

Abschlussbericht

Bestimmung der Aerosolausspülung durch natürliche Konvektion in Klassenzimmern der
Freien Waldorfschule Karlsruhe

Am 9.9.2021

Fertiggestellt am 21.9.2021

Inhalt

1. Einleitung und Zielsetzung	3
2. Geräte- und Versuchsbeschreibung	3
2.1 Testaerosol.....	3
2.2 Durchführung der Messungen und Auswertung	4
2.3 Versuchsergebnisse	5
3. Zusammenfassung.....	8
4. Literatur.....	8

1. Einleitung und Zielsetzung

Ziel der Messungen war es, die Wirksamkeit der Lüftung von Klassenzimmern durch geöffnete Fenster und Türen für die Reduktion luftgetragener Krankheitserreger zu prüfen. Dies wurde mithilfe von Messungen der zeitlichen Veränderung eines Aerosols bei Ausspülung und Verdünnung durch natürliche Konvektion erreicht.

Hierzu wird ein Testaerosol aus DEHS erzeugt, einer ölartigen Substanz, welche kugelförmige Tropfen bildet. Dieses Aerosol wird bei geschlossenen Fenstern und Türen an zentraler Stelle in den Raum entlassen, bis ein Wert von ca. 10.000 Partikeln /cm³ erreicht ist, um deutlich über dem Wert für die Hintergrundaerosolkonzentration zu liegen (einige hundert Partikeln /cm³). Auf diese Weise wird ein Aerosol modelliert, welches typischerweise von einer infizierten Person abgegeben wird. Die Größenverteilung entspricht dabei mit einer mittleren Partikelgröße von 300 nm einem typischen Tropfenspektrum in der ausgeatmeten Luft. Die Anzahlkonzentration liegt jedoch deutlich über derjenigen, die selbst eine hochgradig erkrankte Person exhaliert würde. Nach Erreichen der Zielkonzentration wird die Quelle abgeschaltet. Ein Ventilator im Raum sorgt für eine homogene Verteilung des Aerosols im Raum um einen gut definierten Anfangszustand zu erreichen. Nach Erreichen einer stabilen Aerosolkonzentration am zentral aufgestellten Sensor werden Tür und Fenster geöffnet und die Aerosolkonzentration in Form von Abklingkurven zeitlich aufgelöst gemessen. Ein Sensor war zentral im Raum aufgestellt, in Linie mit den geöffneten Fenstern und der Tür, ein weiterer in einer Ecke des Raums, welche einen schlechten Luftaustausch erwarten ließ. In diesem Bereich der Räume war für einige Messungen ein Ventilator aufgestellt, um den Effekt einer Durchmischung in schlecht durchströmten Bereichen der Räume untersuchen zu können.

2. Geräte- und Versuchsbeschreibung

Folgende Geräte kamen bei den Messungen zum Einsatz:

- Palas AGF 2.0iP Aerosolgenerator mit integrierter Pumpe für die Erzeugung des Testaerosols aus DEHS
- 2x Fidas Frog Aerosolspektrometer. Messbereich 0.18-20µm zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration und der örtlichen Aerosolkonzentrationen

2.1 Testaerosol

Das Testaerosol wurde mit dem Aerosolgenerator Palas AGF 2.0 iP aus Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat (DEHS) in Luft erzeugt. Der Volumenstrom des Aerosols liegt bei 9,5 l/min. Die Partikelgrößenverteilung ist sehr schmal, sie zeigt eine mittlere Größe der Tropfen von 280 nm bei einer Standardabweichung von 1,1 und ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Anzahlkonzentration liegt bei ca. $3,6 \times 10^5$ Partikeln/cm³, die Massenkonzentration der Partikel ergibt sich daraus mit ca. 10 mg/m³.

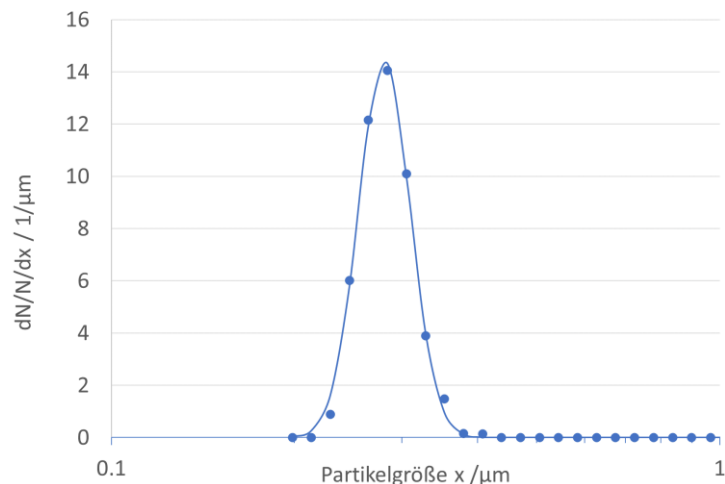


Abbildung 1: Partikelgrößenverteilung DEHS Aerosol aus Palas AGF 2.0iP Generator gemessen mit Palas Promo 2000 mit Sensor Welas 2070

2.2 Durchführung der Messungen und Auswertung

Die Methodik der Messungen ist prinzipiell schon in der Einleitung beschrieben worden und wurde darüber hinaus veröffentlicht [1;2]. Hier wird daher nur noch auf die konkrete Durchführung der Versuche eingegangen. Zu Versuchsbeginn wurde bei noch ausgeschalteter Quelle ein Hintergrundwert für die Aerosolkonzentration aufgenommen. Bei der Messung der Hintergrundkonzentration wurde mit beiden Geräten unmittelbar nebeneinander parallel gemessen, um Abweichungen zwischen ihnen erkennen zu können. Wie schon eingangs erwähnt wurde zwei identische Messgeräte an der Erwartung nach unterschiedlich gut durchströmten Bereichen platziert. Ein Ventilator sorgte für die Gleichverteilung des Aerosols vor Öffnung der Fenster und Türen und konnte darüber hinaus zur Untersuchung eines Effekts verbesserter Durchmischung in schlecht durchströmten Bereichen genutzt werden. Die gemessenen Konzentrationen wurden durch Division mit der Anfangskonzentration in relative Größen umgerechnet.

Die Windstärke am Tag der Messung lag bei ca. 1 Bft, die Lufttemperatur lag bei etwas über 20°C so dass zwischen den Temperaturen in den Klassenzimmern und außen kaum ein Unterschied bestand.

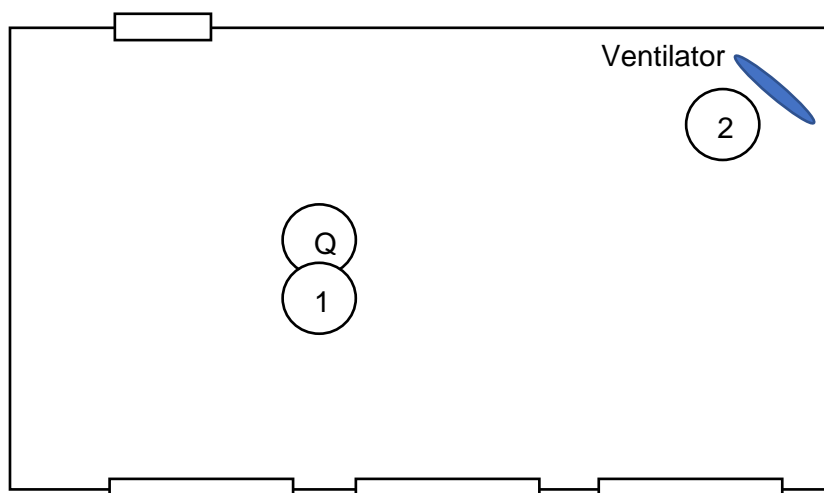


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung in einem typischen Klassenzimmer. Q: Position Quelle, 1: Position Messgerät 1; 2: Position Messgerät 2.

2.3 Versuchsergebnisse

Im Klassenraum der 13A wurde zusätzlich zur Messung im leeren Zimmer eine Vergleichsmessung mit ca. 16 SchülerInnen mit Lehrer in einer Unterrichtssituation durchgeführt (s. Abbildung 3). Hintergrund hierfür ist die Sicherstellung der Aussagekraft der Messungen in leeren Räumen für den realen Schulalltag. In beiden Fällen fielen die Aerosolkonzentrationen exponentiell, in Anwesenheit der SchülerInnen etwas schneller. Dies kann mit einer verbesserten Durchmischung der Raumluft durch thermische Effekte zusammenhängen. Aufgrund der geringen Windgeschwindigkeit und der starken Verwirbelung um das Gebäude herum kam es zu keiner eindeutig ausgebildeten gerichteten Luftströmung. Es kam daher zu wechselndem Ein- und Ausströmen von Luft durch Tür und Fenster. Eine maximale Strömungsgeschwindigkeit von 0,3 m/s konnte an der Tür gemessen werden, woraus sich ein Volumenstrom von ca. 0,4 m³/s abschätzen lässt. Diese Werte wurden in etwa für alle weiteren Messungen gefunden, wobei durch die Umkehr der Strömungsrichtung eine Luftwechselrate der Räume auf Basis dieser Werte nicht angegeben werden kann.

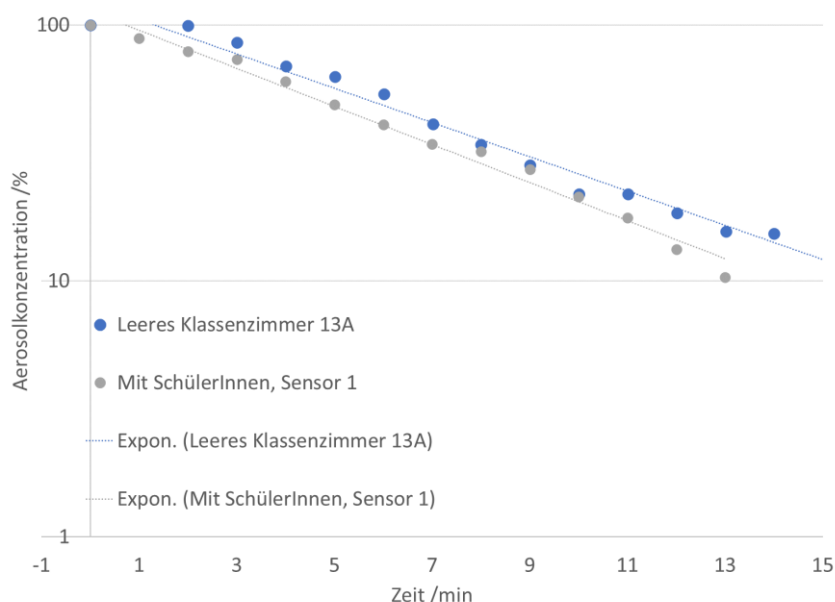


Abbildung 3: Messungen in Klasse 13A mit und ohne Anwesenheit von SchülerInnen

Im Klassenraum der 5A wurde der Effekt der geöffneten bzw. geschlossenen Tür bei gleichzeitig geöffneten Fenstern betrachtet. Abbildung 4 zeigt die beiden gemessenen Zeitverläufe, die sich entgegen der Erwartung nur leicht unterscheiden. Dieses Ergebnis wäre sicher bei stärkerem Wind und gerichtetem Durchzug deutlich anders ausgefallen. Immerhin ergibt sich ein Unterschied von ca. 40% für Zeiten größer als 7 min, für kürzere Zeiten ist das Ergebnis nicht eindeutig.

Im Handarbeitsraum III und im Klassenraum der 7B wurde untersucht inwieweit eine zusätzliche Durchmischung des schlecht belüfteten Bereichs mithilfe eines Ventilators zu einer Verbesserung der Lüftungseigenschaften der Räume beiträgt. Abbildung 5 zeigt die Konzentrationsverläufe für den schlecht belüfteten Bereich der Räume (Sensor 2 in Abbildung 2) einmal mit und einmal ohne eingeschalteten Ventilator in diesem Teil des Raums. Der Unterschied ist sehr deutlich erkennbar, die Zeit zur Unterschreitung der 10% Linie ist nahezu verdoppelt. Dem hingegen zeigt Abbildung 6, dass der gut belüftete Bereich (Sensor 1) sich bei eingeschaltetem Ventilator kaum vom schlecht belüfteten Bereich (Sensor 2) unterscheidet.

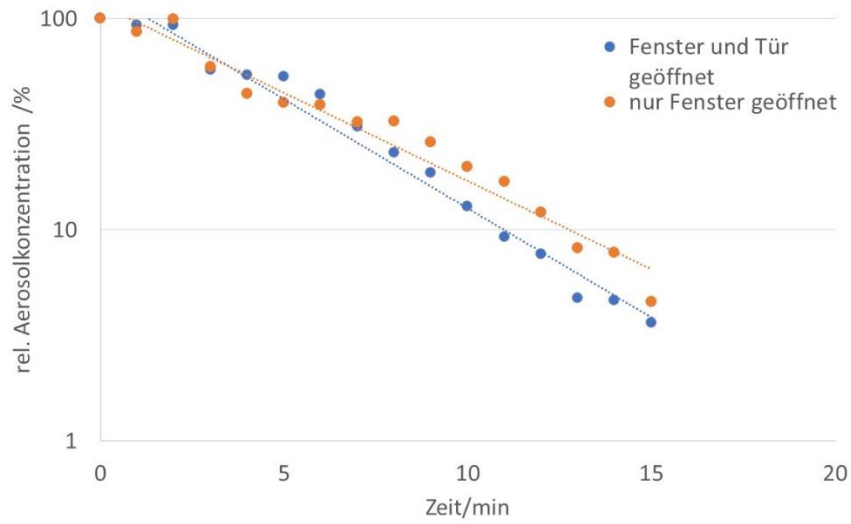


Abbildung 4: Messungen in Klasse 5A: Effekt der geöffneten Tür

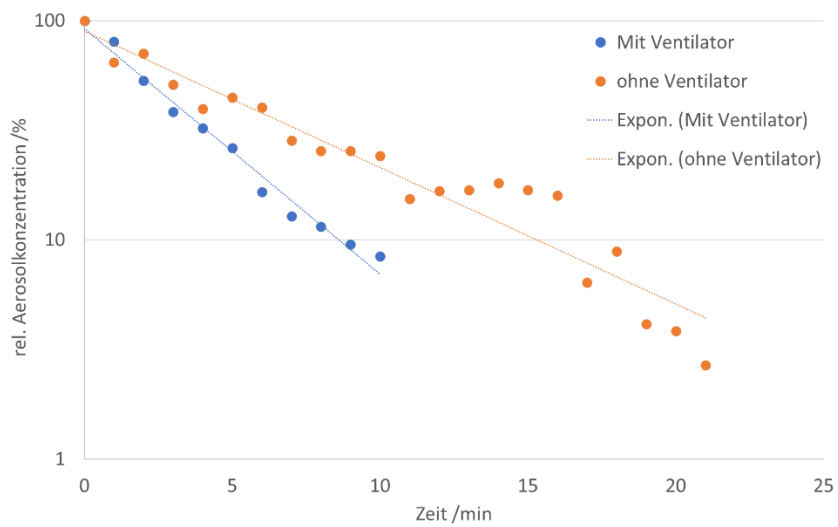


Abbildung 5: Verlauf der Aerosolkonzentration bei Lüftung in schlecht durchströmtem Bereich: Effekt einer zusätzlichen Durchmischung (Handarbeitsraum III)

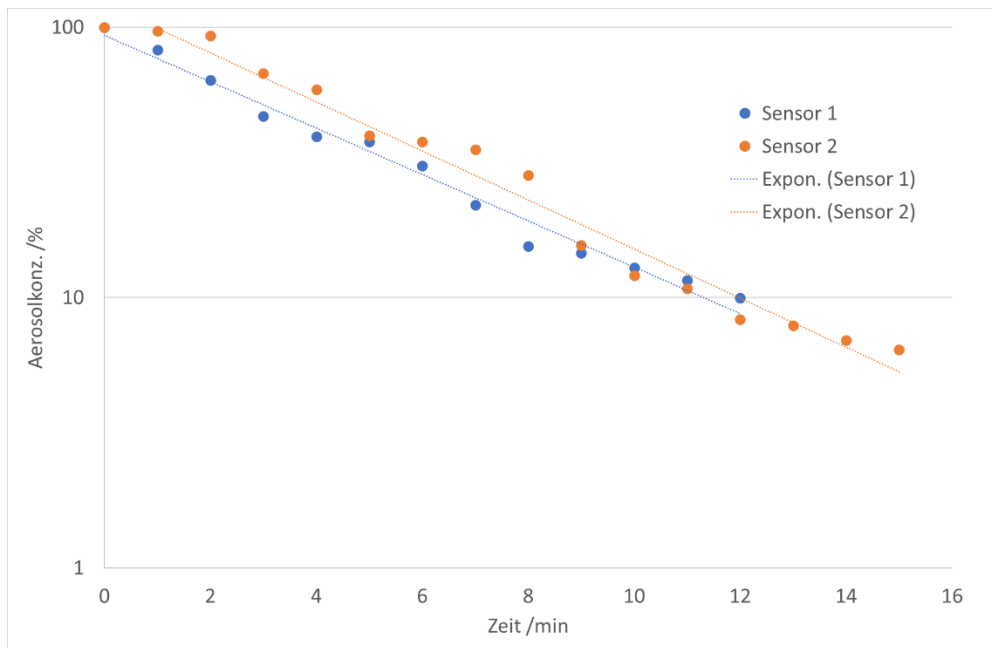


Abbildung 6: Verlauf der Aerosolkonzentration in gut- und schlecht belüfteten Bereichen mit zusätzlicher Vermischung (Klasse 7B)

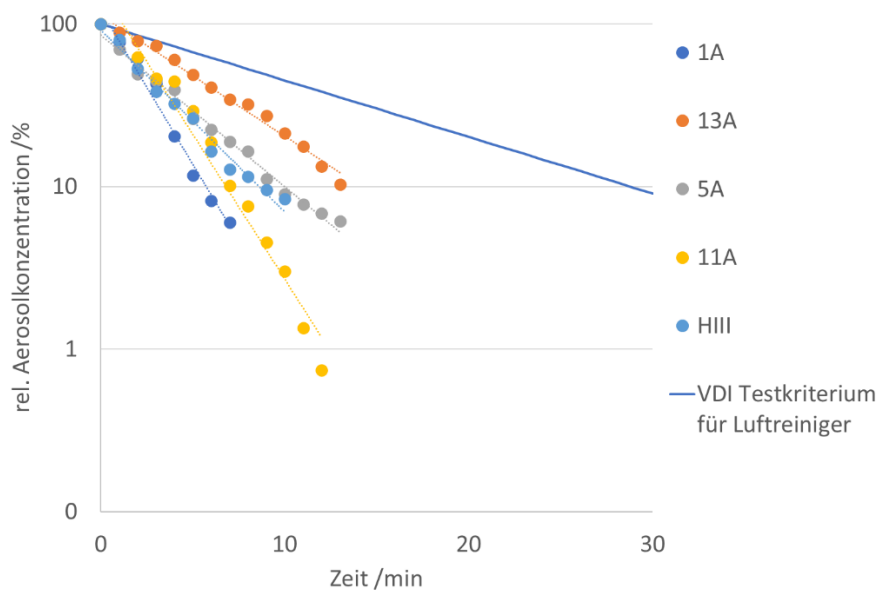


Abbildung 7 zeigt zusammenfassend alle im gut belüfteten Bereich der Räume gemessenen Abklingkurven. Zusätzlich ist das von der VDI Arbeitsgruppe „Prüfkriterien für mobile Luftreiniger“ erarbeitete Kriterium dargestellt, nach dem ein Luftreiniger besser als 90% Reduktion einer anfänglich vorhandenen Aerosolanzahlkonzentration in einem Zeitraum von 30 min schaffen soll [3]. In der Zusammenschau ist zu erkennen, dass es deutliche Unterschiede gibt zwischen den einzelnen Klassenräumen, welche mit der Lage der Räume zusammenhängen. In allen Fällen ist die natürliche Lüftung jedoch deutlich besser als das Luftreiniger Kriterium. Bei stärkerem Wind und größeren Unterschieden zwischen Innen- und Außentemperatur kann ein noch deutlich stärkerer Effekt der natürlichen Lüftung auf das Abklingverhalten der Aerosolkonzentration erwartet werden.

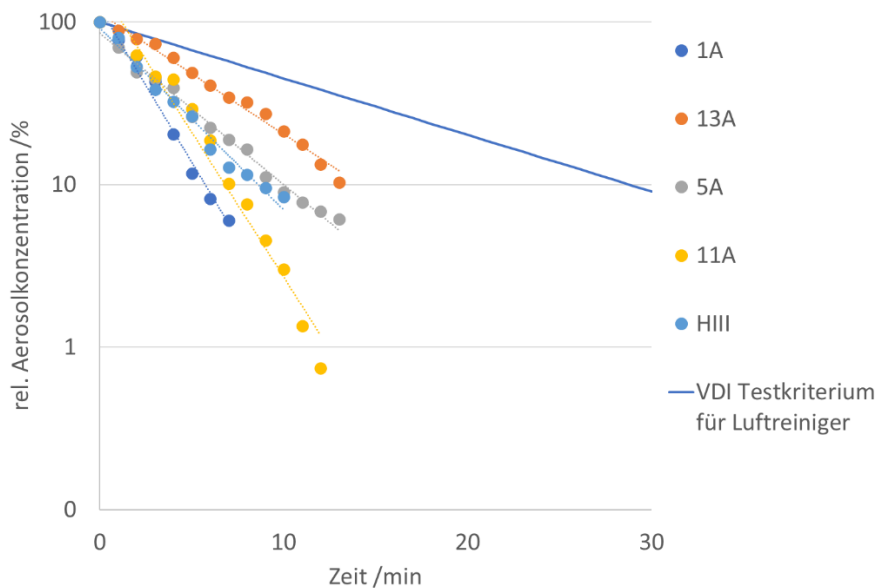


Abbildung 7: Alle mit Sensor 1 gemessenen Daten zusammengefasst, zum Vergleich ist das VDI Kriterium für Luftreiniger aufgetragen

3. Zusammenfassung

Für das Abklingverhalten der Aerosolkonzentration in Klassenräumen wurden folgende Punkte festgestellt:

- Bei den am Messtag vorherrschenden Schwachwindbedingungen war nur ein relativ geringer Einfluss der Türöffnung beim Lüften erkennbar
- Der Einsatz eines Ventilators während des Lüftens verbessert deutlich das Abklingverhalten in schlecht durchströmten Bereichen der Räume
- Bis auf einen Raum ist eine Lüftungsdauer von 10 min ausreichend zur Unterschreitung der 10% Marke
- Nach 5 min ist im Mittel eine Reduktion der Anfangskonzentration auf ca. 25% erreicht.
- In allen Fällen ist der beobachtete Abfall der Aerosolkonzentration deutlich besser als im VDI Kriterium zur Wirksamkeitsüberprüfung von mobilen Luftreinigern vorgeschlagen
- Anwesenheit von SchülerInnen hat keinen oder schwach positiven Einfluss, wodurch die Aussagekraft der Messungen in leeren Räumen bestätigt wurde

4. Literatur

- [1] Schade, W., Reimer, V. Seipenbusch, M., Willer, U. Experimental Investigation of Aerosol and CO₂ Dispersion for Evaluation of COVID-19 Infection Risk in a Concert Hall. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 3037
- [2] Schade, W., Reimer, V. Seipenbusch, M., Willer, U., Hübner, E.G. Viral aerosol transmission of SARS-CoV-2 from simulated human emission in a concert hall. Int. J. Infectious Diseases 2021, 107, 12-14
- [3] Prüfkriterien für mobile Luftreiniger. VDI EE 4300 Blatt 14, Beschlussfassung vom 20.7.2021