; MLRs 2-7) verspreidt lucht efficiënter dan een MLR met een horizontale luchtstroming (MLR1). Daarnaast speelt de locatie van de MLR (of meerdere MLRs) een belangrijke rol: voor maximale schoonmaak van de lucht moet de luchtstroming van de MLRs altijd gericht zijn op de bezette zone in de ruimte.

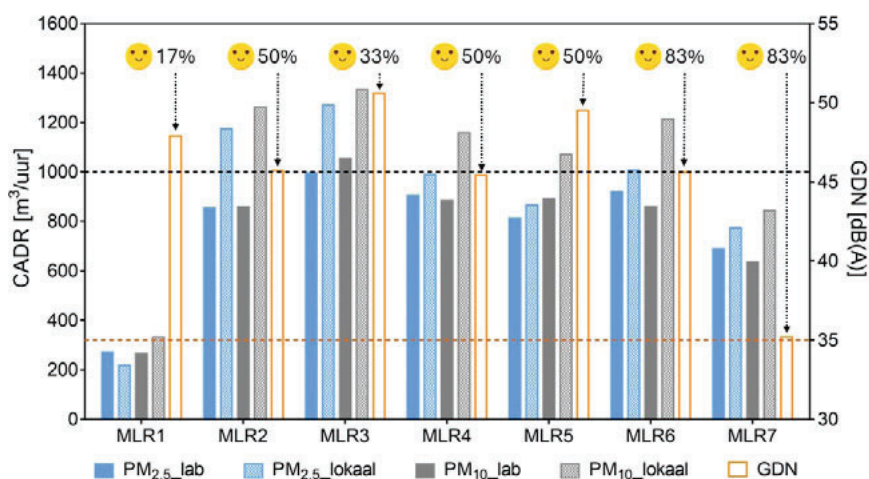
De aanvullende testen in een klaslokaal op de universiteit bevestigden de eerdere bevindingen in de Experience room en benadrukten bovendien het belang van het gebruik van meerdere MLRs, naarmate de ruimte groter wordt. Verder bleek uit de

resultaten dat de combinatie van MLRs met mechanische ventilatie een hogere CADR oplevert dan alleen MLRs. De hoge stand veroorzaakte meestal een overschrijding van het voorgeschreven maximale toelaatbare geluidsniveau en werd als onacceptabel ervaren door het testpanel. De lichtsnelheden voldeden over het algemeen aan de richtlijnen en kregen een positieve feedback van het testpanel. Deze bevindingen benadrukken het belang van gebruikersfeedback bij prestatieoptimalisatie (luchtreiniging en gebruikerscomfort) van MLRs in klaslokalen.

Vervolgstudie op scholen

Om de haalbaarheid van de hierboven genoemde strategieën te onderzoeken, werd in november en

Figuur 1: Testresultaten van zowel de CADR van $PM_{2.5}$ en PM_{10} in de Experience room als in het 'echte' klaslokaal gecombineerd met de geluidsmetingen (SPL) en beoordelingen van het geproduceerde geluid door het panel. De zwarte gestippelde lijn geeft de gewenste CADR weer bij een bezetting van 30 studenten in het klaslokaal ($1000 \text{ m}^3/\text{uur}$). De oranje gestippelde lijn geeft het maximaal toelaatbare geluidniveau (GDN) veroorzaakt door installaties in een klaslokaal aan (35 dB(A)).



December 2023 een vervolgstudie uitgevoerd in 45 klaslokalen van vijf Nederlandse basisscholen. De studie omvatte 1) het beoordelen van de praktische uitvoerbaarheid van de bepaalde strategieën (plaatsing, aantal MLRs, en stand) en 2) het monitoren van $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO_2 (kooldioxide), en TVOS (totaal vluchtige organische stoffen) in drie klaslokalen per school, tijdens een controle en een interventieperiode van elk drie weken.

School 1 had acht klaslokalen, school 3 tien, en de overige elk meer dan tien klaslokalen. Daarom werd op scholen 1 en 3 alle klaslokalen voorzien van MLRs, en op de overige scholen negen klaslokalen. De klaslokalen waren gelijk in afmetingen, vloeroppervlak 40 tot 50 m², met een bezetting van 20 tot 25 kinderen (5-12 jaar). Alle klaslokalen hadden meerdere te openen ramen en deuren voor natuurlijke ventilatie. Alleen school 1 had additioneel gebalanceerde mechanische ventilatie.

Interventie met MLRs

Drie MLRs met de beste prestaties uit de experimentele studie werden geselecteerd (MLR 4, 6 en 7) (zie Tabel 2) en willekeurig toegewezen aan de klaslokalen van elke school. Alle drie de MLRs werkten het best met twee apparaten, waarvan één achter in het klaslokaal en één voor in het klaslokaal, met de uitgaande luchtstroom naar de kinderen toe. In november 2023 werden daarom in elk klaslokaal twee MLRs van een bepaald type (4, 6 of 7) geplaatst, met de optimale stand respectievelijk hoogste, hoogste, en laagste stand. Instructies voor het gebruik van de MLRs werden zichtbaar met een sticker op de apparaten geplakt. Daarnaast werd in drie klaslokalen per school, elke voorzien van MLR 4, 6 of 7, een paneel met sensors voor CO_2 , $PM_{2.5}$, PM_{10} en TVOS op het bureau van de leerkracht geplaatst.

Vanaf de tweede week van november 2023, begonnen scholen 1, 4, en 5 voor drie weken met de AAN-periode, en scholen 2 en 3 met de UIT-periode. Na drie weken werd gewisseld.

Resultaten en conclusies

Statistische analyse (Wilcoxon signed rank test) werd uitgevoerd om de gemiddelde concentraties van elke parameter per klaslokaal gemeten in de AAN en UIT-periode met elkaar te vergelijken. De uitkomsten weergegeven in Tabel 3 laten zien dat de verschillen alleen voor $PM_{2.5}$ en PM_{10} statistisch relevant zijn en dus bevestigen dat de MLRs effectief waren in het verlagen van de deeltjes concentraties.

De MLRs hadden, zoals verwacht, geen significant effect op de CO_2 -concentraties: CO_2 wordt voornamelijk door uitademing van aanwezige personen en ventilatie bepaald en niet door MLRs uit de lucht gehaald. Ook was er geen significante afname van TVOS-concentraties, zelfs niet in de klaslokalen met MLR4, die een actief koolstoffilter bevat, waarvan eigenlijk verwacht wordt dat die VOSsen afvangt.

Het inzetten van MLRs in klaslokalen bracht praktische uitdagingen met zich mee, zoals beperkte ruimte, overvolle indelingen en onvoldoende stopcontacten, wat aanpassingen in de plaatsing van de MLRs en het gebruik van verlengsnoeren noodzakelijk maakte. Hoewel de positie niet altijd hetzelfde was als de aanbevolen positie, zo lang als één apparaat aan de voorkant en één aan de achterkant stond, met de luchtstroom gericht op het bezette gebied, verlaagde alle MLRs de $PM_{2.5}$ en PM_{10} deeltjesconcentraties.

Alhoewel het meten van de binnenluchtkwaliteit op slechts één locatie in het klaslokaal (bij de leerkracht) niet geheel representatief is voor de hele ruimte [6], was het voldoende in deze pilotstudie om te de effectiviteit van de MLRs te demonstreren. Om echter te bepalen of de MLRs de lucht in het hele klaslokaal hetzelfde schoonmaakt, zijn meerdere meetpunten nodig.

Binnenlucht parameter	Aan	Uit	P
$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	1,2 (1,0-1,6)	3,0 (2,5-3,5)	0,001
PM_{10} ($\mu g/m^3$)	5,0 (2,8-5,9)	8,9 (5,8-9,9)	< 0,001
CO_2 (ppm)	985 (847-1135)	1014 (833-1169)	0,158
TVOS (ppb)	1000 (770-1812)	1066 (670-2228)	0,925

Tabel 3: Vergelijking van gemeten binnenlucht parameters tussen AAN en UIT periode d.m.v. statistische analyse (Wilcoxon signed rank test) voor alle MLRs.

Conclusies en aanbevelingen

De gemeten afname van fijnstofdeeltjes van $PM_{2.5}$ en PM_{10} in de lucht van klaslokalen wanneer de luchtreinigers aanstonden, bevestigde het aanbevolen gebruiksprotocol en eigenschappen van de luchtreinigers zoals bepaald in de selectiestudie, dat wil zeggen: het gebruik van twee mobiele luchtreinigers die aan tegenoverliggende zijden van het klaslokaal worden geplaatst, waarbij de luchtuitvoer bij voorkeur naar boven gericht is met een minimale aanbevolen totale luchtreinigingscapaciteit van 800-1000 m³/uur voor een klas met 30 personen.

Naast de metingen van de verschillende luchtparameters, werden ook interviews gehouden met leerkrachten en leerlingen. De uitkomsten lieten zien dat de MLRs, ondanks de zorgvuldige selectie, over het algemeen een negatieve impact op geluid en koude (als gevolg van tocht) ervaringen

hadden. Voor zoveel mogelijk behoud van comfort wordt daarom daarnaast aanbevolen een luchtreiniger te selecteren waarvan het maximale geluidsniveau van de luchtreinigers wanneer beide apparaten aanstaan onder de 35 dB(A) blijft en de luchtstroom snelheid in de gebruikszone van het klaslokaal < 0,2 m/s.

Dankbetuiging

Beide studies zijn gefinancierd door het Ministerie van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap. De eerste studie werd gecoördineerd door de TU Delft en uitgevoerd samen met de Universiteit van Amsterdam. De tweede studie was onderdeel van het project AIRIAS dat werd gecoördineerd door de Universiteit Medisch Centrum Utrecht. Overige deelnemers waren de Universiteit Utrecht, Ecraid, Universiteit van Amsterdam, en de TU Delft.



Foto 4: Beide auteurs Er Ding (links) en Philomena Bluysen (rechts) tussen de in de test gebruikte luchtreinigers.

Referenties

1. Bluysen PM (2023) Van ontkenning naar acceptatie van 'airborne' transmissie: waarom duurde het zo lang? TVVL Magazine no.2, April: 36-43.
2. Ding E, Zhang D, Bluysen PM (2022) Ventilation regimes of school classrooms against airborne transmission of infectious respiratory droplets: A review, Building and Environment 207: 108484.
3. Ding E, Zhang D, Hamida A, García-Sánchez C, Jonker L, de Boer AR, Bruijning PCJL, Linde KJ, Wouters IM, Bluysen PM (2023) Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and preventive measures, Building and Environment 229:109922.
4. Ding E, Giri A, Gaillard A, Bonn D, Bluysen PM (2024) Using mobile air cleaners in school classrooms for aerosol removal: Which, where and how, Indoor and Built Environment 33(10): 964-87.
5. Ding E (2025) Hoofdstuk 4 in: Healthy Air for children, strategies for ventilation and air cleaning to control infectious respiratory particles in school classrooms, dissertation, Faculteit Bouwkunde, TU Delft, Delft.
6. Zhang D, Ding E, Bluysen PM (2022) Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring, Indoor and Built Environment 31(4): 1107-26.