

Institut für Sensorik und Elektronik
Gruppe Partikelmesstechnik
Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW)
Klosterzelgstrasse 2
CH-5210 Windisch
<http://www.fhnw.ch/engineering/ise>

Messbericht Nr. 20210710

Messauftrag: Messung der Filtrationsleistung von DIY-Luftreinigern (CADR-Werte) für Aerosolpartikel mit Durchmessern kleiner 1 Mikrometer

Auftraggeber Verein „make.human.technology“
Tösstalstrasse 371
8482 Sennhof

Ansprechpartner: Markus Leutwyler

Messung
Messobjekte: Zwei Selbstbau-Luftreiniger für Schulen

Messbericht
Anzahl Seiten Bericht: 14

Gültigkeit: Die Messergebnisse haben nur Gültigkeit für die geprüften Messobjekte

Messlabor
Institut: Institut für Sensorik und Elektronik, Gruppe Partikelmesstechnik
Hochschule für Technik
Fachhochschule Nordwestschweiz
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch

Ansprechpartner: Prof. Dr. Ernest Weingartner
ernest.weingartner@fhnw.ch, 056 202 79 18
Tobias Rüggeberg
tobias.rueggeberg@fhnw.ch, 056 202 70 45
Manuela Wipf
manuela.wipf@fhnw.ch, 056 202 87 84

Inhalt

1. SARS-CoV-2 und feine Aerosole	2
2. Experimenteller Aufbau	3
2.1 Untersuchte Luftreiniger	3
2.2 Repräsentatives Schulzimmer.....	5
2.3 Aerosol-Partikelerzeugung und Messung der Konzentration und Größenverteilung	6
2.4 Clean Air Delivery Rate (CADR)	8
2.5 Empfohlene Luftaustauschrate ACH	9
3. Messergebnisse	10
3.1 Messungen mit NaCl-Partikeln.....	10
4. Zusammenfassende Beurteilung der beiden Luftreiniger	13
5. Verwendung des Berichts	14
6. Referenzen.....	14
7. Weiterführende Links	14

1. SARS-CoV-2 und feine Aerosole

Das «severe acute respiratory syndrome coronavirus type 2» (SARS-CoV-2) ist ein neuartiges sogenanntes Beta-Coronavirus, welches zu Beginn des Jahres 2020 als Haupterreger für die COVID-19-Pandemie erkannt wurde. SARS-CoV-2 wird über Tröpfchen und feine Aerosole übertragen wie viele andere Viren, welche respiratorische Syndrome hervorrufen. Beim Sprechen, Husten, Niesen, aber auch beim Atmen emittiert ein Mensch kleinste Partikel, sogenannte Aerosole.

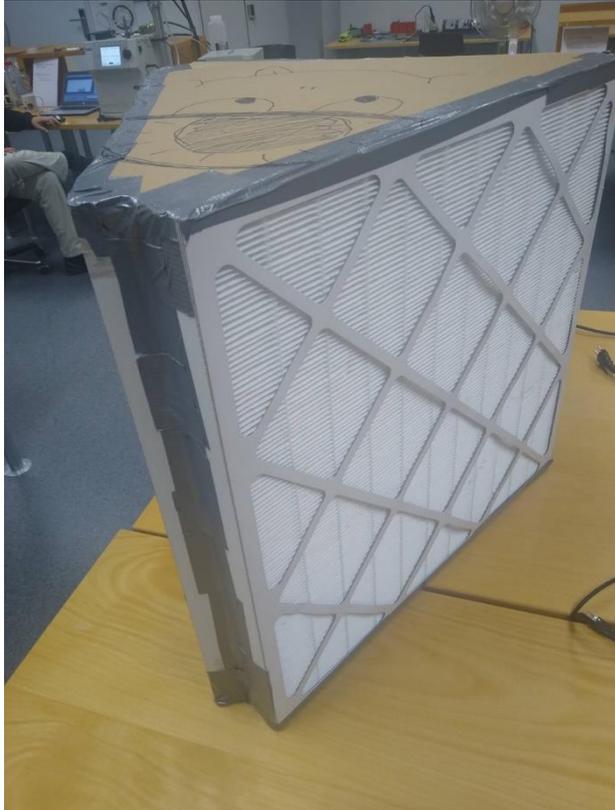
- Beim Sprechen liegt die Partikelemission je nach Aussprache ca. bei 1 bis 50 Partikeln pro Sekunde ($0.06-3$ Partikel pro cm^3), die Partikel-Grösse bewegt sich zwischen 0.3 und mehreren Mikrometern (z.B. Lindsley et al, 2012; Asadi et al., 2019; Dhand & Li, 2020).
- Beim Husten oder Niesen werden hingegen weitaus mehr Partikel emittiert (180 bis 2'400 Partikel pro cm^3), wobei deren Größenverteilung etwas breiter gestreut ist als beim Sprechen.
- Eine mit SARS-CoV-2 infizierte Person emittiert ein Gemisch aus Aerosolen, welches eine unterschiedlich hohe Virenkonzentration beinhalten kann.

Bei den durchgeführten Experimenten liegt das Augenmerk auf den feinen Aerosolpartikeln mit Durchmessern kleiner 1 Mikrometer, weil diese in schlecht belüfteten Räumen lange in der Luft schweben und eine wesentliche Rolle bei der Übertragung von SARS-CoV-2 spielen, siehe z.B. <https://www.info.gaef.de/positionspapier>.

2. Experimenteller Aufbau

2.1 Untersuchte Luftreiniger

Bei den untersuchten DIY-Luftreinigern handelt es sich um Prototypen. Sie bestehen aus zwei V-förmig angeordneten Kombi-Filterplatten und einem Ventilator. Bei beiden Prototypen handelt es sich bei den Filterplatten um plissierte Paneelfilter mit Kunststoffrahmen der Firma Camfil AG (3GPA 592x592x48-F7-0, Ecopleat F7, ISO-Rating ISO16890: ePM1 50%)¹.



Figur 1: Seitenansicht auf die V-förmig angeordneten Filterpaneele

Die beiden Prototypen unterscheiden sich im verwendeten Ventilator, der die zu säubernde Raumluft durch die beiden Filterpaneele befördert. Die gefilterte Luft strömt an den zwei Ausenseiten der Filter zurück in den Raum.

Der kleinere Luftreiniger verwendet einen 60W-Ventilator (Pearl NX6414)². Dieser Ventilator wurde in den Tests auf der höchsten Leistungsstufe betrieben (3 von 3).

Beim grösseren Luftreiniger wird ein leistungsstarker Caterpillar-Ventilator (CAT HVD24AC)³ verwendet. Dieser Ventilator wurde auf der niedrigsten Leistungsstufe (1 von 4) betrieben (120 W).

¹ https://www.camfil.com/de-ch/produkte/allgemeine-luftfilter/panel--und-metallfilter/ecopleat/ecopleat-g-_-5867

² <https://www.pearl.ch/de/extrastarker-bodenventilator-3-geschwindigkeitsstufen-60-w-oe-48-cm.html>

³ <https://www.doitgarden.ch/de/p/614272800000/cat-hvd24ac-75>



Figur 2: Die untersuchten Raumreiniger. Links: Variante mit kleinerem Ventilator; rechts Variante mit leistungsstärkerem Gebläse

Durch die Anordnung von zwei solchen Kombifiltern ist zu erwarten, dass der durch die Filter verursachte Druckwiderstand bei der geforderten Gesamtdurchflussmenge von mehreren hundert m^3/h vergleichsweise gering ist. Dies ist wichtig, da die eingesetzten Ventilatoren nur bei geringen Druckwiderständen den geforderten hohen Luftdurchsatz (m^3/h) aufrechterhalten können.

Gleichzeitig ist die Strömungsgeschwindigkeit (m/s) durch die grössere Filterfläche vergleichsweise gering, was zu einer verbesserten Abscheidung von feinen Aerosolpartikeln ($D < \sim 400 \text{ nm}$) führt. Der gewünschte Effekt beruht darauf, dass die niedrige Strömungsgeschwindigkeit die Verweilzeit der Partikel im Filter erhöht. Da sich die feinen Partikel durch Diffusionsprozesse auf den Filterfasern ablagern, kann dies die Filterabscheideeffizienz für diese feinen Partikel günstig beeinflussen.

Dieses V-förmige Setup lehnt sich an eine DIY-Lösung an, welche würfelförmig angeordnete Filterpaneele verwendet. Richard Corsi und Jim Rosenthal haben in den USA die Corsi/Rosenthal Box⁴ entwickelt und einen wirksamen und kostengünstigen Luftreiniger entwickelt. Dieser wurde bereits in Schulen, Kirchen, Wohnungen und Bürogebäuden eingesetzt, um Partikel wie SARS-Cov-2 und Rauch von Waldbränden zu entfernen.

⁴ <https://www.texairfilters.com/iaq-research-practice-in-action-the-corsi-rosenthal-box-air-cleaner/>

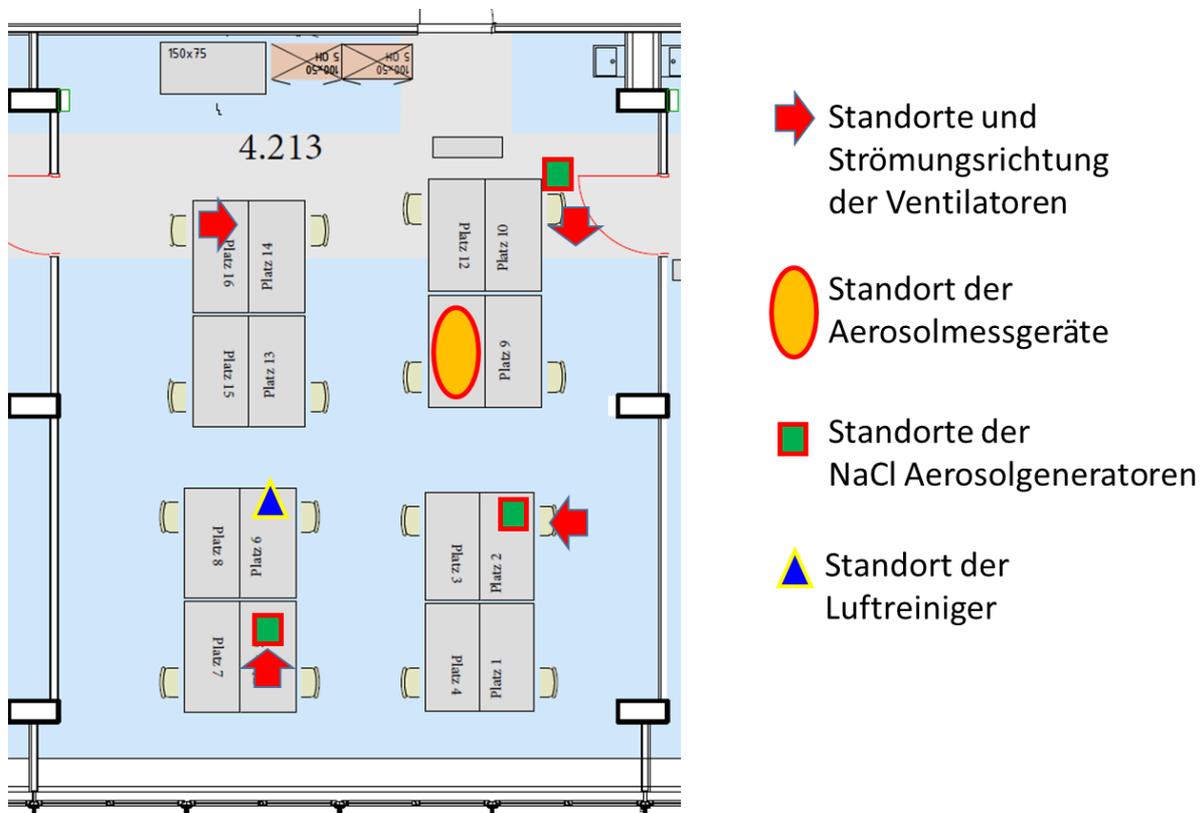
2.2 Repräsentatives Schulzimmer

Um die Filtrationsleistung der Luftreiniger zu messen, wurde an der FHNW in Windisch ein 80 m² grosses Zimmer (Raumhöhe 2.95 m) verwendet. Es handelt sich um ein Schulzimmer, das mit Tischen und Stühlen ausgestattet ist. Dieses hat keine Gebäudelüftung und die Fenster und Türen waren während der Experimente geschlossen, sodass die Situation eines nicht belüfteten Zimmers nachgebildet wurde.



Figur 3: Fotos des Schulzimmers inklusive Messausrüstung für die Experimente

Damit die Luft im Zimmer gut durchmischt wird, wurden zusätzlich ständig vier Ventilatoren betrieben, die so aufgestellt waren, dass die Luft turbulent in einer Kreisströmung vorherrschte. Diese Strömung sorgte dafür, dass sich kurzzeitig und lokal freigesetzte Aerosolpartikel (z.B. Russ aus einem kleinen Papierfeuer oder NaCl-Kristalle aus einem Versprüher mit Salzlösung) innerhalb weniger Minuten homogen im Raum verteilen.



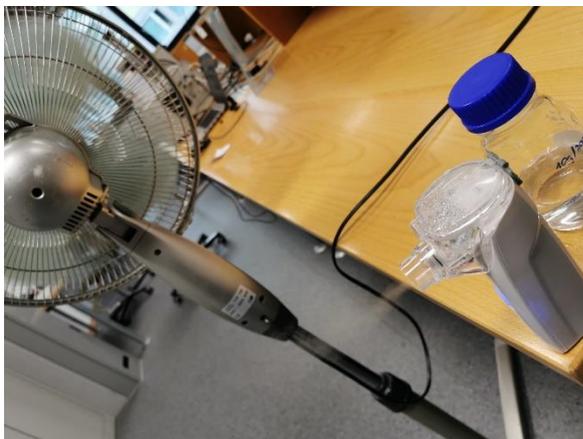
Figur 4: Grundriss des Raumes mit der Position der vier Ventilatoren sowie der Position des untersuchten Luftreinigers und der Aerosolmessgeräte

2.3 Aerosol-Partikelerzeugung und Messung der Konzentration und Grössenverteilung

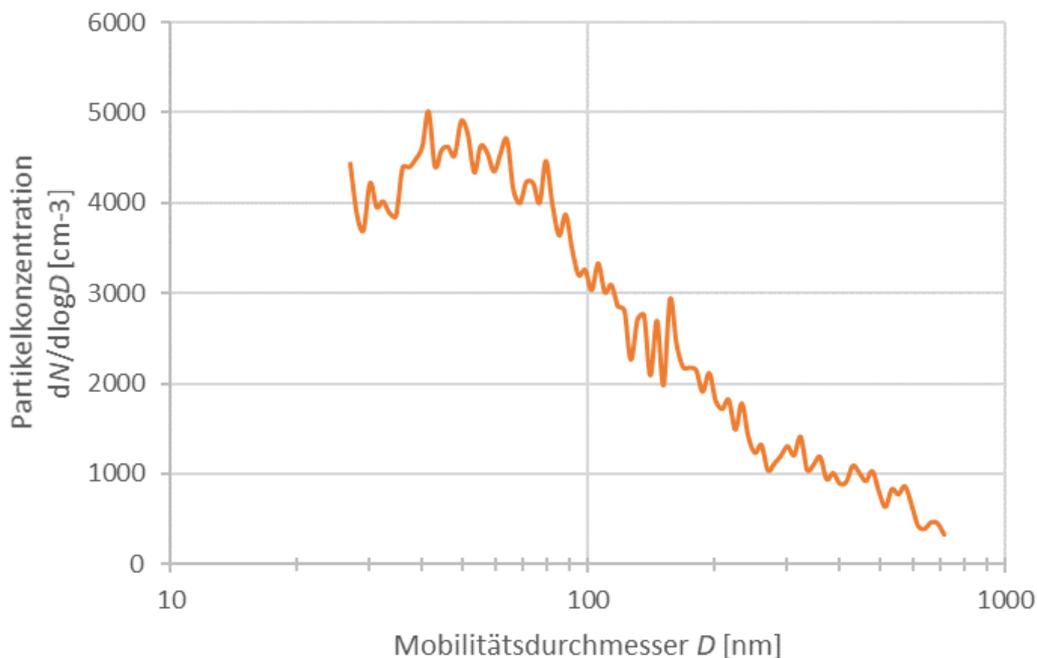
Mit dem nachfolgend erklärten Setup wurden unter kontrollierten und reproduzierbaren Bedingungen Aerosol-Experimente durchgeführt, um die Filtrationswirkung von Luftreinigern zu beurteilen.

In einem ersten Schritt wurde eine definierte Konzentration von feinen Aerosolpartikeln freigesetzt. Dazu wurden Salzpartikel (NaCl) verwendet, die durch Versprühen einer wässrigen Salzlösung (5 g/l) erzeugt wurden. Ein Ultraschallvernebler generierte mikrometergrosse Tröpfchen, welche in der trockenen Raumluft innerhalb weniger Sekunden abtrocknen. Es bleibt ein solides, trockenes Salzpartikel übrig. Dieses Salzaerosol weist eine breite Grössenverteilung im Bereich zwischen 20 und 1'000 nm auf (siehe Figur 6).

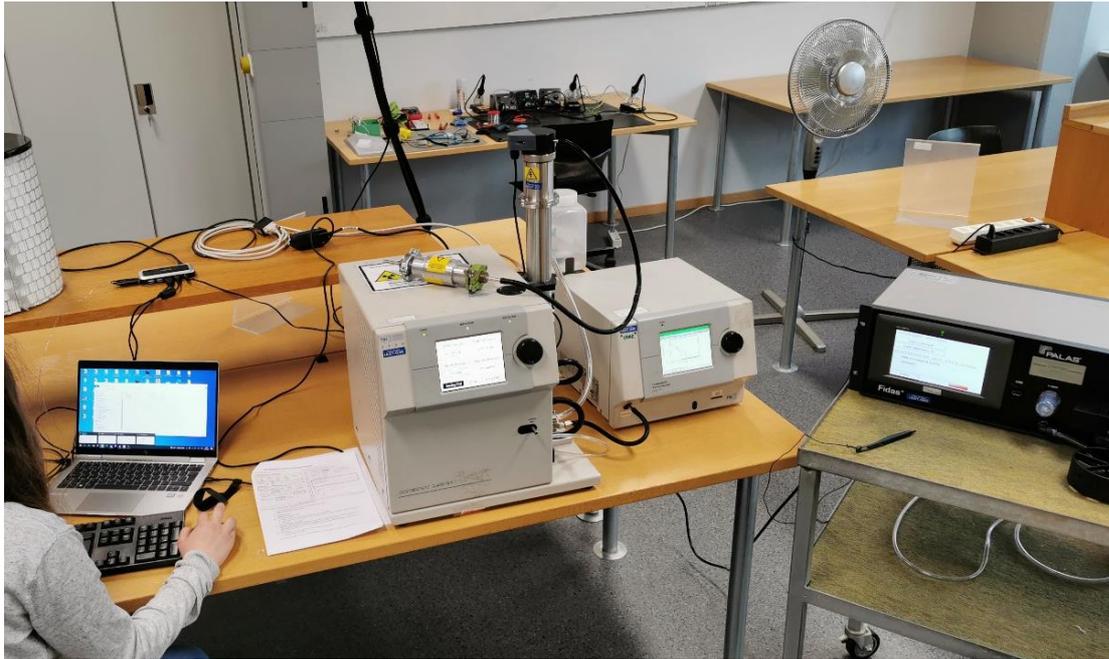
Alternativ wurden auch Experimente mit Verbrennungspartikeln (z.B. aus einem kleinen Papierfeuer) durchgeführt, diese Partikel sind flüchtiger und organischer Natur; die Partikeldurchmesser liegen hier i.d.R. unterhalb von 100 nm.



Figur 5: Freisetzen von feinen NaCl-Partikeln mittels eines Ultraschallverneblers



Figur 6: Typische Grössenverteilung der vom Vernebler produzierten trockenen NaCl-Partikel



Figur 7: Messung der Partikelgrößenverteilung 20 – 800 nm mithilfe eines SMPS

Nach der Freisetzung der Partikel erfolgt eine 15-minütige Stabilisierungs- und Homogenisierungsphase. Dann wurde über mehrere Stunden die zeitliche Veränderung dieses Aerosols verfolgt mithilfe von zwei Scanning Mobility Particle Sizers (SMPS), bestehend aus Neutralisator, differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA TSI 3081) und Kondensationskernzähler (CPC TSI 3775). Das SMPS erfasst die Partikelanzahlkonzentration und Grössenverteilung im Durchmesserbereich von 20 bis 800 Nanometern mit einer Zeitauflösung von 4 Minuten. Das Messprinzip basiert auf der Messung der elektrischen Mobilität eines geladenen Teilchens in einem elektrischen Feld. Die in das Gerät eingebrachten Partikel werden mit einer radioaktiven Quelle neutralisiert, sodass sie eine Gleichgewichtsladungsverteilung aufweisen. Anschliessend gelangen sie in einen differentiellen Mobilitätsanalysator (DMA), in dem die Aerosolpartikel nach ihrer elektrischen Mobilität klassifiziert werden, wobei pro Messscan nur Teilchen mit einem bestimmten Mobilitätsbereich durch den Ausgangspalt austreten. Diese monodisperse Verteilung gelangt dann in einen Kondensationskernzähler (CPC), der die Partikelkonzentration bzgl. dieser Grösse bestimmt. Der DMA besteht aus einem Zylinder mit einem negativ geladenen Stab in der Mitte; der Hauptstrom durch den DMA ist partikelfreie Luft, die an der Innenwand des DMA-Rohrs entlangströmt (Mantelluft). Es ist wichtig, dass diese Strömung laminar ist. Der Partikelstrom wird an der Aussenkante des DMAs eingespritzt, positiv geladene Partikel bewegen sich durch den Mantelstrom in Richtung des zentralen Stabes, und zwar mit einer Geschwindigkeit, die durch ihre elektrische Mobilität bestimmt wird. Teilchen mit einer bestimmten Mobilität treten durch den Probenschlitz am oberen Ende des DMA aus, während alle anderen Teilchen mit dem Abgasstrom abgeführt werden. Welche Partikel durch den Schlitz austreten, wird durch die Grösse der Partikel, die Ladung, die Spannung des zentralen Stabes und die Strömung im DMA bestimmt. Durch exponentielles Durchfahren der Spannung am zentralen Stab wird eine vollständige Partikelgrössenverteilung gemessen. Eine detailliertere Beschreibung des SMPS findet man z.B. auf der TSI-Webseite (<https://tsi.com/products/particle-sizers/particle-size-spectrometers/>).

Das SMPS wurde so betrieben, dass es die Anzahlgrössenverteilung im Durchmesserbereich 30 bis 800 nm misst. Die gemessenen Partikelkonzentrationen liegen mit einer hohen Durchmesserauflösung vor und werden im Folgenden für folgende Partikelgrössenbereiche durch Mittelwertbildung zusammengefasst: 30-50 nm, 50-100 nm, 100-200 nm, 200-400 nm und 400-800 nm. Zusätzlich wird in den Zeitverläufen der Konzentrationen auch die Gesamtkonzentration im Bereich 30-800 nm angegeben.

Die CADR-Werte der Luftreiniger werden auch für diese Grössenbereiche berechnet und für den entsprechenden Bereich beim mittleren Partikeldurchmesser angegeben, d.h. bei $D = 40$ nm, 75 nm, 150 nm, 300 nm und 600 nm.

2.4 Clean Air Delivery Rate (CADR)

Zur Quantifizierung der Reinigungswirkung von Luftreinigern wird die Clean Air Delivery Rate (CADR) als Mass verwendet (z. B. Nelson et al., 1993). Sie beschreibt die Durchflussrate der sauberen Luft, die der Luftreiniger in den Raum abgibt. Die CADR entspricht somit idealerweise dem Produkt der Filtrationseffizienz EF des Filters und dem Volumenstrom Q_V , der durch das Gerät gezogen wird:

$$CADR = EF \cdot Q_V \quad (1)$$

Die Filtrationseffizienz ist allerdings stark von der Partikelgrösse abhängig, somit muss auch der CADR-Wert in Abhängigkeit der Partikelgrösse angegeben werden.

Da die Durchflussmenge eines Raumluftreinigers (Q_V) normalerweise nicht so einfach messbar ist, wird hier ein anderer Ansatz gewählt, um den CADR-Wert zu bestimmen (Küpper et al., 2019). Für das Klassenzimmer wurden die Abklingraten k der Partikelkonzentration N in der jeweiligen definierten Grössenklasse bestimmt.

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (2)$$

Da die im Raum vorhandenen Oberflächen (Wände, Möbel) auch Senken für Aerosolpartikel sind, werden Messungen mit ausgeschaltetem Luftreiniger (k_{Raum}) und mit eingeschaltetem Luftreiniger ($k_{LR+Raum}$) durchgeführt.

Mit Hilfe des Raumvolumens (V_{Raum}) lässt sich der CADR-Wert des Reinigers bestimmen:

$$\begin{aligned} CADR_{LR} &= CADR_{LR+Raum} - CADR_{Raum} \\ &= V_{Raum} \cdot k_{LR+Raum} - V_{Raum} \cdot k_{Raum} \end{aligned} \quad (3)$$

Durch Analyse der exponentiellen Abfälle der grössenabhängigen Aerosolkonzentrationen lässt sich damit auf den CADR-Wert des Luftreinigers schliessen. Es wurde darauf geachtet, dass bei den Experimenten die Partikelkonzentrationen nicht zu hoch sind, um Verfälschungen durch Koagulation zu vermeiden. Koagulationseffekte sind in den Messdaten dadurch erkennbar, dass die Abklingkurven nicht exponentieller Natur sind.

2.5 Empfohlene Luftaustauschrate ACH

Aus den CADR-Werten kann mit Hilfe der Raumgrösse die Luftaustauschrate ACH (Air Changes per Hour) berechnet werden:

$$ACH = \frac{CADR}{V_{Raum}} \quad (4)$$

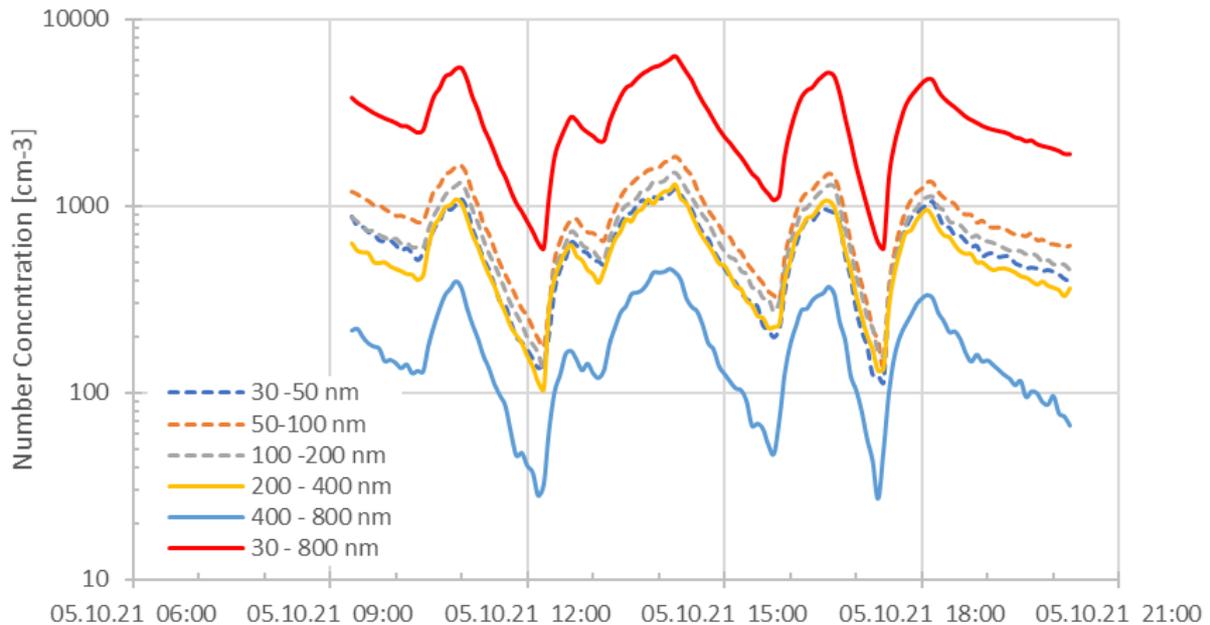
Angesichts der Covid-Pandemie wird für Schul- oder Universitätsräume empfohlen, das gesamte Raumvolumen zwei bis sechs Mal pro Stunde mit sauberer Luft auszutauschen (z.B. DIN 16798). Gemäss Allen und Ibrahim (2021) empfiehlt die ASHRAE, eine der massgeblichen Normungsorganisationen für Belüftungsraten, eine Luftaustauschrate von mindestens 0.35 h^{-1} . Schulen sollten etwa für zehnmal höhere Werte ausgelegt sein ($ACH > 3.5 \text{ h}^{-1}$), jedoch erreichen die meisten Schulen diesen Wert in der Praxis nicht. Eine Zielvorgabe von 4 bis 6 ACH-Werten wird in Krankenhäusern vorgegeben. Diese hohen ACH-Anforderungen zeigen, dass hohe Luftwechselraten als Strategie zur Infektionskontrolle eine grosse Rolle spielen.

Eine alternative Empfehlung beruht auf der Angabe des Luftvolumens an gesäuberter Luft, welche pro Person zugeführt werden soll. Laut DIN 13779/12831 wird z.B. für eine «mittlere Raumluftqualität» ein Volumenaustausch von 36 bis 54 m^3 pro Stunde und Person empfohlen.

3. Messergebnisse

3.1 Messungen mit NaCl-Partikeln

Wir haben uns für die Verwendung von NaCl-Partikel entschieden, weil sie sich dadurch auszeichnen, dass nicht flüchtig sind, eine breitere Verteilung aufweisen und damit eine Beurteilung der Filtrationsleistung für Partikel > 50 nm ermöglichen. Figur 8 zeigt den zeitlichen Verlauf der Konzentrationen in verschiedenen Grössenklassen. Bei dem gezeigten Experiment wurde im Messzimmer mehrfach NaCl-Partikel freigesetzt und diverse Raureiniger sequenziell betrieben.



Figur 8: Zeitliche Entwicklung der vom SMPS gemessenen Anzahlkonzentrationen in verschiedenen Grössenklassen. Die 5-mal wurde der Raum mit NaCl Partikeln gefüllt. Dies äussert sich in den erkennbaren Anstiegen in den gemessenen Partikelkonzentrationen. Von 9:03 bis 10:56 wird die «natürliche» Zerfallsrate des Aerosols ohne eingeschaltetem Luftreiniger gemessen. Eine weitere solche «Hintergrunds-Messung» findet am Ende statt, von 18:10 bis 20:10.

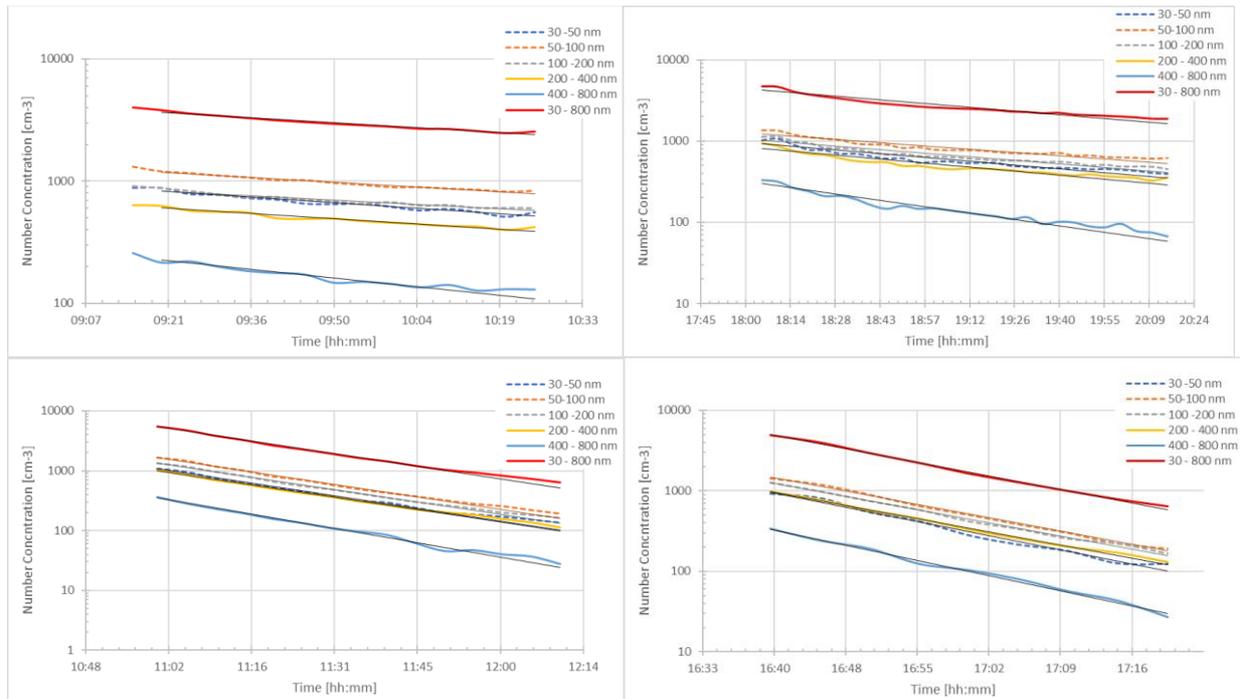
Der Raumreiniger mit dem Pearl Ventilator ist von 11:05 bis 12:14 eingeschaltet (Stufe 3) Der Prototyp mit stärkerem Ventilator (CAT, Stufe 1) ist von 14:30 bis 15:50 in Betrieb.

Schön ersichtlich ist, dass die Konzentrationsverläufe nach dem Befüllen des Raumes einem exponentiellen Abfall folgen – die Konzentrationsverläufe folgen geraden Linien in der logarithmischen Abbildung. Um 11:05 und um 14:30 wurden die beiden Luftreiniger jeweils einzeln in Betrieb genommen (um 12:45 und 14:30 wurden andere Luftreiniger beurteilt).

Die Abnahmen in der Konzentration am Anfang und am Ende sind auf die Messung der «natürlichen» Partikelverluste im Raum zurückzuführen. Für die ultrafeinen Partikel ($D < 100$ nm) sind dies vor allem diffusionsbedingte Abscheidungen an sämtlichen im Raum vorhandenen Oberflächen (Wände, Tische, etc.). Je grösser die Partikel, desto stärker nehmen durch Sedimentation bedingte Abscheidungen zu. Auch ist zu erwarten, dass die grösseren Partikel an den Propellerblättern der zusätzlich betriebenen Ventilatoren impaktierten.

Klar ersichtlich ist, dass nach dem Einschalten des Luftreinigers die Konzentrationsverläufe aufgrund der zusätzlichen Reinigungswirkung schneller abnehmen.

Im Folgenden wurden für ausgewählte Zeitperioden die grössenabhängigen Abklingkurven gemäss Formel 2 und 3 parametrisiert, die Abklingraten bestimmt und die CADR-Werte berechnet. Figur 9 zeigt für die vier Messphasen die an die Messdaten angefütteten exponentiellen Abklingkurven (schwarze feine Linien), die es erlauben die grössenabhängigen Abklingraten k_{Raum} und $k_{LR+Raum}$ zu bestimmen. In anderen Worten: Die feinen Linien stellen das in 2.4 beschriebene Model dar und wurden durch eine Regressionsanalyse an die Messdaten angeglichen um die k -Werte zu bestimmen.



Figur 9: Ausgewählte Konzentrationsverläufe mit angefütteten Zerfallskurven (feine schwarze Linien).

Oben: Messungen des Hintergrunds am Anfang und Ende der Messreihe (jeweils ohne eingeschaltetem Reiniger),

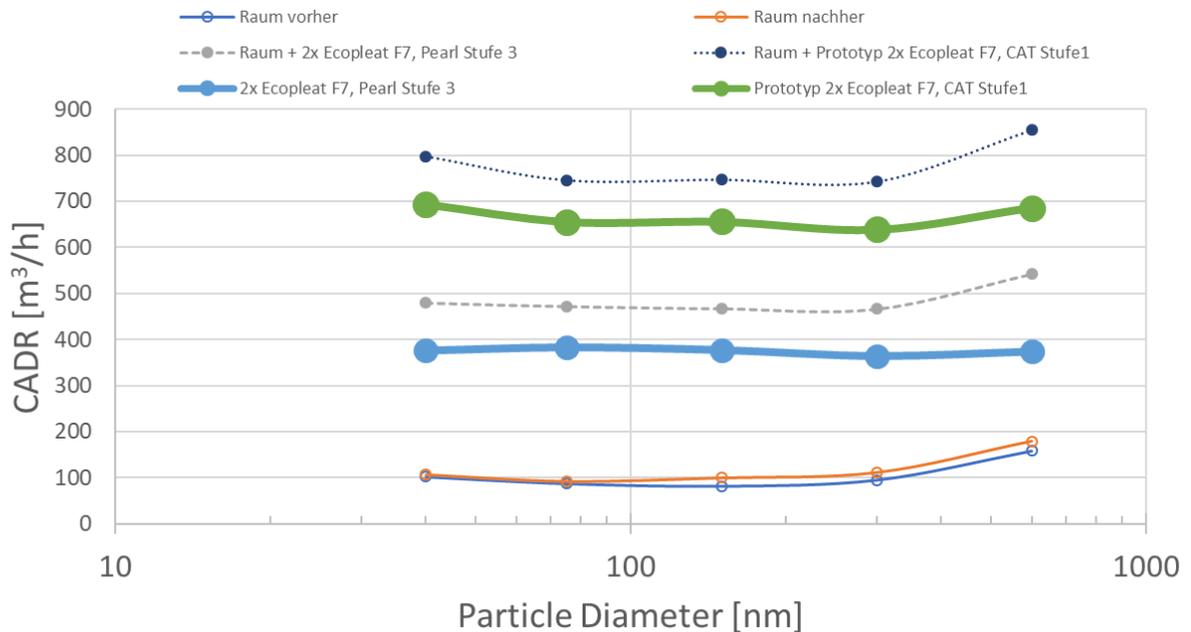
Unten: die beiden Reinigungsphasen mit eingeschalteten Luftreinigern

Unten links: Version mit Pearl Ventilator, Unten recht: Version mit Cat Ventilator

Mit Kenntnis des Raumvolumens (236 m^3) lassen sich gemäss Kapitel 0 die ermittelten Abklingraten in CADR-Werte umrechnen.

Figur 10 zeigt für diese NaCl-Experimente die direkt gemessenen Werte ($CADR_{LR+Raum}$, $CADR_{Raum}$) und die durch Differenzbildung ermittelten CADR Werte für die beiden Reinigungsgeräte.

Die dargestellten CADR Werte (bei $D = 40 \text{ nm}$, 75 nm , 150 nm , 300 nm und 600 nm) repräsentieren Mittelwerte, welche für die Partikel Partikelgrössenbereiche $30\text{-}50 \text{ nm}$, $50\text{-}100 \text{ nm}$, $100\text{-}200 \text{ nm}$, $200\text{-}400 \text{ nm}$ und $400\text{-}800 \text{ nm}$ berechnet wurden.



Figur 10: Die ermittelten CADR-Werte als Funktion der Partikelgrösse.

Die ausgezogenen dünnen Linien stellen die zwei Hintergrundmessungen der Reinigungswirkung des Raumes dar ($CADR_{100\text{-}200 \text{ m}^3/\text{h}}$). Die gestrichelten Linien sind die direkt gemessenen CADR Werte, wenn der Luftreiniger an ist. Die fetten Linien zeigen die Netto-CADR Werte der Luftreiniger, bei welchen die Reinigungswirkung des Raumes durch Subtraktion berücksichtigt wurde.

4. Zusammenfassende Beurteilung der beiden Luftreiniger

Es kann festgehalten werden, dass für die beiden DIY-Luftreiniger bei Partikeln mit Durchmessern zwischen 30 und 800 nm folgende CADR-Werte gemessen wurden:

Version mit 60W-Ventilator (Pearl NX6414) Stufe 3: CADR = 380 m³/h

Version mit 120W-Caterpillar-Ventilator (CAT HVD24AC) Stufe 1: CADR = 660 m³/h

Diese CADR-Werte können folgendermassen eingestuft werden:

Wenn z.B. mit dem Gerät, das ein CADR von 660 m³/h aufweist, in einem Raum eine Luftaustauschrate von vier Luftwechseln pro Stunde (ACH = 4) erreicht werden soll, dann darf die Raumgrösse nicht grösser als 165 m³ sein. Bei einer Raumhöhe von 2.5 m entspricht dies einem Zimmer mit 66 m² Grundfläche.

Beim leistungsschwächeren Modell (CADR = 380 m³/h) ergeben sich für ACH = 4 ein Raumvolumen von maximal 95 m³ respektive eine Zimmergrundfläche von rund 40 m².

5. Verwendung des Berichts

Der vorliegende Bericht darf nicht als Ersatz für eine Zertifizierung der ausgemessenen Produkte verwendet werden. Er ermöglicht jedoch eine Einschätzung der Reinigungswirkung des getesteten Geräts.

Dieses Dokument darf gegenüber Dritten verwendet oder veröffentlicht werden, um eine Abschätzung der gemessenen Eigenschaften vorzuweisen.

6. Referenzen

Allen JG, Ibrahim AM. Indoor Air Changes and Potential Implications for SARS-CoV-2 Transmission. *JAMA*. 2021;325(20):2112–2113. doi:10.1001/jama.2021.5053

Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific reports*, 9(1), 1-10.

Dhand, R., & Li, J. (2020). Coughs and sneezes: their role in transmission of respiratory viral infections, including SARS-CoV-2. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 202(5), 651-659.

Küpper, M., Asbach, C., Schneiderwind, U., Finger, H., Spiegelhoff, D., Schumacher, S. (2019). Testing of an Indoor Air Cleaner for Particulate Pollutants under Realistic Conditions in an Office Room. *Aerosol and Air Quality Research*, 19: 1655–1665. doi: 10.4209/aaqr.2019.01.0029

Lindsley, W. G., Pearce, T. A., Hudnall, J. B., Davis, K. A., Davis, S. M., Fisher, M. A., Khakoo, R., Palmer, J. E., Clark, K. E., Celik, I., Coffey, C. C., Blachere, F. M., & Beezhold, D. H. (2012). Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness. *Journal of occupational and environmental hygiene*, 9(7), 443-449.

Nelson, P.R., Sears, S.B. and Heaven, D.L. (1993). Application of methods for evaluating air cleaner performance. *Indoor Built Environ*. 2: 111–117.

7. Weiterführende Links

<https://www.info.gaef.de/positionspapier>

<https://tsi.com/products/particle-sizers/particle-size-spectrometers/>

https://www.vdi.de/news/detail/anforderungen-an-mobile-luftreiniger?utm_source=newsletter&utm_medium=email&utm_campaign=VDI+News+-+KW+35