

Anhang C: Luftqualität in Schulräumen

Anhang zur Dokumentation «Saubere Raumluft – jetzt!» für Schulgemeinden, präsentiert von [#ProtectTheKids](#), v1.21, 22. Sept. 2022.

Dieser Anhang richtet sich an Schulpräsidenten und Schulverwaltungsleitende von Schulgemeinden und Schulkreisen, Entscheidungsträger/-innen Bildung und Gesundheit in Gemeinden sowie an Stellen im Bereich Gebäudetechnik/Raumklima.

Autoren:

Fredy Neeser
Dr. sc. techn. ETH
Wissenschaftliche Beratung

Andrea Hadorn-Stuker
Erziehungswissenschaftlerin
lic. phil. I und MSc, Vorstandsmitglied

Kontakt:

[#ProtectTheKids](#)
medien@protect-the-kids.ch

Im vorliegenden Anhang werden verschiedene Ansätze zur Verbesserung der Luftqualität in Klassenzimmern verglichen.

Für eine gesunde Raumluft zu sorgen und gleichzeitig Energie zu sparen ist je nach Gebäudestandard und Aussentemperatur eine Herausforderung. Flexible Lösungen für saubere Raumluft, welche beide Ziele erreichen, lassen sich durch eine geeignete Kombination von Ventilation/Lüften und Filtration bzw. Deaktivierung von Aerosolen realisieren. Mobile Luftreiniger ermöglichen eine rasche Umsetzung in Räumen ohne Lüftungssystem und in Gebäuden, deren Lüftungssysteme nicht kurzfristig saniert werden können.

Insbesondere im Hinblick auf den Winter 2022/23, aber auch mit einer längerfristigen Sicht, widmen wir uns folgenden Fragestellungen:

- Welche Konzepte ermöglichen eine rasche Verbesserung der Luftqualität in Schulhäusern bzw. Schulräumen, welche aktuell über kein Raumklimasystem verfügen, und welche eignen sich für Schulhäuser, welche nach dem Minergie-Standard gebaut wurden oder mit einem veralteten Raumklimasystem ausgerüstet sind?
- Wie lässt sich ein Lüftungskonzept, welches die CO₂-Konzentration in einem gesundheitlich akzeptablen Bereich hält und gesundheitsgefährdende Aerosole soweit als möglich entfernt, sowohl ökonomisch als auch energieeffizient realisieren?
- Angesichts der vorhersehbaren Energiekrise im Winter 2022/23 und auch längerfristig im Interesse nachhaltiger Lösungen: Wie können Ventilation und HEPA-Filtration für eine sehr gute Reduktion der respiratorischen Aerosole bei bestmöglicher Energieeffizienz kombiniert werden?

C.1. Lüften alleine reicht nicht

Regelmässiges Lüften durch Öffnen der Fenster garantiert leider nicht zuverlässig und nachhaltig eine ausreichende Luftqualität. Das oft gepriesene Stosslüften kann zwar kurzfristig Abhilfe schaffen, führt jedoch zu hohen Peaks in der Konzentration von CO₂ und Aerosolen. Bei ungünstigen Bedingungen wie tiefen/hohen Aussentemperaturen, zu viel Wind (Durchzug), Lärm, Feinstaub/Smog in städtischen Gebieten etc. ist Stosslüften einem angenehmen Raumklima nicht förderlich.

Für CO₂-Konzentrationen unter 1000 ppm müssen Klassenzimmer ohne Raumklimasystem bei einer Belegung mit ca. 25 Personen je nach Aktivität bis zu drei Mal pro Stunde gelüftet werden, was die Lektionsgestaltung erheblich stören kann. In der Folge wurden die CO₂-Sensoren mancherorts kurzerhand ausser Betrieb gesetzt. Ein Klassenzimmer drei Mal pro Stunde zu lüften ist weder bei tiefen Aussentemperaturen (wesentlich unter 10 Grad Celsius ⇒ grosser Wärmeverlust und grosse Schwankungen der Raumtemperatur) noch in Hitzeperioden (Aussenluft wärmer als Raumluft) praktikabel.

Insbesondere bei geringer Temperaturdifferenz zur Aussenluft und bei Windstille ergibt freies Fensterlüften keine ausreichende Luftqualität, auch nicht bei mehrmaligem Öffnen der Fenster pro Stunde; die Luft wird sogleich wieder stickig. Auch in Schulhäusern, welche nach dem Minergie-Standard gebaut wurden, haben die Klassenzimmer häufig eine unzureichende Frischluftzufuhr; in manchen Gebäuden lassen sich nicht einmal die Fenster öffnen. Ein unzureichender Luftaustausch macht sich durch eine rasch steigende CO₂-Konzentration bemerkbar.

Das Delegieren der Verantwortung ausschliesslich an die Lehrpersonen ist nicht ausreichend und zielführend, weil ohne technische Hilfsmittel wie mechanische Ventilation und Filtration eine gute Luftqualität in dicht belegten Klassenzimmern nicht erreichbar ist.

Eine ausreichende Reduktion der Aerosol- und CO₂-Konzentrationen in Schulräumen ist unerlässlich für ein gesundes Schulklima, erfolgreiches Lernen und zum Schutz von Schülerinnen, Schülern und Lehrpersonen. Konkrete Massnahmen für eine deutliche Verbesserung der Luftqualität in Schulräumen sind längst überfällig.

Die Gemeinden stehen in der Verantwortung bei den Schulgebäuden der Volksschule, aber die Kantone tragen eine Mitverantwortung und können es nicht alleine den Gemeinden überlassen, ob und wie sie dies angehen und umsetzen.

[#ProtectTheKids](#) setzt sich dafür ein, dass die Kantone Richtlinien für eine bessere Luftqualität in Schulräumen erlassen und in Zusammenarbeit mit den Gemeinden zweckmässige und wirkungsvolle Lösungen fördern.

C.2. Mechanische Ventilation

Wenn keine Möglichkeit für eine Querlüftung besteht, kann unter Umständen nur mit Hilfe von Ventilatoren ein ausreichender Luftaustausch erzielt werden.

In der italienischen Region Marche wurde in einer Kohorten-Studie (siehe [Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools](#)) mit Beteiligung von über 10'000 Klassenzimmern der Zusammenhang zwischen mechanischer Ventilation und der Übertragung von SARS-CoV-2 untersucht. Für Klassenzimmer, welche mit mechanischer Ventilation ausgerüstet sind, fand die Studie eine Reduktion des relativen Infektionsrisikos bei zunehmender *Ventilationsrate*: Eine Rate im Bereich von 10 bis 14 Litern pro Sekunde pro Person reduzierte die Infektionswahrscheinlichkeit für Schülerinnen und Schüler um 80 % gegenüber Klassenzimmern

mit ausschliesslich natürlicher Belüftung. Jede weitere Erhöhung der Ventilationsrate um 1 Liter pro Sekunde pro Person reduzierte das relative Infektionsrisiko um 12 bis 15 %.

C.3. Gesunde Raumluf und Energieeffizienz: Wie erreichen wir beides?

Grundsätzlich gibt es für eine gesunde Raumluf mehrere Methoden, welche kombiniert werden können und sollen, nämlich

1. Ventilation/Lüften (Frischluf zuführen und Abluf wegführen: O₂-Konzentration erhöhen, CO₂-Konzentration reduzieren und Aerosole verdünnen);
2. Aerosole filtern (mit HEPA-Filtern in mobilen Luftreinigern oder Lüftungssystemen mechanisch aus der Umluf entfernen);
3. Infektiöse Aerosole deaktivieren (in der Umluf mittels UV-C unschädlich machen).

Dieses Vorgehen deckt sich mit der Strategie «Saubere Luft für pandemiegerechte Gebäude» [\[Riediker-2022b\]](#) (siehe White Paper «Clean air for pandemic-proof buildings» [\[Riediker-2022c\]](#)) der Schweizer *Expertengruppe für pandemiegerechte Gebäude* – insbesondere mit der Phase 1 («Einführung und Begleitung temporärer Massnahmen für saubere Luft») dieser Strategie.

Auch CDC, die US-Behörde für öffentliche Gesundheit, propagiert in [«Reducing SARS-CoV-2 in Shared Indoor Air»](#) das Kombinieren dieser Methoden.

Alle drei Methoden reduzieren die Konzentration gesundheitsgefährdender Aerosole in der gemeinsam genutzten Raumluf. Gemäss [«Mask Use and Ventilation Improvements to Reduce COVID-19 Incidence in Elementary Schools»](#) war die Inzidenz von COVID-19 bei einer Studie mit 169 Primarschulen im Staat Georgia (USA) 35 % tiefer in 39 Schulen, welche alleine mit Lüften arbeiteten, und 48 % tiefer in 31 Schulen, welche Lüften und Filtern kombinierten.

Anhand eines Simulationsmodells wurde in [«Efficacy of portable air cleaners and masking for reducing indoor exposure to simulated exhaled SARS-CoV-2 aerosols – United States, 2021»](#) für ein Konferenz-/Klassenzimmer gezeigt, dass Filterung mit zwei mobilen HEPA-Luftreinigern die Belastung der Anwesenden mit den Partikeln einer infektiösen Person um 65 % reduzierte, in Kombination mit dem Tragen von Masken um 90 %. Auch FFP2- oder FFP3-Masken filtern Aerosole – mit dem Vorteil, dass infektiöse Partikel bereits an der Quelle grösstenteils eliminiert werden.

Wenn die Belüftung aus energetischen Gründen Umlufanteile enthält, dann müssen diese mit HEPA-Filtern gefiltert oder mit UV-C desinfiziert werden, bevor sie dem Raum zugeführt werden. Hier fokussieren wir auf die Methoden 1 und 2.

Das mehrmalige Lüften pro Stunde ist im Laufe der Pandemie mancherorts zum Standard geworden. Doch während der Heizperioden und an Hitzetagen ist auch die Energieeffizienz ein äusserst wichtiges Kriterium.

HEPA-Luftfiltergeräte (siehe **Anhang B: Mobile Luftreiniger für Schulen und Betreuungseinrichtungen**) oder auch Lüftungssysteme, welche mit HEPA-Filtern ausgerüstet sind, entfernen potenziell virenbeladene Aerosole aus der Raumluf. HEPA-Filtration ist für die Lufthygiene besonders wichtig in der kalten Jahreszeit, wenn das Lüften häufiger unterbleibt, und sie ist zwingend notwendig für rezirkulierte Luft. Raumluf, welche mit genügend Aerosol-reduzierenden Luftwechselln pro Zeiteinheit erneuert wird, ist gesundheitlich unbedenklich, auch wenn sie eine

gegenüber der Aussenluft erhöhte CO₂-Konzentration bis zu einem Richtwert von ca. 1400 ppm aufweist.

Mobile Luftreiniger sind besonders geeignet für Räume ohne Lüftungssystem und ermöglichen auch eine kostengünstige, schnell umsetzbare Übergangslösung für Räume mit einem Lüftungssystem, welches nur im Rahmen einer Sanierung mit HEPA-Filtern ausgestattet werden kann. Bei Neubauten und Sanierungen empfiehlt es sich, die Lüftungssysteme mit HEPA-Filtern der Klasse 13 oder 14 auszurüsten.

C.4. Effektive Methoden zur Verbesserung der Raumluft

Aerosole werden sowohl durch Ventilation als auch durch HEPA-Filtration aus der Raumluft entfernt. Die Volumenströme von Ventilation ($Q_{\text{ventilation}}$) und Filtration ($Q_{\text{filtration}}$), welche in Kubikmetern pro Stunde gemessen werden, tragen somit beide zur Reduktion der Aerosole bei.

Sowohl Ventilation als auch Filtration führt normalerweise durch *Vermischung* der eingeführten Luft mit der restlichen Raumluft zu einer *Verdünnung der Aerosole* (sog. [Verdünnungslüftung oder Mischlüftung](#)). Zur Bestimmung, wie schnell Aerosole verdünnt werden, ist es nützlich, die Volumenströme in Relation zum Raumvolumen V zu betrachten. Man verwendet dazu *Luftwechselraten* oder *Air Change Rates*

$$ACR_{\text{ventilation}} = Q_{\text{ventilation}} / V$$

$$ACR_{\text{filtration}} = Q_{\text{filtration}} / V$$

mit der Einheit "Luftwechsel pro Stunde". Wie schnell Aerosole verdünnt werden, wird durch die *Aerosol-reduzierende Luftwechselrate* [\[Riediker-2020\]](#)

$$ACR_{\text{aerosol}} = ACR_{\text{ventilation}} + ACR_{\text{filtration}}$$

bestimmt. In Gegenwart einer infizierten Person, welche kontinuierlich mit einer Rate R_v (Anzahl Virionen pro Stunde) Viren emittiert, ergibt sich bei Mischlüftung und einer gegebenen Luftwechselrate ACR_{aerosol} im stationären Zustand (welcher sich einstellt, wenn Viren-Emission und Luftwechsel im Gleichgewicht sind) eine *Aerosol-Konzentration* in Virionen pro m³ von

$$c_{\text{aerosol}} = R_v / (V \times ACR_{\text{aerosol}}).$$

Ventilation und Filtration werden somit zur Reduktion der Aerosol-Konzentration mit Vorteil kombiniert. Dies gilt ungeachtet der Tatsache, dass die CO₂-Konzentration nur durch Ventilation reduziert werden kann. Es gilt insbesondere auch für Schulhäuser nach Minergie-Standard sowie allgemein für Schulräume mit Lüftungsanlagen, in welchen zugunsten der Energieeffizienz mit Umluftanteilen gearbeitet wird. Die Erfahrungen mit Superspreading-Ereignissen in der Corona-Pandemie zeigen, dass rezirkulierte Raumluftanteile durch HEPA-Filtration gereinigt werden müssen, sei es mit mobilen Luftreinigern oder durch Nachrüsten der Lüftungsanlage, wie die *Expertengruppe für pandemiegerechte Gebäude* in ihrer Strategie festhält [\[Riediker-2022b\]](#).

Bei Schulräumen in Standardgrösse (Fläche 72 m², Volumen ca. 200 m³) mit 25 Jugendlichen wird für eine wirksame Entfernung und Verdünnung respiratorischer Aerosole eine Luftwechselrate ACR_{aerosol} von 5 bis 6 Luftwechseln pro Stunde empfohlen [\[Riediker-2022c\]](#).

Beim Kombinieren von Ventilation und Filtration sind Luftwechsel infolge Ventilation bis zu einem gewissen Punkt austauschbar mit Luftwechseln, welche durch Filtration erzielt werden. Solange nämlich die CO₂-Konzentration in einem mittleren, akzeptablen Bereich unter ca. 1400 ppm

verbleibt, kann $ACR_{ventilation}$ reduziert und $ACR_{filtration}$ entsprechend erhöht werden, ohne dass sich die Aerosol-Gleichgewichtskonzentration ändert.

Das folgende Beispiel zeigt, dass eine Kombination von Ventilation und Filtration mit massvoller Reduktion der Ventilation um 33 % und grosszügig bemessener Filtration bei verbesserter Energiebilanz sogar eine wesentlich tiefere Aerosol-Gleichgewichtskonzentration erreichen kann als eine reine Ventilationslösung.

Wie Abb. 1 für *Fensterlüftung mit Abluftventilatoren (FLA)* [MPIC-2022] zeigt, ermöglicht die Kombination mit Filtration abhängig von der Aussentemperatur beträchtliche Einsparungen bei der Heizleistung pro Klassenzimmer. Die grössere Steilheit im Bereich von 9 bis 15 Grad Celsius kommt dadurch zustande, dass die *Heizgrenze* (die Aussentemperatur, welche das Einschalten der Heizung erforderlich macht) bei einer Reduktion des Volumenstroms der Lüftung um 33 % deutlich tiefer zu liegen kommt.

Zum Beispiel neigt sich die rote Kurve (leistungsfähige mechanische Ventilation mit 1200 m³/h) im Bereich zwischen 12 und 15 Grad Celsius stärker, denn bei einer Reduktion des Lüftungsvolumenstroms um 33 % muss die Heizung erst bei einer Aussentemperatur von 12 Grad Celsius eingeschaltet werden, d. h. die Heizgrenze verschiebt sich um 3 Grad nach unten.

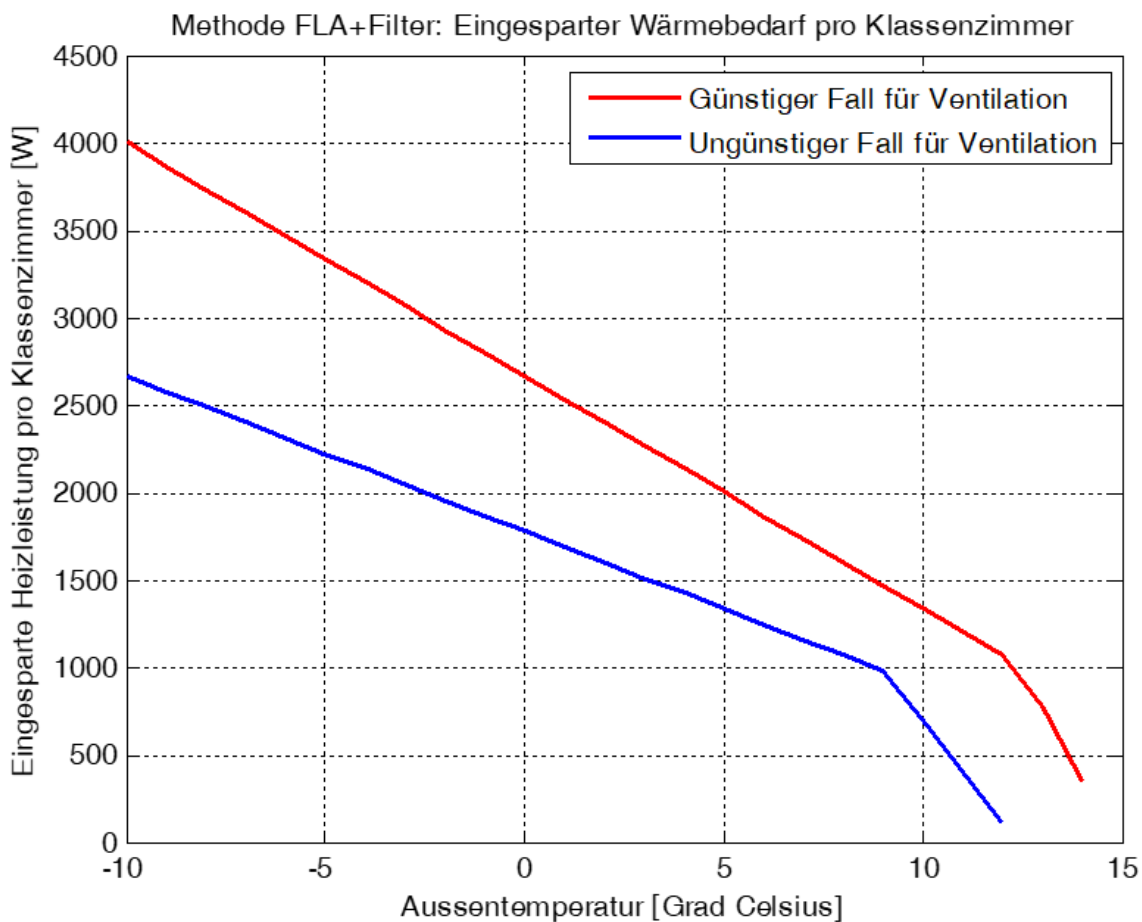


Abb. 1: Eingesparte Heizleistung pro Klassenzimmer bei Fensterlüftung mit Abluftventilatoren (FLA) in Kombination mit Filtration (mobile Luftreiniger).

Für die Filtration kommen hier drei mobile Luftreiniger zum Einsatz, welche bei 50 % der Maximalgeschwindigkeit betrieben werden und dabei eine effektive $CADR_{total}$ (total Clean Air Delivery Rate) von 800 m³/h erreichen. Die totale Leistungsaufnahme der drei Luftreiniger (ca. 60 Watt auf mittlerer Stufe) ist gegenüber der eingesparten Heizleistung vernachlässigbar.

Tabelle 1 zeigt zwei verschiedene Methoden der Ventilation, *Dauerlüften mit Kippfenstern* (DLK) sowie *Fensterlüftung mit Abluftventilatoren* (FLA) [MPIC-2022] zuerst ohne, dann in Kombination mit Filtration durch mobile Luftreiniger. Bei den kombinierten Varianten ist die Ventilation um 33 % reduziert.

Methode	Volumenstrom		Air Change Rate (ACR)		c _{CO2} in Raumluft	Inhalierete Virendosis pro Schultag		Eingesparter Energiebedarf / Klassenzimmer bei T _a = 2 °C
	m ³ /h		Luftwechsel/h			# Partikel / Schultag	Watt	
	Lüftung	Filtration	CO ₂	Aerosole	Sehr hoher Emitter			Hoher Emitter (häufig)
DLK	490	0	2.45	2.45	1338	1100	26	0 (Ref.)
	920	0	4.60	4.60	909	750	19	0 (Ref.)
DLK+Filter	347	800	1.73	5.73	1718	650	16	765
	633	800	3.17	7.17	1131	550	14	1720
FLA	860	0	4.30	4.30	943	800	20	0 (Ref.)
	1260	0	6.30	6.30	777	600	15	0 (Ref.)
FLA+Filter	593	800	2.97	6.97	1178	550	14	1600
	860	800	4.30	8.30	943	500	13	2400

Tabelle 1: Übersicht der analysierten Methoden für Luftqualität (siehe Beschreibung im Text), mit Wirksamkeit betreffend Reduktion von CO₂ und Aerosolen (inhalierete Virendosis) sowie Angabe des eingesparten Energiebedarfs für Wärme. Jede Methode/Kombination wurde für zwei Fälle analysiert:

1. Ungünstiger Fall mit weniger Lüftungsvolumen (obere Zeile)
2. Günstiger Fall mit mehr Lüftungsvolumen (untere Zeile)

Die Berechnungen für Tabelle 1 wurden analog zu [MPIC-2022] durchgeführt, und zwar für die Methoden *Dauerlüften mit Kippfenstern* (DLK) oder *Fensterlüftung mit Abluftventilatoren* (FLA), jedoch zusätzlich auch in Kombination mit Filtration. Die Wärmeproduktion der anwesenden Personen wurde dabei berücksichtigt.

Quellluft-Effekte können die Schadstoffbelastungen leicht reduzieren [MPIC-2022], werden aber hier bei keiner Methode berücksichtigt, da diese Effekte von Eigenheiten des Raums abhängen und nur unter günstigen Bedingungen zum Tragen kommen.

Infizierte Menschen tragen unterschiedlich viele Viren in sich. Zudem emittieren einige mehr, andere weniger Aerosole. Dies führt zu grossen Unterschieden in der Emission (Freisetzung) von Virionen. Man spricht daher von unterschiedlich hohen Emittenten. Das SARS-CoV-2 Virus ist gekennzeichnet durch eine sehr grosse Virenproduktion [Riediker-2022a]. Bei Omikron sind rund 50 % bis 75 % der Infizierten "Hohe Emittent" und 20 % bis 30 % sogar "sehr hohe Emittent". Die "Virendosis" entspricht der mit PCR-Tests nachgewiesenen Zahl von Virus-RNA-Kopien. Bei Omikron besteht bei einer Dosis über 100 Viruskopien ein realistisches Ansteckungsrisiko.

Die inhalierete Virendosis wurde mit dem Viren-Tool [SCOEH-2021] des Schweizerischen Zentrums für Arbeits- und Umweltgesundheit (SCOEH) berechnet für einen Schultag mit 5 Lektionen à 45 Minuten, wobei die Lüftung / Filtration in den Pausen aktiviert bleibt. Siehe die untenstehenden Parameter für einen Viren-Emitter und exponierte Personen.

Wie Tabelle 1 zeigt, ermöglicht das Kombinieren von mobilen Luftreinigern und mechanischer Ventilation flexible, rasch einsetzbare und nachhaltige Lösungen, welche bei akzeptablen CO₂-Werten die Aerosole stärker reduzieren als reine Ventilationslösungen und dabei eine bessere Energiebilanz erzielen.

Lufthygienische Richtlinien für Aerosole und CO₂ sollen in die kantonalen Volksschulverordnungen aufgenommen werden mit dem Ziel, die Luftqualität in Schulräumen durch HEPA-Filterung und mechanische Lüftungsanlagen nachhaltig zu verbessern, insbesondere bei Neubauten und Sanierungen von Schulräumen.

Methoden

- DLK: Dauerlüften mit Kippfenster-Paaren [MPIC-2022]
- FLA: Fensterlüftung mit Abluftventilatoren [MPIC-2022]
- Filter: Filtration mit mobilen Luftreinigern

Verwendete Parameter

- Klassenzimmer 200 m³, mit 1 LP und 24 SuS (≥ 10 Jahre).
- Filter: 3 mobile Luftreiniger, welche bei 50 % der Maximalgeschwindigkeit eine effektive CADR_{total} (Clean Air Delivery Rate) von 800 m³/h erreichen, mit totaler Leistungsaufnahme ca. 60 Watt.
- Viren-Emitter (Parameter für Viren-Tool [SCOEH-2021])
 - Emission: 'Hoch' sowie 'sehr hoch'
 - Keine Maske
 - Aktivitäten: Ruhend (90 %), leicht (10 %)
 - Lautstärke: Ruhig (50 %), normal (40 %), laut (10 %)
- Exponierte Personen (Parameter für Viren-Tool [SCOEH-2021])
 - Keine Masken

Quellen

[MPIC-2022] Helleis F, Klimach T, Pöschl U, *Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumluftechnik und Luftreiniger*. 11.02.2022, Max-Planck-Institut für Chemie, <https://zenodo.org/record/6049289#YsnPL3YzY2w>.

[Riediker-2020] Cruz M, Riediker M et al., *Guide for ventilation towards healthy classrooms*. Dec. 2020, https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2021/01/Guide-for-ventilation_Indairpollnet.pdf.

[Riediker-2022a] Riediker M et al., *Higher viral load and infectivity increase risk of aerosol transmission for Delta and Omicron variants of SARS-CoV-2*. 06.01.2022, <https://doi.org/10.4414/smw.2022.w30133>.

[Riediker-2022b] Riediker M et al., *Saubere Luft für pandemiegerechte Gebäude*. Eine Strategie präsentiert durch die Expertengruppe «Pandemiegerechte Gebäude» in Form eines White Papers. 21.06.2022, <https://scoeh.ch/de/saubere-luft-fur-pandemiegerechte-gebäude/>.

[Riediker-2022c] Riediker M et al., *Clean air for pandemic-proof buildings*. A strategy presented by the expert group on «Pandemic-proof buildings». June 2022, https://scoeh.ch/wp-content/uploads/2022/06/2022-06-21b_Clean_air_for_pandemic-proof_buildings.pdf.

[SCOEH-2021] Riediker M, *Viren-Tool zur Berechnung der Virendosis und des CO₂ in Räumen*, v2.2.3, Aug. 2021. Schweizerische Zentrum für Arbeits- und Umweltgesundheit, <https://scoeh.ch/de/tools/>.

[Umwelt-BA-2008] *Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft: Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf.