

Datum: 4. Juli 2023

Referenz: CHE20221124

# Verbesserung der Luftqualität in Adliswiler Klassenzimmern

## Kurzbericht zur Pilotstudie

Michael Riediker<sup>1</sup> und Fredy Neeser<sup>2</sup>

1 Dr. sc. nat. ETH, Direktor SCOEH, Arbeits- und Umwelthygieniker ASA Zert. SGAH

2 Dr. sc. techn. ETH, Vorstandsmitglied und wissenschaftliche Beratung Protect-the-kids  
(Schweiz)

1	Zusammenfassung .....	3
2	Hintergrund und Ziele .....	4
3	Vorgehen .....	6
3.1	Lüften und Filtern für bessere Luftqualität .....	9
4	Resultate und Diskussion .....	10
4.1	Einführung der Luftreiniger an der Primarschule Kopfholz .....	10
4.2	Untersuchung der Luftreiniger .....	11
4.2.1	Vergleich von Einzelgeräten aller Gerätetypen .....	11
4.2.2	Schall bei grösserer Reinigungsleistung durch höhere Stufen oder mehr Geräte .....	13
4.2.3	Frequenzspektrum bei verschiedener Reinigungsleistung .....	15
4.2.4	Reinigungsleistung und Schallpegel der Geräte in Gemeinschaftsräumen .....	16
4.2.5	Bevorzugte Einstellungen und Benutzerakzeptanz .....	20
4.3	Luftqualität in den Schulräumen: Statistiken über die gesamte Studienperiode .....	21
4.4	Luftqualität nach Schulzimmer und Wochentag in Kopfholz 1 .....	25
4.5	Luftwechselraten und Effizienz des Fensterlüftens in Kopfholz 1 .....	27
4.5.1	Situation #1: Effektive Basislüftung, Stosslüften 2-3 Mal pro Doppelstunde .....	28
4.5.2	Situationen #2a/b: Geringe Basislüftung, keine Stosslüftungen im Unterricht .....	29
4.6	Luftwechselraten bei mechanischer Lüftung in Kopfholz 2 .....	31
4.6.1	Situation #3: Klassenraum in Kopfholz 2 mit Volumen 320m <sup>3</sup> .....	32
4.7	Virensimulationen mit variabler Lüftung und Nutzen der Filtration .....	34
5	Empfehlungen .....	37
6	Referenzen .....	40
	Anhang .....	42
A1	Messgerät, CO <sub>2</sub> -Messungen und Leckraten .....	42
A1.1	Messgerät Air CO2ntrol 5000 .....	42
A1.2	CO <sub>2</sub> -Messungen: Kalibrierung, Offsetkorrektur und Langzeitstabilität .....	42
A1.3	Leckraten in Schulzimmern von Kopfholz 1 .....	45
A2	Dimensionierung der Reinigungsleistung für kombiniertes Lüften und Filtern .....	47
A3	Einführung der Luftreiniger an der Primarschule Kopfholz .....	50
A4	Messwerte der Reinigertests .....	52
A5	Technische Spezifikationen der getesteten Luftreiniger .....	53

## 1 Zusammenfassung

COVID-19, Influenza, RSV, Windpocken und zahlreiche weitere Erkrankungen werden häufig durch respiratorische Aerosole übertragen. In dicht belegten Schulräumen besteht ein erhöhtes Risiko der Verbreitung solcher luftgetragener Krankheitserreger, besonders wenn die Luftqualität unzureichend ist. Eine starke Erhöhung der Lüftung kann dieses Risiko deutlich senken, was allerdings besonders im Winter mit reduziertem Komfort und Energieverlusten einhergeht. Der Einsatz von mobilen Luftreinigern, die Aerosole und somit auch luftgetragene Krankheitserreger aus der Atemluft entfernen, scheint daher ein hilfreicher Ansatz zu sein. Im Rahmen dieser sechswöchigen Pilotstudie liess die Stadt Adliswil untersuchen, wie mobile Luftreiniger nutzbringend in Klassenzimmern eingesetzt werden können und wie sie sich in der Praxis bewähren.

Die Untersuchungen erfolgten in den Gebäuden der Primarschule Kopfholz. *Kopfholz 1* ist ein renovierter Altbau mit Fensterlüftung, *Kopfholz 2* ein Minergie-Standards entsprechender Neubau mit mechanischer Lüftung. In jedem Klassenzimmer wurden bis zu drei mobile Luftreiniger installiert. Die Firmen Electrolux, Philips und Stadler Form stellten freundlicherweise eine grosse Anzahl von Geräten zur Verfügung. Die Luftreiniger wurden hinsichtlich Reinigungsleistung und Geräuschentwicklung beim Betrieb in der realen Umgebung evaluiert. Die Aerosol-Reduktionsraten wurden mit einem Testaerosol aus Kochsalzkristallen und im Raum verteilten Sensoren bestimmt, der Schallpegel und die Frequenzen mit einem Audio- und Akustik-Analysator. Zudem wurden die Schallpegel der Luftreiniger-Konfigurationen ermittelt, die von den Lehrpersonen noch als akzeptabel bezeichnet wurden. CO<sub>2</sub>-Messungen dienten der Beurteilung der Luftqualität in den Räumen und der Bestimmung der durch manuelle und/oder mechanische Lüftung erreichten Luftwechselraten.

Die evaluierten Luftreiniger sorgen durch den nach oben gerichteten Luftauslass für eine verbesserte Durchmischung der Innenraumluft. Als Einzelgeräte auf Vollast getestet zeigten sie in den rund 240 m<sup>3</sup> grossen Räumen von Kopfholz 1 Reduktionsraten von zwei bis drei eACH (engl. equivalent Air Changes per Hour = äquivalente Luftwechsel pro Stunde), was einer Reinigungsleistung CADR (engl. Clean Air Delivery Rate) von rund 480 bis 720 m<sup>3</sup>/h entspricht. Der Schallpegel in zwei Metern Abstand betrug zwischen 45 und 55 dB(A). Die Lehrpersonen bevorzugten tiefere Betriebsstufen, die mit einem Schallpegel zwischen 32 und 42 dB(A) einhergingen. Durch den parallelen Einsatz mehrerer Geräte wurden auf diesen tieferen Stufen hohe Luftreinigungsraten von 3 bis 5 eACH erreicht, dies bei Lautstärken, die mit einer ruhigen Büroumgebung kompatibel sind.

Die Luftqualität war in den beiden Gebäuden sehr unterschiedlich: In Kopfholz 2 war das CO<sub>2</sub> meist im guten bis sehr guten Bereich unter 1000 ppm mit Luftwechselraten von 2.3 bis 2.9 ACH. Die CO<sub>2</sub>-Statistik zeigte deutlichen Handlungsbedarf im manuell belüfteten Altbau Kopfholz 1: Die CO<sub>2</sub>-Werte waren regelmässig im hygienisch inakzeptablen Bereich über 2000 ppm und zu 61 % der Zeit im das Lernen beeinträchtigenden Bereich über 1000 ppm. Es wurden mehrheitlich ineffiziente Lüftungsstrategien beobachtet. Die Strategie «selten, dafür besonders stark lüften» war wegen der schlechten Verteilung der Luftwechsel deutlich weniger effizient als «häufig und stark lüften». Selbst bei vorbildlicher Fensterlüftung war die Luftqualität oft mässig, und nur gerade in 20 % der Zeit war das CO<sub>2</sub> im für kognitive Leistungen idealen Bereich unter 800 ppm.

In typischen Situationen mit Fensterlüftung wurden mittlere Luftwechselraten im Bereich von 0.3 bis 2.5 ACH gemessen, so dass bereits eine Luftreinigerleistung von 3 eACH eine Reduktion der Virendosis um mindestens 50 % ergab. In einigen Situationen reduzierten die Reiniger die Dosis sogar um 90 %. Luftreiniger entfernen Aerosole aus der Luft, nicht aber das CO<sub>2</sub>. Sie ergänzen somit Massnahmen für eine bessere Belüftung. Bei der Sanierung von Altbauten mit mechanischer Lüftung sollten dezentrale und zentrale Lösungen verglichen werden.

Bezüglich der Reduktion der Aerosole war der relative Nutzen von «Lüften und Filtern» im Vergleich zum «Fensterlüften» besonders gross. Die mobilen Luftreiniger waren flexibel einsetzbar und konnten durch Konfiguration für eine ruhige Lernumgebung gut in den Schulalltag integriert werden. Voraussetzung für eine erfolgreiche Implementation ist allerdings die Sensibilisierung der Beteiligten für die Vorteile der Infektionsprävention durch Luftreinigung.

## 2 Hintergrund und Ziele

Schon früh haben Superspreading-Ereignisse darauf hingewiesen, dass die Übertragung des Coronavirus (SARS-CoV-2) durch respiratorische Aerosole in Innenräumen eine wichtige Rolle spielt, wie auch die Swiss Science Task Force festgehalten hat (Stocker et al., 2020). Es ist heute wissenschaftlich breit abgestützt, dass COVID-19, Influenza, RSV, Windpocken, Tuberkulose und zahlreiche weitere Erkrankungen zu einem wichtigen Teil durch erregerbelaadene Schwebeteilchen in der Raumluft übertragen werden und Schmierübertragung relativ seltener ist (Peng et al., 2022; Pöhlker et al., 2021; Sachs et al., 2022; Smieszek et al., 2019)<sup>1</sup>. Kinder spielen eine wichtige Rolle bei der Verbreitung von luftübertragenen Krankheiten: Wie eine Studie zur Übertragung von Infektionen in über 800'000 US-amerikanischen Haushalten gezeigt hat, gingen 70.4 % aller Übertragungen in Haushalten von einem Kind aus (Tseng et al., 2023). Während der Schulsessions war der Anteil der von Kindern ausgehenden Übertragungen noch deutlich höher, was für eine Rolle des Schulbesuchs bei der Verbreitung von COVID-19 spricht.

COVID-19 ist eine Gefässerkrankung, welche neurologische Störungen, Schäden in Lungen, Herz, Nieren und weiteren Organen verursachen kann – mit Risiken, welche sich bei Reinfektionen kumulativ erhöhen (Bowe et al., 2022). Kinder und Jugendliche sind ebenso von COVID-19 betroffen wie Erwachsene. Zwar sind viele während der akuten Infektion nur leicht erkrankt, doch bei mehreren Prozent der infizierten Kinder entwickelt sich daraus das über viele Monate anhaltende Long-COVID (Davis et al., 2023). Das Risiko dafür steigt bei Kindern und Teenagern mit dem Alter, allerdings wird Long-COVID bei jüngeren Kindern selten diagnostiziert, weil die Symptome in diesem Alter viel schwieriger greifbar sind (Vilser, 2022). Post-COVID-Konsequenzen wie Diabetes und Schädigungen von Lungen und Kreislaufsystem stellen oft lebenslang bleibende Beeinträchtigungen dar.

In dicht belegten Schulräumen ist das Risiko einer starken Verbreitung von Krankheitserregern bei unzureichender Luftqualität besonders hoch, weil sich in Gegenwart einer ansteckenden Person mit Erregern beladene Atemaerosole in der Raumluft anreichern und im ganzen Raum ausbreiten können. Im Vergleich zur Übertragung der Erreger über kurze Distanzen (im sogenannten Nahfeld des Erreger-Emitters) ist die Übertragung über grössere Distanzen (im sogenannten Fernfeld) in solchen Situationen häufiger, wobei alle Anwesenden einem Ansteckungsrisiko ausgesetzt sind (Guo et al., 2023). Auch in sogenannten «toten Zonen» eines Raumes, welche weniger gut mit Frischluft versorgt werden, kann die Erregerkonzentration stark ansteigen und die Wahrscheinlichkeit einer Ansteckung auch bei kurzem Aufenthalt stark erhöhen. Der Übertragungsweg sowohl im Fernfeld als auch im Nahfeld lässt sich durch Ausbreitungsmodelle beschreiben (Riediker et al., 2022; Riediker and Monn, 2021; Riediker and Tsai, 2020)<sup>2</sup>.

Neue wissenschaftliche Erkenntnisse zeigen, dass jede zusätzliche Erhöhung der Lüftungsrate die Ansteckungswahrscheinlichkeit weiter reduziert. Eine italienische Studie mit mechanischer Ventilation in Schulen fand eine Reduktion des relativen Risikos einer SARS-CoV-2-Infektion um 80 % bei Lüftungsquoten, welche Raten zwischen 5.3 und 7.4 ACH (engl. Air Changes per Hour = Luftwechsel pro Stunde) entsprechen (Buonanno et al., 2022). In einem Klassenzimmer von 250 m<sup>3</sup> entspricht dies einem stündlichen Durchfluss von 1325 bis 1850 m<sup>3</sup>. So grosse Luftwechsel sind durch gelegentliches Öffnen der Fenster nicht realisierbar. Vielmehr wären zahlreiche intensive Lüftungsvorgänge nötig, was die Unterrichtsgestaltung empfindlich stören würde. Im Winter kämen die Störung durch die Kälte und die Verschwendung von Heizenergie dazu. Im Sommer wird häufiges Lüften vermehrt durch hohe Aussentemperaturen erschwert.

Luftreiniger mit HEPA-Filtern entfernen Aerosole aus der Raumluft und ermöglichen einen kombinierten Ansatz «Lüften und Filtern» zur Reduktion der Aerosolkonzentration und des Risikos der

---

<sup>1</sup> Der Weg über die Luft wird auch im Bericht des Wissenschaftlichen Beratungsgremiums COVID-19 «Saubere Luft im Zusammenhang mit der Zirkulation von Krankheitserregern» hervorgehoben ([https://wiss-gremium-covid19.ch/wp-content/uploads/230526\\_ReportWiBeG\\_DE\\_final-1.pdf](https://wiss-gremium-covid19.ch/wp-content/uploads/230526_ReportWiBeG_DE_final-1.pdf)).

<sup>2</sup> Kostenloses Berechnungstool auf <https://scoeh.ch/de/tools/>

Übertragung von Infektionskrankheiten, worauf auch das kürzlich vom Bundesamt für Gesundheit (BAG) veröffentlichte Positionspapier «Lüftung von Gebäuden in Pandemiesituationen» hinweist <sup>3</sup>.

Sowohl regelmässiges Lüften als auch HEPA-Filtration ersetzt einen Teil der Raumluft durch *saubere Luft*, also durch Luft, welche frei von Atemaerosolen ist <sup>4</sup>. Von zentraler Bedeutung ist bei diesem Ansatz die effektive oder äquivalente Gesamtluftwechselrate. Ein äquivalenter Luftwechsel entspricht dabei dem Ersetzen des gesamten Raumvolumens durch saubere Luft. Es wird allerdings nicht alle Luft zeitgleich ersetzt. Vielmehr handelt es sich um eine Vermischung sauberer Luft mit verbrauchter Luft, wobei die Atemaerosole verdünnt werden. Kombiniertes Lüften und Filtern verringert den Energieverbrauch im Winter, weil eine hohe äquivalente Gesamtluftwechselrate mit einer reduzierten Lüftungsrate und somit einem geringeren Wärmeverlust erreicht werden kann (Helleis et al., 2022). Die grösste Energieeinsparung gibt es in Gebäuden mit Fensterlüftung, da bei diesen (anders als bei mechanischen Lüftungssystemen) keine Wärmerückgewinnung möglich ist.

Als Indikator für verbrauchte Luft und damit eine potenziell erhöhte Konzentration respiratorischer Aerosole dient der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft. Bei ungenügender Frischluftzufuhr nimmt der CO<sub>2</sub>-Gehalt im Vergleich zur Aussenluft <sup>5</sup> durch unser Ausatmen rasch zu. Ab CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 800 ppm sinkt zudem die Konzentrations- und Lernfähigkeit, was bei 1200 bis 1400 ppm bereits deutlich erkennbar wird (Allen et al., 2016). CO<sub>2</sub>-Werte über 2000 ppm sind hygienisch bedenklich und müssen an Arbeitsplätzen vermieden werden (SECO, 2023). Die CO<sub>2</sub>-Konzentration kann nur durch manuelle und/oder mechanische Lüftung effektiv reduziert werden.

In dieser Pilotstudie zur Verbesserung der Luftqualität in Klassenzimmern liess die Stadt Adliswil untersuchen, wie mobile Luftreiniger nutzbringend eingesetzt werden können und wie sie sich in der Praxis bewähren.

Die Luftreiniger wurden hinsichtlich ihrer Reinigungsleistung durch Messung der erreichten Aerosolreduktion in der realen Umgebung evaluiert. Ausserdem wurde der Schallpegel der Luftreiniger-Konfigurationen ermittelt (Anzahl und Typ von Geräten sowie deren Betriebsstufe), die von den Lehrpersonen als akzeptabel bezeichnet wurden. Darüber hinaus wurden CO<sub>2</sub>-Messungen zur Beurteilung der Lufthygiene in den Räumen durchgeführt und die durch manuelle und/oder mechanische Lüftung erreichten Luftwechselraten bestimmt.

Die relative Reduktion des Übertragungsrisikos durch Luftreinigung entspricht dann dem Verhältnis der durch Lüftung erreichten Luftwechselrate zur gesamthaft durch Lüftung und Filtration erreichten äquivalenten Luftwechselrate.

---

<sup>3</sup> Positionspapier des Bundesamtes für Gesundheit BAG und von 12 namhaften Schweizer Organisationen der Lüftungs- und Baubranche, <https://www.bag.admin.ch/bag/de/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/wohngifte/gesund-bauen/lueftung-von-gebaeuden-in-pandemiesituationen.html>

<sup>4</sup> Luftfilter haben den zusätzlichen Vorteil, dass sie auch Allergien verursachende Pollen und Feinstaub entfernen.

<sup>5</sup> Stand Jan. 2023 beträgt die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Aussenluft ca. 420 ppm (parts per million).

### 3 Vorgehen

Die Pilotstudie dauerte von 9. Januar bis 18. Februar 2023 (Weihnachts- bis Sportferien) und wurde am Schulstandort Kopfholz durchgeführt. Hier werden Kinder vom Kindergarten bis zur sechsten Klasse unterrichtet. Die Studie war eine Kollaboration zwischen SCOEH und ProtectTheKids. Die Rolle von SCOEH bestand aus der Analyse der Filtergeräte, während ProtectTheKids eine CO<sub>2</sub>-basierte Analyse der Luftqualität durchführte. ProtectTheKids installierte auch die Luftreiniger<sup>6</sup> und sorgte für einen weitgehend automatisierten Betrieb der Geräte zur Unterstützung der Lehrpersonen. Die Bewertung der Resultate erfolgte gemeinsam.

Die Schule Kopfholz besteht aus drei Gebäuden, einem vor wenigen Jahren renovierten Altbau (Kopfholz 1), einem Minergie-Standards entsprechendem Neubau (Kopfholz 2) und einer (in diesem Projekt nicht untersuchten) Sporthalle. In Kopfholz 1 erfolgt die Lüftung durch manuelles Öffnen der Fenster<sup>7</sup>, in Kopfholz 2 automatisch mit der CO<sub>2</sub>-gesteuerten Lüftungsanlage sowie durch zusätzliches manuelles Öffnen der Fenster.

Für eine CO<sub>2</sub>-basierte Analyse der Luftqualität und zur Unterstützung der Lehrpersonen wurden 17 Schulräume mit CO<sub>2</sub>-Monitoren «Air CO2ntrol 5000» (Dostmann electronic GmbH, Deutschland) ausgestattet, welche Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf einer Speicherkarte aufzeichnen. Die CO<sub>2</sub>-Daten ermöglichten eine CO<sub>2</sub>-Statistik über die ganze Dauer der Pilotstudie sowie die Ermittlung von Luftaustauschraten (Minguillón et al., 2020) bei manueller und/oder mechanischer Lüftung sowie bei geschlossenen Türen und Fenstern bzw. bei abgeschalteter Lüftung.



Der Bedarf an Luftreinigungsgeräten pro Schulraum wurde aufgrund einer Zielvorgabe für die gesamthaft durch Lüftung und Filterung zu erreichenden Luftwechselraten von rund 5 bis 6 Luftwechseln pro Stunde (ACH) ermittelt (Minguillón et al., 2020). Dabei wurden CO<sub>2</sub>-Messungen, Erfahrungswerte für die erreichbaren Luftwechselraten bei Fensterlüftung bzw. mechanischer Lüftung, die Dimensionen der Schulzimmer sowie Herstellerangaben zur erwarteten Reinigungsleistung durch Filterung (engl. CADR: Clean Air Delivery Rate) berücksichtigt (siehe auch Kapitel A2 und A5 im Anhang).

Dank der freundlichen Unterstützung der Hersteller Electrolux, Philips und Stadler Form konnten alle regelmässig genutzten Schulzimmer sowie die Gemeinschaftsräume (Mittagstisch, Betreuung, Singsaal und Bibliothek) mit Luftreinigern ausgestattet werden. Die Hersteller stellten Geräte zur Verfügung, die für grosse Räume vorgesehen sind und bei Volllast eine CADR von mehreren hundert m<sup>3</sup>/h versprechen. Electrolux stellte Geräte des Typs Pure A9 (PA91-604GY) und Well A7 (WA71-

<sup>6</sup> Speziell gedankt sei A. Neeser für ihre tatkräftige, mehrtägige Unterstützung bei der Installation der Geräte.

<sup>7</sup> Der Singsaal ist mit einer mechanischen Lüftung ausgestattet.

305DG), Philips solche des Typs AC4236-10 und Stadler Form solche des Typs Roger big zur Verfügung. Bei der Zuteilung der Luftreiniger wurden Schulzimmer mit einem, zwei oder drei Geräten ausgerüstet. Dies ermöglichte die Evaluation von Reinigungsleistungen in einem grösseren Bereich und eine räumlich verteilte Luftreinigung.

Bei einer Luftreiniger-Konfiguration muss nicht nur auf die Reinigungsleistung geachtet werden, sondern auch auf die Richtwerte und Empfehlungen für Hintergrundgeräusche, welche für Büro- und Unterrichtsumgebungen gelten (SECO, 2023). Das Verteilen der gewünschten Reinigungsleistung auf mehrere Geräte bezweckte auch deren Betrieb auf einer niedrigeren Geschwindigkeitsstufe, um so die Gesamtgeräuschbelastung tief zu halten.

Die Luftreiniger wurden in der ersten Januarwoche installiert und waren vom 9. Januar bis 16. Februar 2023 in Betrieb, der Schulperiode zwischen den Weihnachts- und Sportferien von Adliswil. Anlässlich der Inbetriebnahme wurde den Lehrpersonen und der Betreuung ein Infoblatt «Verbesserung der Luftqualität im Schulhaus Kopfholz» mit einer kompakten Beschreibung des Konzepts «Lüften und Filtern» ausgeteilt. Darin wurde für jedes Schulhaus ein moderates Lüftungsziel formuliert, welches die Erleichterung aufgrund der Luftreinigung berücksichtigt:



Für die Schulzimmer ohne Lüftungsanlage in Kopfholz 1 (Volumen  $240\text{ m}^3$ ) wurde den Lehrpersonen empfohlen, die  $\text{CO}_2$ -Konzentration mit Hilfe des kontrollierten Lüftens unterhalb von  $1200\text{ ppm}$  zu halten. Für Schulzimmer mit Lüftungsanlage und manueller Lüftungsmöglichkeit in Kopfholz 2 (Volumen  $320$  sowie  $260\text{ m}^3$ ) wurde ein Ziel von maximal  $1000\text{ ppm}$  angegeben.

Bei der Wahl der Geschwindigkeitsstufe der Luftreiniger besteht ein Zielkonflikt zwischen einer möglichst guten Reinigungsleistung und einem möglichst tiefen Geräuschpegel. Es wurden daher Konfigurationen gesucht, welche bei akzeptabler Geräuschbelastung eine signifikante Verbesserung der Luftqualität ermöglichen. Die Lehrpersonen wurden gebeten, ausgehend von der niedrigsten Stufe am ersten Tag die Gebläsegeschwindigkeit sukzessive jeden Tag um eine Stufe zu erhöhen, solange der Geräuschpegel als nicht störend für den Unterricht empfunden wurde. Dieses Herantasten an die individuell als «optimal» empfundene Reinigungsstufe wurde mit einem Logbuch erfasst. Im weiteren Verlauf der Studie liefen die Geräte auf der für den betreffenden Unterrichtsraum von der Lehrperson bevorzugten Einstellung mit fester Geschwindigkeit<sup>8</sup>.

<sup>8</sup> Die Geräte haben auch einen «Automatikmodus». Dieser wurde jedoch nicht verwendet, da er für eine vorhersagbare Reduktion der von Menschen emittierten Aerosole ungeeignet ist. Die Konzentration von Luftschadstoff-Feinstaub ist oft deutlich höher als diejenige von Atemaerosolen. Der Automatikmodus handelsüblicher Geräte beruht auf Messungen der Gesamt-Aerosolkonzentration und kann respiratorische Aerosole nicht von anderen Aerosolen unterscheiden.

An drei Testtagen ausserhalb der Schulstunden wurden die Aerosol-Reduktionsraten und der Geräuschpegel der Luftreiniger in einer Auswahl von Unterrichtsräumen gemessen. Die Tests erfolgten bei geschlossenen Türen und Fenstern auf der von den Lehrpersonen gewählten Reinigungsstufe für den normalen Schulbetrieb, auf Vollast sowie bei abgeschalteten Geräten<sup>9</sup>. In Kopfholz 2 blieb die Lüftung eingeschaltet. Die Reduktionsrate wurde mit Hilfe eines Testaerosols aus Kochsalzkristallen<sup>10</sup> bestimmt.



Während dessen Freisetzung waren zur gleichmässigen Verteilung des Aerosols drei Ventilatoren im Betrieb. Nach einer kurzen Ruhephase wurden die Luftreiniger angeschaltet.



Die Aerosolkonzentration im Raum wurde mit mehreren im Raum verteilten Feinstaubsensoren ermittelt (Sensorion SPS30, Stäfa, Schweiz). Die Rate des exponentiellen Abfalls der Aerosolkonzentration wurde danach mit der nicht-linearen Schätzungsmethode der kleinsten Quadrate ermittelt (Stata/SE 15.1, StataCorp, College Station, TX, USA). Die mittlere Reduktionsrate wurde anhand des Mittelwerts aller Sensoren bestimmt, während der Abfall der Konzentration an den Standorten der einzelnen Sensoren über den Bereich der Reduktionsrate (den «Range») im Raum informierte.

Parallel zu den Reduktionsraten der Reiniger wurde jeweils der durchschnittliche Schallpegel («Leq») in verschiedenen Distanzen zu den Luftreinigern bestimmt (XL2 Audio- und Akustik-Analysator, NTI Audio, Schaan, Liechtenstein). Zudem wurde das Frequenzprofil der verschiedenen Gerätetypen («noise rating») bestimmt. Bei der Auswertung wurde untersucht, ob und wie stark die empfundene Störung und das Betriebsgeräusch der Geräte sowie der gemessene Schallpegel zusammenhängen.

<sup>9</sup> Gebäudeleckagen wie Undichtigkeiten in Fenstern und Türen verursachen bereits einen geringen Luftwechsel. Im Kopfholz 2 kommt die mechanische Lüftung dazu.

<sup>10</sup> Vernebelung einer 20% Kochsalzlösung mit Druckluft-Vernebler Beurer IH26; Tröpfchengrösse bei Abgabe (MMAD): 3 µm; Aerosolgrösse nach Adaptierung an Umgebungsfeuchte ca. 1 µm.

### 3.1 Lüften und Filtern für bessere Luftqualität

Aerosole werden sowohl durch Ventilation<sup>11</sup> als auch durch HEPA-Filtration aus der Raumluft entfernt. Die Volumenströme  $Q_v$  durch Ventilation und  $Q_f$  durch Filtration tragen somit beide zur Reduktion der Aerosole bei.

Bei einer sogenannten Mischlüftung oder Verdünnungslüftung tragen sowohl Ventilation als auch Filtration durch Vermischung der eingeführten sauberen (virenfreien) Luft mit der restlichen Raumluft zu einer Verdünnung der respiratorischen Aerosole bei. Die Reduktionsraten ergeben sich aus den Volumenströmen in Relation zum Raumvolumen  $V$ . Wie schnell Aerosole verdünnt werden, wird durch die äquivalente Gesamtluftwechselrate (engl. equivalent air change rate, eACR)

$$eACR_{\text{total}} \stackrel{\text{def}}{=} ACR_v + ACR_f$$

bestimmt (Minguillón et al., 2020), wobei  $ACR_v \stackrel{\text{def}}{=} Q_v/V$  und  $ACR_f \stackrel{\text{def}}{=} Q_f/V$  in äquivalenten Luftwechseln pro Stunde (equivalent Air Changes per Hour, eACH) gemessen werden.

Die Gesamtluftwechselrate  $eACR_{\text{total}}$  berücksichtigt normalerweise nur die Verdünnung der respiratorischen Aerosole durch Ventilation und Filtration. Die Übertragung von Viren wird jedoch auch durch die Deposition von Aerosolen an Oberflächen sowie durch den Zerfall der Viren beeinflusst, welcher von Faktoren wie UV-Strahlung, Luftfeuchtigkeit und Temperatur abhängt.

In Kombination führen Verdünnung der Aerosole durch Ventilation und Filtration, Deposition der Aerosole sowie der Virenzerfall zu einer totalen Verlustrate

$$R_{\text{total}} \stackrel{\text{def}}{=} ACR_v + ACR_f + R_d + R_z,$$

wobei  $R_d$  und  $R_z$  die Verlustraten aufgrund von Deposition und Virenzerfall bezeichnen. Verlustraten haben die Einheit 1/h, welche mit der Einheit eACH (äquivalente Luftwechsel/h) kompatibel ist. Der Einfachheit halber verwenden wir auch bei Verlustraten die Einheit eACH.

Bei der Ermittlung der Filter-Reinigungsleistung mittels Aerosol-Abklingmessung wird zusätzlich zu  $ACR_f$  auch die Depositionsrate  $R_d$  und eine Luftwechselrate  $ACR_v$  mitgemessen, welche bei Messbedingungen (geschlossene Türe und geschlossene Fenster) der Leckrate  $ACR_l$  des Raumes entspricht.

Es ist zweckmässig, die Filter-Reinigungsleistung als Reduktionsrate

$$R_f \stackrel{\text{def}}{=} ACR_f + R_d,$$

zu definieren, so dass die totale Verlustrate als

$$R_{\text{total}} \stackrel{\text{def}}{=} ACR_v + R_f + R_z,$$

geschrieben werden kann. Die Leckrate  $ACR_l$  ist in der Luftwechselrate  $ACR_v$  enthalten. Bei der Ermittlung der Reduktionsrate  $R_f$  aus der Aerosol-Abklingmessung wird die via  $\text{CO}_2$ -Analyse bestimmte Leckrate (siehe Anhang A1.3) rechnerisch entfernt.

<sup>11</sup> Der Einfachheit halber verwenden wir «Ventilation» als Überbegriff sowohl für manuelle Lüftung durch Öffnen der Fenster als auch für mechanisch unterstützte Lüftung.

## 4 Resultate und Diskussion

### 4.1 Einführung der Luftreiniger an der Primarschule Kopfholz

Zu Beginn der Studienperiode am 09.01.2023 waren 52 Luftreiniger in total 25 Klassenzimmern und Gemeinschaftsräumen der Schulhäuser Kopfholz 1 und 2 fertig installiert und auf Stufe 1 in Betrieb. Nach Vorgesprächen mit Lehrpersonen und Hauswartung waren diverse Platzierungswünsche bereits berücksichtigt. In den Klassenzimmern mit zwei oder drei installierten Geräten konnte eine gleichmässige Verteilung der Luftreinigung durch Platzierung auf gegenüberliegenden Seiten erreicht werden. Zur Vermeidung einer allfälligen Geräuschbelastung wurde darauf geachtet, dass der kleinste Abstand zu Personen mindestens einen Meter betrug. Im Kopfholz 1 wurde ein Gerät meist neben der Wandtafel platziert, nach Möglichkeit auf der vom Pult der Lehrperson weiter entfernten Seite. In Kopfholz 2 wurden Geräte auch in der Nähe der Fensterfront platziert. Die Klassenzimmer in Kopfholz 2 sind über einen offenen Durchgang mit einem Nebenzimmer (Gruppenraum) verbunden, dort wurde ein kleineres Gerät installiert. Im Laufe der ersten zwei bis drei Wochen wurde die Positionierung bei wenigen Geräten zu Gunsten eines grösseren Abstands von Personen oder zur Reduktion des Windchill-Effekts weiter optimiert.



Abb. 1 Staubschicht nach drei Wochen Betrieb

Die Automatisierung des Gerätebetriebes via App wird von allen Gerätehersteller unterstützt. Um keinen zeitlichen Mehraufwand für die Lehrkräfte zu erzeugen, wurden die Geräte automatisch vor Schulbeginn aktiviert und ca. 1/2 Stunde nach Schulende abgeschaltet. Das Herantasten an die bevorzugte Kombination von Betriebsstufen wurde mit Logblättern erfasst. Eine detaillierte Auswertung befindet sich im Kapitel A3. Einige Logblätter wurden mit unvollständigen oder rudimentären Einträgen retourniert, so dass die gewünschte Einstellung erst nach persönlicher Nachfrage gefunden werden konnte.

Nach drei Wochen wurden die Geräte durch Absaugen der Filteroberfläche gewartet. Abb. 1 zeigt eine typische Staubschicht, wie sie sich nach drei Wochen Betrieb im Klassenzimmer auf dem Vorfilter präsentierte. Dass Luftreiniger mit HEPA-Filtern nicht nur feine Aerosolpartikel mit Partikelgrössen zwischen einigen Nanometern und mehreren Mikrometern sondern auch grössere Staubteilchen aus der Raumluft entfernen und von den Lungen der Kinder fernhalten, ist ein positiver zusätzlicher Effekt. Bei allen Gerätetypen war die Reinigung der Filteroberfläche einfach und rasch bewerkstelligt.

## 4.2 Untersuchung der Luftreiniger

Die Luftreiniger wurden bezüglich Reinigungsleistung und Geräuschemissionen untersucht. Ein detaillierter Vergleich der Gerätetypen bezüglich Reinigungsleistung, Schallpegel und Frequenzmuster erfolgte in einem Referenz-Klassenzimmer unter gleichbleibenden Bedingungen. Zudem erfolgten in beiden Gebäuden in einer Auswahl von Räumen Versuche mit den dort installierten Reinigern auf den von den Lehr- und Betreuungspersonen eingestellten Stufen.

### 4.2.1 Vergleich von Einzelgeräten aller Gerätetypen

Von jedem Gerätetyp wurde je ein Reiniger bezüglich seiner Reinigungsleistung und Schallpegel auf verschiedenen Stufen getestet. Diese Versuche erfolgten zwecks guter Vergleichbarkeit im gleichen Referenz-Klassenzimmer in Kopfholz 1.

Zuerst wurden die Geräte unter Vollast<sup>12</sup> getestet. Abb. 2 zeigt die Resultate der Aerosol-Reduktionstests. Dargestellt sind die exponentiellen Abfall-Raten bestimmt aus dem Mittelwert der Aerosolkonzentration im Raum (bestimmt nach Berechnung des Mittelwertes aller Sensoren im Raum, blauer Punkt) sowie die kleinste und höchste bestimmte Reduktionsrate an den verschiedenen Punkten im Raum (berechnet auf Basis der einzelnen Sensor-Werte, der Range ist durch Whisker-Linien angezeigt).

Das Raumvolumen des Klassenzimmers betrug 241 m<sup>3</sup>, eine Reduktionsrate von -3 bedeutet also 3 eACH<sup>13</sup>, was dem entspricht, was unter perfekten Mischbedingungen mit einer aerosolfreien Frischluftzufuhr von 3 Luftwechseln pro Stunde beziehungsweise 723 m<sup>3</sup>/h erreicht würde. Die Reduktionsrate ohne Reiniger ergibt sich aus der Luftaustauschrate, die durch Undichtigkeiten in Türe und Fenster verursacht wird (Leckrate von 0.13 eACH bestimmt auf Basis von CO<sub>2</sub>-Messungen) und der Deposition von Aerosolen (0.25 eACH), welche bei ruhiger, nicht turbulenter Luft zu einem gewissen Grad vorkommt.

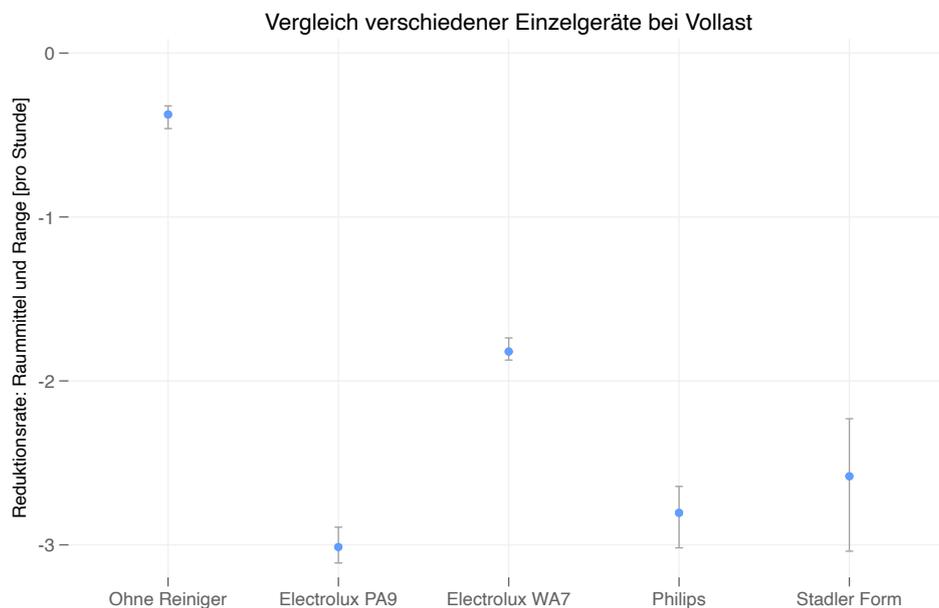


Abb. 2 Vergleich der Aerosol-Reduktionsraten beim Einsatz der verschiedenen Luftreiniger als Einzelgeräte auf Vollast in einem Referenz-Klassenzimmer von 241 m<sup>3</sup> Volumen. Electrolux PA9: Electrolux Pure A9 (PA91-604GY) auf Stufe 9, Electrolux WA7: Electrolux Well A7 auf Stufe 5, Philips: Philips AC4236-10 auf Stufe 3, Stadler Form: Stadler Form Roger big auf Stufe 4 statt 5 getestet.

<sup>12</sup> Das Gerät von Stadler Form wurde wegen eines internen Kommunikationsfehlers nur auf der zweithöchsten Stufe getestet (Stufe 4 statt 5).

<sup>13</sup> eACH: vom Englischen «equivalent Air Changes per Hour» = äquivalente Luftwechsel pro Stunde

Parallel zur Reinigungsleistung wurden auch die Schallpegel gemessen. Abb. 3 zeigt die äquivalenten Dauerschallpegel ( $L_{Aeq}$ ) sowie die höchsten und tiefsten Kurzzeitschallwerte ( $L_{AFmin}$  und  $L_{AFmax}$ : Schnelle Zeitgewichtung mit einer Zeitkonstanten von 35 ms). Bei allen Messungen wurde die das menschliche Hörvermögen abbildende A-Frequenzgewichtung verwendet. Alle untersuchten Luftreiniger waren bei Volllast lauter als der für Büroräumlichkeiten empfohlene Hintergrundgeräuschwert von 40 dB(A) bis 45 dB(A). In der Schulkantine wäre ein Betrieb unter Volllast noch im Bereich der Empfehlungen für Betriebsrestaurants von 55 dB(A). Die Messungen ohne Reiniger zeigen die Grenzen solcher Untersuchungen in einer realen Umgebung (Klassenzimmern). Sowohl Geräusche der Heizung als auch Wind im Freien liessen den Schallpegel nie unter 27 dB(A) sinken.

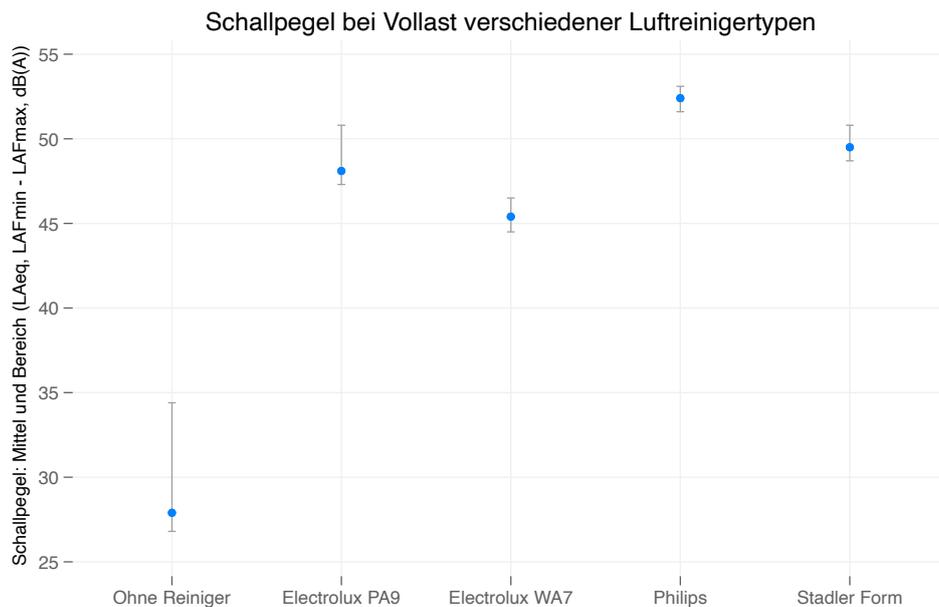


Abb. 3 Vergleich der äquivalenten Dauerschallpegel ( $L_{Aeq}$ ) in 2 Metern Abstand beim Betrieb der Geräte auf der höchsten Stufe (Stadler Form auf Stufe 4 von 5). Die Whisker verbinden die Punkte der höchsten und tiefsten Kurzzeitschallwerte.

Weitere Untersuchungen betrachteten die Leistung der Geräte auf den häufigsten in den beiden Gebäuden zum Einsatz kommenden Stufen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen die Resultate für die Aerosol-Reduktion beziehungsweise den Schallpegel. Erwartungsgemäss nehmen sowohl Reinigungsleistung als auch Schallpegel bei höheren Betriebsstufen zu. Auf den tiefsten Stufen waren die Geräte fast nicht mehr hörbar mit entsprechend geringem Unterschied zu den Schallpegeln ohne Reinigerbetrieb. Die Messungen erfolgten an zwei verschiedenen Tagen. Die Messungen ohne Reiniger zeigen (Stufe 0 in Abb. 4 und Abb. 5), dass sowohl die Reduktionsrate ohne Reiniger also auch die Hintergrundschallpegel im Raum vergleichbar waren.

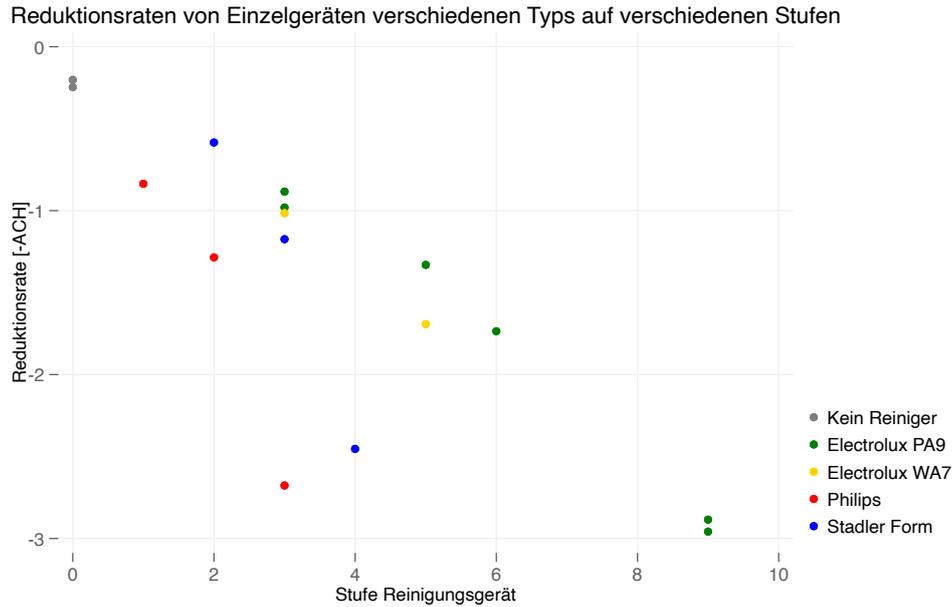


Abb. 4 Vergleich der Reduktionsraten von Einzelgeräten auf verschiedenen Stufen in einem Referenz-Klassenzimmer von 241 m<sup>3</sup> Volumen. Alle Versuche erfolgten im gleichen Raum, aber an zwei verschiedenen Tagen. An beiden Tagen wurde auch ohne Reiniger-Betrieb gemessen. Die Reduktionsraten sind bereits um die CO<sub>2</sub>-Leckrate des Raumes korrigiert.

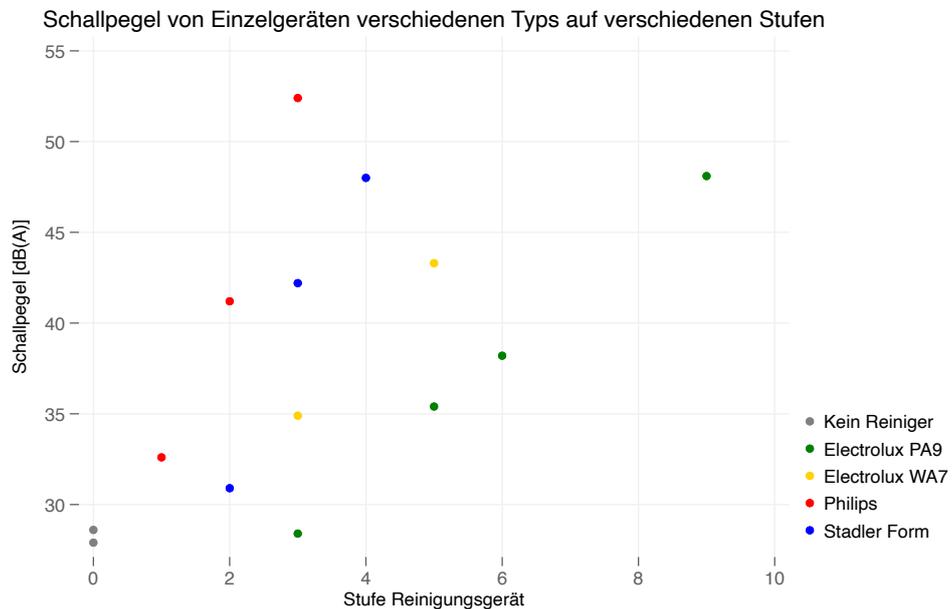


Abb. 5 Vergleich des Schallpegels von Einzelgeräten auf verschiedenen Stufen. Alle Versuche erfolgten im gleichen Raum aber an zwei verschiedenen Tagen. An beiden Tagen wurde auch ohne Reiniger-Betrieb gemessen.

#### 4.2.2 Schall bei grösserer Reinigungsleistung durch höhere Stufen oder mehr Geräte

Das in den oben beschriebenen Versuchen benutzte Referenz-Klassenzimmer wies von der Heizung stammende Hintergrundgeräusche auf. Um die Schallemissionen auf tiefen Stufen genauer zu betrachten, erfolgten zusätzliche Untersuchungen daher in einem Klassenzimmer mit weniger Hintergrundgeräuschen. In dem Zimmer waren bereits drei Philips AC4236-10 installiert, daher wurden die Experimente mit diesen Geräten durchgeführt. Die Dimensionen und das Volumen des Raumes

waren mit  $242 \text{ m}^3$  praktisch identisch zum Raum, in dem zuvor die Einzelgeräte verglichen worden waren. Abb. 6 zeigt die Reinigungsleistung und Abb. 7 die Schallpegel bei verschiedenen Stufen mit einem, zwei und drei Geräten sowie ohne Reiniger.

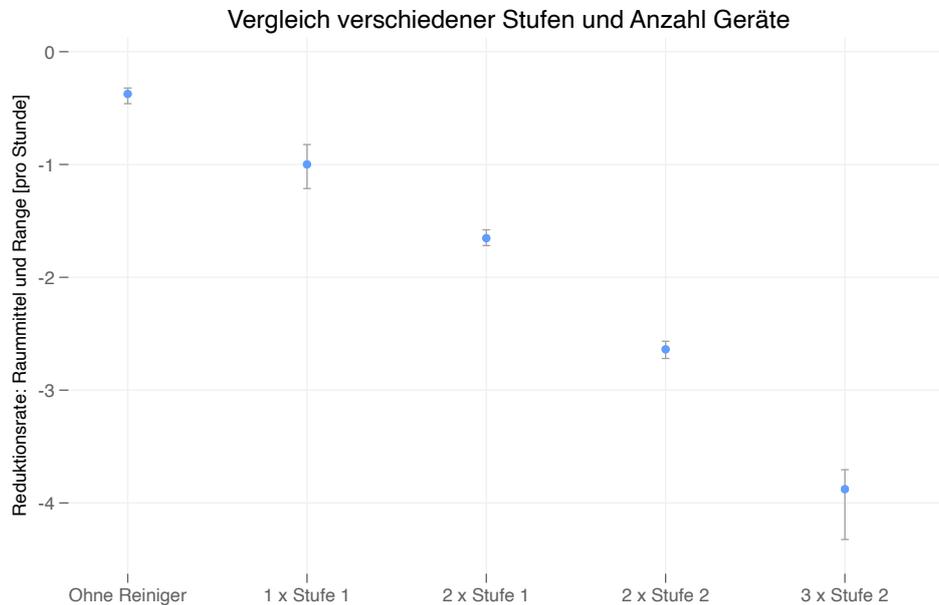


Abb. 6 Reduktionsraten der Aerosole beim Betrieb von einem, zwei und drei Philips AC4236-10 Luftreinigern auf tiefer und mittlerer Stufe in einem Referenz-Klassenzimmer von  $241 \text{ m}^3$  Volumen. Die Reduktionsraten sind bereits um die  $\text{CO}_2$ -Leckrate korrigiert. «Ohne Reiniger» zeigt die im Referenzzimmer bestimmte Rate.

Die Reinigungsleistung auf Stufe 1 war praktisch identisch mit derjenigen im Referenz-Klassenzimmer mit mehr Hintergrundgeräuschen. Im Referenz-Klassenzimmer wurde mit einem Gerät auf Stufe 2 eine Reinigungsleistung von  $1.4 \text{ eACH}$  gemessen, was nur gering tiefer ist, als was hier mit zwei Geräten auf Stufe 1 erreicht wurde. Die Zunahme der Reinigungsleistung war additiv und entsprach dem, was im Referenzklassenzimmer beobachtet worden war. Die Reduktionsraten mehrere Geräte lassen sich nach Subtraktion der Rate ohne Reiniger addieren, was in einem gut gemischten Raum erwartet wird.

Wenn zwei oder drei Geräte parallel eingesetzt werden, erhöht sich der Schallpegel weniger stark, als wenn die Stufe der Geräte erhöht wird, um die Reinigungsleistung zu erhöhen. Dieses Verhalten ist erwartbar, denn eine Verdoppelung der Schalleistung entspricht auf der logarithmischen Dezibel-Skala einer Erhöhung um  $3 \text{ dB(A)}$ <sup>14</sup>. Der getestete Gerätetyp zeigt pro Reinigungsstufe aber eine Erhöhung um rund  $10 \text{ dB(A)}$ . Auch bei den anderen getesteten Geräten ist es aus Sicht der Schalleistungs-Reduktion besser, mehr Geräte auf tieferer Stufe zu betreiben. Die Experimente bestätigen die theoretischen Überlegungen.

<sup>14</sup> Die Verdoppelung der Gerätezahl auf Stufe 1 geht einher mit einer Erhöhung um  $4 \text{ dB(A)}$ . Dies lässt sich durch Unterschiede im Hintergrundlärm (erkennbar an den Whiskern) erklären.

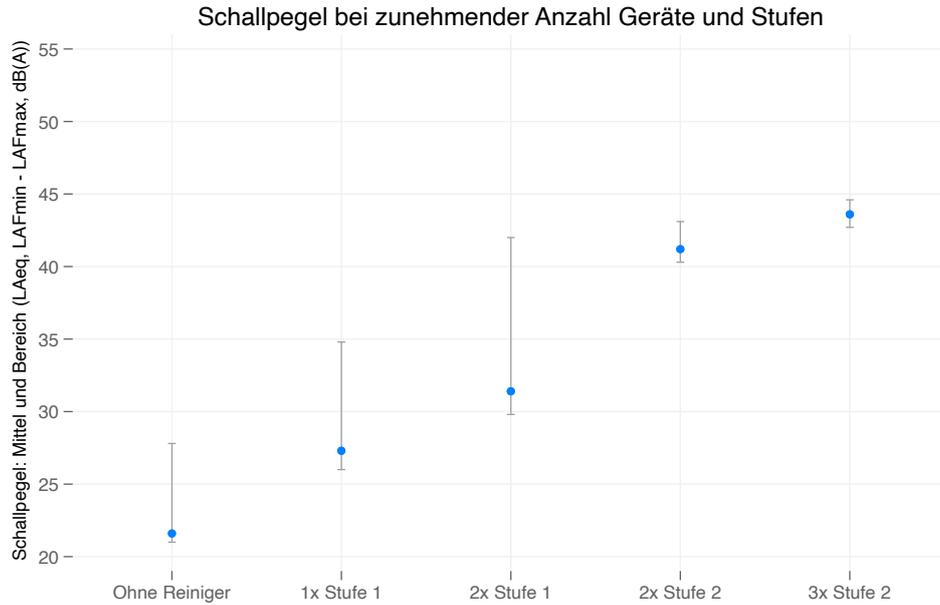


Abb. 7 Schallpegel beim Betrieb von einem, zwei und drei Philips AC4236-10 Luftreinigern auf Stufen 1 und 2 (von maximal 3 Stufen). Die Messungen erfolgten in einem der ruhigsten Klassenzimmer. Die LAFmax-Werte auf den tiefen Stufen bezeugen aber, dass gelegentlich Hintergrundgeräusche hörbar waren.

#### 4.2.3 Frequenzspektrum bei verschiedener Reinigungsleistung

Das mit dem Audio-Analysator gemessene Frequenzspektrum ist bei den meisten Geräten breit, flach und gleicht einem rosa Rauschen (siehe Abb. 8 und Abb. 9). Einzig der Stadler Form Roger big fällt durch einzelne Spitzen auf. Diese machen sich bei höheren Stufen in Form eines tiefen Brummens bemerkbar. Ein Vergleich der Spektren mit den noise-rating-Kurven (NR) zeigt, dass die meisten Spektren unterhalb der NR 40 Kurve liegen. Ein Betrieb auf jenen Stufen wird gemäss ISO (ISO/R 1996-1971) also als im Einklang mit ruhigen Büroumgebungen betrachtet.

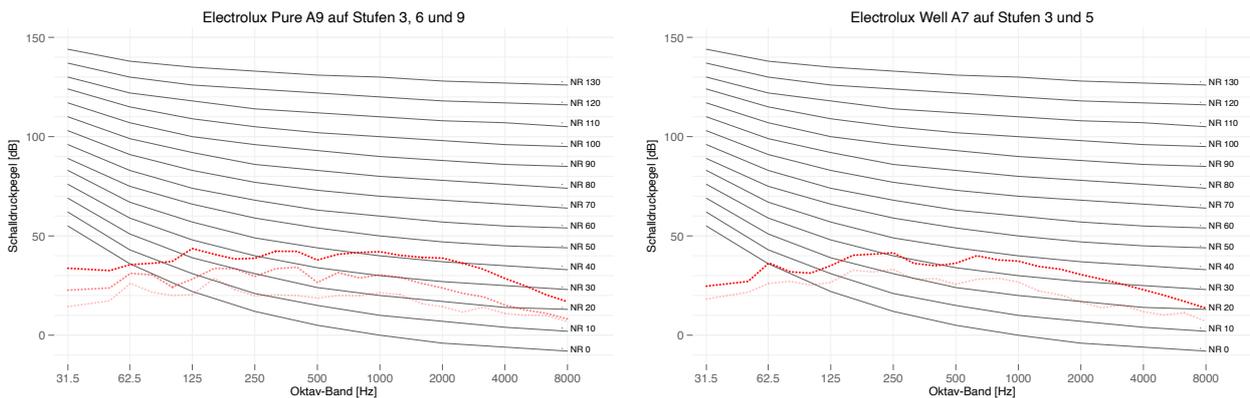


Abb. 8 Gemessenes Frequenzspektrum im Vergleich zu Noise Rating Kurven für die Geräte von Electrolux. Beide Geräte weisen ein breites, flaches Spektrum auf, das einem rosa Rauschen gleicht.

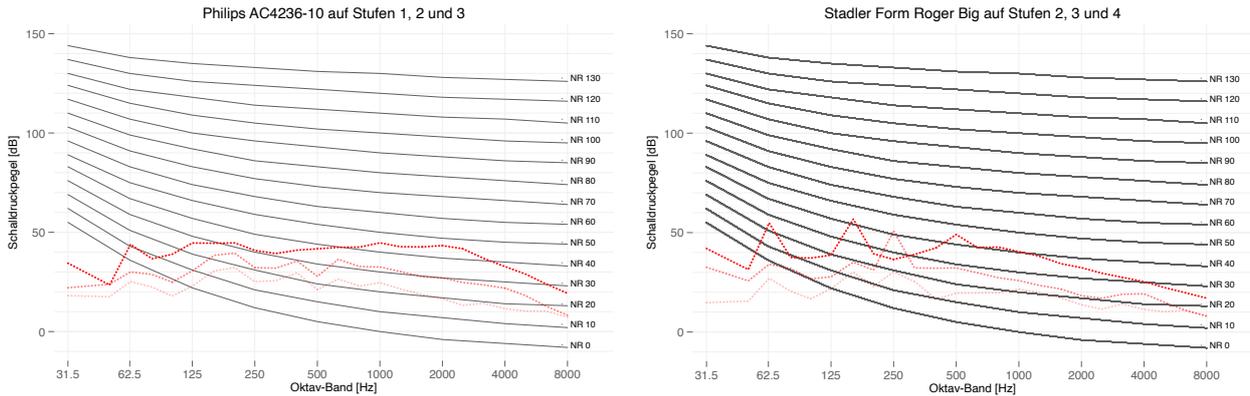


Abb. 9 Gemessenes Frequenzspektrum im Vergleich zu Noise Rating Kurven für die Geräte von Philips und Stadler Form. Das Gerät von Philips weist ein breites, flaches Spektrum auf, das einem rosa Rauschen gleicht. Beim Roger big fallen einzelne erhöhte Frequenzen auf.

Es gilt hier hervorzuheben, dass diese Messungen nicht in einem Akustik-Labor sondern in Klassenzimmern mit Hintergrundgeräuschen erfolgten. Besonders bei den niedrigeren Stufen sind die Spektren mit einer gewissen Vorsicht zu interpretieren.

#### 4.2.4 Reinigungsleistung und Schallpegel der Geräte in Gemeinschaftsräumen

Die Geräte wurden auch im Singsaal, im Hort/Mittagstisch und einem zweiten Essraum, dem «Kinderrestaurant». Der Singsaal ist mit 330m<sup>3</sup> der grösste Raum in Kopfholz 1 und verfügt als einziger Raum im Gebäude über eine mechanische Lüftung. Sie muss manuell ein- und ausgeschaltet werden. Während zwei Phasen wurde diese Raumlüftung auf Stufe 1 betrieben. Während der Versuchsphase wurden drei Philips AC4236-10 Luftreinigern auf Stufe 1 betrieben. Abb. 10 zeigt den Verlauf der Aerosolkonzentration während der Versuchsphase. Die Aerosolfreisetzung erfolgte im Bereich der Bühne. Die Sensoren waren im Raum verteilt.

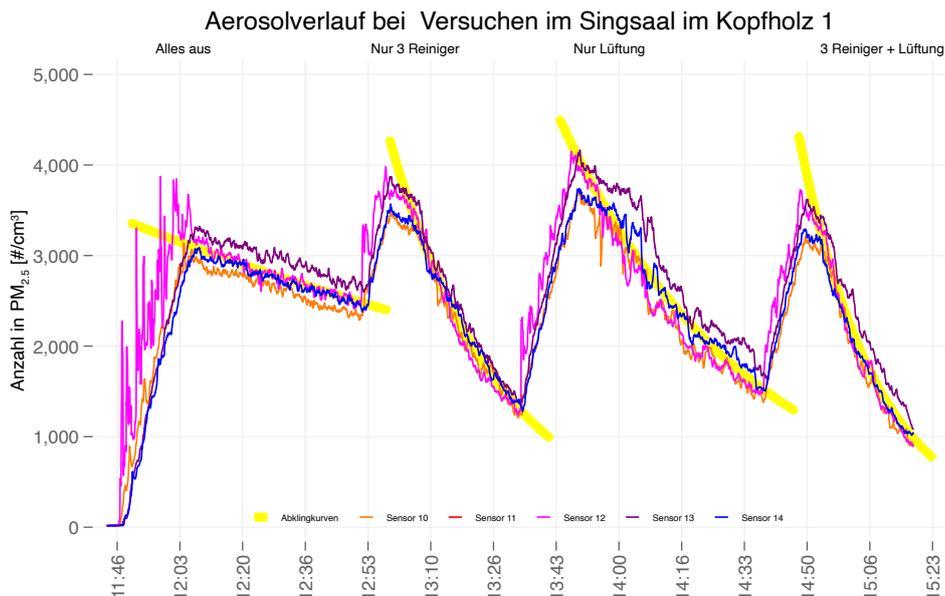


Abb. 10 Zeitlicher Verlauf der Aerosolkonzentration im Singsaal. Während der Aufbauphase und ein paar Minuten danach waren jeweils drei Ventilatoren im Betrieb, um die Aerosole im Raum zu verteilen. Gegen Ende der ersten Freisetzungphase wurde ein Ventilator umgestellt, um für eine gleichförmigere Anfangsverteilung zu sorgen.

Anders als Gase verteilen sich Aerosole fast ausschliesslich über Luftbewegungen in einem Raum. Dies hat zur Folge, dass sich die Aerosole in Schwaden langsam im Raum verteilen. Wie in Abb. 10 gut sichtbar, gab es trotz der drei eingesetzten Ventilatoren grosse Schwankungen besonders in der Nähe der Quelle (Magenta Linie, Sensor 12). Am besten ist das in der ersten Aufbauphase beobachtbar, als die Standorte der Ventilatoren noch optimiert wurden. Auch danach gab es an den einzelnen Standorten deutlich erkennbare Schwankungen und Unterschiede zwischen den Sensoren. Die Konzentrationsunterschiede waren in denjenigen Phasen, in denen Luftreiniger liefen, geringer, da diese im turbulenten Strömungsbereich für eine homogenere Verteilung sorgen.

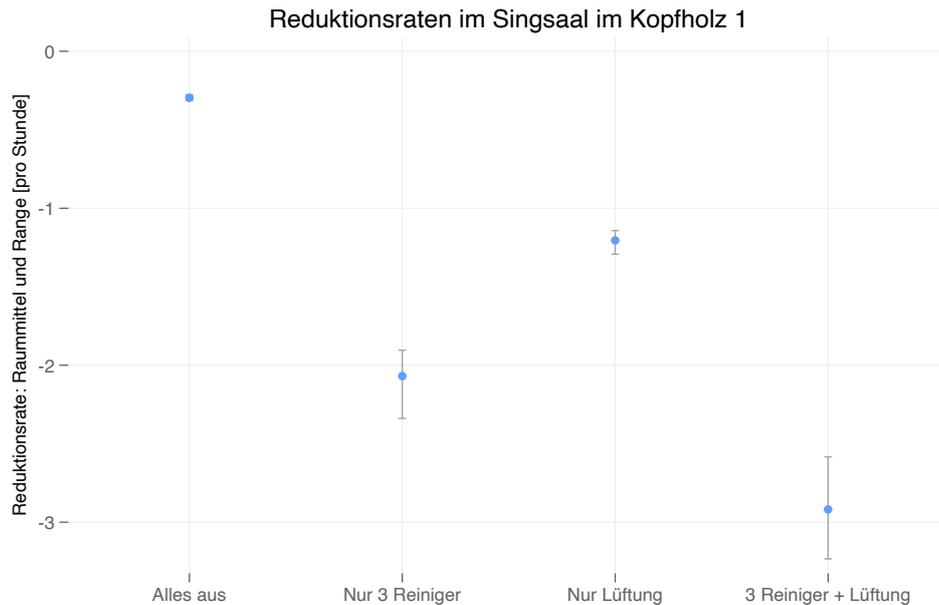


Abb. 11 Reduktionsraten im Singsaal bei den getesteten Konfigurationen.

Abb. 11 zeigt, dass die Lüftung im Singsaal eine Reduktionsrate hat, die rund einem Luftwechsel pro Stunde entspricht. Die drei Reiniger sorgten bereits auf Stufe 1 für eine deutlich stärkere Reduktion der Aerosole und die Kombination war nochmals deutlich besser.

Der Betrieb von Luftreiniger und Lüftung alleine oder zusammen führte jeweils zu einer leichten Erhöhung des Schallpegels. Auch im Kombinationsbetrieb war der Dauerschallpegel mit 33.6 dB(A) aber noch immer sehr tief. Wie in Abb. 12 an den Whiskern gut erkennbar, waren im Singsaal Hintergrundgeräusche von Aktivitäten in anderen Teilen des Schulhauses in Form von Körperschall und Kindergeschrei gut zu hören. Diese übertönten das leise Rauschen von Reiniger und Lüftung jeweils deutlich.

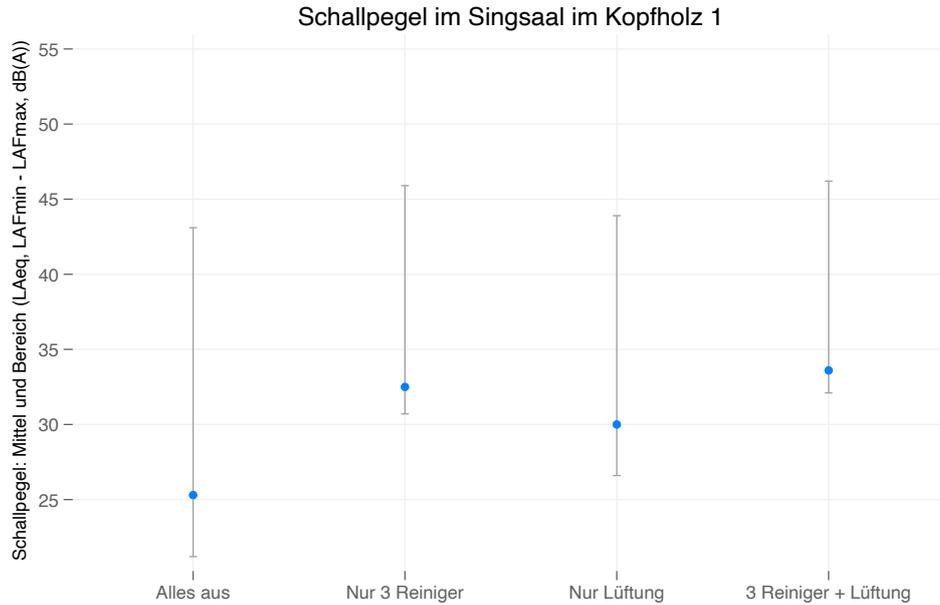


Abb. 12 Schallpegel während der Experimente im Singsaal. In dieser Zeit gab es in anderen Räumen Aktivitäten, die immer wieder deutlich hörbaren Körperschall verursachten. Zudem war gelegentlich vom Korridor Kindergeschrei hörbar. Dies erklärt die hohen LAFmax-Werte.

Der Hort/Mittagstisch und der zweite Essraum, das «Kinderrestaurant», befinden sich im obersten Stockwerk des nach Minergie-Standard gebauten Kopfh Holz 2. Die Reiniger in diesen Räumen waren Stadler Form Roger big.

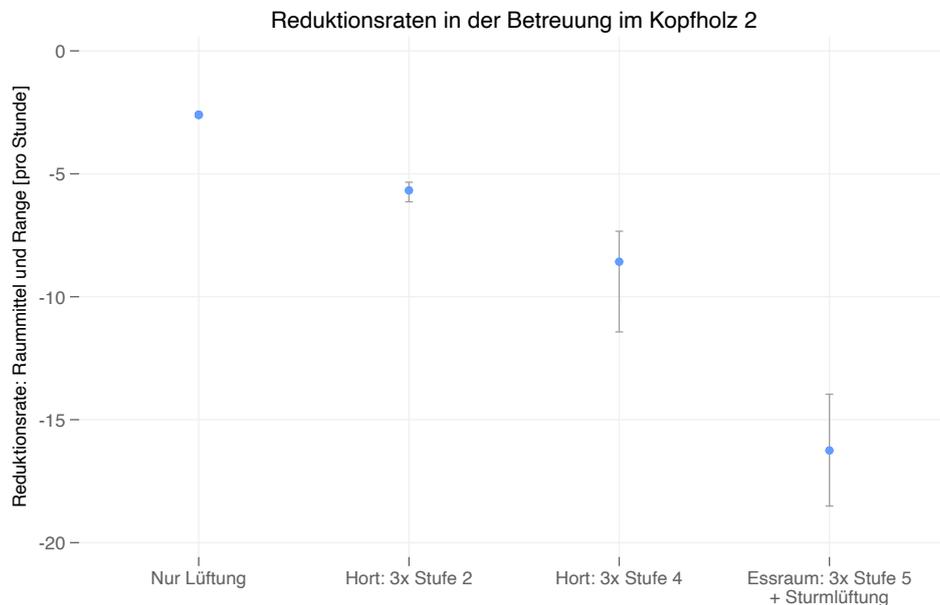


Abb. 13 Reduktionsraten in den Räumen der Betreuung in Kopfh Holz 2. Beide Räume haben ein Volumen von 354 m<sup>3</sup>. Die Reduktionsraten sind wie gemessen, also nicht auf die Lüftungsrate korrigiert. Der Wert «Nur Lüftung» wurde mit der CO<sub>2</sub>-Methode bestimmt und zeigt die Lüftungsrate bei wenig Personen im Raum, entsprechend der Situation während den Aerosolversuchen.

Abb. 13 zeigt die Reduktionsraten in diesen Räumen. Es gilt zu berücksichtigen, dass es hier bereits ohne Reiniger einen hohen Luftwechsel gibt. Die mit der CO<sub>2</sub>-Methode bestimmte Luftwechselrate betrug bei geringer Belegung 2.6 ACH, bei Anwesenheit von Kindern im Mittel 4.1 ACH und bei sehr

hoher Belegung rund 8 ACH. Die auf hoher Stufe laufenden Reiniger bewirkten nochmals eine deutliche Erhöhung der äquivalenten Gesamtluftwechselrate.

Im Essraum gibt es die Option, eine zusätzliche Sturmlüftung einzuschalten. Zu Testzwecken wurde diese zusammen mit drei Stadler Form Geräten auf Vollast (Stufe 5) getestet. In der Summe resultierte eine äquivalente Reduktionsrate von über 16.2 eACH (Raummittel, maximale Rate im Raum 18.5 eACH). Die Lüftung war in den Räumen der Betreuung deutlich hörbar, wie auch in Abb. 14 erkennbar. Der Dauerschallpegel blieb beim Einsatz der Reiniger auf Stufe 2 unverändert. Die Kombination aus Sturmlüftung und Reiniger auf Vollast erhöhte den Schallpegel allerdings deutlich und war mit 55.2 dB(A) im Bereich des maximal empfohlenen Wertes für Betriebsrestaurants.

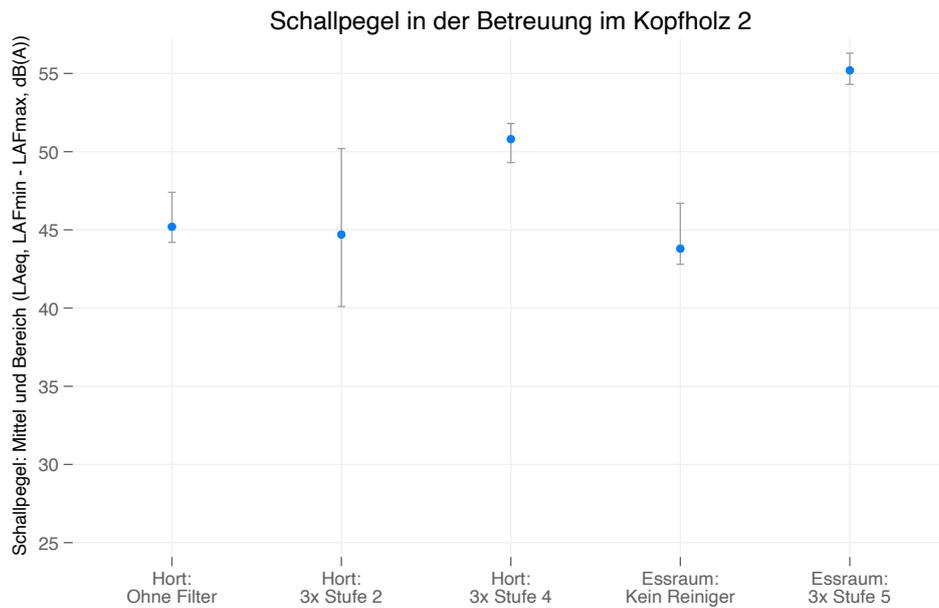


Abb. 14 Schallpegel in den Räumen der Betreuung. Die Geräusche der Lüftung waren deutlich hörbar.

#### 4.2.5 Bevorzugte Einstellungen und Benutzerakzeptanz

Der Schallpegel mit und ohne Luftreiniger im Betrieb wurde in beiden Schulgebäuden bestimmt. Abb. 15 zeigt die Ruhewerte und die Schallpegel auf den von den Lehr- und Betreuungspersonen als akzeptabel bezeichneten Gerätestufen.

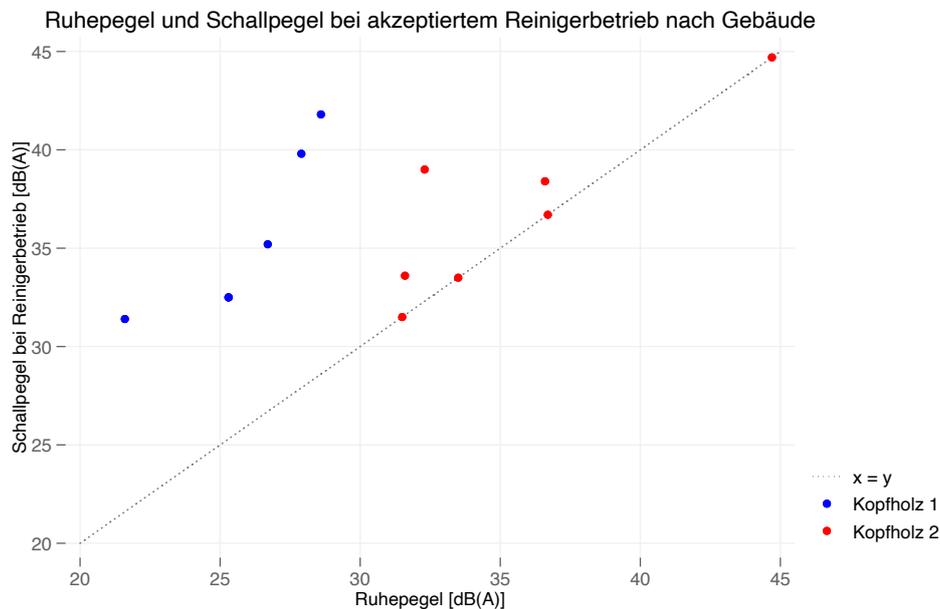


Abb. 15 Untersuchung des akzeptierten Schallpegels in den Räumen der beiden Schulgebäude. Die Messungen erfolgten bei ausgeschalteten Reinigern (Ruhepegel) und auf den von den Lehrpersonen bevorzugten Stufen. Punktirt eingezeichnet ist die Linie identischer Ruhe und Betriebswerte.

Bezüglich Ruhepegel war ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Gebäuden erkennbar. In den Klassenzimmern von Kopfholz 1 lag dieser zwischen 21.6 und 30.0 dB(A), in den Klassenzimmern von Kopfholz 2 zwischen 32.3 und 36.6 dB(A). Im Hort/Mittagstisch von Kopfholz 2 waren es sogar 45.2 dB(A). Die erhöhten Schallwerte in Kopfholz 2 können der Gebäudelüftung zugeordnet werden.

Bezüglich des Schallpegels beim Reinigerbetrieb auf den von den Lehrpersonen bevorzugten Stufen war dagegen kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Gebäuden feststellbar. Der Schallpegel lag in den Klassenzimmern zwischen 31.5 und 41.8 dB(A) und im Hort/Mittagstisch bei 45 dB(A). Die höchsten noch als akzeptabel bezeichneten Werte befinden sich in der gleichen Größenordnung wie die empfohlene Obergrenze für Büroarbeitsplätze von 40 bis 45 dB(A). In den Klassenzimmern von Kopfholz 1 bedeutete der Betrieb der Luftreiniger allerdings eine deutlich grössere Erhöhung des Hintergrundschallpegels als in Kopfholz 2.

Die Definition von «akzeptablem Geräusch» scheint auch eine subjektive Note zu enthalten, was daran ersichtlich ist, dass von einigen Lehrpersonen nur Werte deutlich unter 35 dB(A) noch als akzeptabel betrachtet wurde. Auch bei identischen Gerätekonfigurationen variierte die als noch akzeptabel empfundene Stufe zum Teil stark zwischen Lehrpersonen. Aus den Logblättern einiger LP war ersichtlich, dass höhere Stufen nicht getestet wurden. Es ist gut möglich, dass die Geräte in einigen Fällen nicht wegen des Geräusches als störend betrachtet wurden.

### 4.3 Luftqualität in den Schulräumen: Statistiken über die gesamte Studienperiode

Die während sechs Wochen aufgezeichneten CO<sub>2</sub>-Daten ermöglichten die Ermittlung der CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung für die beiden untersuchten Gebäude Kopfh Holz 1 und 2 und für sämtliche Schulzimmer. Diese CO<sub>2</sub>-Statistik ist nach Gebäude, Schulzimmer und Wochentag aufgeschlüsselt. Zudem sind zusammenfassende Statistiken pro Schulzimmer (Mittelung über alle Wochentage) und pro Gebäude (Mittelung über alle Schulzimmer des Gebäudes) verfügbar.

Die Primarschule Kopfh Holz arbeitet mit altersdurchmischem Lernen, wobei die meisten Klassen mit zwei Jahrgängen in Halbklassen geführt werden. Entsprechend kann der Unterricht abwechslungsweise im Format Ganzklasse (GK), untere oder obere Halbklass (UHK/OHK) stattfinden. In einer Ganzklasse wie z.B. einer 5./6. Klasse werden im Mittel 22 Schülerinnen und Schüler (SuS) mit 11 SuS pro Halbklass unterrichtet. Ausserdem gibt es eine Kleinklass (KK) mit 11 SuS.

Weil die CO<sub>2</sub>-Produktionsrate von der Klassengrösse abhängt, sind die Statistiken zusätzlich nach dem *Unterrichtsformat* (GK, UHK, OHK und KK) aufgeschlüsselt. Dies wurde erreicht, indem die CO<sub>2</sub>-Daten mit Hilfe des Stundenplans den verschiedenen Unterrichtsformaten zugeordnet wurden.

Zur Berechnung der CO<sub>2</sub>-Statistik für ein gegebenes Unterrichtsformat (GK, UHK, OHK oder KK) wurde jeder Wochentag der Studienperiode mit verfügbaren Daten gemäss Stundenplan analysiert. Pro Format wurde jede Unterrichtseinheit als separates 45-Minuten-Intervall mit den vorgesehenen Unterrichtszeiten berücksichtigt. Das Timen der CO<sub>2</sub>-Analyse und das Ausschliessen der Pausen erleichterte die Erkennung von Abwesenheiten einer Klasse. Eingeplante Unterrichtszeiten, zu denen der Raum nicht belegt war, könnten die CO<sub>2</sub>-Statistik in der einen oder anderen Richtung verfälschen – je nachdem, ob der Raum in gelüftetem oder ungelüftetem Zustand verlassen wurde. Daher wurden eingeplante Zeiten von der Statistik ausgeschlossen, wenn der Raum aufgrund der CO<sub>2</sub>-Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht durch eine Klasse belegt war.

Abb. 16 vergleicht die CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilungen (Mittelung über alle Wochentage) aller Klassenzimmer bei Unterricht im Ganzklassenformat zwischen Kopfh Holz 1 und 2.

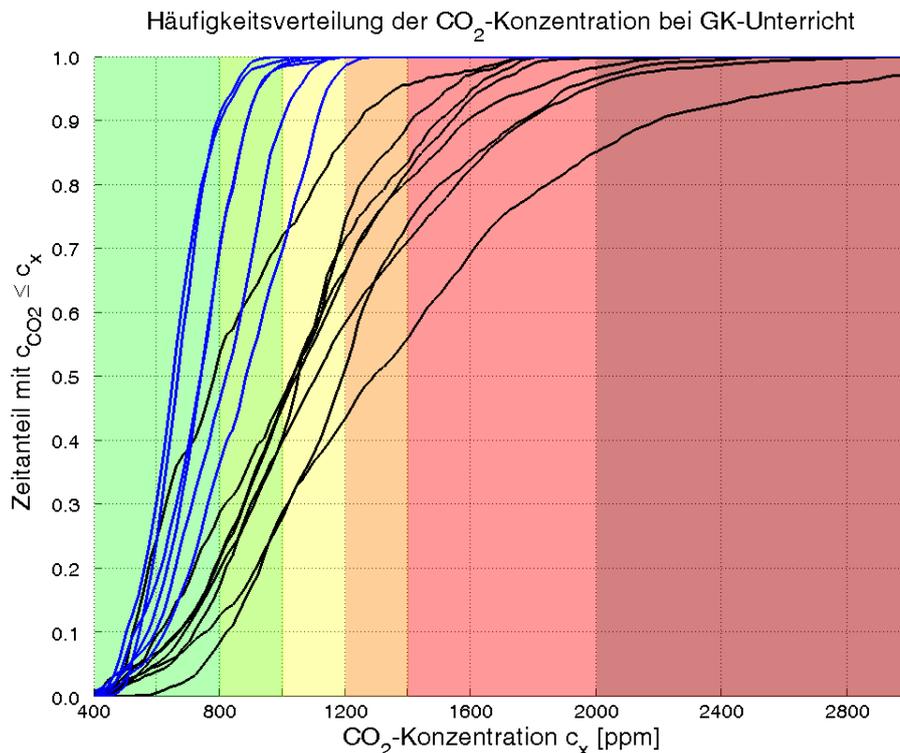


Abb. 16 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung in den Klassenzimmern bei Ganzklassen (GK) – Unterricht.

**Schwarze Kurvenschar:** Klassenzimmer Schulhaus Kopfh Holz 1 (Fensterlüftung)  
**Blaue Kurvenschar:** Klassenzimmer Schulhaus Kopfh Holz 2 (mechanische Lüftung)

Die CO<sub>2</sub>-Werte in den Räumen von Kopfholz 1 (Fensterlüften) waren häufig im roten oder sogar im hygienisch inakzeptablen braunen Bereich über 2000 ppm, während sie in Kopfholz 2 (mechanische Lüftung) meist im guten bis sehr guten Bereich unter 1200 ppm bzw. unter 1000 ppm blieben.

Abb. 17 und Tab. 1 zeigen die CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung bei Unterricht mit Ganzklassen (GK) in den Klassenzimmern von Kopfholz 1, welche nur manuell gelüftet werden können.

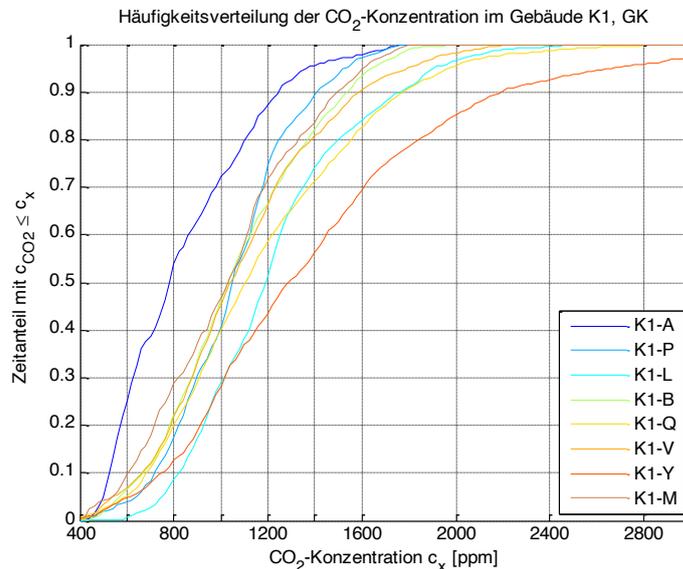


Abb. 17 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung in den Klassenzimmern von Kopfholz 1 (Fensterlüften) bei Ganzklassen-Unterricht.

Lesebeispiel: In K1-Y lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration während 56 % der Zeit unter 1400 ppm und während 44 % der Zeit darüber. Während 15 % der Zeit lag sie über 2000 ppm.

Zur Einordnung der Werte: Unter 800 ppm werden in Gebäuden nur sehr selten gesundheitliche Beschwerden beobachtet. Mit zunehmenden CO<sub>2</sub>-Werten sinkt die geistige Leistungsfähigkeit und erhöhen sich Konzentrationsschwächen, Müdigkeit und Kopfschmerzen. Das SECO bezeichnet die Luftqualität bei CO<sub>2</sub>-Werten unter 1000 ppm als «gut bis sehr gut», von 1000 bis 1400 ppm als «mässig», und von 1400 bis 2000 ppm als «niedrig». CO<sub>2</sub>-Werte über 2000 ppm werden als «hygienisch inakzeptabel» betrachtet (SECO, 2023). Bei solchen Werten sind ein starker Abfall der geistigen Leistung und deutliche gesundheitliche Beschwerden zu erwarten.

Die Zeitangaben in den CO<sub>2</sub>-Häufigkeitstabellen (Tab. 1 bis 4) sind für ein gegebenes Unterrichtsformat und die entsprechenden Stundenpläne wie folgt zu interpretieren:

**S-Zeit:** Für das Unterrichtsformat gemäss Stundenplan vorgesehene Gesamt-Unterrichtszeit in Stunden<sup>15</sup> während der Studienperiode<sup>16</sup>. Ausgeschlossen sind Tage, an welchen kein regulärer Unterricht stattfand, z.B. 01.02.2023 und Freitag vor den Sportferien. Sämtliche Pausen (kurz oder lang) sind ausgeschlossen. Es gilt S-Zeit = P-Zeit + N-Zeit + F-Zeit.

**P-Zeit:** Gesamt-Unterrichtszeit in Stunden<sup>15</sup>, während der die CO<sub>2</sub>-Daten verfügbar und vollständig waren und die Klasse aufgrund der CO<sub>2</sub>-Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit *präsent* war. Die Häufigkeitsangaben sind auf die P-Zeit bezogen.

**N-Zeit:** Gesamt-Unterrichtszeit in Stunden<sup>15</sup>, während der die CO<sub>2</sub>-Daten verfügbar und vollständig waren, die Klasse jedoch aufgrund der CO<sub>2</sub>-Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit *nicht präsent* war.

**F-Zeit:** Gesamt-Unterrichtszeit in Stunden<sup>15</sup> mit unvollständigen oder fehlenden CO<sub>2</sub>-Daten (z.B. ausgestecktes Messgerät).

<sup>15</sup> Summe über alle Wochentage oder aufgeschlüsselt nach Wochentag.

<sup>16</sup> In K1-A waren CO<sub>2</sub>-Messungen erst nach Freiwerden eines Messgeräts ab 30.01.2023 verfügbar.

Zimmer	S-Zeit	P-Zeit	N-Zeit	F-Zeit	> 800	>1000	>1200	>1400	>2000
K1-A	07:30	07:30	00:00	00:00	46.1	27.8	12.7	4.5	0.0
K1-P	09:00	09:00	00:00	00:00	82.5	59.2	25.3	10.5	0.0
<b>K1-L</b>	54:45	50:15	04:30	00:00	91.4	71.0	48.6	25.9	3.4
<b>K1-B</b>	45:00	38:15	06:45	00:00	78.0	53.7	33.4	17.9	0.2
<b>K1-Q</b>	75:00	73:30	01:30	00:00	79.9	59.9	41.5	28.7	4.5
<b>K1-V</b>	63:00	55:30	06:45	00:45	78.3	54.6	33.6	19.3	1.8
<b>K1-Y</b>	72:45	58:30	11:15	03:00	87.2	71.9	56.4	43.8	14.9
K1-M	12:45	11:15	01:30	00:00	71.1	53.2	28.3	16.4	0.0

Tab. 1 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung [%] in den Klassenzimmern von Kopfh Holz 1 (GK, ganze Woche)

Die Klassenzimmer von Kopfh Holz 1 sind bezüglich des Volumens und der für die Belüftung verfügbaren Fensterflächen identisch; in Tab. 1 ist daher die grosse Spanne von 12.7 bis 56.4 % bei der Häufigkeit einer CO<sub>2</sub>-Konzentration über 1200 ppm besonders augenfällig. In Abschnitt 4.4 werden diese Diskrepanzen genauer untersucht.

Tab. 2 zeigt die CO<sub>2</sub>-Statistiken über alle Klassenzimmer von Kopfh Holz 1 bei Unterricht mit Ganz- und Halbklassen. Das moderate Lüftungsziel, die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 1200 ppm zu halten, wurde bei Unterricht mit Ganzklassen in 41.4 % der Zeit verfehlt. Bei Halbklassenunterricht (UHK und OHK) in Zimmern mit alternierenden Unterrichtsformaten wurde die Schwelle von 1200 ppm während 24 bis 27 % der Zeit überschritten<sup>17</sup>.

Format	S-Zeit	P-Zeit	N-Zeit	F-Zeit	> 800	>1000	>1200	>1400	>2000
GK	339:45	303:45	32:15	03:45	81.6	61.2	41.4	26.5	4.9
UHK	154:45	141:15	11:15	02:15	74.4	48.6	26.9	12.6	2.5
OHK	147:00	129:00	16:30	01:30	74.1	47.1	23.9	11.9	1.0
KK	123:45	110:15	09:45	03:45	68.2	40.9	17.8	6.4	0.0

Tab. 2 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilungen [%] in Kopfh Holz 1 mit Fensterlüftung (ganze Woche)

Die Statistik für Kopfh Holz 1 beinhaltet CO<sub>2</sub>-Daten aus einer Gesamt-Unterrichtszeit (P-Zeit) von 684.25 h.

Tab. 3 zeigt zum Vergleich die entsprechenden Verteilungen für das Schulgebäude Kopfh Holz 2, welches über eine Lüftungsanlage verfügt.

Format	S-Zeit	P-Zeit	N-Zeit	F-Zeit	> 800	>1000	>1200	>1400	>2000
GK	423:00	312:45	98:15	12:00	31.9	6.9	0.2	0.0	0.0
UHK	84:00	51:00	27:00	06:00	19.9	1.5	0.1	0.1	0.0
OHK	120:00	81:45	27:45	10:30	13.8	1.5	0.1	0.1	0.0
KK	00:00	00:00	00:00	00:00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tab. 3 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilungen [%] in Kopfh Holz 2 mit Lüftungsanlage und manueller Lüftung (ganze Woche)

Mit einem Zeitanteil von nur 32 % über 800 ppm und fast keinen Werten über 1200 ppm war die Luftqualität im mechanisch belüfteten Gebäude Kopfh Holz 2 signifikant besser als im manuell belüfteten Altbau Kopfh Holz 1, wo die CO<sub>2</sub>-Konzentration während 81.6 % der Zeit über 800 ppm lag. Allerdings zeigten sich auch in Kopfh Holz 2 bei Aufschlüsselung der Statistik nach Klassenzimmer deutliche Unterschiede in der Luftqualität. Wie in Abb. 18 und in Kolonne «> 800» von Tab. 4 ersichtlich ist, hatten die Klassenzimmer K2-E und K2-N im Erdgeschoss die beste Luftqualität mit fast deckungsgleichen CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilungen. Bei geringerer Luftqualität sind auch die Statistiken der Zimmer K2-W und K2-Z im 2. OG nahezu identisch. Deutlich höhere, aber immer noch

<sup>17</sup> Die Statistik für das Format KK ist nicht repräsentativ, weil nur zwei Klassenzimmer dazu beitragen.

mehrheitlich akzeptable CO<sub>2</sub>-Werte unter 1200 ppm wurden jedoch in den Zimmern K2-R und K2-U im 1. OG gefunden.

Zimmer	S-Zeit	P-Zeit	N-Zeit	F-Zeit	> 800	>1000	>1200	>1400	>2000
K2-E	84:00	57:00	24:00	03:00	8.7	0.0	0.0	0.0	0.0
K2-N	84:00	44:15	30:45	09:00	10.1	0.6	0.0	0.0	0.0
K2-R	56:15	49:30	06:45	00:00	63.3	30.0	1.4	0.1	0.0
K2-U	56:15	48:45	07:30	00:00	53.4	9.7	0.1	0.0	0.0
K2-W	74:15	60:45	13:30	00:00	29.0	1.2	0.1	0.0	0.0
K2-Z	68:15	52:30	15:45	00:00	29.5	1.6	0.0	0.0	0.0

Tab. 4 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung [%] in den Klassenzimmern von Kopfholz 2 (GK, ganze Woche)

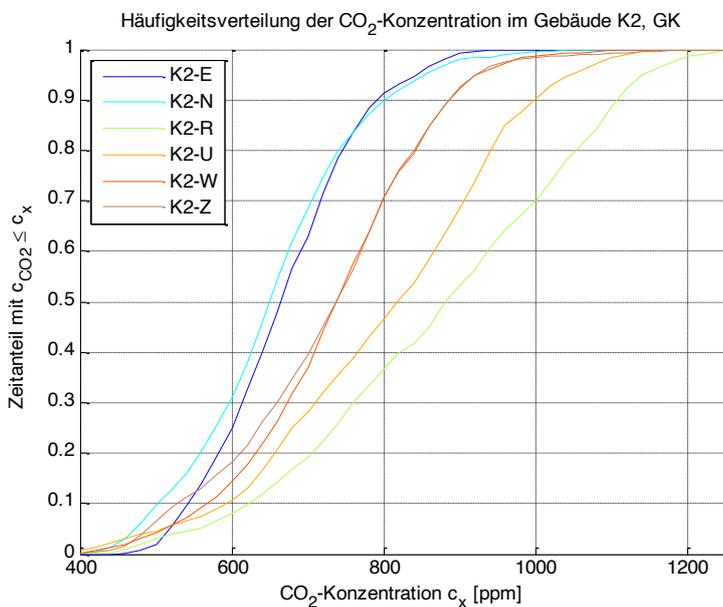


Abb. 18 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung in den Klassenzimmern von Kopfholz 2 (Lüftungsanlage und manuelles Lüften) bei GK-Unterricht. Man beachte die im Vergleich zu Kopfholz 1 viel kürzere CO<sub>2</sub>-Achse.

Lesebeispiel: In K2-R lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration während 70 % der Zeit unter 1000 ppm und während 30 % der Zeit darüber.

Die Zimmer im EG und im 1. OG haben alle ein Volumen von 320 m<sup>3</sup>, diejenigen im 2. OG von 260 m<sup>3</sup>. Trotz identischer Einstellung der Lüftungsparameter für alle Klassenzimmer<sup>18</sup> bestanden grosse Unterschiede bei den erreichten Lüftungsquoten. Es scheint daher im 1. OG eine Unterversorgung relativ zu den übrigen Stockwerken vorzuliegen.

<sup>18</sup> gemäss Information Hauswartung.

#### 4.4 Luftqualität nach Schulzimmer und Wochentag in Kopfholz 1

Die grossen Diskrepanzen zwischen den Klassenzimmern von Kopfholz 1 hinsichtlich CO<sub>2</sub>-Belastung werden noch deutlicher bei der Aufschlüsselung der CO<sub>2</sub>-Statistik nach Wochentag in Abb. 19. Die im Infoblatt «Verbesserung der Luftqualität im Schulhaus Kopfholz 1» empfohlene Obergrenze von 1200 ppm (rot) wurde an mehreren Wochentagen mindestens zur Hälfte der Zeit überschritten und die CO<sub>2</sub>-Werte waren zwischen 8% und 25% der Zeit hygienisch inakzeptabel.

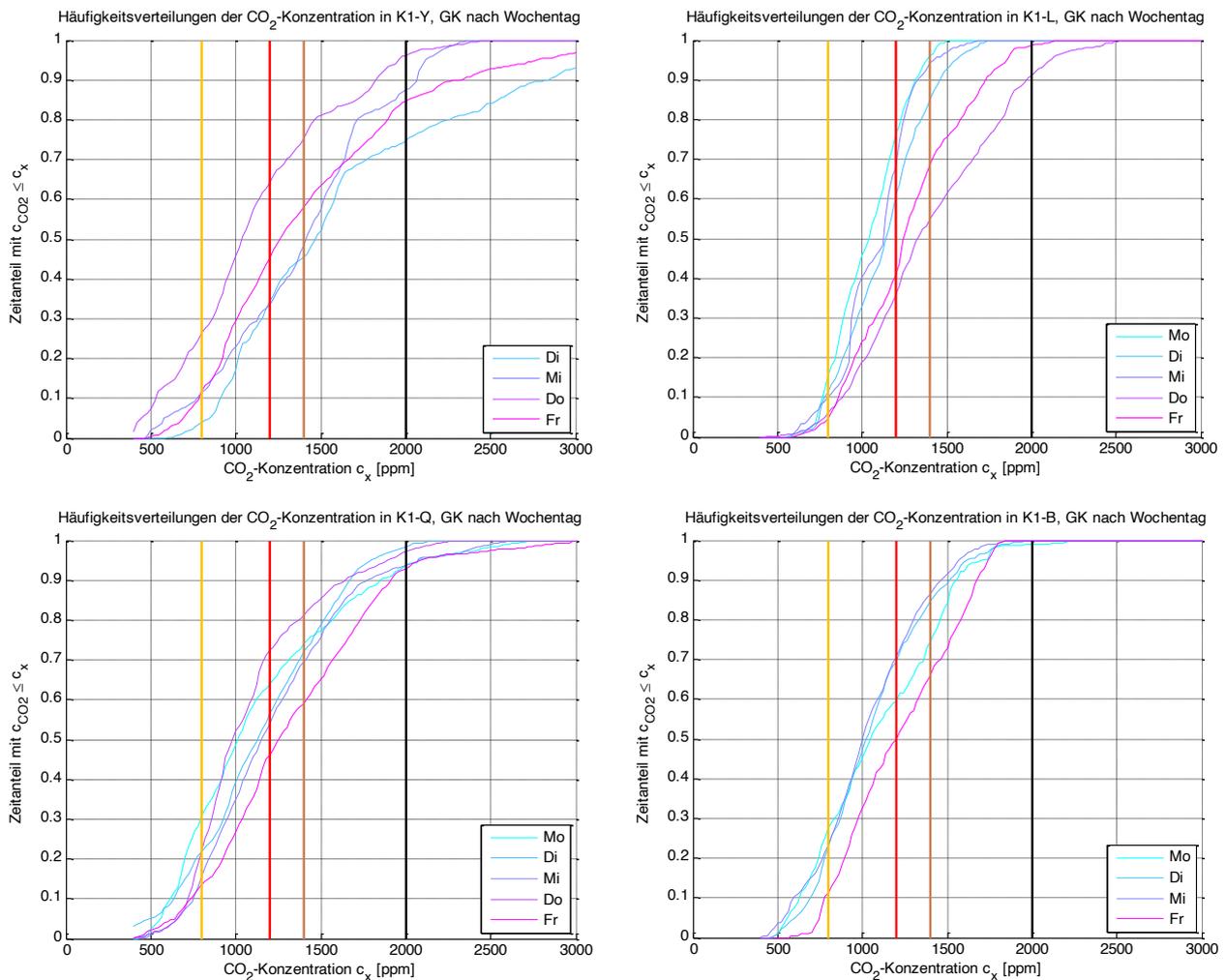


Abb. 19 CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilungen in Kopfholz 1 bei Ganzklassen-Unterricht, aufgeschlüsselt nach Wochentag.  
Lesebeispiel: In K1-Q lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration je nach Wochentag während 18.8 bis 41.0% der Zeit über 1400 ppm.

Die in Tab. 1 fett hervorgehobenen Zimmer wurden bezüglich Lüftungsmuster und Luftqualität an verschiedenen Wochentagen näher untersucht. Für eine gute Vergleichbarkeit wurden Wochentage gewählt, an welchen jeweils genau vier Unterrichtseinheiten im Ganzklassen-Format (GK-Format) stattfanden. Bei den meisten Klassenzimmern waren dies zwei Doppelstunden, also je zwei Unterrichtseinheiten von 45 Minuten, getrennt durch eine Kurzpause von fünf oder zehn Minuten. Doppelstunden mit dazwischenliegender Kurzpause sind lüftungsmässig anspruchsvoll, weil für das Lüften in der Pause wenig Zeit zur Verfügung steht. Bei K1-Q wurde ein Wochentag mit zwei Einzelstunden und einer Doppelstunde gewählt.

Mit der getroffenen Auswahl gab es für die Untersuchung der Lüftungsmuster an jedem Raum-Wochentag im Laufe der sechswöchigen Pilotstudie bis zu 24 GK-Unterrichtseinheiten (GK-UE) und bis zu 12 dazwischenliegende Kurzpausen (KP).

Im Infoblatt wurde empfohlen, zweimal pro Stunde zu lüften – einmal während jeder Lektion und einmal ausgiebig in *jeder* Pause. Daher bestimmten wir mit Hilfe von Wochentag-Plots die Gesamtzahl der *effizienten Lüftungen* in den GK-Unterrichtseinheiten und den dazwischenliegenden Kurzpausen. In den Kurzpausen kamen als effiziente Lüftungen nur Stosslüftungen in Frage; während der Unterrichtseinheiten alternativ auch Dauerlüftungen.

*Stosslüftungen* galten dabei als effizient, wenn sie in kurzer Zeit (5-10 Minuten) mindestens 50 % der Raumluft durch Aussenluft ersetzen. Wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei einer Stosslüftung von  $c_1$  auf  $c_2$  fällt, lässt sich der durch Aussenluft mit  $c_a \approx c_{a,ref} = 424$  ppm ersetzte Volumenanteil  $x$  näherungsweise mit der Mischrechnung  $x \cdot c_{a,ref} + (1 - x) \cdot c_1 = c_2$  bestimmen. Stosslüftungen mit  $x = (c_1 - c_2) / (c_1 - c_{a,ref}) \geq 0.5$  wurden daher als effizient gezählt.

*Dauerlüftungen* galten als effizient, falls die CO<sub>2</sub>-Konzentration während des Unterrichts kontinuierlich abnahm und unter 1200 ppm fiel oder bis zum Ende der Lektion unter dieser Schwelle blieb.

Tab. 5 zeigt die vorgefundenen Lüftungsmuster mit den CO<sub>2</sub>-Statistiken des Wochentags. Die Häufigkeit effizienter Lüftungen (EL.Freq) erweist sich darin als nützliches Mass zur Optimierung der Lüftungseffizienz. Dabei kommt es vor allem auf die Summe effizienter Lüftungen in den Unterrichtseinheiten und den Kurzpausen<sup>19</sup> an; häufiges Lüften nur in den Kurzpausen reichte nicht für eine gute Luftqualität. Die Top-Performance mit einem Zeitanteil unter ca. 15 % bei mehr als 1400 ppm wurde allerdings nur an sehr wenigen Raum-Wochentagen beobachtet.

Raum	WT	GK-UE. Anzahl	KP. Anzahl	SL-in-KP. Anzahl	SL-in-KP. Freq	SL-in-UE. Anzahl	DL-in-UE. Anzahl	EL. Anzahl	EL. Freq	CO <sub>2</sub> > 1200ppm	CO <sub>2</sub> > 1400ppm
K1-B	Di	21	10	4	40.0 %	14	0	18	58.1 %	30.5 %	15.3 %
K1-V	Mo	20	10	4	40.0 %	5	2	11	36.7 %	48.3 %	28.7 %
K1-Q	Fr	20	10	6	60.0 %	1	2	9	30.0 %	54.0 %	41.0 %
K1-L	Do	24	12	2	16.7 %	3	3	8	22.2 %	64.1 %	45.1 %
K1-Y	Di	21	10	0	0.0 %	0	6	6	19.4 %	65.7 %	54.4 %

Tab. 5 Lüftungsmuster und Lüftungseffizienz an ausgewählten Wochentagen (WT) in fünf Klassenzimmern von Kopfholz 1 bei GK-Unterricht, sowie Zusammenhang zwischen der Häufigkeit effizienter Lüftungen und der CO<sub>2</sub>-Häufigkeitsverteilung.

GK-UE.Anzahl: Anzahl der Unterrichtseinheiten (UE) im GK-Format mit Präsenz der Klasse

KP.Anzahl: Anzahl der dazwischenliegenden Kurzpausen

SL-in-KP.Anzahl: Anzahl der Kurzpausen mit einer effizienten Stosslüftung

SL-in-KP.Freq: Häufigkeit von Kurzpausen mit einer effizienten Stosslüftung

SL-in-UE.Anzahl: Anzahl der GK-UE mit einer effizienten Stosslüftung

DL-in-UE.Anzahl: Anzahl der GK-UE mit einer effizienten Dauerlüftung

EL.Anzahl: Gesamtzahl effizienter Lüftungsvorgänge = SL-in-KP.Anzahl + SL-in-UE.Anzahl + DL-in-UE.Anzahl

EL.Freq: Häufigkeit von effizienten Lüftungsvorgängen = EL.Anzahl / (GK-UE.Anzahl + KP.Anzahl)

CO<sub>2</sub> > 1200ppm: Zeitanteil mit CO<sub>2</sub>-Konzentration über 1200 ppm

CO<sub>2</sub> > 1400ppm: Zeitanteil mit CO<sub>2</sub>-Konzentration über 1400 ppm

<sup>19</sup> Auch das Lüften in langen Pausen (10-Uhr-Pause, über Mittag und nach Schulschluss) ist wichtig, weil die Fenster so dicht sind, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration selbst bei längerer Abwesenheit von Personen nicht genügend abgebaut wird. Für die Beurteilung des Lüftungsverhaltens ist es jedoch weniger relevant, da es viel einfacher ist, in langen Pausen ausreichend zu lüften.

#### 4.5 Luftwechselraten und Effizienz des Fensterlüftens in Kopfholz 1

Zur genaueren Untersuchung der Lüftungseffizienz wurden die mit Fensterlüften erreichten Luftwechselraten für mehrere Raum-Wochentage mit einem Curve-Fitting-Verfahren berechnet. Der Fokus lag wiederum auf Ganzklassen-Unterricht, bei welchem hygienisch bedenkliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen besonders häufig vorgefunden wurden.

Solange sich die Lüftungssituation in einem ausschliesslich manuell belüfteten Schulzimmer nicht ändert, d.h. wenn die Türe geschlossen bleibt und Fenster in gleicher Position belassen werden, ist die Luftwechselrate an windstillen Tagen näherungsweise konstant, wobei sie von der Geometrie der Fensteröffnungen und der Differenz zwischen Innen- und Aussentemperatur abhängt. Die mittlere CO<sub>2</sub>-Emissionsrate einer Schulklasse ist stark aktivitätsabhängig, bleibt jedoch näherungsweise konstant, solange eine ganze Klasse dieselbe Aktivität ausübt.

Zur Bestimmung der Luftwechselraten in einem zusammenhängenden Zeitbereich wird dieser mit einem Tool und einer Grobanalyse der CO<sub>2</sub>-Daten in eine *Sequenz* von Intervallen zerlegt, innerhalb welcher keine Trendänderungen im CO<sub>2</sub>-Verlauf wie zum Beispiel abrupte Änderungen der Steigung oder Wendepunkte erkennbar sind. Dies ermöglicht die Verwendung eines physikalischen *Lüftungsmodells mit abschnittsweise konstanten Systemparametern*. In jedem Intervall schätzt das verwendete *nichtlineare least-squares* Curve Fitting gleichzeitig die totale CO<sub>2</sub>-Produktionsrate der anwesenden Personen und die Luftwechselrate durch Austausch von Raumluft mit Aussenluft.

Beim Fensterlüften in der kalten Jahreszeit mit Stosslüften und/oder Dauerlüften ist eine grosse Variation der Luftwechselrate während des Unterrichts zu erwarten, doch ein regelmässiges Lüftungsmuster mit genügend grosser mittleren Luftwechselrate und einer nicht allzu grossen Variation wäre der Luftqualität förderlich. Im Folgenden präsentieren wir daher mit Curve Fitting untersuchte Lüftungssituationen aus Tab. 6, um die erreichten Luftwechselraten bezüglich Mittelwert und Variationskoeffizient zu vergleichen. Das Curve-Fitting wurde jeweils für einen Block von zwei Unterrichtseinheiten mit dazwischenliegender Kurzpause durchgeführt. Das Aufrechterhalten einer guten Luftqualität ist hier besonders anspruchsvoll, weil kurze Pausen im Winter verständlicherweise von den meisten SuS im Klassenzimmer verbracht werden, was ein effizientes Lüften erschwert.

In der Tat konnten wir beobachten, dass die zweite Lektion bereits bei viel höherer CO<sub>2</sub>-Konzentration begonnen wurde und sich die Luftqualität von Stunde zu Stunde verschlechterte. Niedrige Luftwechselraten zu Beginn einer Doppelstunde sind besonders ungünstig, weil sich dadurch frühzeitig sowohl hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen als auch hohe Aerosolkonzentrationen aufbauen können, welchen die Klassen anschliessend für längere Zeit ausgesetzt sind.

Raum	WT	Situation	Datum (2023)	Zeit	Dauer	M.avg [met]	ACR.avg [ACH]	ACR.std [ACH]	ACR.rsd	N <sub>a</sub>	N <sub>d</sub>	CO <sub>2</sub> > 1200ppm	CO <sub>2</sub> > 1400ppm	Typisch für Raum-WT
K1-B	Di	#1	14.02	08:20	01:41	2.4	4.30	4.09	0.95	2.76	4.49	4.0 %	0.0 %	nein
K1-B	Di		17.01	13:40	01:40	2.1	3.55	4.55	1.28	0.96	4.95	38.5 %	22.5 %	ja
K1-Q	Fr	#2a	20.01	13:40	01:40	2.1	2.88	5.16	1.79	0.94	3.87	60.5 %	43.0 %	ja
K1-L	Do		09.02	10:25	01:36	2.4	2.43	1.53	0.63	1.16	2.73	49.5 %	33.9 %	ja
K1-L	Do		09.02	08:20	01:35	2.5	1.83	1.28	0.70	0.96	1.93	55.8 %	38.4 %	ja
K1-Q	Fr	#2b	27.01	13:40	01:39	2.4	0.59	0.29	0.49	0.77	0.21	80.8 %	72.2 %	nein
K1-L	Do		26.01	08:20	01:35	1.9	0.29	0.38	1.31	0.20	0.25	79.5 %	66.3 %	ja

Tab. 6 Untersuchte Situationen in Klassenzimmern von Kopfholz 1 bei GK-Unterricht, nach ACR.avg sortiert.

M.avg Mittlere metabolische Rate

ACR.avg Mittelwert von ACR<sub>v</sub>

ACR.std Standardabweichung von ACR<sub>v</sub>

ACR.rsd Variationskoeffizient/relative Standardabweichung ACR.std/ACR.avg

N<sub>a</sub> Anzahl Luftwechsel bei CO<sub>2</sub>-Anstieg (ascent)

N<sub>d</sub> Anzahl Luftwechsel bei CO<sub>2</sub>-Abnahme (descent)

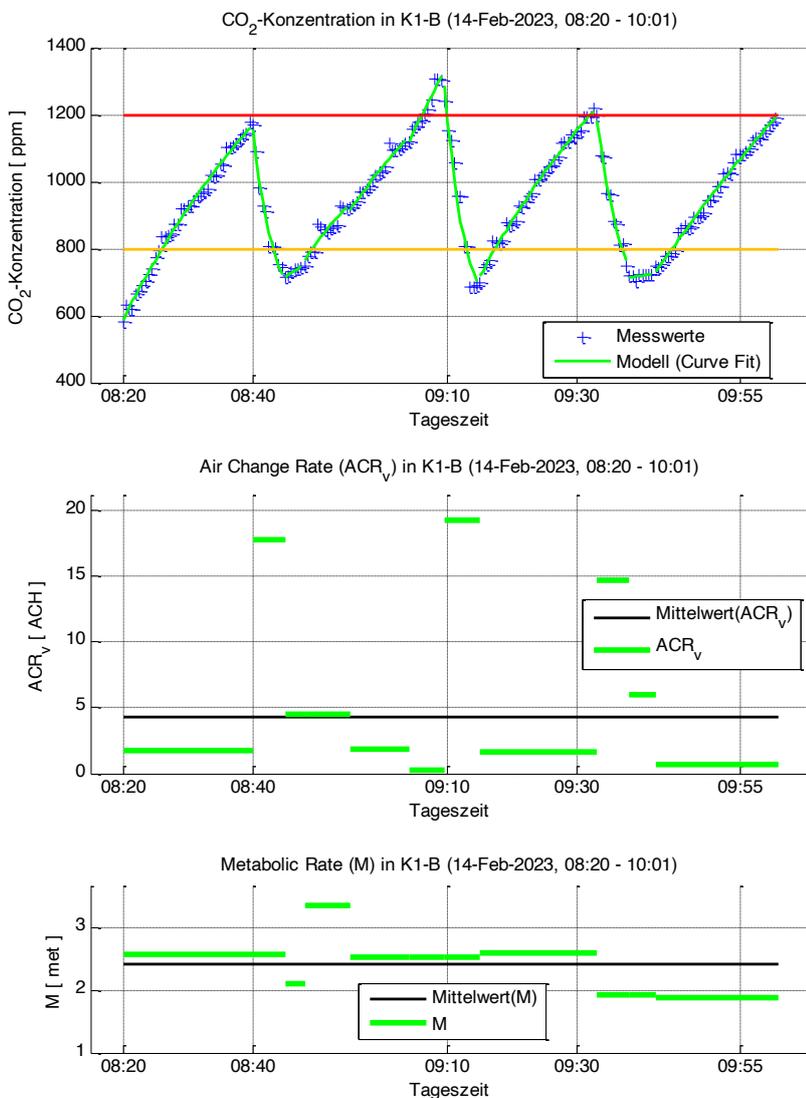
CO<sub>2</sub> > x Zeitanteil mit CO<sub>2</sub>-Konzentration > x in dieser Situation (Zeile)

Die folgende Analyse von Lüftungssituationen bei GK-Unterricht illustriert deutlich den Unterschied zwischen den Strategien «häufig und stark Lüften» und «selten und schwach Lüften». Auch die Strategie «selten, dafür besonders stark Lüften» erweist sich dabei als ineffizient.

#### 4.5.1 Situation #1: Effektive Basislüftung, Stosslüften 2-3 Mal pro Doppelstunde

Situation #1 (K1-B, Di, 14.02.2023, 08:20-10:01) mit zwei Unterrichtseinheiten wurde in elf Intervalle unterteilt und mittels Curve Fitting analysiert (Abb. 20); sie gehört zu einem Raum-Wochentag mit einer relativ niedrigen CO<sub>2</sub>-Belastung (siehe Tab. 5 und Wochentagsplot Abb. 21). Auffällig ist die Krümmung der CO<sub>2</sub>-Kurve in den ansteigenden Flanken. Hier sorgte wahrscheinlich ein geöffnetes Fenster auch während den Lektionen für Luftwechsel. In Kombination mit regelmässigen Stosslüftungen wurde eine mittlere Luftwechselrate von 4.31 ACH erzielt. Interessanterweise trugen sowohl die drei Stosslüftungen (total 15.5 Minuten) als auch die Basislüftung (85.5 Minuten) mit 2.67 bzw. 1.64 ACH signifikant zur mittleren Luftwechselrate bei.

Regelmässige Stosslüftungen in Kombination mit der Basislüftung ergaben eine ACR-Standardabweichung von 4.09 ACH und einen Variationskoeffizienten von  $4.09/4.31 \cong 0.95$ .



Wie Virensimulationen zeigen (siehe 4.7), sind Lüftungsmuster bezüglich Aerosolreduktion dann effizient, wenn die mittlere Luftwechselrate hoch und der Variationskoeffizient niedrig ist.

Dass hier die CO<sub>2</sub>-Konzentration trotz einer überdurchschnittlich hohen mittleren Luftwechselrate von 4.31 ACH nur knapp unter 1200 ppm gehalten werden konnte, lässt sich mit der ebenfalls überdurchschnittlichen mittleren metabolischen Rate erklären, einem Mass für die Intensität der Unterrichtsaktivitäten, welches mit Hilfe der geschätzten CO<sub>2</sub>-Produktionsrate bestimmt werden kann.

Trotz Dauerlüftung erhöhte sich die Raumtemperatur während jeder ansteigenden CO<sub>2</sub>-Flanke um ca. 1 Grad. Dies zeigt, dass eine massvolle Dauerlüftung während der Lektionen aufgrund der Wärmeabgabe einer Klasse energetisch kein Problem darstellt.

Situation #1 zeigt, dass das Ziel, unter 1200 ppm zu bleiben, mit zweimal Lüften pro

Abb. 20 CO<sub>2</sub>-Analyse für Situation #1 (K1-B, 14.02.2023, 08:20-09:55)

Oben: Messwerte und gefitteter CO<sub>2</sub>-Verlauf gemäss Lüftungsmodell mit abschnittsweise konstanten Systemparametern  
Mitte: Mittels Curve Fitting geschätzte Luftwechselraten ACH<sub>v</sub> und Mittelwert  
Unten: Mittels Curve Fitting geschätzte (mittlere) metabolische Raten M und Mittelwert

Stunde (einmal während jeder Lektion und einmal in jeder Pause) erreicht werden kann, wenn für eine gute Basislüftung gesorgt wird.

Der Wochentagsplot in Abb. 21 zeigt jedoch auch, dass dieses Ziel selbst mit gutem Timing und einer effizienten Lüftungsmethode im Schulalltag ein anspruchsvolles Ziel bleibt, denn Situation #1 repräsentiert an diesem Raum-Wochentag von 08:20 bis 09:55 nicht den typischen Fall.

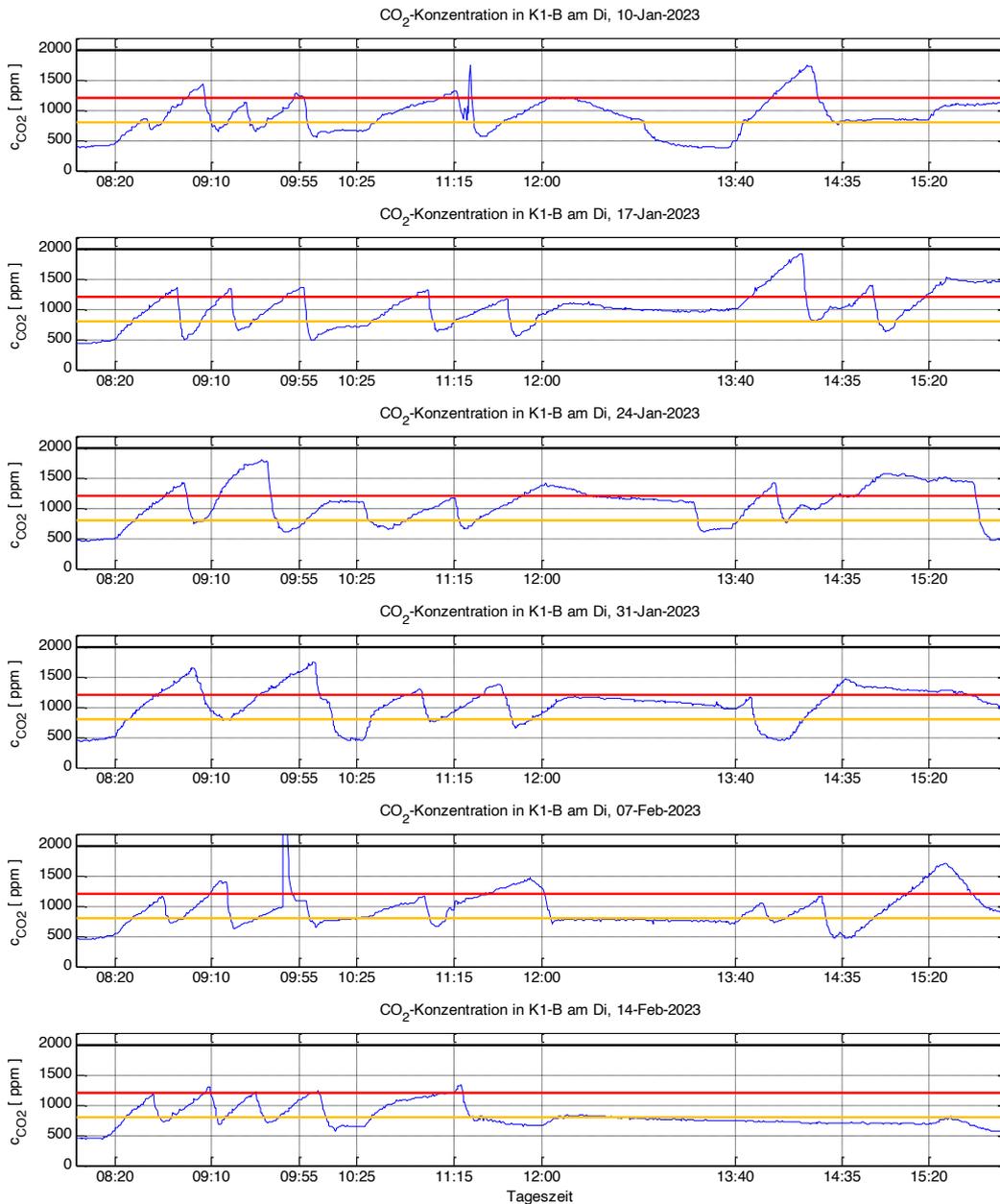


Abb. 21 CO<sub>2</sub>-Wochentagsplot für K1-B am Dienstag, mit folgenden Unterrichtseinheiten:  
2 x GK (08:20-09:55), 2 x UHK (10:25-12:00), 2 x GK (13:40-15:20)  
Unterster Plot: Situation #1 (K1-B, 14.02.2023, 08:20-09:55)

#### 4.5.2 Situationen #2a/b: Geringe Basislüftung, keine Stosslüftungen im Unterricht

Gemäss Abb. 19 wurde in K1-Q am Freitag die höchste CO<sub>2</sub>-Belastung gemessen; im GK-Unterricht lag die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu 54 % der Zeit über 1200 ppm und zu 41 % über 1400 ppm. Ein Blick auf den Wochentagsplot zeigte an jedem Freitag dasselbe Muster (siehe auch Tab. 5): Während der Lektionen gab es nur sehr selten eine effiziente Lüftung, und die geringe Krümmung der CO<sub>2</sub>-Anstiege weist auf niedrige Basis-Luftwechselraten hin.

Eine CO<sub>2</sub>-Analyse mit Curve Fitting wurde für die Situation #2a (K1-Q, Fr, 20.01.2023, 13:40-15:20) sowie #2b (K1-Q, Fr, 27.01.2023, 13:40-15:20) durchgeführt. Ein Unterschied zwischen #2a und #2b liegt darin, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in #2b auch in der zweiten Stunde weiter zunahm und Extremwerte über 3000ppm erreichte, da in der Pause keine wirksame Lüftung stattfand. Für den gegebenen Raum-Wochentag ist #2a eine typische Situation und #2b ein eher seltener Extremfall.

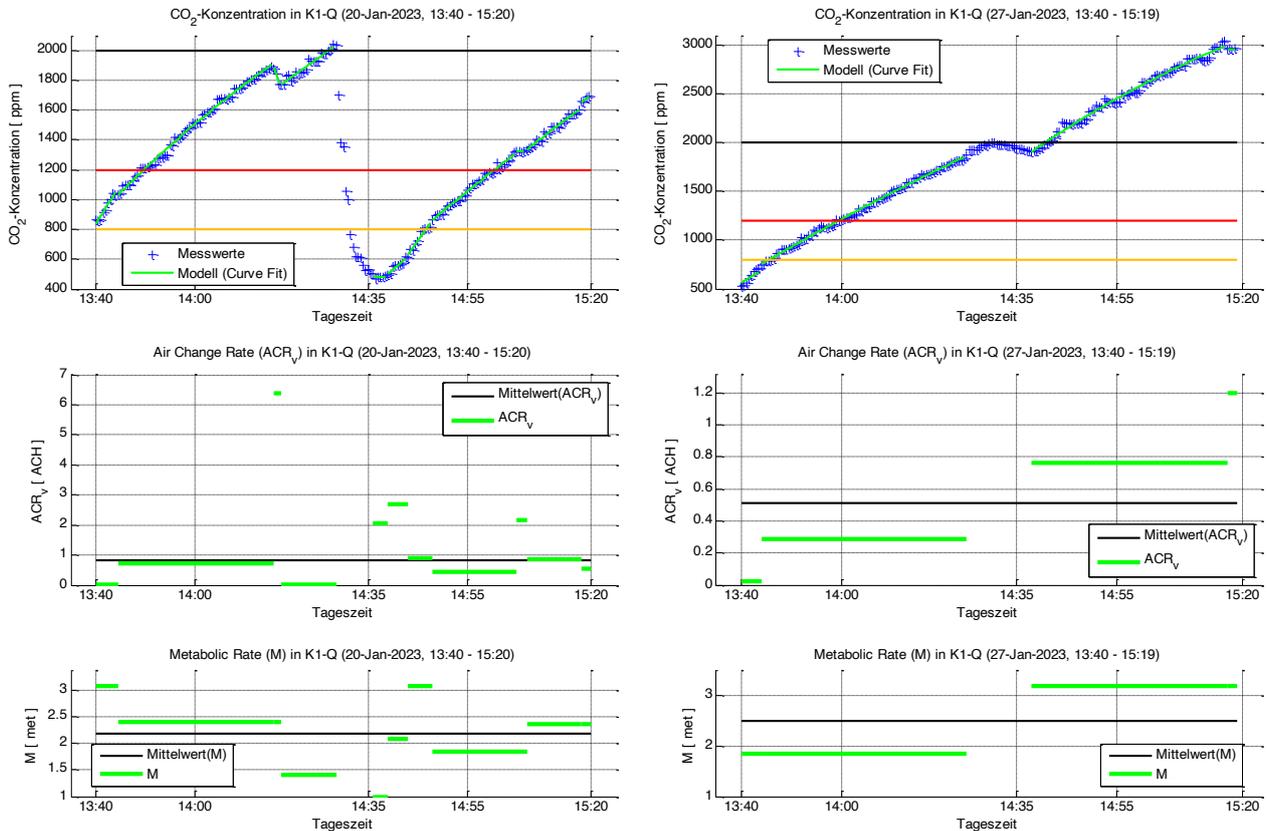


Abb. 22 CO<sub>2</sub>-Analyse für  
- Situation #2a (K1-Q, 20.01.2023, 13:40-15:20, links) und  
- Situation #2b (K1-Q, 27.01.2023, 13:40-15:20, rechts).

Oben: Messwerte und gefitteter CO<sub>2</sub>-Verlauf gemäss Lüftungsmodell mit abschnittsweise konstanten Systemparametern  
Mitte: Mittels Curve Fitting geschätzte Luftwechselraten ACR<sub>v</sub> und Mittelwert (ohne Lüftungsintervall in Kurzpause KP)  
Unten: Mittels Curve Fitting geschätzte (mittlere) metabolische Raten M und Mittelwert (ohne Lüftungsintervall in KP)

Die CO<sub>2</sub>-Analysen wurden hier unter Ausschluss der Kurzpause erstellt, so dass der Mittelwert von ACR<sub>v</sub> die Effizienz einer Basislüftung repräsentiert, vermutlich infolge eines nur leicht geöffneten Fensters in Kombination mit der Raum-Leckage. In Situation #2a und #2b wurde mit der Basislüftung eine mittlere Luftwechselrate von 0.82 bzw. 0.51 ACH erreicht. Die metabolischen Raten in Abb. 22 (unten) variierten in einem für schulische Aktivitäten typischen Bereich.

Eine zusätzliche CO<sub>2</sub>-Analyse von Situation #2a unter Einbezug der Kurzpause ergab eine ACR<sub>v</sub> von 29ACH für die Stosslüftung, einen Mittelwert von 2.88ACH und eine Standardabweichung von 5.15ACH. Der Variationskoeffizient war  $5.16/2.88 \approx 1.79$  und deutlich höher als in Situation #1.

Eine Virensimulation mit Situation #2a zeigte (siehe 4.7), dass die variable Lüftung bei dieser schlechten Verteilung der Luftwechsel zu einer deutlich höheren Virendosis führt als eine gleichmässige Lüftung mit 2.88 ACH. Eine gleichmässigerer Verteilung der Luftwechsel auf mehrfache effiziente Stosslüftungen in kürzeren Abständen verbessert die Wirksamkeit und reduziert die Belastung durch CO<sub>2</sub> und Aerosole.

## 4.6 Luftwechselraten bei mechanischer Lüftung in Kopfholz 2

Im Schulhaus Kopfholz 2 kann mit der CO<sub>2</sub>-gesteuerten mechanischen Lüftungsanlage und zusätzlichem manuellem Fensterlüften eine gleichmässiger Belüftung als im Altbau Kopfholz 1 erzielt werden. Jeder Raum verfügt über einen separaten CO<sub>2</sub>-Wächter und einstellbare Volumenströme bzw. Lüftungsquoten (niedrig, mittel, hoch) für verschiedene CO<sub>2</sub>-Bereiche. Während der Studienperiode waren alle Zimmer mit CO<sub>2</sub>-Schwellwerten bei 800 ppm sowie 1300 ppm konfiguriert<sup>20</sup>. Die relativ hohen Schwellen von 800 sowie 1300 ppm führen dazu, dass die das Übertragungsrisiko stärker reduzierenden Lüftungsquoten (mittel, hoch) nur mit Verzögerung aktiviert werden.

Das in Abschnitt 4.5 beschriebene Curve Fitting-Verfahren 'nonlinear' wurde auch zur Untersuchung der mechanischen Lüftung in Kopfholz 2 verwendet. Das Verfahren ist umso genauer, je länger die Systemparameter konstant bleiben. Bei der Zerlegung der CO<sub>2</sub>-Daten in Abschnitte mit konstanten Systemparametern muss berücksichtigt werden, dass der Volumenstrom in der Nähe der CO<sub>2</sub>-Schwellwerte zwischen den vorkonfigurierten Lüftungsquoten (niedrig, mittel, hoch) umschaltet.

Eine CO<sub>2</sub>-Steuerung mit vorkonfigurierten Lüftungsquoten ist nicht in der Lage, einen optimalen Volumenstrom einzustellen, der während des Unterrichts zu einem CO<sub>2</sub>-Gleichgewicht (konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration) bei einem geeigneten Sollwert wie z.B. 600 ppm führen würde. Die Lüftungsquote «niedrig» führt bei voller Belegung zu einem raschen CO<sub>2</sub>-Anstieg, die Quote «mittel» verlangsamt den Anstieg, und bei der Quote «hoch» nimmt die CO<sub>2</sub>-Konzentration rasch ab. Daher sind häufige Wechsel der Lüftungsquote zu erwarten, so dass die Intervalle mit konstanten Systemparametern im Bereich von ca. 600 bis 1400 ppm deutlich kürzer werden als bei manueller Fensterlüftung.

Die Umschaltvorgänge werden auch durch Hysterese-Einstellungen<sup>21</sup> der CO<sub>2</sub>-Steuerung sowie durch die Position (inkl. Höhe) des CO<sub>2</sub>-Wächters relativ zu den Auslässen/Einlässen für Abluft bzw. Zuluft beeinflusst<sup>22</sup>. Häufige und starke Änderungen der Lüftungsquote können die zeitliche und räumliche Variation der CO<sub>2</sub>-Konzentration verstärken. Kürzere Beobachtungszeiten und verstärkte CO<sub>2</sub>-Inhomogenitäten führen zu grösserer «Unschärfe», was die gleichzeitige Schätzung von Luftwechselrate  $ACR_v$  und CO<sub>2</sub>-Produktionsrate  $R_{CO_2}$  beim Curve Fitting erschwert.

Je kürzer das Beobachtungsintervall ist und je näher sich das System an einem CO<sub>2</sub>-Gleichgewicht befindet (nahezu flacher CO<sub>2</sub>-Verlauf), desto unschärfer wird das Problem der gleichzeitigen Bestimmung von  $ACR_v$  und  $R_{CO_2}$  aus den CO<sub>2</sub>-Daten. Kann das System nur im CO<sub>2</sub>-Gleichgewicht beobachtet werden, ist die gleichzeitige Bestimmung von  $ACR_v$  und  $R_{CO_2}$  nicht möglich.

Um die Unschärfe zu reduzieren, verwenden wir daher in kurzen Intervallen und in Intervallen mit nahezu flachem CO<sub>2</sub>-Verlauf eine alternative Curve-Fitting-Methode 'nonlinear-v2', welche nur die Luftwechselrate schätzt und die CO<sub>2</sub>-Produktionsrate als zusätzlichen Eingangsparameter verwendet. Eine gute Schätzung der CO<sub>2</sub>-Produktionsrate der Klasse bzw. der mittleren CO<sub>2</sub>-Emissionsrate pro Person kann häufig aus benachbarten, längeren Intervallen gewonnen werden, da die CO<sub>2</sub>-Produktionsrate durch eine kurzfristige Änderung der Lüftungsquote kaum beeinflusst wird. Auch Informationen zur Personenzahl bei Ganz- und Halbklassenunterricht sowie Sanity Checks zur Überprüfung/Limitierung der mittleren CO<sub>2</sub>-Emissionsrate pro Person können die Unschärfe reduzieren.

Die Klassenräume in Kopfholz 2 haben eine lichte Höhe von 3.0m und Volumina von 320 bzw. 260 m<sup>3</sup>. Sie bestehen aus einem Klassenzimmer von 71 m<sup>2</sup> und einem angegliederten Gruppenraum

---

<sup>20</sup> gemäss Information Hauswartung.

<sup>21</sup> Die Hysterese-Einstellungen der CO<sub>2</sub>-Steuerung sowie die abhängig von der CO<sub>2</sub>-Konzentration theoretisch zur Verfügung stehenden Aussenluft-Volumenströme sollten beim Lüftungsunternehmen in Erfahrung gebracht werden.

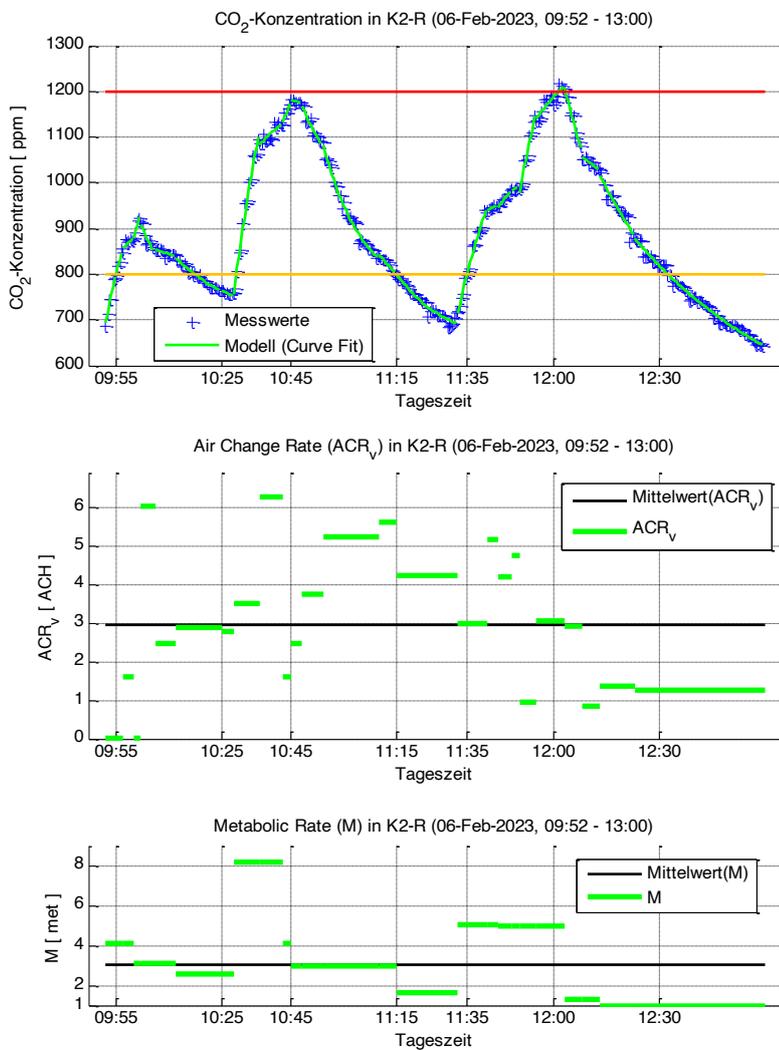
<sup>22</sup> Der CO<sub>2</sub>-Wächter und die Auslässe/Einlässe für Abluft bzw. Zuluft dürften sich im Deckenbereich befinden (keine Quelllüftung); die genauen Positionen wären für die Interpretation der CO<sub>2</sub>-Daten von Interesse.

von 35 bzw. 15 m<sup>2</sup> Fläche, welcher über eine meist offene Schiebetüre verbunden ist. Es ist anzunehmen, dass die Belüftung dieser «kommunizierenden» Räume mit Hilfe nur eines CO<sub>2</sub>-Wächters gesteuert wird, der sich im Klassenzimmer befindet. Das Air CO<sub>2</sub>ntrol 5000 Messgerät befand sich im Klassenzimmer auf einer Höhe von ca. 1.2 m.

#### 4.6.1 Situation #3: Klassenraum in Kopfholz 2 mit Volumen 320 m<sup>3</sup>

Situation #3 (K2-R, Mo, 06.02.2023, 09:50-13:00, siehe Abb. 23) begann um 09:50 mit der Ankunft der Klasse nach morgendlichem Sport, gefolgt von der 10-Uhr-Pause (09:55-10:25), zwei Unterrichtseinheiten (Ganzklasse) getrennt durch eine Kurzpause (11:10-11:15) und der Mittagspause.

Auffällig sind die steilen CO<sub>2</sub>-Flanken bei Ankunft nach dem Sport und zu Beginn der Lektionen. Die geschätzten CO<sub>2</sub>-Produktionsraten lassen in diesen Phasen auf aussergewöhnlich intensive Aktivitäten mit viel Bewegung schliessen; metabolische Raten von 4 bis 5 met sind typisch für Treppensteigen/Tanzen, eine Rate von 8 met für intensives Aerobic. In diesen kurzen, aber intensiven Phasen sind die metabolischen Raten aufgrund einer beträchtlichen räumlichen Inhomogenität der CO<sub>2</sub>-Konzentration möglicherweise überschätzt.



In der 10-Uhr-Pause blieben einige SuS zunächst im Zimmer und gingen etwas später in die Pause. In der Kurzpause blieben die SuS im Klassenzimmer. Nach 11:15 fiel die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei leichter Arbeitsintensität (1.6 met) und aktiver mechanischer Lüftung unter 800 ppm.

Die langen Intervalle mit einer Luftwechselrate von ca. 3 ACH dürften der mittleren Lüftungsquote mit einem Volumenstrom von ca. 960 m<sup>3</sup>/h entsprechen. Im Intervall von 11:15 bis 11:32 mit 4.2 ACH war vermutlich zusätzlich ein Fenster geöffnet<sup>23</sup>.

Zwischen 10:35 und 11:10 lagen die Spitzenwerte zwischen 5.3 und 6.3 ACH; hier wurde mehrmals die Lüftungsquote «hoch» mit einem Volumenstrom von ca. 1700 bis 2000 m<sup>3</sup>/h aktiviert.

Man beachte, dass die Lüftung nur kurzzeitig auf der hohen Quote lief und zweimal direkt anschliessend auf eine niedrige Quote wechselte (siehe 10:43 sowie 11:50), bevor sie auf eine mittlere Quote umschaltete.

Abb. 23 CO<sub>2</sub>-Analyse für Situation #3 (K2-R, 06.02.2023, 09:50-13:00)

Oben: Messwerte und gefitteter CO<sub>2</sub>-Verlauf gemäss Lüftungsmodell mit abschnittsweise konstanten Systemparametern  
Mitte: Mittels Curve Fitting geschätzte Luftwechselraten ACR<sub>v</sub> und Mittelwert  
Unten: Mittels Curve Fitting geschätzte (mittlere) metabolische Raten M und Mittelwert

<sup>23</sup> Von 10:54 bis 11:21 fiel die Temperatur von 21.9 auf 21.3 Grad Celsius.

Solch unerwünschtes «Einschwingen» kann verschiedene Ursachen haben, z.B. einen zu geringen Abstand zwischen dem CO<sub>2</sub>-Wächter und einem Zuluft-Einlass, eine ungünstige Hysterese-Einstellung für die Rückkehr auf Quote «mittel» und/oder eine zu inhomogene CO<sub>2</sub>-Verteilung im Raum.

In der Mittagspause ab ca. 12:15 war meist niemand im Klassenraum – das Curve Fitting mit Methode 'nonlinear' ergab hier vernachlässigbar kleine CO<sub>2</sub>-Produktionsraten um 0.01 m<sup>3</sup>/h im Vergleich zum Mittelwert von 0.47 m<sup>3</sup>/h. Nachdem die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter ca. 950 ppm gefallen war, dürfte die gemessene Luftwechselrate von 1.3 ACH der Lüftungsquote «niedrig» mit einem Volumenstrom von ca. 416 m<sup>3</sup>/h entsprechen.

Im Zeitraum von 09:50 bis 13:00 erreichte die mechanische Lüftung eine mittlere Luftwechselrate von 2.9 ACH bei einer Standardabweichung von 1.2 ACH. Im Zeitraum von 09:50 bis 12:03 betrug die mittlere Luftwechselrate 3.6 ACH bei einer Standardabweichung von 1.1 ACH.

### 4.7 Virensimulationen mit variabler Lüftung und Nutzen der Filtration

Die Simulation der Emission von SARS-CoV-2 Aerosolen, der dabei in der Raumluft entstehenden Aerosolkonzentrationen und der inhalierten Virendosen ist ein nützliches Werkzeug zur Untersuchung der Übertragungsrisiken in Abhängigkeit von Lüftung und Filtration (Riediker and Monn, 2021). Die CO<sub>2</sub>-Analyse mit Curve Fitting ermöglicht, solche Virensimulationen unter Berücksichtigung der real in den Klassenzimmern erreichten, variablen Lüftungsraten  $ACR_v$  zu berechnen und deren Reduktion durch zusätzliche Filtration mit  $ACR_f$  zu bestimmen.

Abb. 24 zeigt die berechneten Konzentrationen und Virendosen für ein Szenario mit einer infektiösen Person für den Fall einer sehr hohen Emissionsrate, was seit Aufkommen der Omikron-Varianten häufig ist (Riediker et al., 2022). Abb. 24 (links) zeigt die Simulation für Situation #1, in welcher mit Lüften eine mittlere Rate von 4.31 ACH erreicht wurde. Die Simulationen mit aktivierten Luftfiltern wurden für zusätzliche Luftwechselraten  $ACR_f$  von 3.0 und 5.4 ACH gerechnet.

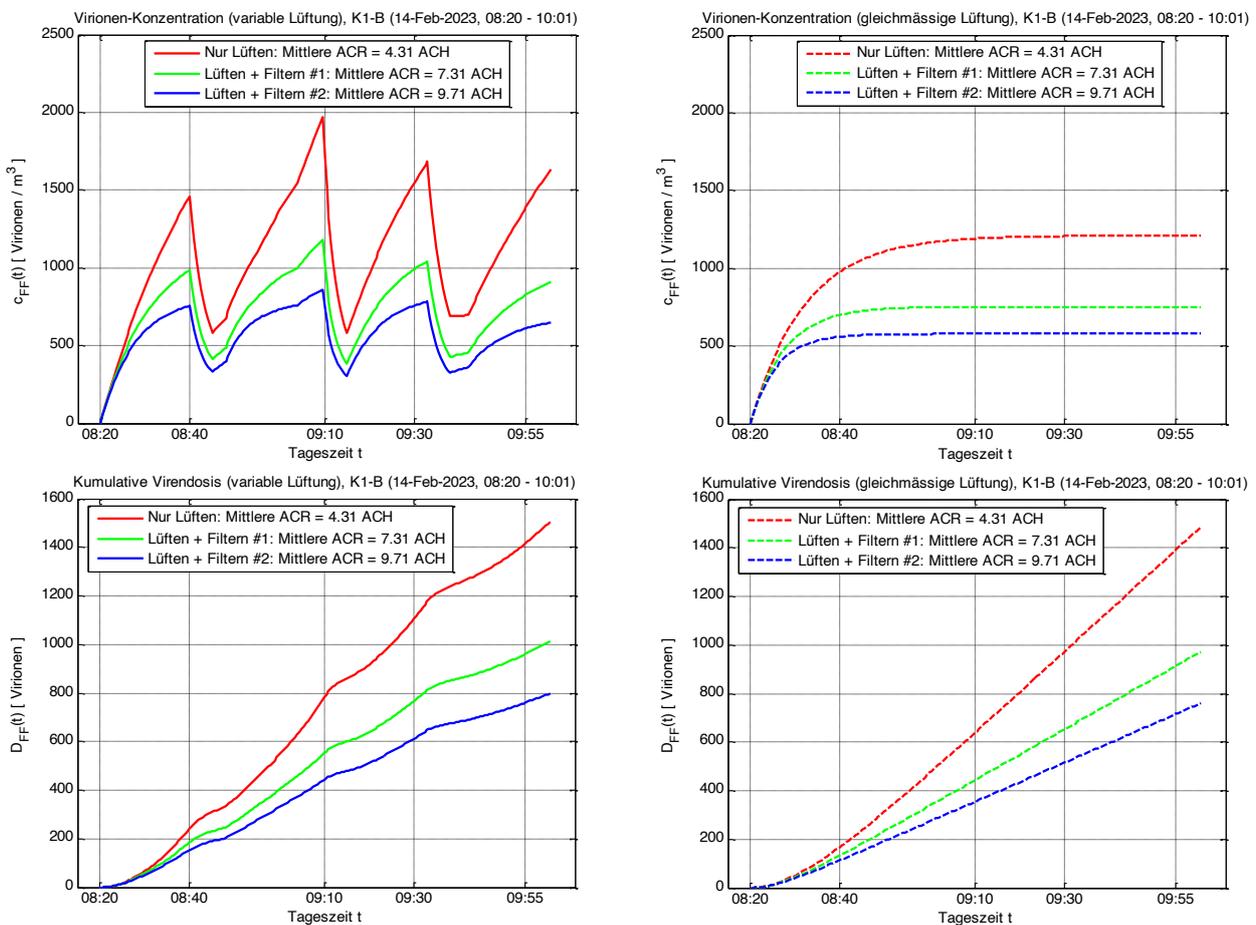


Abb. 24 Virensimulationen für ein Szenario mit einer infektiösen Person bei einer sehr hohen Viren-Emissionsrate.  
links: Virenkonzentration (oben) und kumulative Virendosis (unten) bei variablem Lüften gemäss Situation #1.  
rechts: Virenkonzentration (oben) und kumulative Virendosis (unten) bei gleichmässigem Lüften mit 4.31 ACH.

Ausgehend von der natürlichen Mischlüftung wurden die Berechnungen mit der Fernfeld-Näherung durchgeführt, d.h. unter Annahme einer räumlich homogenen Aerosolkonzentration  $c_{FF}$ . Die Genauigkeit dieser Näherung wird erhöht durch den Einsatz von Luftreinigern, welche mit dem gereinigten Luftstrom die räumliche Homogenisierung der Aerosolkonzentration beschleunigen – ein Effekt, welcher bei mehreren im Raum verteilten Geräten noch verstärkt wird.

Anstrengende Arbeit (körperliche Aktivität sowie Hirnleistung) ist mit einem höheren Atemminutenvolumen (AMV) verbunden als leichte Arbeit. Bei einer infektiösen Person führt eine höhere Arbeitsintensität durch das grössere AMV zu einer stärkeren Emission und somit zu einer höheren Viren-

konzentration im Raum (Riediker and Monn, 2021); bei einer exponierten Person erhöht sie bei gegebener Virenkonzentration die inhalierte Virendosis. Beide Effekte wurden in den Virensimulationen mit Hilfe der geschätzten metabolischen Rate berücksichtigt.

Abb. 24 (rechts) zeigt eine zweite Simulation, in welcher die variable Lüftung durch eine gleichmässige Lüftung mit einer Rate von 4.31 ACH ersetzt wurde; ausserdem wurde die leicht variable Arbeitsintensität durch eine gleichmässige Arbeitsintensität mit einer mittleren metabolischen Rate von 2.3 met ersetzt. Bei variabler Lüftung variiert auch die Aerosolkonzentration stärker, doch die kumulativen Virendosen und die entsprechenden Übertragungsrisiken unterscheiden sich nach der Doppelstunde praktisch nicht. Dies weist darauf hin, dass der ACR-Mittelwert von Situation #1 (4.3ACH bei einem Variationskoeffizienten von 0.95) dank der häufigen Lüftungsfrequenz ähnlich gut ist wie konstant mit 4.3ACH zu lüften.

Für Situation #2a wurde bei einem höheren Variationskoeffizienten von 1.79 eine mittlere Luftwechselrate von 2.88 ACH erreicht. Die Virensimulationen für #2a in Abb. 25 zeigen, dass die Virendosis bei variabler Lüftung 22 % höher ist als bei gleichmässiger Lüftung mit 2.88 ACH, d.h. die Virendosis lässt sich bei gegebener mittlerer Luftwechselrate durch Reduktion des Variationskoeffizienten (Verbesserung der Gleichmässigkeit) verringern, wozu auch das kombinierte Lüften und Filtern beiträgt.

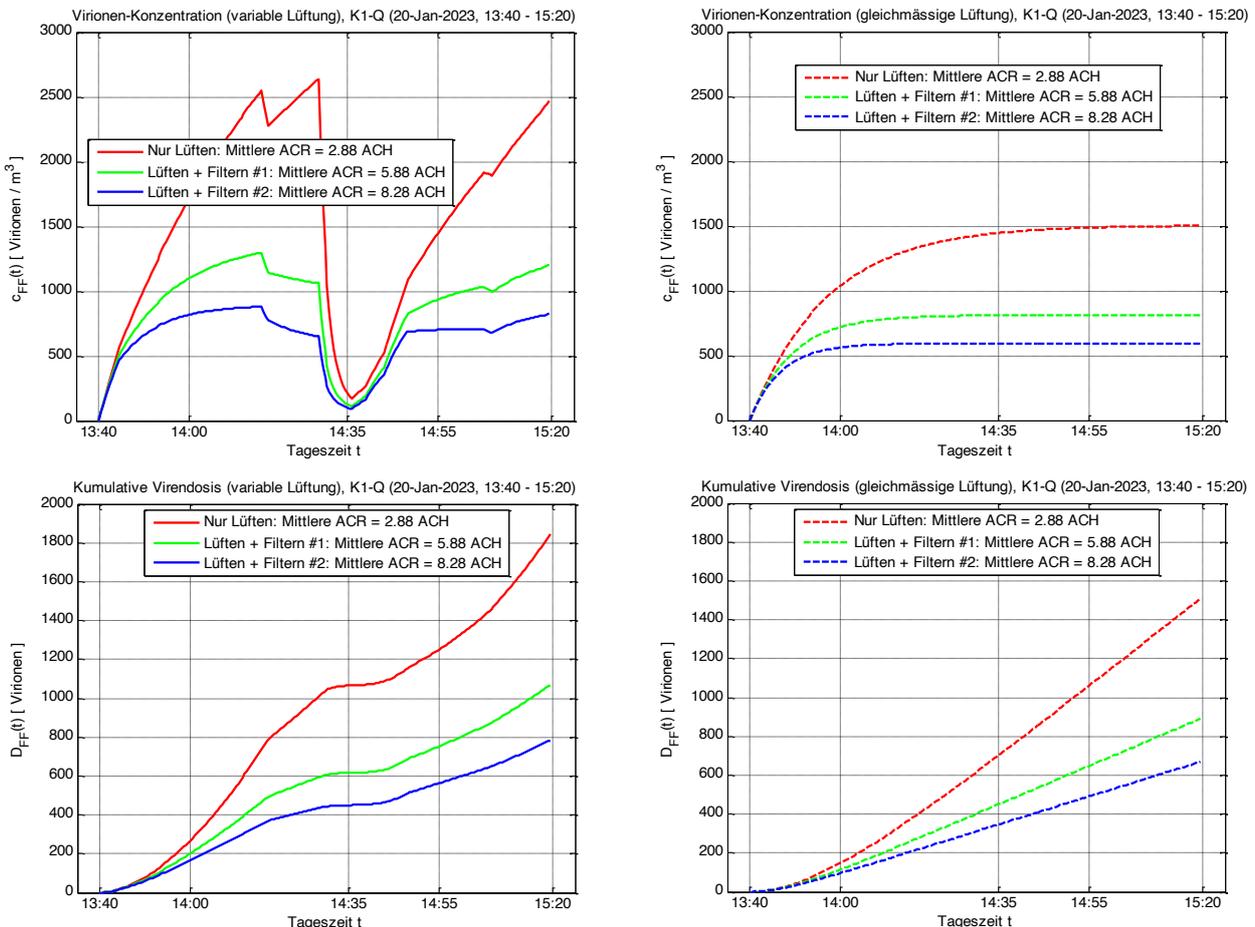


Abb. 25 Virensimulationen für ein Szenario mit einer infektiösen Person bei einer sehr hohen Viren-Emissionsrate.  
links: Virenkonzentration (oben) und kumulative Virendosis (unten) bei variablem Lüften gemäss Situation #2a.  
rechts: Virenkonzentration (oben) und kumulative Virendosis (unten) bei gleichmässigem Lüften mit 2.88 ACH.

Umgekehrt ergibt eine gleichmässige Lüftung mit nur 2.1 ACH dieselbe Virendosis wie die variable Lüftung von #2a mit 2.88ACH. Bezüglich Aerosolreduktion sind somit die 2.88ACH von #2a nur 2.1ACH wert. Die Stosslüftung in #2a erreichte in 10.5 Minuten 3.6 Luftwechsel. Bei einer derart intensiven Sturmlüftung werden die Luftwechsel ab einem gewissen Punkt «verschenkt», wenn

nämlich bereits ersetzte Raumluft nochmals ersetzt wird; ausserdem können solche Überlüftungen zu einer übermässigen Auskühlung des Raumes führen.

Abb. 26 (links) zeigt die Konzentrationen und Virendosen<sup>24</sup> für Schulraum K2-R in Situation #3 (09:50 bis 12:03); hier wurde mit der mechanischen Lüftung eine mittlere Rate von 3.63 ACH erreicht. Die Simulationen mit aktivierten Luftfiltern wurden für zusätzliche Luftwechselraten  $ACR_f$  von 2.3 und 4.0 ACH gerechnet. Erst mit der Kombination von mechanischer Lüftung und Filtration konnte eine Gesamtluftwechselrate im Zielbereich über 5 ACH erreicht werden.

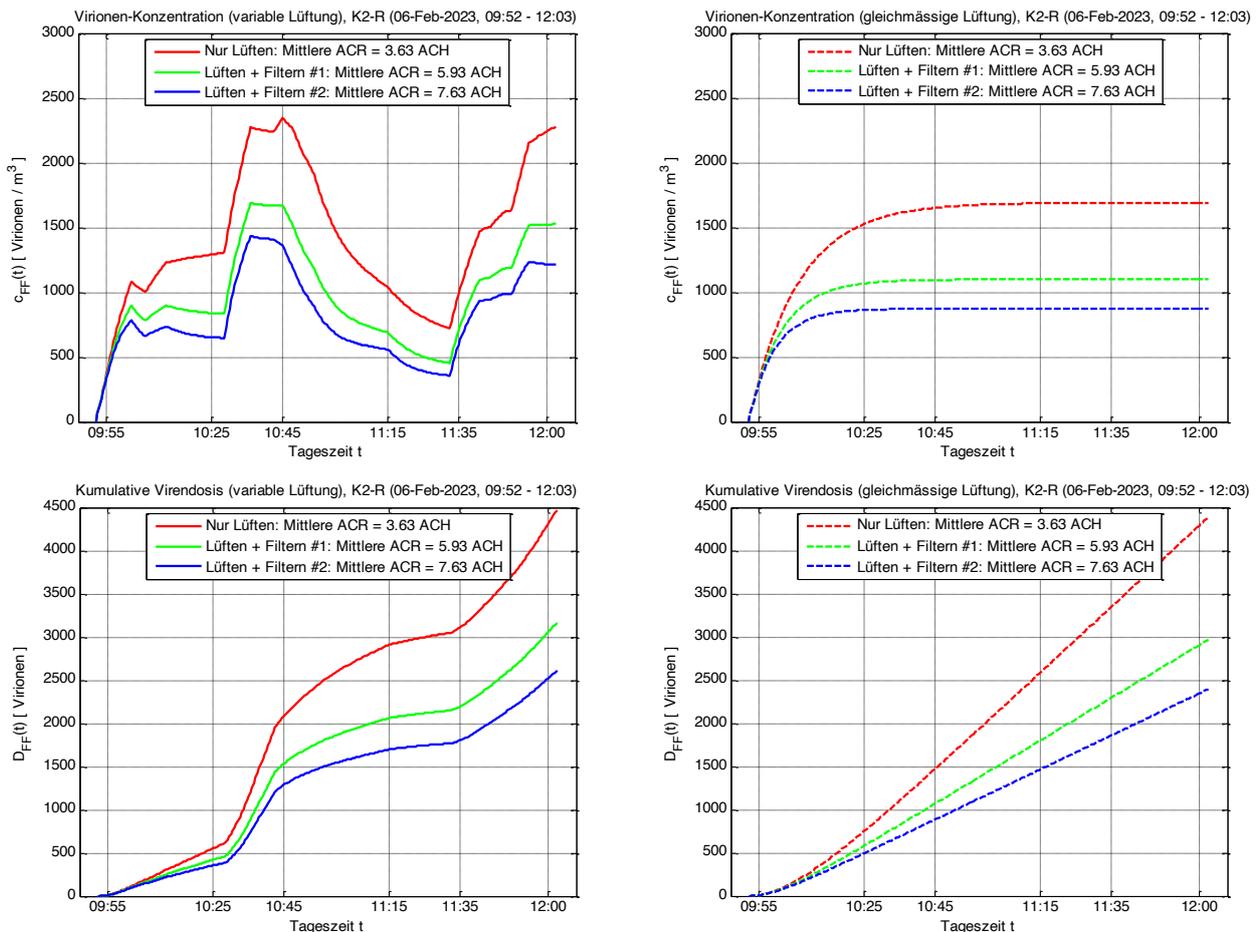


Abb. 26 Virensimulationen für ein Szenario mit einer infektiösen Person bei einer sehr hohen Viren-Emissionsrate.

links: Virenkonzentration (oben) und kumulative Virendosis (unten) bei variabler Lüftung gemäss Situation #3.

rechts: Virenkonzentration (oben) und kumulative Virendosis (unten) bei gleichmässiger Lüftung mit 3.63 ACH.

Abb. 26 (rechts) zeigt eine zweite Simulation, in welcher die variable Lüftung durch eine gleichmässige Lüftung mit einer Rate von 3.6 ACH ersetzt wurde; ausserdem wurde die variable Arbeitsintensität durch eine gleichmässige Arbeitsintensität mit einer mittleren metabolischen Rate von 3.9 met ersetzt. Bei variabler Lüftung variiert auch die Aerosolkonzentration stärker, doch die kumulativen Virendosen und die entsprechenden Übertragungsrisiken unterscheiden sich nach der Doppelstunde praktisch nicht. Die variable mechanische Lüftung mit einem ACR-Mittelwert von 3.6 ACH und einem Variationskoeffizienten von 0.31 reduziert das Übertragungsrisiko somit ähnlich gut wie eine gleichmässige Lüftung mit 3.6 ACH.

<sup>24</sup> Wiederum unter der Annahme einer infektiösen Person mit sehr hoher Emissionsrate.

## 5 Empfehlungen

Die Untersuchungen zum Einsatz mobiler Luftreiniger in Klassenzimmern in Adliswil zeigten, dass die getesteten Geräte die Belastung von Schulräumen durch Schwebstoffe wie luftgetragene Krankheitserreger, Pollen und Feinstaub mit einer hohen Reinigungsleistung wirkungsvoll tief halten, was in einer entsprechenden Risikoreduktion resultieren dürfte.

Die Analyse der Luftqualität mit Hilfe von CO<sub>2</sub>-Monitoren zeigte aber auch einen deutlichen Handlungsbedarf in den manuell über Fenster belüfteten Räumen. Dort wurden regelmässig CO<sub>2</sub>-Werte über 2000 ppm gemessen, also Werte, die als hygienisch inakzeptabel gelten (SECO, 2023). Handlungsbedarf besteht vor allem in den Räumen des Schulhauses Kopfholz 1, für welche verbesserte Lüftungsstrategien nötig scheinen.

Luftreiniger entfernen Aerosole aus der Luft, nicht aber das CO<sub>2</sub> und sind somit kein Ersatz, sondern eine Ergänzung zu Massnahmen für eine ausreichende Belüftung.

### **Luftreiniger gegen Krankheitserreger und andere Schadstoffe in der Raumluft**

Die getesteten Luftreiniger zeigten eine deutliche Reduktion der Aerosolkonzentrationen auf Stufen, die nur mit einer geringen Geräusentwicklung einhergehen. Wenn durch Luftreiniger Schwebstoffe wie luftgetragene Erreger, Pollen und andere Luftschadstoffe reduziert werden, resultiert dies in einer Reduktion des damit zusammenhängenden Gesundheitsrisikos. Der relative Nutzen von «Lüften und Filtern» im Vergleich zu «nur Lüften» ist im alten Gebäude ohne mechanische Lüftung grösser – und umso grösser, je schlechter gelüftet wird. Aufgrund der meist Jahre dauernden Stafelung von Altbau-Sanierungen können mobile Luftreiniger zur Reduktion der Aerosol-Problematik besonders dort hilfreich sein, wo eine Sanierung noch länger zurückgestellt werden muss.

Alle getesteten Luftreiniger saugen Luft seitlich an und lassen die gereinigte Luft nach oben mit einer turbulenten Strömung frei, was gegen «tote Zonen» in den getesteten Räumen half. Der Einsatz mehrerer Geräte pro Raum half dabei ebenfalls. Vor dem Einsatz der Reiniger in Räumen mit gerichteter Luftführung (z.B. Quelllüftung) sollte die Wirkung der erzeugten Turbulenzen auf die Lüftungseffizienz allerdings weiter abgeklärt werden.

Die Untersuchungen bestätigten die physikalisch erwartete Gesetzmässigkeit, dass der parallele Einsatz von zwei Luftreinigern die Reinigungsleistung verdoppelt, während der Schallpegel lediglich um 3 dB zunimmt. Der parallele Betrieb mehrerer Luftreiniger führte somit zu einem positiven Trade-off zwischen Reinigungsleistung und Schall. Bei allen getesteten Geräten war die Geräusentwicklung in einem klar akzeptablen Bereich, solange sie nicht auf maximaler Stufe betrieben wurden. Durch Installation von mehreren Geräten pro Klassenzimmer konnte eine ausreichende Reinigungsleistung bereits auf einer tieferen Stufe erreicht werden.

### **Installation, Betrieb und Wartung der Luftreiniger**

Die mobilen Luftreiniger erwiesen sich als flexibel einsetzbar und konnten durch Konfiguration für eine ruhige Lernumgebung und weitgehende Automatisierung gut in den Schulalltag integriert werden. Ideal wäre eine gemeinsam von der Schule und dem Gesundheitsdepartement organisierte Installation, Betreuung und Wartung der Geräte, damit das dazugehörige Know-How nicht an mehreren Schulstandorten separat erworben werden muss und für die Lehrpersonen kein Zusatzaufwand entsteht. Eine Lösung muss auch gefunden werden für die Deinstallation/Reinstallation von Geräten anlässlich der periodischen Grundreinigung.

In den Klassenzimmern mit zwei oder drei installierten Geräten konnte eine gleichmässige Verteilung der Luftreinigung durch Platzierung auf gegenüberliegenden Seiten erreicht werden. Zur Vermeidung von übermässiger Geräuschbelastung und Luftzug musste ein minimaler Abstand zu Personen von mindestens einem Meter eingehalten werden. Da die Reiniger tragbar sind, entsteht nur ein geringer Aufwand, sollte die Konfiguration des Raumes, wie etwa die Anordnung der Tische,

geändert werden. Eine Herausforderung stellte jedoch die Stromversorgung dar. Ideal wären Steckdosen in der Mitte von Schulräumen, was eine zentralere Geräteplatzierung erlauben würde, insbesondere bei einer U-förmigen Anordnung der Pulte.

Damit die Bedienung der Luftreiniger keinen zeitlichen Mehraufwand für die Lehrkräfte nach sich zog, wurden die Geräte vor Schulbeginn automatisch aktiviert und ca. 1/2 Stunde nach Schulende automatisch abgeschaltet. Alle Gerätehersteller unterstützten die Automatisierung dieser Vorgänge via App. Praktisch war die Möglichkeit, Geräte zeitgesteuert auf den zuletzt von den LP eingestellten Betriebsstufen zu reaktivieren.

Luftreiniger benötigen eine regelmässige Wartung. Die Vorfilter müssen ca. alle 4 Wochen, die Partikelsensoren ca. alle 2 Monate abgesaugt werden. Zudem wird ungefähr einmal pro Jahr ein Ersatz der Filter nötig sein.

### **CO<sub>2</sub>-Messungen zur Beurteilung der Luftqualität**

In der Untersuchungsperiode war die Luftqualität im manuell belüfteten Altbau Kopfholz 1 bei Ganzklassenunterricht regelmässig über 2000 ppm CO<sub>2</sub>, also im Bereich «hygienisch inakzeptabel» gemäss der Klassierung der Raumluftqualität in der Wegleitung zur Verordnung 3 des Arbeitsgesetzes (SECO, 2023). Nur gerade in 20 % der Zeit waren die Konzentrationen im für kognitive Leistungen idealen Bereich unter 800 ppm. Es stellt sich die Frage, wie die Luftqualität verbessert werden kann, um Bedingungen für einen optimalen Lernerfolg zu schaffen.

Der Singsaal ist der einzige Raum, der über eine mechanische Lüftung verfügt. Diese kann über einen etwas versteckten Schalter aktiviert/deaktiviert werden, was nicht allen LP bekannt sein dürfte bzw. leicht vergessen geht. Es empfiehlt sich, die zweistufige Lüftung mit einer CO<sub>2</sub>-basierten Steuerung auszurüsten, so dass sie bei Anwesenheit von Personen automatisch aktiviert wird.

Deutlich besser war die Situation in Kopfholz 2, einem Minergie-Standards entsprechenden Gebäude mit einer CO<sub>2</sub>-gesteuerten mechanischen Lüftung. Die Messungen zeigen, dass die technisch-bauliche Umgebung einen wesentlichen Einfluss auf die Luftqualität in den Klassenzimmern hat. Hier war das CO<sub>2</sub> meist im guten bis sehr guten Bereich unter 1000 ppm. Allerdings sollte die Einstellung der Lüftung im 1. OG überprüft werden.

Die Unterschiede zwischen den Klassenzimmern sind besonders in Kopfholz 1 sehr gross. Dies zeigt, dass die Lehrpersonen einen wichtigen Beitrag zu einer hygienisch noch akzeptablen Luftqualität leisten können. Auch die für diese Studie installierten CO<sub>2</sub>-Sensoren bieten mit ihrem Ampel-System eine Hilfeleistung, und die Anzeige in ppm (engl. parts per million) wurde von mehreren Lehrpersonen als informativere Zusatzinformation geschätzt. Doch wie Abschnitt 4.5 zeigt, konnten sogar sehr engagierte Lehrpersonen die lufthygienischen Minimalziele nur knapp erreichen. Wenn die Lehrperson dagegen nur einmal pro Stunde kurz lüftete (siehe Situation #2a in Abschnitt 4.5.2), gab es im Unterricht lange Phasen mit niedriger, oft auch hygienisch inakzeptabler Luftqualität.

Untersuchungen zur Luftqualität in Schweizer Schulen zeigen, dass in Schulgebäuden ohne mechanische Lüftung regelmässig eine hygienisch inakzeptable Luftqualität anzutreffen ist (Vassella et al., 2021). Es erscheint daher sinnvoll, diese Frage vertieft anzugehen und Ansätze zu prüfen, wie die Situation dauerhaft verbessert werden kann. Dies beinhaltet:

- a) Einbau mechanischer Lüftungsanlagen mit Wärme- und Feuchterückgewinnung. Es gibt sowohl zentrale, als auch dezentrale Lösungen. Letztere scheinen besonders für Altbauten prüfenswert zu sein.
- b) Erhöhen der Grundbelüftung in den Zimmern, z.B. durch überströmbare Türen und/oder CO<sub>2</sub>-gesteuerte Klappen im Fensterbereich.
- c) Bauliche Massnahmen, um Stosslüften einfacher und sicherer zu machen, z.B. Türstopper zum Schutz von Kinderhänden, Fensterfallschutz oder Fensterautomation.
- d) Sensibilisierung der Lehrpersonen mit einer Informationsbroschüre mit Empfehlungen für eine effiziente Lüftungsstrategie, wie Grund- und Stosslüften kombiniert werden kann und wie effizientes Lüften mit CO<sub>2</sub>-Sensoren in den Unterricht integriert werden kann.

## Übertragungsrisiko von Krankheitserregern in den untersuchten Räumen

Im durch manuelles Öffnen der Fenster belüfteten Altbau Kopfh Holz 1 wurden lediglich Luftwechselraten von 0.3 bis 2.5 ACH erreicht. Wenn man in den Klassenzimmern dieses Gebäudes von 240 m<sup>3</sup> Volumen den Zielwert von 1000 ppm einhalten will, muss eine gleichmässige Belüftung mit ca. 2.9 ACH sichergestellt werden. Werden zusätzlich in jedem Klassenzimmer zwei bis drei Luftreiniger auf einer nicht störenden Stufe betrieben, tragen diese weitere 3 bis 5 eACH bei. So kommt man bei den beobachteten Fensterlüftungsstrategien und einer Reinigungsleistung von 3 eACH auf Gesamtluftwechselraten von 3.3 bis 5.5 eACH, was bei Anwesenheit eines Viren-Emitters eine relative Reduktion der Virendosis zwischen 54 und 90 % ergibt. Bei Einhalten des CO<sub>2</sub>-Zielwertes werden damit sogar 5.9 eACH erreicht.

Im mechanisch belüfteten Gebäude Kopfh Holz 2 wurde der Richtwert für gute bis sehr gute Luft von 1000 ppm meistens eingehalten. In 320 m<sup>3</sup> (bzw. 260 m<sup>3</sup>) grossen Klassenzimmern kann dies bei einer typischen Arbeitsintensität entsprechend einer metabolischen Rate von 2.5 met mit einer konstanten Luftwechselrate von ca. 2.9 ACH (bzw. von ca. 3.6 ACH) erreicht werden. Bei der mehrstufigen Lüftung von Kopfh Holz 2 mit CO<sub>2</sub>-abhängiger Variation der Luftwechselrate wird für das Einhalten desselben Richtwertes eine nur leicht höhere<sup>25</sup> mittlere Luftwechselrate benötigt. Zusammen mit der in 320 m<sup>3</sup> grossen Räumen zu erwartenden Leistung der Luftreiniger von ca. 2.3 bis 4.0 eACH erreicht man hier eine Gesamtluftwechselrate von 5.2 bis 6.9 eACH. Die Reiniger bewirken in diesen bereits gut belüfteten Räumen bei Anwesenheit eines Viren-Emitters noch immer eine relative Reduktion der Virendosis um ca. 44 bis 58%.

Verglichen mit einer Situation bei minimaler Lüftung (nur Leckrate) und ohne Luftreinigung kann bei einer Kombination von Lüftung und Filtration mit Gesamtluftwechselraten im Bereich von 5.3 bis 7.4 eACH eine Reduktion des Risikos einer SARS-CoV-2-Infektion von rund 80 % erwartet werden (Buonanno et al., 2022).

---

<sup>25</sup> Bei Lüftungsquoten (niedrig, mittel, hoch) mit einem nicht allzu grossen Spread von ca. 1.3 ACH, 2.9 ACH und 6.3 ACH ist gegenüber einer konstanten Lüftungsquote mit einer um weniger als 5 % höheren mittleren Luftwechselrate zu rechnen.

## 6 Referenzen

- Allen, J.G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., Spengler, J.D. (2016). Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environ. Health Perspect.* 124, 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Bowe, B., Xie, Y., Al-Aly, Z. (2022). Acute and postacute sequelae associated with SARS-CoV-2 reinfection. *Nat. Med.* 28, 2398–2405. <https://doi.org/10.1038/s41591-022-02051-3>
- Buonanno, G., Ricolfi, L., Morawska, L., Stabile, L. (2022). Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Front. Public Health* 10, 1087087. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.1087087>
- Davis, H.E., McCorkell, L., Vogel, J.M., Topol, E.J. (2023). Long COVID: major findings, mechanisms and recommendations. *Nat. Rev. Microbiol.* 21, 133–146. <https://doi.org/10.1038/s41579-022-00846-2>
- Guo, Y., Dou, Z., Zhang, N., Liu, X., Su, B., Li, Y., Zhang, Y. (2023). Student close contact behavior and COVID-19 transmission in China's classrooms. *PNAS Nexus* 2, pgad142. <https://doi.org/10.1093/pnasnexus/pgad142>
- Helleis, F., Klimach, T., Pöschl, U. (2022). Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumluftechnik und Luftreiniger. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6049289>
- Minguillón, M.C., Querol, X., Alastuey, A., Riediker, M., Felisi, J.M., Garrido, T., Bekö, G., Nehr, S., Wiesen, P., Carslaw (2020). Guide for ventilation towards healthy classrooms. <https://doi.org/10.20350/digitalCSIC/12677>
- Peng, Z., Rojas, A.L.P., Kropff, E., Bahnfleth, W., Buonanno, G., Dancer, S.J., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M.G.L.C., Marr, L.C., Morawska, L., Nazaroff, W., Noakes, C., Querol, X., Sekhar, C., Tellier, R., Greenhalgh, T., Bourouiba, L., Boerstra, A., Tang, J.W., et al. (2022). Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks. *Environ. Sci. Technol.* 56, 1125–1137. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06531>
- Pöhlker, M.L., Krüger, O.O., Förster, J.-D., Berkemeier, T., Elbert, W., Fröhlich-Nowoisky, J., Pöschl, U., Pöhlker, C., Bagheri, G., Bodenschatz, E., Huffman, J.A., Scheithauer, S., Mikhailov, E. (2021). Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. *ArXiv210301188 Phys.*
- Riediker, M., Briceno-Ayala, L., Ichihara, G., Albani, D., Poffet, D., Tsai, D.-H., Iff, S., Monn, C. (2022). Higher viral load and infectivity increase risk of aerosol transmission for Delta and Omicron variants of SARS-CoV-2. *Swiss Med. Wkly.* 152, 1–5. <https://doi.org/10.4414/SMW.2022.w30133>
- Riediker, M., Monn, C. (2021). Simulation of SARS-CoV-2 Aerosol Emissions in the Infected Population and Resulting Airborne Exposures in Different Indoor Scenarios. *Aerosol Air Qual. Res.* 21, 200531. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.08.0531>
- Riediker, M., Tsai, D.-H. (2020). Estimation of Viral Aerosol Emissions From Simulated Individuals With Asymptomatic to Moderate Coronavirus Disease 2019. *JAMA Netw. Open* 3, e2013807. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.13807>
- Sachs, J.D., Karim, S.S.A., Aknin, L., Allen, J., Brosbøl, K., Colombo, F., Barron, G.C., Espinosa, M.F., Gaspar, V., Gaviria, A., Haines, A., Hotez, P.J., Koundouri, P., Bascuñán, F.L., Lee, J.-K., Pate, M.A., Ramos, G., Reddy, K.S., Serageldin, I., Thwaites, J., et al. (2022). The Lancet Commission on lessons for the future from the COVID-19 pandemic. *The Lancet* 400, 1224–1280. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(22\)01585-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(22)01585-9)

SECO (2023). Wegleitung zur Verordnung 3 zum Arbeitsgesetz - Gesundheitsschutz Plangenehmigung. SECO – Direktion für Arbeit Arbeitsbedingungen, Bern.

Smieszek, T., Lazzari, G., Salathé, M. (2019). Assessing the Dynamics and Control of Droplet- and Aerosol-Transmitted Influenza Using an Indoor Positioning System. *Sci. Rep.* 9, 2185. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38825-y>

Stocker, R., Tschudin Sutter, S., Neher, R., Althaus, C.L., Flahault, A., the Exchange group and Infection Prevention and Control group (2020). The role of Aerosols in SARS-CoV-2 Transmission. National COVID-19 Science Task Force (NCS-TF), Switzerland.

Tseng, Y.-J., Olson, K.L., Bloch, D., Mandl, K.D. (2023). Smart Thermometer-Based Participatory Surveillance to Discern the Role of Children in Household Viral Transmission During the COVID-19 Pandemic. *JAMA Netw. Open* 6, e2316190. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2023.16190>

Vassella, C.C., Koch, J., Henzi, A., Jordan, A., Waeber, R., Iannaccone, R., Charrière, R. (2021). From spontaneous to strategic natural window ventilation: Improving indoor air quality in Swiss schools. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 234, 113746. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2021.113746>

Vilser, D. (2022). Long Covid / Post-COVID-19-Syndrom bei Kindern und Jugendlichen. *Pädiatrie* 34, 20–25. <https://doi.org/10.1007/s15014-022-4024-2>

# Anhang

## A1 Messgerät, CO<sub>2</sub>-Messungen und Leckraten

### A1.1 Messgerät Air CO2ntrol 5000

Für eine CO<sub>2</sub>-basierte Analyse der Luftqualität und zur Unterstützung der Lehrpersonen wurden 17 Schulräume mit CO<sub>2</sub>-Monitoren «Air CO2ntrol 5000» (Dostmann electronic GmbH, Deutschland) ausgestattet, welche Messungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration, der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit auf einer Speicherkarte aufzeichnen. Diese CO<sub>2</sub>-Monitore zeigen den CO<sub>2</sub>-Verlauf der vergangenen 60 Minuten, wechseln auf gelb ab 800ppm und auf rot, wenn die Schwelle von 1200 ppm überschritten wird.

### A1.2 CO<sub>2</sub>-Messungen: Kalibrierung, Offsetkorrektur und Langzeitstabilität

Das Air CO2ntrol 5000 Messgerät unterstützt eine CO<sub>2</sub>-Kalibrierungs-Prozedur, mit der die CO<sub>2</sub>-Konzentration von Aussenluft über mehrere Minuten gemessen wird. Am Ende der Kalibrierung berechnet das Gerät den Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration und eine Offset-Korrektur auf den (leider nicht anpassbaren) Sollwert von 400 ppm, welche im Gerät gespeichert bleibt.

Gemäss Messungen aus der Atmosphärenforschung<sup>26</sup> betrug die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Aussenluft unter Berücksichtigung der Saisonalität am 01.01.2023 ca. 424 ppm. Daher definierten wir für die vorliegende Studie die CO<sub>2</sub>-Referenzkonzentration  $c_{a,ref} \triangleq 424$  ppm.



Abb. 27 Messgeräte Air CO2ntrol 5000 vor (oben) und nach (unten) der CO<sub>2</sub>-Kalibrierung auf den (nicht anpassbaren) Sollwert von 400ppm.

<sup>26</sup> [https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung\\_atmosphaere/spurengase/inh\\_nav/klimagase\\_node.html](https://www.dwd.de/DE/forschung/atmosphaerenbeob/zusammensetzung_atmosphaere/spurengase/inh_nav/klimagase_node.html)

Vor Beginn der Pilotstudie wurden am 09.12.2022 sämtliche Messgeräte in einem zuvor 15 Minuten lang intensiv gelüfteten Schulraum bei offenen Fenstern kalibriert. Während der Kalibrierung stand kein CO<sub>2</sub>-Referenzmessgerät zur Verfügung. Anschliessend wurden die Geräte noch im Dez. 2022 in den Schulräumen installiert.

Unter der Annahme, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Aussenluft am Tag der Kalibrierung 424 ppm betrug (plausibel aufgrund von Abb. 27 (oben)), sind die von den Messgeräten gelieferten CO<sub>2</sub>-Rohdaten um den Offset von 24 ppm zum Sollwert zu tief. Die Rohdaten werden daher vor weiterer Verwendung (z.B. in der Häufigkeitsstatistik) bzw. Interpretation durch Addition eines Offsets von +24 ppm korrigiert.

Am 31.12.2022 und am 01.01.2023 waren die Räume der Schule Kopfholz nicht belegt, so dass im Mittel eine Innenluft-CO<sub>2</sub>-Konzentration von 424 ppm entsprechend  $c_{a,ref} \triangleq 424$  ppm zu erwarten war. Tab. 7 zeigt die am 01.01.2023 gemessenen 24h-Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Rohdaten und die im Tagesverlauf relativ zum Mittelwert beobachteten maximalen Abweichungen. Ebenfalls gezeigt sind Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit (RH) und der Temperatur.

Raum	CO <sub>2</sub> -Messgerät Serial Number	mean (C <sub>CO2</sub> ) [ppm]	d <sub>min</sub> (C <sub>CO2</sub> ) [ppm]	d <sub>max</sub> (C <sub>CO2</sub> ) [ppm]	mean (RH) [%]	min (RH) [%]	max (RH) [%]	mean (T) [°C]	min (T) [°C]	max (T) [°C]	Bemerkungen zu CO <sub>2</sub>
K1-F	101621522264	351.9	-20.9	15.1	34.3	34.1	34.5	21.6	21.3	21.8	steady state
K1-S	101621522317	360.7	-23.7	22.3	35.1	34.6	35.5	22.1	21.8	22.5	steady state
K1-P	101621522251	362.4	-24.4	22.6	39.8	39.2	40.1	19.4	19.2	20.0	steady state
K1-L	101621522336	360.9	-23.9	22.1	36.0	34.2	36.5	22.4	21.9	23.9	steady state
K1-B	101621522339	376.4	-32.4	25.6	33.0	32.6	33.3	21.6	21.3	21.9	steady state
K1-Q	101621522252	378.5	-38.5	34.5	38.0	37.5	38.5	21.8	21.4	22.1	ca. 10 ppm abnehmend
K1-V	101621522319	357.0	-35.0	45.0	37.3	36.9	37.6	20.6	20.3	20.9	steady state
K1-Y	101621522332	356.9	-21.9	18.1	39.3	37.9	39.8	21.4	21.0	22.2	steady state
K1-M	101621522102	388.9	-39.9	27.1	<b>51.5</b>	<b>50.9</b>	<b>52.2</b>	20.3	20.0	20.9	Pflanzen, Photosynthese
K1-alle		366.0	-39.9	45.0	38.3	32.6	52.2	21.2	19.2	23.9	
K2-E	101621522323	368.3	-32.3	28.7	30.0	29.9	30.2	22.8	22.7	23.0	Tagesvariation 363 .. 374
K2-N	101621522335	354.3	-25.3	26.7	30.9	30.2	31.4	22.3	22.1	22.4	Tagesvariation 345 .. 370
K2-R	101621522338	328.4	-25.4	19.6	36.5	35.5	37.1	19.0	18.7	19.5	steady state
K2-U	101621522254	334.5	-22.5	28.5	35.1	32.5	35.8	20.4	20.0	22.2	Tagesvariation 325 .. 343
K2-W	101621522330	<b>308.2</b>	-22.2	21.8	33.0	32.8	33.2	20.9	20.8	21.1	steady state
K2-Z	101621522255	348.6	-23.6	31.4	36.9	36.5	37.2	20.2	20.1	20.4	Tagesvariation 344 .. 357
K2-P	101621522307	360.3	-34.3	32.7	36.1	35.5	37.6	20.8	20.6	20.9	ca. 30 ppm abnehmend
K2-L	101621522101	340.0	-31.0	26.0	33.1	32.5	33.4	21.7	21.4	22.0	Tagesvariation 335 .. 352
K2-alle		342.8	-34.3	32.7	34.0	29.9	37.6	21.0	18.7	23.0	

Tab. 7 Überprüfung der installierten Messgeräte mit Messungen vom 01.01.2023 bei Abwesenheit von Personen.

C<sub>CO2</sub> CO<sub>2</sub>-Konzentration (Rohdaten)

RH Relative Luftfeuchtigkeit

T Temperatur

Die um +24 ppm korrigierten CO<sub>2</sub>-Rohdaten haben einen Gebäude-Mittelwert von 366+24=390 ppm in Kopfholz 1 und 343+24 = 367 ppm in Kopfholz 2 (siehe Zeilen «K\*-alle»). Daher ist davon auszugehen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Aussenluft am 09.12.2022 um ca. 34 bis 57 ppm höher war als am 01.01.2023. Es ist jedoch unklar, weshalb der Gebäude-Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Rohdaten in Kopfholz 2 deutlich tiefer war als in Kopfholz 1, denn mit Ausnahme von vernachlässigbaren Trends in wenigen Räumen befanden sich sämtliche Schulzimmer im CO<sub>2</sub>-Gleichgewicht (steady state).

Die Abweichungen der CO<sub>2</sub>-Rohdaten vom 24-Stunden-Mittelwert des jeweiligen Raumes waren mit -40 bis +45 ppm in Kopfholz 1 und mit -34 bis +33 ppm in Kopfholz 2 äusserst gering, was

bestätigt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Aussenluft im Tagesverlauf in einem ähnlich kleinen Bereich variiert.

Bei einem Messgerät zeigten die CO<sub>2</sub>-Rohdaten im Verlauf der Pilotstudie eine Langzeitdrift im Bereich von ca. -18 bis +50 ppm, was anhand von 1h-Mittelwerten jeweils am Montagmorgen zwischen 5 und 7 Uhr festgestellt wurde (Tab. 8). Am Montagmorgen vor 7 Uhr wurden in den meisten Räumen bei steady-state Messbedingungen die CO<sub>2</sub>-Wochentiefstwerte gemessen. Eine systematische Untersuchung der Langzeitdrift wurde jedoch nicht durchgeführt.

Datum (2023)	01.01	09.01	16.01	23.01	30.01	06.02	13.02
Startzeit 1h-Mittelwert	05:00	06:00	05:00	05:00	06:00	05:00	06:00
mean(c <sub>CO2</sub> ) [ppm]	376.4	391.1	358.6	384.4	398.4	393.5	425.8
mean(c <sub>CO2</sub> )+24 [ppm]	400.4	415.1	382.6	408.4	422.4	417.5	449.8

Tab. 8 Beobachtete Langzeit-Drift des CO<sub>2</sub>-Messgeräts SN-101621522339

Das für die Pilotstudie verwendete CO<sub>2</sub>-Modell geht von einer konstanten CO<sub>2</sub>-Konzentration  $c_{a,ref} = 424$  ppm in der Aussenluft aus. Daher wird für die Curve Fittings eine additive Korrektur auf  $c_{a,ref}$  berechnet, welche auf dem gemessenen Mittelwert am Montag derselben Woche zwischen 5 und 7 Uhr basiert oder auf einem anderen geeigneten Mittelwert, der in einer zeitlich nahe liegenden steady-state-Phase gemessen wurde.

Ein sonniges Klassenzimmer mit vielen Pflanzen zeigte am 01.01.2023 ab 11 Uhr im Vergleich zu anderen Klassenzimmern in Kopfholz 1 mit vergleichbar kleiner Leckrate eine deutlichere, abrupte Trendänderung zu einer CO<sub>2</sub>-Abnahme (Abb. 28). Hier konnte die Wirkung der Photosynthese in stärkerem Masse beobachtet werden.

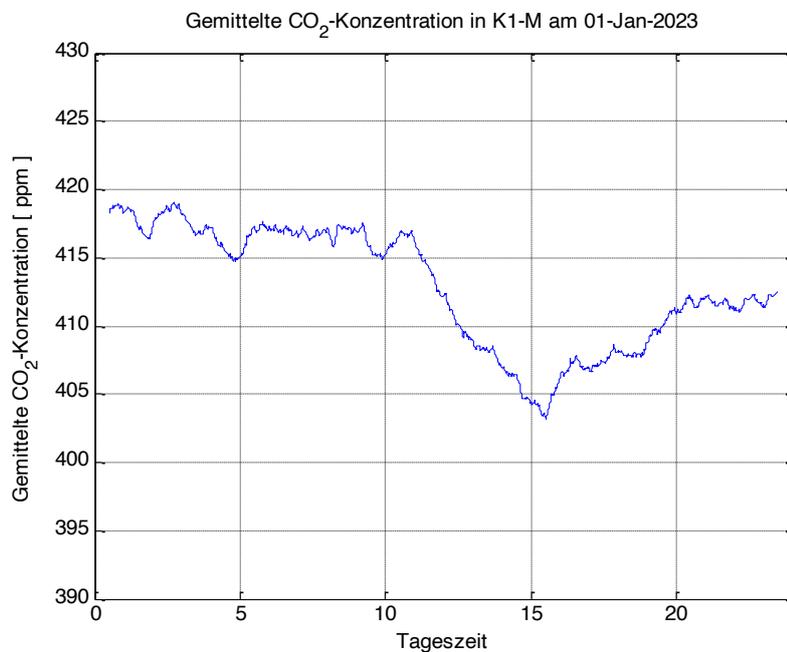


Abb. 28 CO<sub>2</sub>-Abnahme zwischen 10:30 und 15:00 in einem Klassenzimmer mit vielen Pflanzen. Gleitender 1h-Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration nach additiver Korrektur des Kalibrierungsfehlers um +24 ppm.

### A1.3 Leckraten in Schulzimmern von Kopfholz 1

Die Luftwechselrate  $ACR_l$  in Abwesenheit von  $CO_2$ -Quellen, bei geschlossenen Fenstern, geschlossener Türe und (falls vorhanden) abgeschalteter Lüftung wird auch als *Leckrate* oder  *$CO_2$ -Leerraumrate* bezeichnet. Die Leckrate ist auf Undichtigkeiten in Fenstern, Türe und Gebäudehülle zurückzuführen und ist in gut isolierten Gebäuden oft kleiner 0.1 ACH. Die Messung kleiner Luftwechselraten erfordert eine lange Beobachtungszeit für eine ausreichende relative Genauigkeit. Dafür waren die in den Nachtstunden aufgezeichneten  $CO_2$ -Daten geeignet. Ab 19:00 waren die Schulräume meist während 12 Stunden nicht belegt; Türen und Fenster waren in der Regel geschlossen.

Eine Analyse über mehrere Tage im gleichen Raum (Abb. 29 bis Abb. 31) ergab eine sehr geringe Streuung des  $CO_2$ -Abklingverhaltens; die Leckrate  $ACR_l$  lag im Bereich von 0.077 bis 0.094 ACH.

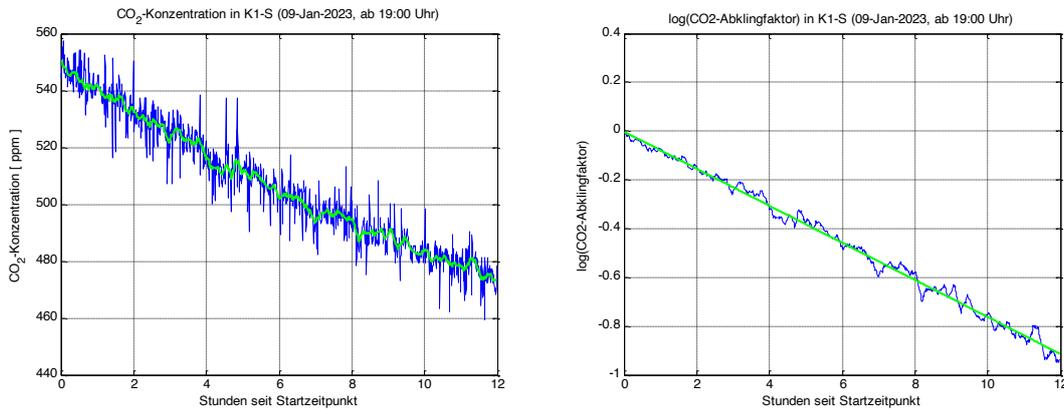


Abb. 29  $CO_2$ -Abklingvorgang am 09./10.01.2023. Gemessene Leckrate: 0.077 ACH.

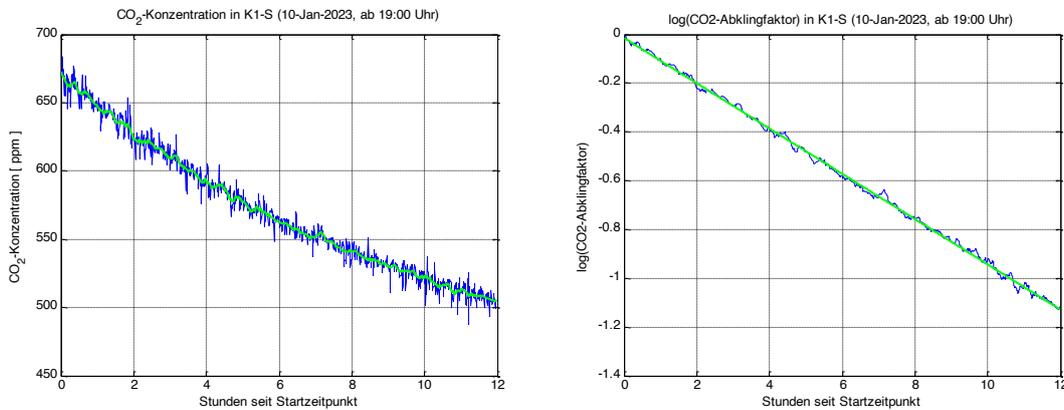


Abb. 30  $CO_2$ -Abklingvorgang am 10./11.01.2023. Gemessene Leckrate: 0.094 ACH.

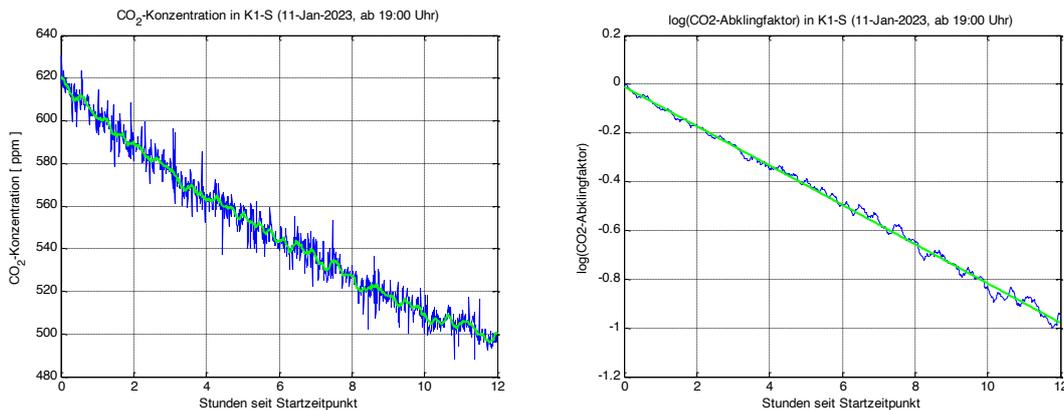


Abb. 31  $CO_2$ -Abklingvorgang am 11./12.01.2023. Gemessene Leckrate: 0.082 ACH.

Die Linearität in der logarithmischen Darstellung zeigt, dass der Anteil der CO<sub>2</sub>-Konzentration, welcher über der Aussenluft-Konzentration liegt, sehr genau einer exponentiellen Abklingkurve folgt.

Abb. 32 zeigt zum Vergleich eine Situation, in der vermutlich ein Kippfenster offenblieb; hier wurde eine Luftwechselrate von 0.47 ACH gemessen.

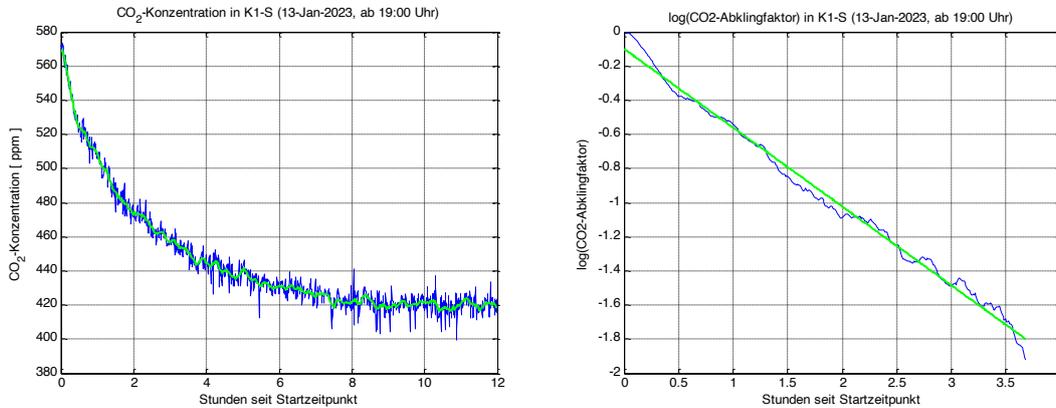


Abb. 32 CO<sub>2</sub>-Abklingvorgang am 13./14.01.2023. Gemessene Luftwechselrate: 0.47ACH.

Die Leckraten wurden für vier Räume von Kopfholz 1 durch Mittelung der Daten mehrerer nächtlicher Abklingvorgänge genauer bestimmt (Tab. 9).

Die mehrheitlich im Bereich von 0.1ACH liegenden Leckraten zeigen, dass die Fenster in Kopfholz 1 generell sehr dicht sind. Trotz identischer Abmessungen und Fensterflächen in drei untersuchten Klassenzimmern wurden leicht unterschiedliche Leckraten gemessen.

Raum	mean(ACR <sub>1</sub> ) [ACH]
K1-U	0.16
K1-S	0.08
K1-L	0.03
K1-B	0.13

Tab. 9 Leckraten in Kopfholz 1

## A2 Dimensionierung der Reinigungsleistung für kombiniertes Lüften und Filtern

Der Bedarf an Luftreinigungsgeräten pro Schulraum wurde aufgrund der Zielvorgabe einer durch Lüftung und Filterung zu erreichenden Gesamtluftwechselrate von mindestens 5 bis 6 ACH ermittelt (Minguillón et al., 2020). Dabei wurden CO<sub>2</sub>-Messungen, Erfahrungswerte für die erreichbaren Luftwechselraten bei Fensterlüftung bzw. mechanischer Lüftung, die Dimensionen der Schulzimmer sowie Herstellerangaben zur erwarteten Reinigungsleistung durch Filterung (CADR) berücksichtigt.

Zur Ermittlung der durch Filtration bereitzustellenden Luftwechselraten  $ACR_f$  wurde ausgehend von der Zielvorgabe  $ACR_{total} \stackrel{def}{=} ACR_v + ACR_f \geq 5$  ACH zuerst die durch Zufuhr von Aussenluft erreichten mittleren Luftwechselraten  $ACR_v$  bestimmt.

Mit einem physikalischen Modell für Mischlüftung lässt sich ein Zusammenhang herstellen zwischen einem CO<sub>2</sub>-Richtwert  $c_R$ , der bei einer gegebenen Belegung des Raums und bei einer gegebenen mittleren Arbeitsintensität in zwei aufeinanderfolgenden Unterrichtseinheiten (UE) nie überschritten wird, und der dazu notwendigen mittleren Luftwechselrate  $ACR_v$ . Wir betrachteten einen genügend langen Zeitabschnitt (95 Minuten) mit zwei aufeinanderfolgenden UE (je 45 Minuten) und einer dazwischenliegenden Pause (5 Minuten), damit dieser mehrere Lüftungsvorgänge beinhaltete.

Für die Schulzimmer von Kopfholz 1 (nur Fensterlüften, d.h. ohne Lüftungsanlage<sup>27</sup>) gingen wir von einem optimierten Lüftungsschema aus, welches zwischen massvollen Lüftungen mit 1-2 Kippfenstern (jeweils 20 Minuten) bei  $ACR_v = x$  und kräftigen Stosslüftungen (jeweils 5 Minuten) mit  $ACR_v = 10x$  alterniert, so dass zusätzlich zur Basislüftung mit Kippfenstern einmal während jeder Lektion

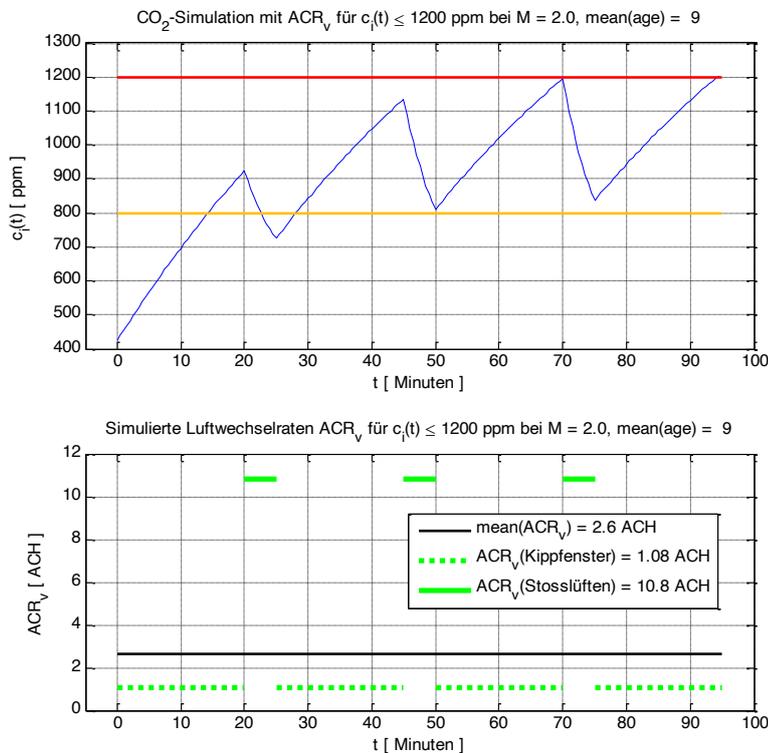


Abb. 33 Lüftungsschema für effizientes Fensterlüften mit CO<sub>2</sub>-Monitor

und einmal in der Pause eine Stosslüftung stattfindet. Mit Hilfe des Modells konnte die kleinstmögliche Luftwechselrate  $x$  bestimmt werden, welche die Bedingung  $c_i(t) \leq c_R$  über 2 UE noch einhält.

Abb. 33 zeigt den simulierten CO<sub>2</sub>-Verlauf mit einem Richtwert  $c_R = 1200$  ppm für ein Schulzimmer von Kopfholz 1 (240 m<sup>3</sup>) bei einer Belegung mit einem Personenäquivalent<sup>28</sup> von 24 SuS (Altersgruppe 6-11 Jahre, Durchschnittsalter neun Jahre) und bei einer typischen Arbeitsintensität entsprechend einer mittleren metabolischen Rate  $M = 2.0$ . Hier wurde für die Basislüftung  $x = 1.08$  ACH bestimmt, und zusammen mit den Stosslüftungen ergab sich eine mittlere Luftwechselrate von 2.6 ACH.

Tab. 10 zeigt die benötigten mittleren Luftwechselraten  $ACR_v$  für das gegebene alternierende Lüftungsschema mit CO<sub>2</sub>-Richtwerten

<sup>27</sup> Der Singsaal in Kopfholz 1 hat eine mechanische Lüftung und wird gesondert betrachtet.

<sup>28</sup> Bei einer Ganzklasse von 21-22 Schülerinnen und Schülern (SuS) und einer Lehrperson (LP) rechnen wir der Einfachheit halber mit einem Personenäquivalent von 24 SuS, bei einer Halbklassse von 10-11 SuS und einer LP mit einem Personenäquivalent von 12 SuS.

1200 ppm sowie 1000 ppm bei leichter, mittlerer und hoher Arbeitsintensität entsprechend den mittleren metabolischen Raten 1.5, 2.0 und 2.5 met.

Volumen [m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> - Richtwert [ppm]	Metabolische Rate <i>M</i> [met]	Luftwechselrate ACR <sub>v</sub> [ACH]	Lüftungsschema
240	1200	1.5	1.70	alternierend
240	1200	2.0	2.60	alternierend
240	1200	2.5	3.60	alternierend
240	1000	1.5	2.50	alternierend
240	1000	2.0	3.60	alternierend
240	1000	2.5	6.10	alternierend

Tab. 10 Benötigte Luftwechselraten ACR<sub>v</sub> in Schulzimmern von Kopfholz 1, so dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in zwei aufeinanderfolgenden Unterrichtseinheiten (2 x 45 Minuten mit dazwischenliegender 5-Minuten-Pause) mit einem Personenäquivalent von 24 SuS (mittleres Alter 9 Jahre) und bei einer Arbeitsintensität entsprechend einer mittleren metabolischen Rate *M* den angegebenen CO<sub>2</sub>-Richtwert nicht überschreitet.

Das Einhalten des Richtwerts 1200 ppm hat sich in den Klassenzimmern von Kopfholz 1 im besten Fall (selten) als knapp machbar erwiesen. Tab. 10 zeigt, dass mit optimal verteilten Lüftungen bei einer typischen (mittleren) Arbeitsintensität nicht mehr als 2.6 Luftwechsel pro Stunde zu erwarten sind; fünf bis sechs Luftwechsel pro Stunde sind selbst mit optimiertem Fensterlüften nicht erreichbar.

Eine durch Filtration erzielte Luftwechselrate ACR<sub>f</sub> von ca. 2.5 ACH führt somit bereits zu einer Verdoppelung der Gesamtluftwechselrate ACR<sub>total</sub>.

Je nach Raumsituation (Volumen, Platzverhältnisse), Belegung und erwarteten Aktivitäten installierten wir in den Schulzimmern von Kopfholz 1 Luftreiniger für Luftwechselraten von 1.2 bis 3.7 ACH bei einer mittleren Betriebsstufe, wobei je nach Wahl der bevorzugten Stufe höhere oder niedrigere Luftwechselraten möglich waren.

Mit dieser Dimensionierung konnte in den Schulzimmern von Kopfholz 1 eine Gesamtluftwechselrate im erwarteten Bereich von ca. 2.9 bis 7.3 ACH evaluiert werden.

Im Schulhaus Kopfholz 2 mit CO<sub>2</sub>-gesteuerter Lüftungsanlage und zusätzlicher manueller Lüftung kann eine gleichmässige Belüftung als im Altbau Kopfholz 1 erzielt werden. Jeder Raum verfügt über einen separaten CO<sub>2</sub>-Wächter und einstellbare Volumenströme (niedrig, mittel, hoch) für verschiedene CO<sub>2</sub>-Bereiche. Während der Studienperiode waren alle Zimmer mit CO<sub>2</sub>-Schwellwerten bei 800 ppm sowie 1300 ppm konfiguriert<sup>29</sup>. Die relativ hohen Schwellen von 800 sowie 1300 ppm führen dazu, dass die das Übertragungsrisiko signifikant reduzierenden Volumenströme (mittel, hoch) nur mit einer Verzögerung aktiviert werden.

Eine CO<sub>2</sub>-Modellierung mit gleichmässiger Belüftung (Luftwechselrate als konstant angenommen) ergab, dass in den Schulzimmern von Kopfholz 2 die in Tab. 11 angegebenen Mindestwerte der Luftwechselrate ACR<sub>v</sub> und des zugehörigen Aussenluft-Volumenstroms erreicht werden, falls in zwei aufeinanderfolgenden Unterrichtseinheiten (Dauer 2 x 45 + 5 Minuten) mit einem Personenäquivalent von 24 SuS und bei einer Arbeitsintensität entsprechend einer mittleren metabolischen Rate *M* der angegebene CO<sub>2</sub>-Richtwert nicht überschritten wird.

<sup>29</sup> Die Hysterese-Einstellungen der CO<sub>2</sub>-Steuerung sowie die abhängig von der CO<sub>2</sub>-Konzentration theoretisch zur Verfügung stehenden Aussenluft-Volumenströme sollten beim Lüftungsunternehmen in Erfahrung gebracht werden.

Volumen [m <sup>3</sup> ]	CO <sub>2</sub> - Richtwert [ppm]	Metabolische Rate <i>M</i> [met]	Luftwechselrate ACR <sub>v</sub> [ACH]	Aussenluft- Volumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
320	1000	1.5	1.65	528
320	1000	2.0	2.30	736
320	1000	2.5	2.90	928
320	800	1.5	2.70	864
320	800	2.0	3.60	1152
320	800	2.5	4.50	1440
260	1000	1.5	2.10	546
260	1000	2.0	2.85	741
260	1000	2.5	3.60	936
260	800	1.5	3.30	858
260	800	2.0	4.40	1144
260	800	2.5	5.50	1430

Tab. 11 Benötigte Luftwechselraten für Ventilation (ACR<sub>v</sub>) und Aussenluft-Volumenströme in Schulzimmern von Kopfholz 2, so dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in zwei aufeinanderfolgenden Unterrichtseinheiten (2 x 45 Minuten mit dazwischenliegender 5-Minuten-Pause) mit einem Personenäquivalent von 24 SuS (mittleres Alter 9 Jahre) und bei einer Arbeitsintensität entsprechend einer mittleren metabolischen Rate *M* den angegebenen CO<sub>2</sub>-Richtwert nicht überschreitet.

Falls in einem Schulraum von 320 m<sup>3</sup> bei einer mittleren Arbeitsintensität ( $M = 2.0$ ) CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über 1000 ppm gemessen werden, folgt daher, dass die (mittlere) Luftwechselrate ACR<sub>v</sub> nicht höher als 2.3 ACH sein kann; der Zielwert von von 5 bis 6 ACH wird somit deutlich verfehlt. Kombiniert man jedoch die mechanische Lüftung mit Filtration, kann eine Gesamtluftwechselrate von 5 bis 6 ACH bei einem CO<sub>2</sub>-Richtwert von maximal 1000 ppm, kurzfristig auch maximal 1200 ppm erreicht werden. Hilfreich ist auch zusätzliches manuelles Lüften zumindest in jeder Pause.

Je nach Raumsituation (Volumen, Platzverhältnisse), Belegung und erwarteten Aktivitäten installieren wir in den Schulzimmern von Kopfholz 2 Luftreiniger für Luftwechselraten von 1.4 bis 2.5 ACH bei einer mittleren Geschwindigkeitsstufe, wobei je nach Wahl der bevorzugten Stufe auch höhere oder niedrigere Luftwechselraten möglich waren.

Mit dieser Dimensionierung konnte in Kopfholz 2 eine Gesamtluftwechselrate im erwarteten Bereich von ca. 3.0 bis 8.0 ACH evaluiert werden.

### A3 Einführung der Luftreiniger an der Primarschule Kopfholz

Zu Beginn der Studienperiode am Morgen des 09.01.2023 waren 52 Luftreiniger in total 25 Klassenzimmern und Gemeinschaftsräumen der Schulhäuser Kopfholz 1 und 2 fertig installiert und auf Stufe 1 in Betrieb. Nach Vorgesprächen mit Lehrpersonen und Hauswartung waren diverse Platzierungswünsche bereits berücksichtigt.

In den Klassenzimmern mit zwei oder drei installierten Geräten konnte eine gleichmässige Verteilung der Luftreinigung durch Platzierung auf gegenüberliegenden Seiten erreicht werden. Zur Vermeidung einer allfälligen Geräuschbelastung wurde darauf geachtet, dass der kleinste Abstand zu Personen mindestens einen Meter betrug.

In Kopfholz 1 wurde ein Gerät meist neben der Wandtafel platziert, nach Möglichkeit auf der vom Pult der Lehrperson weiter entfernten Seite. Ein zweites Gerät fand meist auf der gegenüberliegenden Seite Platz. Bei der Platzierung der Geräte wurde auf genügenden Abstand zur Fensterfront geachtet, so dass die Luftreinigung besonders in denjenigen Bereichen unterstützt wurde, welche weniger von Fensterlüftungen profitieren und für die Anreicherung respiratorischer Aerosole prädestiniert sind. Nach Möglichkeit wurde ein Mindestabstand zur Wand von 30 bis 50 cm eingehalten.

In Kopfholz 2 wurden Geräte auch in der Nähe der Fensterfront platziert, da die hohen Fenster nicht geöffnet werden können und somit saubere Luft nicht über geöffnete Fenster «verschwendet» werden konnte. Die Klassenzimmer in Kopfholz 2 sind über einen offenen Durchgang mit einem Nebenzimmer (Gruppenraum) verbunden; ein kleineres Gerät wurde deshalb im Nebenzimmer installiert.

Eine zentralere Positionierung der Geräte war in den Klassenzimmern beider Gebäude aus mehreren Gründen nicht möglich:

- Aufgrund der geringen Abstände zwischen den Pultreihen hätte der Mindestabstand zu Personen bei einer zentraleren Positionierung nicht eingehalten werden können.
- Die Hauswartung legte Wert darauf, dass die Reinigung der Böden nicht durch verlegte Netzkabel erschwert wurde.
- Im Altbau Kopfholz 1 mangelt es an geeignet platzierten Steckdosen, so dass die meisten Geräte über Netzverlängerungskabel (3 m oder 5 m) angeschlossen werden mussten.
- Netzkabel konnten zur Vermeidung von Stolperfallen nur entlang der Wände verlegt werden. Eine Absicherung von Verlängerungskabeln mittels Klebband wurde zur Vermeidung von Klebstoffrückständen nicht in Betracht gezogen, und eine Absicherung mittels flacher Kabelbrücken wäre für das Pilotprojekt zu aufwändig/teuer gewesen.
- Bei einer U-förmigen Anordnung der Pulte wäre eine zentrale Geräteplatzierung zwar sinnvoll gewesen, doch in der Mitte der Schulräume gab es keine Steckdosen.

Damit die Bedienung der Luftreiniger keinen zeitlichen Mehraufwand für die Lehrkräfte nach sich zog, wurden die Geräte von Beginn weg vor Schulbeginn automatisch aktiviert und ca. 1/2 Stunde nach Schulende automatisch abgeschaltet. Alle Gerätehersteller unterstützten die Automatisierung dieser Vorgänge via App. Besonders in der zweiwöchigen Testphase bewährte sich die Möglichkeit, ein Gerät zeitgesteuert auf der zuletzt von der LP eingestellten Betriebsstufe zu reaktivieren.

Die allermeisten Lehrkräfte und Betreuungspersonen erhielten in der ersten Woche eine persönliche Kurzeinführung in die manuelle Bedienung ihrer Geräte sowie ein Infoblatt «Verbesserung der Luftqualität im Schulhaus Kopfholz 1 (bzw. 2).»

Im Laufe der ersten zwei bis drei Wochen wurde die Positionierung bei wenigen Geräten zu Gunsten eines grösseren Abstands von Personen oder zur Reduktion des Windchill-Effekts weiter optimiert. Das Herantasten an die bevorzugte Kombination von Betriebsstufen wurde mit Logblättern erfasst. Tab. 12 zeigt die Auswertung der Rückmeldungen mit den gewählten Stufen. Einige Logblätter wurden mit unvollständigen oder rudimentären Einträgen retourniert, so dass die gewünschte Einstellung erst nach persönlicher Nachfrage gefunden werden konnte. Die gewählte Stufenkombination wurde bis am 23.01.2023 fest einprogrammiert, so dass die Geräte im weiteren Verlauf der Studie abgesehen von manuellen Anpassungen (z.B. bei Ereignissen mit erhöhtem Ruhebedarf wie Prüfungen oder für Turbo-Betrieb in Pausen) mehrheitlich auf den gewählten Betriebsstufen liefen.

Raum	Nutzung	LP	FB	LR1	LR2	LR3	Höchste getestete Stufen			Gewählte Stufen	Fussnoten
							nicht störend	knapp akzept.	nicht akzept.		
K1-A	Unterricht		7	P-AC4			2			2	
K1-U	Singsaal		4	P-AC4	P-AC4	P-AC4	(1,1,1)		(2,2,2)	(1,1,1)	
K1-K	Diverses		7	P-AC4			1			1	
K1-D	Leitung		0	P-AC4						1	K1.D
K1-W	Diverses		0	S-RB	S-RB					(1,1)	
K1-Z	Bibliothek		0	E-WA7	E-WA7					(3,3)	
K1-F	Diverses		0	E-PA9	E-WA7					(4,2)	
K1-S	Klasse		10	P-AC4	P-AC4		(1,1)			(1,1)	
K1-P	Unterricht		5	P-AC4	P-AC4		(2,2)			(2,2)	
K1-L	Klasse		1	S-RB	S-RB			(1,1)	(1,1)	(1,1)	K1.L
K1-L	Klasse		0	P-AC4	P-AC4					(1,1)	K1.L
K1-B	Klasse		10	E-PA9	E-PA9		(6,6)	(7,7)		(6,6)	
K1-XG	Diverses		0	E-WA7						3	
K1-XK	Unterricht		5	P-AC4			2			2	
K1-Q	Klasse	1	6	E-PA9	E-PA9	E-WA7	(4,4,4)		(9,9,9)	(4,4,3)	K1.Q
K1-Q	Klasse	2	4	E-PA9	E-PA9	E-WA7	(1,1,1)	(3,3,3)		(4,4,3)	K1.Q
K1-V	Klasse		0	P-AC4	P-AC4	P-AC4	(2,2,2)			(2,2,2)	K1.V
K1-Y	Klasse		0	P-AC4	P-AC4					(2,2)	
K1-M	Unterricht		10	P-AC4	P-AC4		(1,1)			(1,1)	K1.M
K2-E	Klasse		10	E-PA9	E-WA7		(1,1)			(5,3)	K2.E
K2-N	Klasse		8	P-AC4	P-AC4		(1,1)			(1,1)	
K2-R	Klasse		4	E-PA9	E-PA9	E-WA7	(6,6,3)		(7,7,3)	(6,6,0)	K2.R
K2-U	Klasse		3	E-PA9	E-PA9	E-WA7	(3,5,3)			(3,5,3)	K2.U
K2-W	Klasse		7	S-RB	S-RB		(2,2)			(2,2)	
K2-Z	Klasse		10	S-RB	S-RB		(2,2)			(2,2)	
K2-P	Restaurant		0	S-RB	S-RB	S-RB				(3,3,3)	K2.P
K2-L	Mittagstisch		0	S-RB	S-RB	S-RB				(3,3,3)	K2.L

Tab. 12 Auffinden der bevorzugten Luftreiniger-Betriebsstufen während der Testphase (Wochen 1 und 2).  
FB: Anzahl Tage mit Feedback auf Logblatt (max. 10; Eintrag 0, falls nichts ausgefüllt oder Logblatt nicht abgegeben).

1-3 Geräte LR1, LR2, LR3:

E-PA9: Electrolux Pure A9 (PA91-604GY, 9 Stufen), E-WA7: Electrolux Well A7 (5 Stufen)

P-AC4: Philips AC4236-10 (3 Stufen)

S-RB: Stadler Form Roger big (5 Stufen)

Höchste getestete Stufen: Einstellung, für welche eine Rückmeldung («nicht störend», «knapp akzeptabel» oder «nicht akzeptabel») erfolgte. Ist das Feld leer, gab es keine entsprechende Rückmeldung mit Stufenangabe.

#### Fussnoten zu Tab. 12

K1.D: Gerät war anfänglich zu nahe an den Arbeitsplätzen; der leicht kühlende Effekt der Luftbewegung wurde als störend empfunden. Das Gerät wurde deshalb in der 3. Woche umpositioniert (Abstand von Arbeitsplätzen: 3.5 m).

K1.L: Hörbarer Dauerton (Stufe 2) wurde als störend empfunden. Geräte wurden nach 1 Woche durch P-AC4 ersetzt.

K1.Q: Unterschiedliche Einschätzungen. Gewählte Stufen: Kompromiss-Einstellung nach Besprechung mit LP1 (23.01.).

K1.V: Gewählte Stufen (2,2,2) nicht störend gemäss mündlicher Rückmeldung.

K1.M: Auf Stufe 2 wurde der kühlende Effekt der Luftbewegung als störend empfunden (Abstand Gerät von LP: 2 m).

Die SuS haben sich bei Stufe 2 nicht beklagt.

K2.E: Gewählte Stufen gemäss Besprechung am 23.01 (gute Erfahrungen mit höheren Stufen in anderen Klassen).

K2.R: Auf Wunsch der LP wurde LR3 (im Gruppenraum-Nebenzimmer) nur bei Bedarf/Benutzung aktiviert.

K2.U: Als Optimierung wurden die Geräte in einigen Pausen manuell auf maximale Leistung (Stufe 9) eingestellt.

K2.P/13: Aufgrund der bestehenden, sehr gut hörbaren Lüftungsanlage wurde das Geräusch der Luftreiniger bis Stufe 3 nicht als störend empfunden.

## A4 Messwerte der Reinigertests

Konfiguration	Abklingrate Raummittel	Reduktions- rate [ACH]	Berech- nete CADR [m <sup>3</sup> /h]	LAeq [dB(A)]	LAFmax [dB(A)]	LAFmin [dB(A)]
<b>Versuche im Referenzraum</b>						
Ohne Reiniger	-0.37			27.9	34.4	26.8
Electrolux PA9 (3)	-1.11	0.981	236	28.4	37.4	27.2
Electrolux PA9 (5)	-1.46	1.331	321	35.4	40.5	34.2
Electrolux PA9 (6)	-1.86	1.736	418	38.2	39.4	37.4
Electrolux PA9 (9)	-3.01	2.885	695	48.1	50.8	47.3
Philips AC4236-10 (1)	-0.96	0.836	201	32.6	37.4	31.5
Philips AC4236-10 (2)	-1.41	1.285	310	41.5	45.0	40.3
Philips AC4236-10 (3)	-2.80	2.677	645	52.4	53.1	51.6
Stadler Form Roger big (2)	-0.71	0.584	141	30.9	36.9	29.0
Stadler Form Roger big (3)	-1.30	1.174	283	42.2	44.0	41.0
Stadler Form Roger big (4)	-2.58	2.453	591	48.0	48.9	47.1
Electrolux WA7 (3)	-1.14	1.015	245	34.9	36.4	33.9
Electrolux WA7 (5)	-1.82	1.693	408	43.3	45.2	42.4
<b>Versuche in ruhigerem Raum</b>						
Ohne Reiniger				21.6	27.8	21.0
Philips AC4236-10 (1)	-1.00	-0.972	235	27.3	34.8	26.0
Philips AC4236-10 (1) (1)	-1.65	-1.626	393	31.4	42.0	29.8
Philips AC4236-10 (2) (2)	-2.64	-2.611	632	41.2	43.1	40.3
Philips AC4236-10 (2) (2) (2)	-3.88	-3.851	932	43.6	44.6	42.7

Tab. 13 Zusammenfassung der kontrollierten Messungen im Referenzzimmer und der zusätzliche Messungen in einem ruhigeren Zimmer (beide Räume mit Volumen 241 m<sup>3</sup>). Die Konfiguration zeigt den Reinigertypen gefolgt von der bzw. den Stufen in Klammern. Die Abklingrate gibt die Rate des exponentiellen Abfalls der Aerosole im Raum an. Die Reduktionsrate ist die Abklingrate korrigiert um die mit der CO<sub>2</sub>-Methode bestimmte Leckrate (siehe Anhang A1.3). Die berechnete CADR ist die bei den experimentellen Bedingungen resultierende Clean Air Delivery Rate. LAeq ist der äquivalenten Dauerschallpegel, LAFmax und LAFmin der höchste und tiefste Kurzzeitschallwert (schnelle Zeitgewichtung).

## A5 Technische Spezifikationen der getesteten Luftreiniger

Hersteller	Electrolux	Electrolux	Philips	Stadler Form
Modell	Pure A9 PA91-604GY	Well A7 WA71-305DG	AC4236/10	Roger big
EAN	7332543797295	7332543765492	8720389002045	7630850300505
Ansicht <sup>30</sup>				
Grösse in mm (L × B × H)	315 × 315 × 725	579 × 213 × 480	306 × 306 × 705	420 × 340 × 520
Gewicht	8.9 kg	6.2 kg	7.4 kg	10.5 kg
Maximale CADR	620 m <sup>3</sup> /h	285 m <sup>3</sup> /h	610 m <sup>3</sup> /h	736 m <sup>3</sup> /h
Maximale Lautstärke	49 dB(A) in 1 m	49 dB(A) in 1 m	60 dB(A) in 1 m	58 dB(A) in 1 m
Minimale Lautstärke	17 dB(A) in 1 m	23.3 dB(A) in 1 m	21 dB(A) in 1 m	25.7 dB(A) in 1 m
Anzahl Stufen	9 + «Automatik»	5 + «Automatik»	4 + «Automatik»	5 + «Automatik»
Staub- und Gas-sensoren zur Steuerung des «Automatik-Modus»	Ja	Ja	Ja	Ja
Integrierte Filterarten	HEPA, Aktivkohle, Vorfilter, antibakterielle Beschichtung, Ionisator	HEPA, Aktivkohle, Vorfilter, antibakterielle Beschichtung, Ionisator	HEPA, Aktivkohle, Vorfilter	HEPA, Aktivkohle, Vorfilter
Filterwechsel nach Betriebs-Modus	Alle 2 Jahre, 12 h Betrieb/Tag	Alle 2 Jahre, 12 h Betrieb/Tag	Alle 3 Jahre, 16 h Automatik/Tag	Alle 12 Monate, Nonstop-Betrieb
Steuerung am Gerät möglich	Ja	Ja	Ja	Ja
Timer-Funktion	Ja	Ja	Ja	Ja
App zur Kontrolle von Timer und Steuerung	Ja iOS und Android	Ja iOS und Android	Ja iOS und Android	Ja iOS und Android

<sup>30</sup> Reproduziert mit Erlaubnis des Herstellers. Das Copyright der Bilder verbleibt beim jeweiligen Hersteller.