Vorläufige Dokumentation Abluftanlage für Klassenräume

Thomas Klimach und Frank Helleis

10. November 2020, letzte Aktualisierung vom 21. Januar 2021

1 Vorwort

Liebe Eltern, Schüler*innen, Lehrer*innen und andere Interessierte,

besondere Zeiten erfordern besonderes Handeln. Wir vom Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz haben uns lange überlegt, ob und wie wir im Rahmen unserer Möglichkeiten zur Erleichterung der Situation und der Bewältigung der besonderen Herausforderungen beitragen können.

Aerosole sind ein Schwerpunkt unserer wissenschaftlichen Arbeit, und so ist es nicht verwunderlich, dass wir uns seit Monaten mit der Effizienz von Masken aller Art und der Ausbreitung von Aerosolen in geschlossenen Räumen beschäftigen, was uns mehr oder minder direkt zu Forschungsprojekten im Bereich Schule führt.

Über unser rein wissenschaftliches Interesse hinaus sahen wir aber auch konkreten Handlungsbedarf, nicht nur, weil auch wir teilweise Kinder im Schulalter haben, sondern auch weil wir als öffentlich finanzierte Einrichtung ein großes Interesse am Gemeinwohl haben.

Wir haben einen einfachen und pragmatischen Vorschlag einer low-cost Abluftanlage zum Selbstbau entwickelt, die die Raumlufthygiene nachhaltig verbessern kann. Besonders für die große Anzahl schwierig zu lüftender Klassenräume sehen wir dies derzeit als effektive und nachhaltige Lösung an.

Wir möchten betonen, dass dieses Dokument einen vorläufigen Charakter hat und ggf. nach und nach ergänzt wird. Dies gilt auch für die Interpretation der in diesem Dokument präsentierten Messdaten und die Angaben zu Stücklisten und die Baubeschreibung. Uns erreichen täglich Anfragen sowie Angebote, das Projekt zu unterstützen. Falls beispielsweise Bauteile wie Verteilerstücke in größeren Mengen verfügbar wären, werden wir diese Information aktualisieren.

Abschließend möchten wir betonen, dass unsere Anlage nicht das konsequente Einhalten von Sicherheitsmaßnahmen wie das Tragen von Masken ersetzt. Sie kann sie vielmehr ergänzen, um so das Risiko einer Infektion mit dem Corona-Virus während des Unterrichts zu verringern.

2 Haftungsausschluss und Nutzungsbedingungen

Die Inhalte dieses Dokuments wurden nach eigenüblicher Sorgfalt erstellt. Wir übernehmen jedoch keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der bereitgestellten Inhalte. Es wird insbesondere keine Gewähr dafür übernommen, dass die hier beschriebene Abluftanlage die dargestellten Funktionen erfüllt und sich für die dargestellte bzw. beabsichtigte Verwendung eignet. Die Nutzung der Inhalte erfolgt auf eigene Gefahr des Nutzers. Mit der Zusendung dieses Dokumentes und dessen Verwendung kommt keinerlei Vertragsverhältnis oder sonstige Rechtsbeziehung zustande.

Die Inhalte dieses Dokuments werden unter der Creative Commons Lizenz CC BY-SA 4.0 (siehe https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de) lizenziert. Als Quelle ist das Max-Planck-Institut für Chemie anzugeben.

3 Funktion

Ziel der von uns entwickelte Abluftanlage ist es, möglichst viel ausgeatmete Luft, die möglicherweise Viren oder Bakterien enthält, gezielt mit Hilfe von Abzugshauben aus der direkten Umgebung von Personen, die an Tischen sitzen, aufzunehmen, bevor sie sich im Raum verbreitet. Die Abluft gelangt über Verbindungsrohre in ein Zentralrohr und wird mit Hilfe eines Ventilators durch ein gekipptes Fenster nach draußen geführt.

Die an einem warmen Körper aufsteigende Luft unterstützt den Effekt, sodass sie zusammen mit der ausgeatmeten Luft innerhalb von etwa zehn Sekunden zur Abzugshaube gelangt.

Die Zuluft kann wie beim normalen manuellen Lüften durch ein gekipptes Fenster oder eine geöffnete Tür erfolgen. Alternativ kann sie über Filter von draußen zugeführt werden. Der Querschnitt der Zuluftöffnung sollte mindesten dem halben Rohrquerschnitt des Zentralrohres entsprechen. Die Zuluftöffnung sollte sich nicht vertikal über der Abluftöffnung befinden, sondern vorzugsweise erheblich darunter.

4 Dimensionierung

Zur Ermittlung der mindestens notwendigen Luftflüsse schätzen wir das Volumen der vom Körper erwärmten Luft, die sich auf dem Weg zur Ablufthaube mit der Atemluft mischt, wie folgt ab: Mit ca. 5 cm (Grenzschichtdicke zwischen einer Person und der Luft) x 80 cm (Umfang der Person) und einer Vertikalgeschwindigkeit von ca. 15 cm/s (gemessen) resultiert daraus ein Fluss von 6 l/s. Bei zwei an einem Tisch sitzenden Personen benötigt man einen Fluss von ca. 12 l/s (entspricht 43 m^3/h) Durchsatz durch unsere Abzugshaube. Für einen Schulraum mit 26 Schülern und einem Lehrer ergeben sich in der Summe: 14 (Absaugungen) x 43 m^3/h = 600 m^3/h.

Dies entspricht beim Volumen eines typischen Schulraumes von 200 m^3 einer Raumluftwechselrate von ca. 600 m^3/h / 200 m^3 = 3/h, äquivalent zu 1 perfekten Stoßlüftung in 40 min.

Die Anlage sollte offen unter einer Decke montierbar sein, keine Gewichtsprobleme hinsichtlich der Deckentragfähigkeit verursachen, geräuscharm sein und nach Möglichkeit auch energiesparend arbeiten. Daher sind Ventilatoren mit kleiner Leistung (20 W), relativ großem Durchmesser, geringer Drehzahl und geringem Differenzdruck (ca. 4 Pa) sinnvoll.

Es errechnet sich ein Innendurchmesser für die Verbindungsrohre von ca. 70 mm bei einer maximalen Länge von 3 m. Um für zukünftige Anwendungen wie z.B. die Kombination mit Umluftfiltern oder Wärmerückgewinnung genügend Reserven zu haben, nehmen wir die nächst größere DN90.

Der Innendurchmesser des Hauptrohres mit der durchschnittlichen Länge von 8 m ergibt sich aus der Anforderung eines Druckabfalls von höchstens 1 Pa/4 m aufgrund des pneumatischen Abgleichs zu mindestens 250 mm. Wir haben aus praktischen Gründen einen Durchmesser von 315 mm gewählt, da diese Größe direkt kompatibel zu gängigen Bodenventilatoren ist und dem Nenndurchmesser DN315 entspricht. Zudem ist der damit verbundene Umfang von 1 m auch passend zu 1 m breiter Rollenware diverser Materialien.

Zum pneumatischen Abgleich werden bei kürzeren Verbindungsrohren Strömungswiderstände (z.B. Lochscheiben aus Pappe o.ä.) in die Rohre geklemmt. Für die Dimensionierung der Widerstände planen wir eine Berechnungsmaske zu veröffentlichen, so dass man die passende Scheibe aus der jeweiligen Rohrleitungslänge und dem längsten Rohr berechnen kann. Messungen an den ersten Testinstallationen haben ohne den Abgleich bei Längenunterschieden von ca. 2,3 m eine Abweichung der Flüsse von knapp 20 % ergeben.

5 Messungen

5.1 Testaufbau

- Der Probeaufbau bestand aus einem Zentralrohr und 9 Absaugrohren, die mittig über den Kanten der Schultische endeten. Die Tische waren in einem regelmäßigen Rechteckmuster angeordnet. Die Höhe der Absaugung war in etwa 2 m Höhe, also ca. 70 cm oberhalb eines sitzenden Schülers.

- Aerosol- und CO_2-Messungen wurden am zentralen Tisch der Anordung durchgeführt. Die Absaugung erfolgte hier wahlweise mit einer einfachen Abzugshaube (ca. 60 cm Durchmesser) oder ohne.

- Die Frischluft wurde über ein spaltoffenes (ca. 5 cm) Unterlicht von außen in den Klassenraum zugeführt.
- Die Abwärme zweier Schüler wurde pro Tisch mit einem 100W Rotlicht simuliert, das auf einem Stuhl innerhalb eines Pappkartons (Testkörper) installiert war.
- Für die Messungen wurden ein Ultraschallzerstäuber (befüllt mit Betriebsmittel für Nebelmaschinen) und eine CO_2-Quelle auf der etwaigen Kopfhöhe eines potenziell infektiösen Schülers installiert.
- Die Probenluft wurde durch einen Schlauch vom Ende eines beweglichen Arms zu einem optischen Partikelzähler (OPC, Grimm 1.108, dp > 300 nm) und einem optischen CO_2-Messgerät (Gascard NH, Edinburgh Instruments) geführt. Dadurch konnte an verschiedenen Positionen relativ zur Quelle und zur Absaugung die Aerosol- und die CO_2-Konzentration sehr einfach gemessen werden.
- Die Strömungsgeschwindigkeit in den Rohren und die Aufwärtsbewegung in der Konvektionszone des Testkörpers wurde mit einem TSI-Heißdraht Anemometer gemessen.

5.2 Messungen und Ergebnisse

- Die durch den Testkörper generierte Vertikalgeschwindigkeit der Luft beträgt ca. 10-20 cm/s, was im Vorfeld zur Dimensionierung der Anlage genutzt wurde (s.o.).
- Die Strömungsgeschwindigkeiten in den 6 langen Ansaugrohren betrugen zwischen ca. 1,6 und 2 m/s. Die Unterschiede waren bedingt durch die Qualität der Fertigung der Folienrohre, wobei faltigere Rohre geringere Flüsse aufwiesen. Die Geschwindigkeit in den 3 kurzen Rohren war konsistent bei ca. 2,5m/s (Fluss ca. 9 l/s). Für die Anforderungen der Testmessungen war ein besserer Abgleich nicht nötig.
- Mit Hilfe der CO_2-Messung im Zentralrohr vor dem Ventilator wurden die Raumluftwechselraten bei verschiedenen Ventilatordrehzahlen und Fensterstellungen und geschlossener Tür gemessen. Ohne Ventilator erhalten wir bei geschlossenen Fenstern ca. 0,15/h, bei einem gekippten Unterlicht ca. 0,3/h, bei Ventilator auf Stufe 2 ca. 1,5/h, auf Stufe 3 ca. 2/h. Die folgenden Messungen wurden durchweg mit dem Ventilator auf Stufe 2, also mit einer einer nominellen Raumluftwechselrate von 1,5/h gemessen, siehe Bild 1.

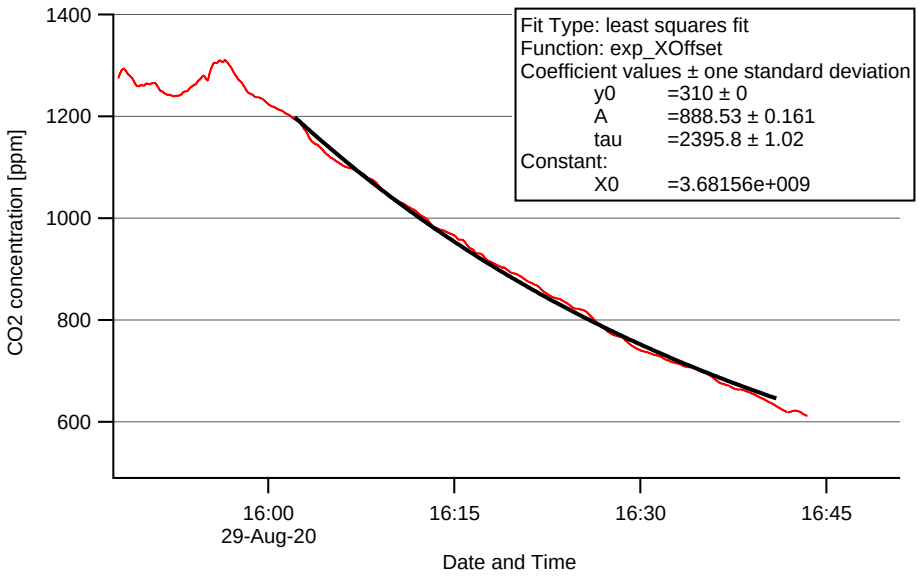


Abbildung 1: Messung der Raumluftwechselrate mit CO_2, der exponentielle Fit ergibt 3600 s/h / 2423 s = ca. 1.5/h.

Die Messungen erfolgten verteilt über einen Tag unter verschiedenen experimentellen Bedingungen. Es wurde abwechselnd die Aerosolkonzentration in der abgesaugten Luft (im Absaugrohr) und in der Raumluft (zwischen zwei Absaugrohren) bestimmt. Die Sammeleffizienz der Absaugung lässt durch den Vergleich der beiden Messungen bestimmen. Je weiter die Messwerte auseinander liegen, desto gezielter ist die Absaugung. Wenn sich die Konzentration in der Raumluft (Hintergrund) nicht mehr ändert, ist ein stabiler Zustand erreicht. Aus dem Verhältnis der Konzentration lässt sich die Effizienz der Anlage bestimmen.

Die Rohdaten der gemessenen Gesamtkonzentrationen sind in Bild 2 dargestellt.

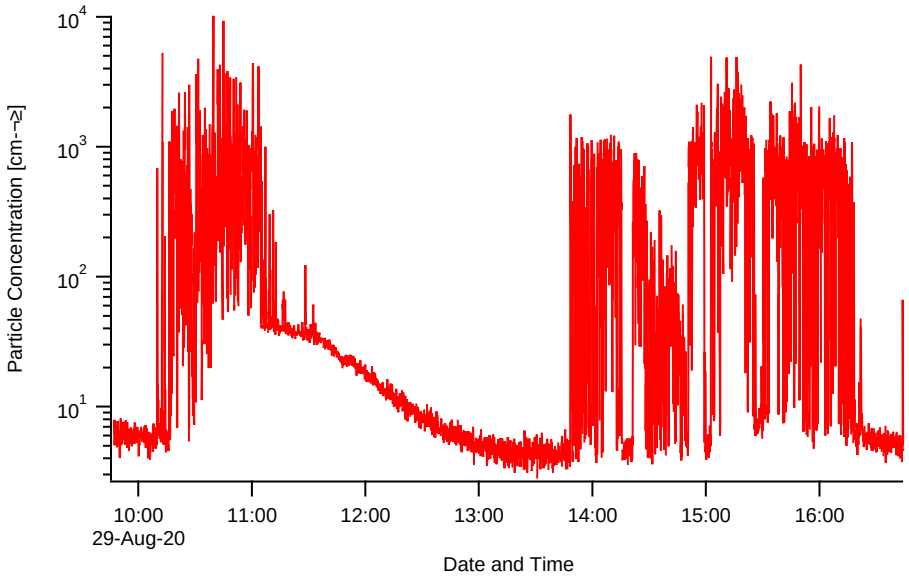


Abbildung 2: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel

Die Messung erfolgte in 3 Blöcken

1. Aerosol-Messung ohne Abzugshaube bis die Konzentration in der Raumluft stabil blieb. (Aerosolerzeugung von ca. 10:15 bis 11:35 h)

2. Messung der Aerosol-Lebensdauer (also die Zeit, bis eine Aerosol verdunstet ist) durch den exponentionellen Abfall der Raumluft-Konzentration ohne Aerosol-Erzeugung (ca 12:00 bis 13:30 h)

3. Aerosol-Messung (Aerosolerzeugung von ca. 13:50 bis 16:25 h; zwischen 14:20 und 14:50 h ging die Emissionsrate wegen Leerlaufen des Aerosol-Generators zurück und wurde durch Nachfüllen behoben.)

5.2.1 Lebensdauer

Die durch Verdampfung/Sedimentation bedingte Lebensdauer der Aerosol-Partikel ergibt sich aus dem exponentiellen Abfall zu 3600 s/h /1478 s = 2,5/h. Korrigiert um die Raumluftwechselrate von 1,5/h bleibt ca 1/h, siehe Bild 3.

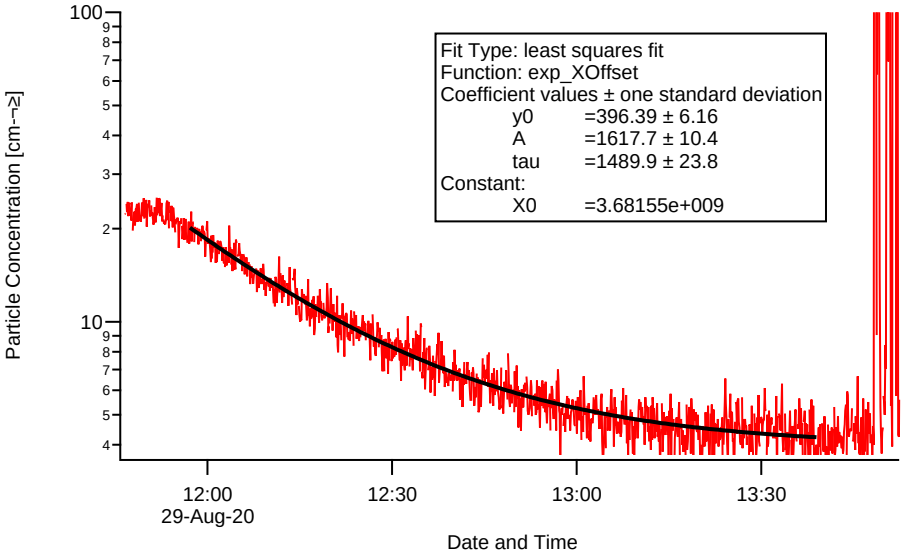


Abbildung 3: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel, Aerosolgenerator abgeschaltet

5.2.2 Effizienz ohne Haube

Im ersten Messblock ohne Abzugshaube (Fig. 4) wurde in verschiedenen Abständen zur Absaugung gemessen

1. in 15 cm Abstand (10:28 bis 10:31 h)
2. in 30 cm Abstand (11:05 bis 11:15 h)
3. in 100 cm Abstand (ab 11:30 h)
4. ohne Abstand (restliche Zeit)

Es lässt sich Folgendes beobachten:

- Die unterschiedlichen Abstände des Probeneinlasses zum Zentrum des Absaugrohres ergeben keine signifikanten Unterschiede in der Raumluft-Konzentration (Hintergrund). Die Aerosolkonzentration ist also bereits im Abstand von 10 cm von der Quellen bzw. der aufsteigenden Abluftfahne auf den Hintergrundwert abgesunken. Es ist keine merkliche Aufweitung der Abluftfahne auf dem Weg zur Absaugung erkennbar.
- Beim Beproben des Zentrums der Absaugöffnung werden im Maximum ca. 1,000 Aerosolpartikel / cm^3 gemessen. Geht man davon aus, dass die detektierten Maximalwerte der Emissionskonzentration des Generators entspricht (was sicher eher eine Untergrenze ist), ergibt sich mit einem Volumenfluss im Absaugrohr von ca. 9 l/s eine Emissionsrate von 1.000 / cm^3 * 9.000 cm^3/s = 0.9*1e7 Partikeln/s. Mit einer Verlustrate (Lebensdauer) der Partikel von 2,5/h = 7*1e-4/s errechnet sich eine theoretische stabile Raumluftkonzentration von ca. 65 Partikeln/ cm^3. Gemessen wurden am Ende des ersten Messblocks um 11:30 aber nur eine stabile Raumluftkonzentration von ca. 30 Partikeln/cm^3. Was auf eine Sammeleffizienz des Rohres von mindestens ca. 1 – 30 / 65 = 54% schließen lässt, siehe Bild 4. Von den Rohwerten wurde jeweils der Untergrund von 6 Partikeln/cm^3 vor der Aerosolerzeugung (10:00 h) abgezogen.

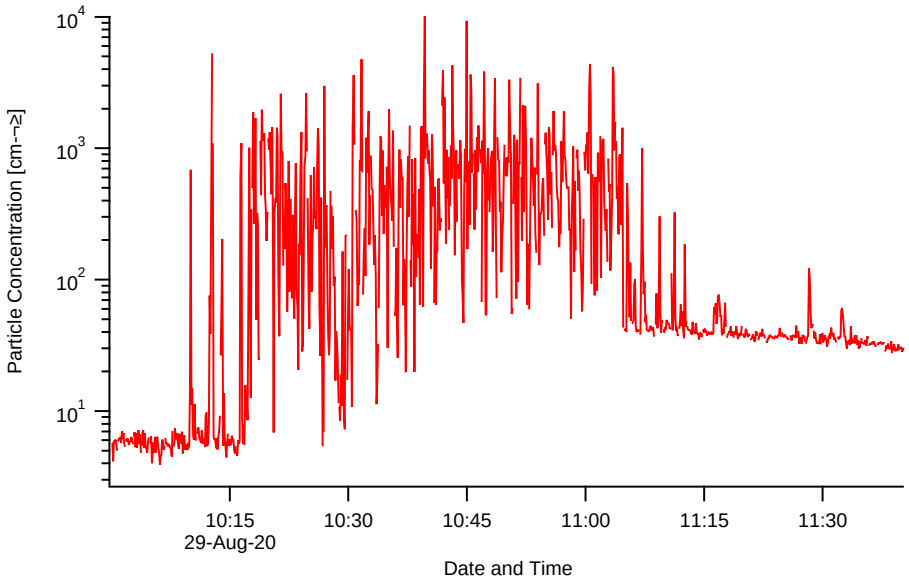


Abbildung 4: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel, ohne Abzugshaube

5.2.3 Effizienz mit Haube

Die Aerosol-Konzentration der abgeführten Luft wurde nahe am Zentrum der Abzugshaube gemessen (siehe Bild 5). Während die Raumluftkonzentration zu bestimmten Zeiten in 120 cm Abstand zur Absaugöffnung gemessen wurde, um wieder den Anstieg durch nicht abgesaugtes Aerosol zu untersuchen.

- 14:09 h bis 15:03 h
- 15:25 h bis 15:30 h
- und ab 16:18 h

Um den Einfluss der Wärmeabgabe des Testkörpers auf die Vertikalkonvektion zu testen, wurde um 15:40 die Heizung des Testkörpers ausgeschaltet, d.h. der Vertikaltransport wurde nur noch durch die Abwärme des Aerosolgenerators (ca. 20W) unterstützt.

Es lässt sich Folgendes beobachten:

- Befindet sich der Probeneinlass im Zentrum des Endes des Absaugschlauches, werden in Phasen geringer Variabilität maximal ca. 600 Partikel/cm^3 gemessen. Hier würde man mit nicht selektiver Absaugung eine steady-state Konzentration von ca. 40 Partikeln/cm^3 im Hintergrund erwarten. Gemessen wurden im Hintergrund im Mittel aber nur ca. 7/cm^3, was sich um ca. 1/cm^3 vom gemessenen Untergrund um 10:00 h unterscheidet. Die Sammeleffizienz des Rohres ergäbe sich dann zu 1 - 1/40 = 97%.
- Die vergleichsweise geringe Variabilität der Partikelkonzentration z.B. um ca. 14:55 h legt die Vermutung nahe, dass die Sammeleffizienz unter günstigen Bedingungen nahezu 100% erreicht.
- Man sieht deutlich, dass die Variabilität der Partikelkonzentration nach Abschalten der Heizung des Testkörpers um 15:40 h erheblich zunimmt. Man kann also zunächst zumindest qualitativ sagen, dass die durch den warmen Körper erzeugte Konvektion unter den Testbedingungen eine fast quantitative Absaugung der Partikel auch bei Störungen der Luftbewegung z.B. durch Winddruck auf das spaltoffenen Unterlicht im Raum erheblich unterstützt.

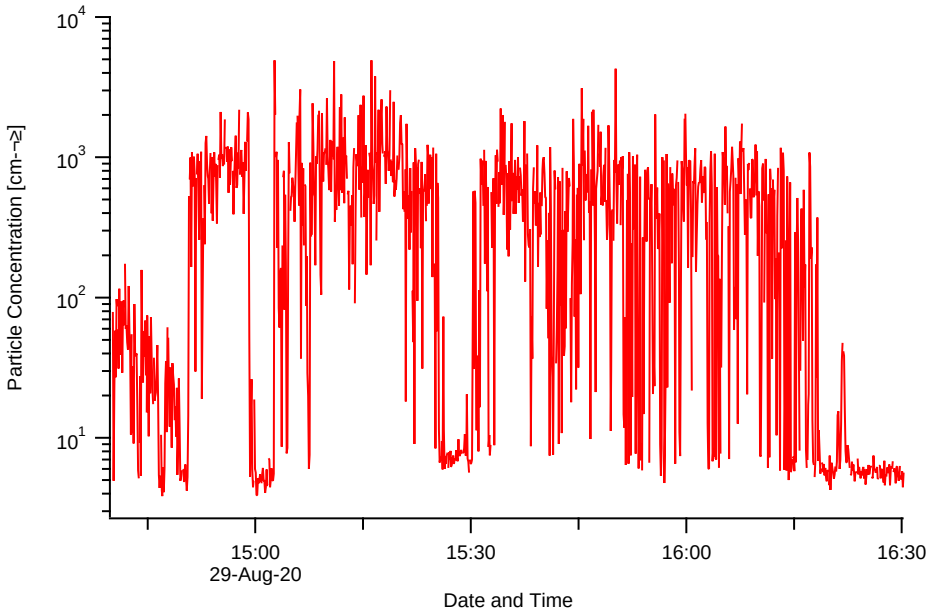


Abbildung 5: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel, mit Abzugshaube

5.3 Simulationen

Im Verlauf der Messungen haben wir auch überlegt, inwieweit Heizung und kalte Fensterfront im Winter die Konvektionsdynamik im Klassenraum stören könnten. Deswegen haben wir die Strömungen im Klassenraum simuliert, zunächst in 2D. Die Ergebnisse sind in Bild 6, ohne Schüler, sowie in Bild 7, mit Schüler dargestellt.

Das kleine weiße Rechteck rechts unten im Bild stellt die Heizung dar, das Fenster befindet sich am rechten Bildrand. Im zweiten Bild sind die Umrisse des Schülers im Zentrum mit Rechtecken grob modelliert.

Man sieht, dass das durch die warme Heizung und das kalte Fenster gebildete Konvektionssystem kaum in den Raum hineingreift.

Sitzt ein Schüler in der Nähe von Heizung und Fenster, vereinigen sich die beiden Konvektionszellen, d.h. die Strömungsrichtung im Bereich des Schülers ändert sich praktisch nicht, der Transport der Ausatemluft des Schülers nach oben wird vermutlich eher unterstützt als abgeschwächt.

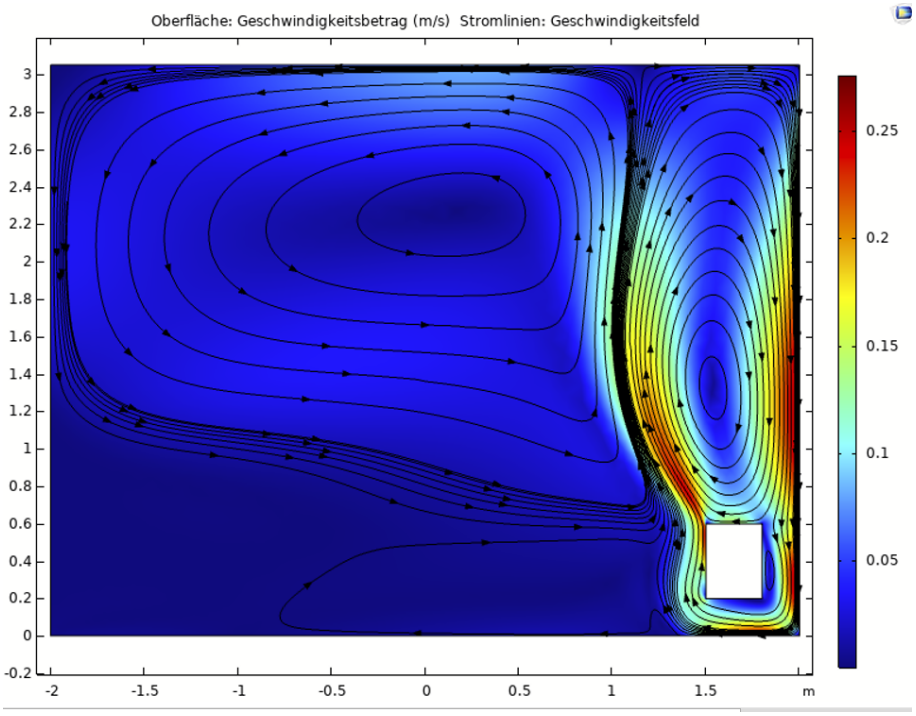


Abbildung 6: Simulation der Raumluftströmung Heizung/Fenster ohne Schüler

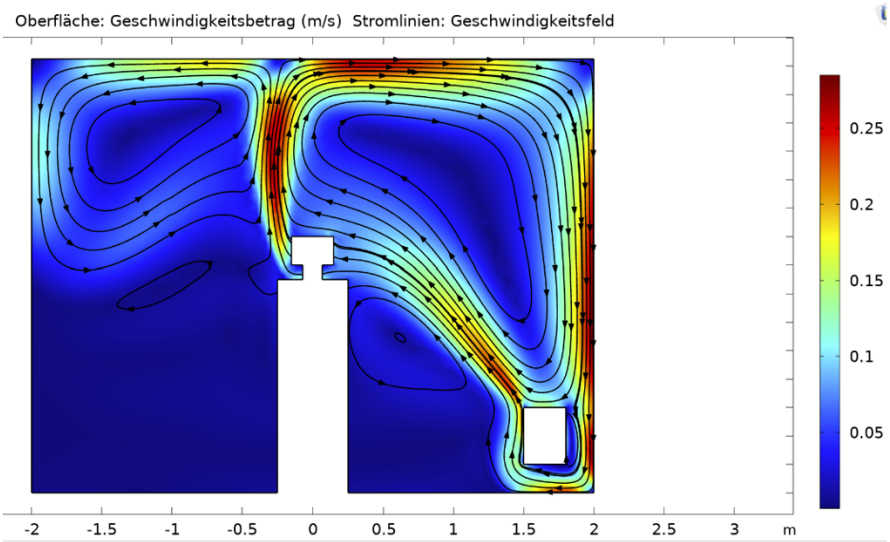


Abbildung 7: Simulation der Raumluftströmung Heizung/Fenster mit Schüler

5.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der hier präsentierten vorläufigen Messungen legen nahe, dass die vorgeschlagene Anlage das durch infektiöses Aerosol bedingte Ansteckungsrisiko deutlich senken kann(unter günstigsten Bedingungen bis zu 90%) und motivieren uns, ein massentaugliches System zu entwickeln.

6 FAQ (Häufig gestellte Fragen)

6.1 Gibt es eine wissenschaftliche Veröffentlichung zu Ihrer Anlage?

Die bis jetzt durchgeführten Messungen und Modellrechnungen reichen nicht aus, um die Wirkungsweise des Systems im Detail verstehen zu können.

Das Haubendesign und der Einfluss der Betriebsparameter (Volumenflüsse) auf die Sammeleffizienz des Systems für Aerosol und CO_2 sind noch nicht genügend erforscht.

Ebenso müssen wir in Erfahrung bringen, wie sich Umwelteinflüsse wie Winddruck und Außentemperatur auswirken. In diesem Zusammenhang interessiert uns auch der Vergleich mit der manuellen Stoßlüftung. Dazu sind längere Messreihen unter realen Bedingungen im Klassenraum auch während des Winters nötig.

6.2 Wie funktioniert das Abluftsystem für Klassenzimmer, das Sie an der integrierten Gesamtschule in Mainz-Bretzenheim installiert haben?

Die Luft wird von Abzugshauben, die über jedem Tisch installiert sind, aufgenommen, durch kleinere Rohre in ein großes Zentralrohr unter der Decke geleitet und über einen Ventilator an einem kippbaren Fenster nach draußen geblasen. Die Zuluft kann über ein weiteres spaltoffenes Fenster oder, vorzugsweise, sofern die Flure über zu öffnende Fenster verfügen, durch die spaltoffene Tür zugeführt werden.

Eine besondere Eigenschaft der Anlage ist, dass sie die um den warmen menschlichen Körper aufsteigende Strömung (Konvektion) ausnutzt und so die natürlicherweise ausgeatmete Luft innerhalb von etwa zehn Sekunden in das Absaugrohr transportiert, also bevor sie sich turbulent im gesamten Raum verteilt.

6.3 Wie teuer und aufwändig ist die Installation?

Die Materialkosten liegen im Moment bei etwa 200 Euro pro Klassenraum. Die Anlagen sind so konstruiert, dass sie von engagierten Lehrern und Eltern und eventuell auch Schülern aufgebaut werden können. Neben typischen Werkzeugen wie Zange und Schere sind einige spezieller Geräte wie ein Lötkolben für die Verbindung von Drähten oder ein Plastikschweißgerät sinnvoll. Mit Routine im Umgang mit den Geräten und den entsprechenden Materialien (siehe Liste), kann eine Anlage von 4-6 Leuten in vier Stunden eingebaut werden. Beim erfolgreichen Versuch die Grundschule Mainz-Marienborn (11 Räume) an einem Wochenende mit Unterstützung der Eltern und Lehrer auszustatten wurden im Mittel pro Raum etwa 30 Mannstunden benötigt. Dabei wurden im Vorraus die Räume schon ausgemessen und die Verteilerboxen in Heimarbeit erstellt.

6.4 Wie haben Sie getestet, wie wirksam dieser Low-Tech-Ansatz zur Luftreinigung ist?

Wir haben Messungen mit Aerosol- und CO_2-Quellen durchgeführt, die auf einem Sitzplatz in Kopfhöhe installiert wurden und einen infizierten Schüler simulieren. Indem wir den Probeneinlass in- und außerhalb des Abluftsystems positionieren, kann die Anreicherung der Aerosole im Abluftsystem direkt als Verhältnis der beiden Messwerte ermittelt werden. Bringt man den Aerosolgenerator außerhalb des Absaugbereichs der Abzugshaube an, wird das Aerosol nicht selektiv abgesaugt. Dabei sieht man einen entsprechenden Anstieg der Aerosol-Konzentrationen im gesamten Klassenraum. Bei diesen einfachen Messungen mit simulierten Schülern, künstlichen Aerosol-Partikeln und unter den genannten Annahmen (5.2 wurden gut 90 % der Partikel abtransportiert bevor sie sich im Raum verteilen konnten.

6.5 Für welche Art und Geometrie von Klassenzimmern wäre solch eine Anlage sinnvoll?

Das System ist ein Baukasten aus mit einer Schere zuschneidbaren Folienrohrsegmenten und Verteiler- bzw. Verbindungsstücken. Da die Rohrsegmente direkt vor Ort hergestellt werden, gibt es keine Einschränkungen hinsichtlich Art oder Geometrie. Die Verteilung der Schulbänke in einem gleichmäßigen Raster vereinfacht den Aufbau allerdings deutlich. Man benötigt lediglich ein kippbares Fenster und eine Steckdose.

6.6 Wie groß ist das Interesse von Schulen und anderen Einrichtungen an dem Nachbau?

Wir haben seit dem ersten Pressebericht am 30.10.2020 bis heute (10.11.2020) über 2700 Anfragen von Schulleitern, Schulträgern, Privatpersonen und verschiedener Firmen erhalten. Die Anzahl der auszurüstenden Räume geht in die Zehntausende. Das System ist prinzipiell mit Standardlüftungskomponenten darstellbar, würde damit aber viel teurer, schwerer und in der Montage aufwendiger. Zudem sind diese Materialien nicht transparent, wodurch die Montage in der Nähe bzw. unterhalb von Lampen zu Verdunklungen führen könnte. Wir haben am Markt keinen Hersteller gefunden, der Komponenten für extreme Niederdrucksysteme anbietet.

6.7 Ist es möglich, die Ergebnisse ihrer Prüfungen einzusehen?

Die vorläufigen Messergebnisse sind angefügt. (2)

Wir haben derzeit weitere automatisierte CO_2-Messungen installiert, deren Daten zeitnah bereit gestellt werden sollen.

6.8 Stellen Sie eine Bauanleitung für die Lüftungsanlage zur Verfügung?

Eine Bauanleitung können wir aus rechtlichen Gründen nicht veröffentlichen. In dem hier vorliegenden Dokument haben wir den Aufbau unserer Testanlagen detailliert beschrieben, so dass man sie mit etwas handwerklichem Geschick nachbauen kann.

6.9 Erfüllt Ihre Anlage gängige Brandschutzauflagen und Sicherheitsbestimmungen?

Unsere Anlage wurde im Vorfeld durch Sachverständige des zuständigen Schulträgers in Bezug auf Brandschutz- und allgemeinen Sicherheitsbestimmungen geprüft und akzeptiert. Durch die Art der Konstruktion, die Nutzung vorhandener Fenster und die brandschutztechnisch relativ unbedenklichen bzw. im Klassenraum auch an anderen Stellen verwendeten Materialien (PE, PP) ergaben sich nur geringe bürokratische Hürden. Unsere Anlage wiegt etwa 10 Kilo. Verglichen mit der durchschnittlichen Brandlast von ca. 200 Kilo (Stühle, Kleidung und Unterrichtsutensilien), die im Brandfall teilweise hochgiftige Gase freisetzen könnten, ist unserer Anlage nahezu vernachlässigbar.

6.10 Muss das Fenster in Ihrer Variante dauerhaft gekippt bleiben oder kann es zeitweise geschlossen werden, z.b. nachts wegen Einbruchschutz?

Die Beseitigung der Aerosole erfolgt kontinuierlich, um die benötigten Leistungen und die Geräuschbelastung niedrig zu halten. Das Fenster behält seine ursprüngliche Funktion und ist lediglich mit einem Anschluss für den Ventilator ausgerüstet, der unabhängig von der Fensterstellung praktisch luftdicht ist. Daher kann und soll das Fenster in der unterrichtsfreien Zeit geschlossen werden, bei Verwendung eines Kontaktschalters stoppt der Ventilator dann sogar automatisch. Eine zusätzliches Einbruchsrisiko ist damit nicht gegeben. Alternativen, die viel weniger Aufwand bedeuten und sogar teilweise von Schulträgern und Gebäudewirtschaftlern unterstützt werden, sind fest in ein Fenster eingebaute Ventilatoren. Da sollte man unbedingt nachfragen.

6.11 Schützt dieses System nur vor indirekten Ansteckungen? Sind zusätzliche Plexiglastrennscheiben zu empfehlen und wie verhält es sich mit einer Mund-Nase-Bedeckung?

Das System kann nur die Ansteckungsgefahr durch Aerosole reduzieren. Wenn Schüler die sich auch in der Pause oder privat treffen, an denselben Tischen sitzen, wird man keine Trennscheiben brauchen. Die Risikoreduktion durch Alltagsmasken kommt allerdings noch multiplikativ hinzu, d.h. beides zusammen ist entsprechend besser.

6.12 Inwiefern ist Ihr Modell für den Masseneinsatz geeignet?

Das System ist aus unserer Sicht massentauglich für alle Situationen, in denen sich Menschen mehr oder minder an einem Ort aufhalten und andere adäquate Lösungen wie das Stoßlüften alle 20 Minuten nicht möglich sind. Dann haben die Abzugshauben maximale Wirkung. Beispiele sind Schulen, Büros, Restaurants.

6.13 Mit welcher zusätzlichen Geräuschbelastung ist durch den Ventilator zu rechnen? Ist es möglich, dies in Dezibel-Angaben zu nennen?

Laut Hersteller erzeugt der Ventilator freiblasend etwa 40 Dezibel, da er sich aber in einem Gehäuse befindet, rechnen wir nur mit 30 Dezibel bei niedrigeren Frequenzen. Wir werden dies aber nochmals messen. Erste Rückmeldungen von betroffenen Lehrern sind positiv und die Lüfter scheinen im normalen Schulalltag nicht besonders aufzufallen.

6.14 Wird die Raumluft durch das ständige Lüften im Winter nicht besonders trocken?

Im Gegenteil, weil die Raumluft nominell nur etwa zweimal pro Stunde gewechselt wird, wird ihr im Vergleich zum vorgeschriebenen Stoßlüften alle 20 Minuten entsprechend weniger Wasser entzogen.

6.15 Inwieweit stören andere Wärmequellen wie Heizung und kalte Fensterfront die thermische Konvektion im Bereich der Schüler?

Vorläufige Simulationen der Raumluftströmungen haben gezeigt, dass die typischerweise unter den Fenstern angebrachte Heizung im Zusammenspiel mit der kalten Fensterfront eine eigene kleinräumige Konvektionszelle bildet. Diese scheint kaum in den Raum hineinzugreifen und verstärkt die Strömungsrichtung im Bereich der nächstsitzenden Schüler eher als sie abzuschwächen. Dies sollte noch im Experiment verifiziert werden. Intuitiv ist es aber nachvollziehbar, da die Schüler verglichen mit Heizung und Fensterfront die stärkste Wärmequelle darstellen.

6.16 Warum können kaum Standard-Komponenten aus der Lüftungstechnik benutzt werden?

Lüftungshersteller bauen meist zentrale Anlagen bei minimierten Platzanforderungen und nutzen deswegen relativ hohe Ventilatorleistungen und Strömungsgeschwindigkeiten. Da wir aus praktischen, statischen und brandschutztechnischen Gründen minimales Gewicht, offene Bauweise, einfache Herstellbarkeit und geringe Geräuschentwicklung brauchen, haben wir Systemdrucke und -Flüsse niedrig gehalten. Bis jetzt bieten nur modifizierte Bodenventilatoren die nötigen niedrigen Leistungen an.

6.17 Sehen Sie Ihr System als Konkurrenz zu mobilen Raumluftfiltern oder als Ergänzung?

Zur vom Umweltbundesamt geforderte Begrenzung der mittleren CO_2-Konzentration in Klassenräumen auf circa 1000 ppm sind rechnerisch 4-5 Raumluftwechsel pro Stunde nötig. Hat man keine Lüftungsanlage und ist es zu kalt zum Dauerlüften, kann dies durch dreimaliges Stoßlüften pro Stunde erreicht werden. Kann man kein Fenster öffnen oder sind die Fenster zu klein oder nur kippbar, ist die Nachrüstung aus unserer Sicht sinnvoll.

Da Raumluftfilter kein CO_2 entfernen, können sie lediglich ergänzend zum Lüften oder im absoluten Notfall betrieben werden. Die von Herstellern von Raumluftfiltern und Forschern empfohlene Installationsleistung liegt auch in dem durch 20-minütige Stoßlüftung erreichbaren Bereich. Position und Luftführung sind erheblich für ihre Wirksamkeit. Manche Forscher präferieren deswegen den Einsatz von mehreren kleinen anstelle eines großen Gerätes. Der Hauptreinigungseffekt entsteht durch das Stoßlüften, der zusätzliche Einsatz von Raumluftreinigern bringt dann typisch eine weitere Halbierung des Infektionsrisikos.

Fazit: Raumluftreiniger sind aus unserer Sicht keine Konkurrenz, sondern lediglich eine Ergänzung zu Lüftungsanlagen oder Stoßlüftung – aber nicht umgekehrt.

7 Systemkomponenten

Das System besteht aus mehreren Komponenten:

1. Fensteranschluss (Bild 8)
2. Ventilatorkasten (Bild 8)
3. Rohrverteiler (Bild 9)
4. Zentralrohrsegment (Bild 10)
5. Verbindungsrohr (Bild 10)
6. Abzugshauben mit Bogen (Bild 10)
7. Befestigungsmaterial, Haken, Bindedraht (Bild 13)

Als Ventilator wurde ein modifizierter Tisch- bzw. Bodenventilator (Durchmesser ca. 300 mm) genutzt und in einen Ventilatorkasten gebaut, der direkt in das Zentralrohr passt.
Die Abdichtung des Abluftfensters kann mit verschiedenen Materialien erfolgen (Bild 8). Relativ gut einsetzbar sind Abdeckungen von mobilen Klimageräten (Bild 8b).

(a) a (b) b

Abbildung 8: Zwei mögliche Varianten zur Fensterabdichtung: (a) Holz-Umbau und (b) Abdeckungen von mobilen Klimageräten mit Klett

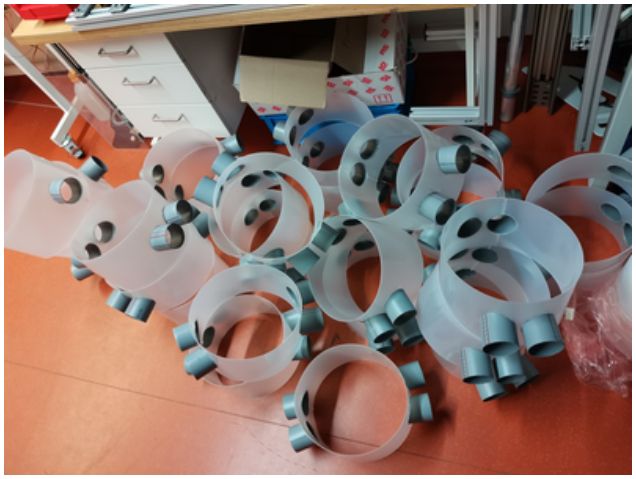


Abbildung 9: Verteiler mit HT DN 75 Rohr mit Muffe

Abbildung 10: Zentralrohr, Verbindungsrohre und Hauben

8 Material

Folgende Materialien haben wir bisher verwendet, ausgehend von 17 Absaugstellen im Raum und einer durchschnittlichen Absaugrohrlänge von 1.7 m sowie einer Deckenhöhe von 3.5 m. Zuächst haben wir die Absaugrohre mit 75 mm Innendurchmesser aufgebaut. Um einen etwas höher Fluss bei gleicher Ventilatorleistung zu erhalten werden die nächsten Räume in der IGS-Bretzenheim aber mit 90 mm weiten Absaugrohren ausgestattet und wir empfehlen das auch für neue Anlagen:

	Pro Raum		
Große Rohre			
Folienschlauch 500 mm 0,2 mm transparent	7,5	m	Bild 19
Stützgitter PE N903 004 Rolle: 1 m x 20 m	7,5	m	Bild 18
Kleine Rohre			
HT-Winkel DN 90 87°	17	St	Bild 22
HT-Abzweigung DN 90 87°	1	St	Bild 22
Stützgitter PE N902 010 Rolle: 1,2 x 100 m - in 26 cm Streifen schneiden	28,9	m	Bild 18
Folienschlauch 150 mm 0,2 mm transparent	28,9	m	Bild 19
Hauben			
Flachfolie 0,2 mm auf 2 m Rolle transparent	17	m^2	Bild 17a
3 mm Edelstahl in 3 m Stäben	17	St	Bild 17a
Verzweiger			
Klebeband Tesa 50 m x 5 cm Glasfaser klar	5	m	
PP Platten 1,5 mm 2 x 1 m - in 181 mm Streifen schneiden	4,6	St	
HT DN 75 Rohr 2 m (alternativ DN 90) - in 6,5 cm Stücke schneiden	1,1	m	Bild 9
Schweißdraht 4 mm PP	0,03	kg	Bild 21
Befestigungsmaterial			
Kabelbinder Soft-Tie (26cm lang)	66	St	Bild 20
Eisendraht verzinkt	15,4	m	Bild 13
Draht clipse (Federdraht)	6	m	Bild 13
Ventilator+Box			
PE/PP Platte 2 mm 2 x 1 m	0,5	St	
Lüfter: Tisch/Bodenventilator 30 cm	1	St	
Fensterabdichtung	1	St	Bild 8
Schweißdraht 4 mm PE	0,07	kg	Bild 21

9 Werkzeuge

9.1 Das Verteiler-Schweißgerät

Hierbei handelt es sich um ein selbst hergestelltes Drehteil, das mit Heizkartuschen betrieben wird. Man benötigt es, um die Verteiler zu bauen (Bild 11). Es hat zwei Funktionen:

1. das Durchgangsloch herstellen
2. das Rohrstück anschweißen

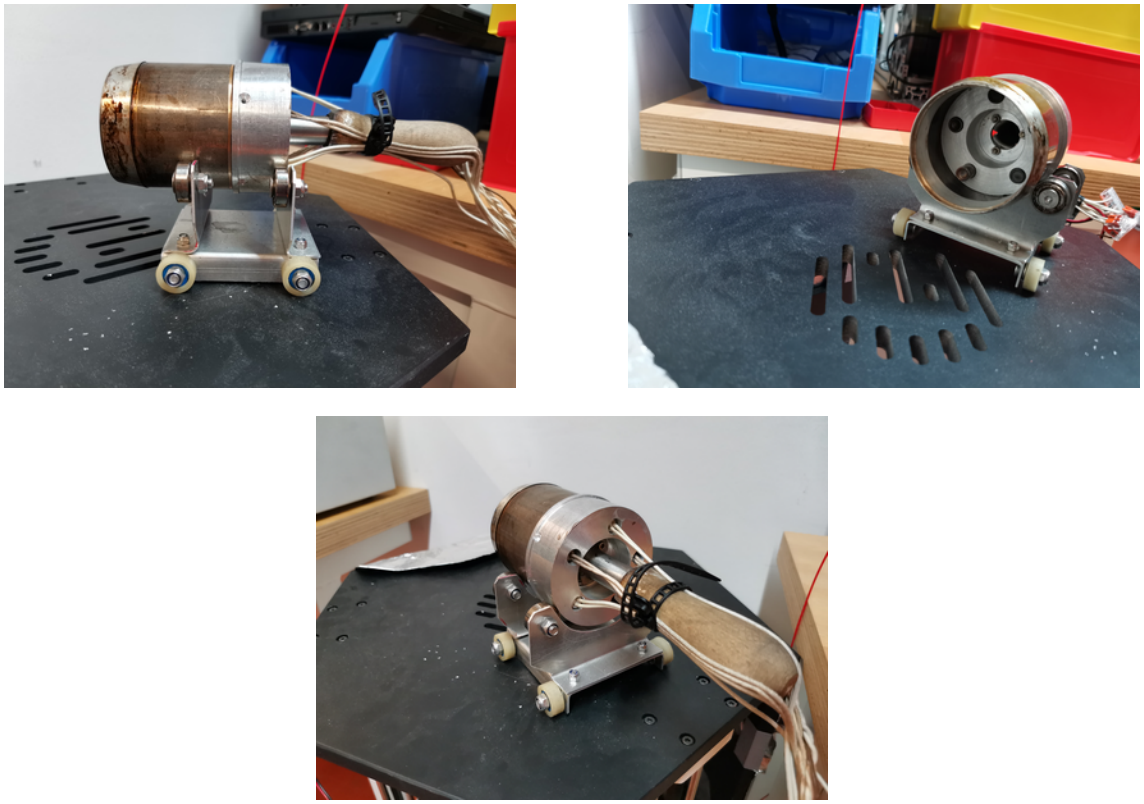


Abbildung 11: Verteiler-Schweißgerät (Spezialwerkzeug selbstgefertigt)

9.2 Schere/Blechschere

für Gittermaterial, Flachmaterial und Flanschstücke

9.3 Kunststoff-Schweißgerät

z.B. Heißluftgebläse mit Schweißschuh (rechts im Bild 12)

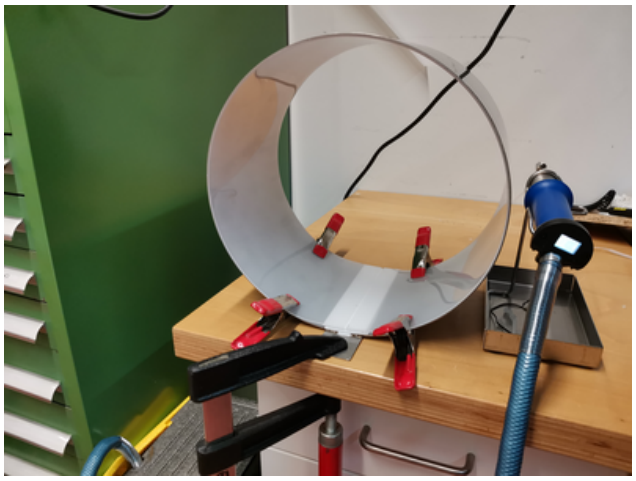


Abbildung 12: Platte zusammenführen und mit Klammern fixieren. Rechts im Bild: Heißluftgebläse mit Schweißschuh.

10 Arbeitsschritte

10.1 Fenster aussuchen

Mittig im Raum und kippbar. Alternativ: Oberlicht, bei dem die Scheibe ausgebaut werden kann.

10.2 Raum ausmessen

Die Tische stehen idealerweise in einem regelmäßigen Raster. Dies hilft der Übersicht, beim Aufbau und gewährleistet zudem die geforderten 1.5 m Abstand. Schnur spannen oder anderen Anhaltspunkt für die Mittellinie des Zentralrohrs suchen. Position der Verteiler festlegen. Pro Verteiler können 4 Einzelrohre angeschlossen werden. Abstand der besetzten Tischkantenmitten zu den entsprechenden Verteilern messen. In der Fertigung müssen dann

- die Zentralrohrsegmente 8 cm kürzer sein als die Punkt-zu-Punkt-Messung.
- die Einzelrohre 21 cm kürzer sein als die Punkt-zu-Punkt-Messung.

10.3 Materialien besorgen

- Gittermatten und Schlauchfolie im Verpackungszubehörhandel
- Kunststoffplatten im Baumarkt/Großhandel
- Draht und HT-Abflussrohr im Baumarkt

10.4 Befestigung an der Decke

(a) a (b) b

Abbildung 13: Zur Befestigung an der Decke: (a) Aus 1.5 mm Federstahldraht gebogene Haken/Ösen zur Befestigung an der Decke und (b) Eisendraht verzinkt

Wegen des geringen Gewichts kann die Anlage an bestehende abgehängte Decken montiert werden. Die günstigte Variante ist, aus 1.5 mm Federstahldraht passende Haken/Ösen zu biegen (Bild 13a). Einschraubhaken oder spezielle Halter funktionieren auch bzw. sind bei Betondecken nötig.

10.5 Verteiler

Die Verteiler sind das kompliziertesten Stück der Anlage. Derzeit gibt es Gespräche mit Herstellern, diese auf Grund des großen Interesses in Serie fertigen zu lassen. Solange es die Teile jedoch noch nicht zu kaufen gibt bzw. wenn Lust und Zeit zum Basteln besteht, hier unsere Vorgehensweise.

1. Flachmaterial schneiden: 181 mm x 1000 mm
   Das klappt am Besten auf einer großen Schlagschere, funktioniert bei einer begrenzten Stückzahl aber auch mit einer Handschere.

2. Je einen Streifen zu einem großen Rohrstück zusammenschweißen:

   - die zugeschnittene Platte in einem Bogen zusammenführen, bis zwischen den kurzen Seiten ein etwa 2 mm großer Spalt entsteht (Bild 12)
   - die kurzen Seiten mit Klammern fixieren. Wir haben uns hierzu eine Hilfe aus Edelstahlblech gebaut (Bild 12), die die Form vorgibt und an der die Enden fixiert werden können. Es sollte auch funktionieren, wenn man die beiden kurzen Enden im richtigen Abstand auf einer Holzplatte festklemmt.
   - ein ca. 20 cm langes Stück vom Schweißdraht abschneiden
   - das Schweißgerät auf ca. 270°C einstellen und nach Erreichen der Temperatur das Schweißdrahtstück einführen, kurz warten bis es weich wird, und dann das Gerät langsam unter Druck über den Spalt führen.
   - Abkühlen lassen und anschließend die Fixierung lösen
   - Überstehende Reste des Schweißdrahts abknipsen/-schneiden

3. Anschweißstücke schneiden (Bild 14)
   Ziel ist es, den benötigten konkaven Anschnitt an ein kleines Rohrstück zu bekommen, der ein formschlüssiges Anschweißen an das zuvor hergestellte große Rohrstück ermöglicht. Sehr gut geht das mit einer Bandsäge, ist aber auch mit einer Hand- oder Blechschere möglich. Eine Schnittschablone zum Ausdrucken, die zum Anzeichnen um das Rohr gelegt werden, findet sich im Anhang. Das Vorgehen mit Bandsäge wäre wie folgt:

   - relativ zur Drehachse einer Bandsäge eine Drehachse anbringen. Die Drehachse sollte senkrecht zu Schneidrichtung ca. 16 cm versetzt und entgegen der Schneidrichtung um ca. 5 cm versetzt sein. Die Achse könnte z.B. ein Rohrstück oder Rundstab sein, der in ein dickes Brett gesteckt wird.
   - in ein kurzes HT-PP-Rohr bei der 11,5 cm-Marke ein Loch entsprechend dem Durchmesser der Drehachse bohren und auf die Drehachse setzen.
   - nun kann ein langes HT-PP-Rohr relativ zügig in die benötigten Anschweißstücke gesägt werden. Dabei sollte das Sägeblatt nicht zu breit sein; mit einem 6 mm breiten hat in unseren Aufbauten gut funktioniert.

4. 4 x Loch schmelzen und Flansch anschweißen (Bild 14)

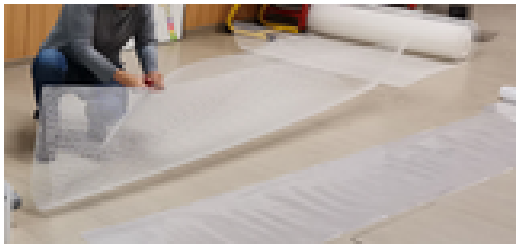
5. Verteiler mit Flachmaterial abschließen (pro Raum 1x)
   Dazu eine Scheibe mit 309 mm Durchmesser ausschneiden und einschweißen (Bild 15). Der verbleibende Rand kann als Flachflansch für den Ventilator-Ring verwendet werden.

Abbildung 14: Loch schmelzen und Flansch anschweißen

Abbildung 15: Scheibe als Abschluss ausschneiden und später anschweißen

10.6 Zentralrohr-Segmente

1. Gitter auf richtige Länge abschneiden
2. Schlauch je Seite etwa 5 cm länger abschneiden
3. Gitter zusammenrollen und in Schlauch schieben, dabei alle ca. 15 cm die beiden Kanten gegeneinander abstützen (Bild 16)
4. schließlich die passenden Verteiler einschieben. Montiert werden nachher die äußeren Segmente zuerst.



(a) a

(b) b

(c) c

Abbildung 16: (a) Gitter auf richtige Länge abschneiden, zusammenrollen und verweben, (b)(c) Gitter in Schlauch schieben

10.7 Absaugrohre

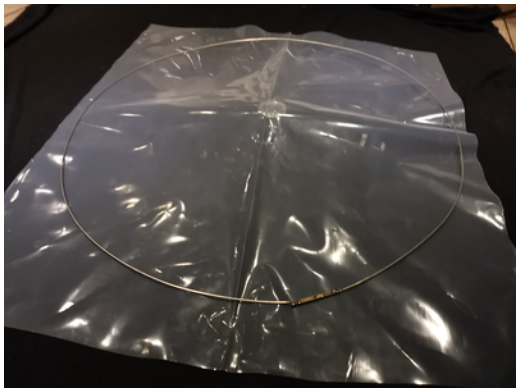
1. Gitter auf richtige Länge abschneiden (Bild 18a)

2. Schlauch je Seite etwa 5 cm länger abschneiden
3. Gitter zusammenrollen und in Schlauch schieben, dabei ineinander weben zwecks guter Stabilität (s. Zentralrohr)
4. Zum Abschluss an einer Seite einen HT-PP-Winkel mit Haube aufsetzen und einen passenden Draht (siehe 10.9) um den Winkel legen und leicht verdrillen.

10.8 Hauben

Die Hauben fangen den warmen Abluftstrom ein und leiten ihn Richtung Absaugrohr. Wichtig ist, dass die Haube schlussendlich einigermaßen waagerecht hängt.

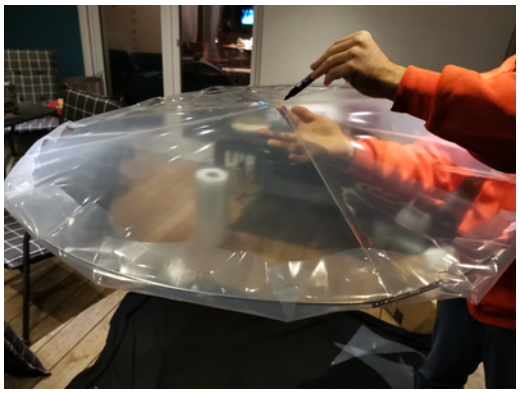
1. Die 3 m Edelstahlstäbe zu Ringen verschweißen, um einen ca. 90-95 cm durchmessenden Reif zu erhalten (Bild 17a).
2. 1 m x 1 m Stücke aus der Flachfolie schneiden (Bild 17a)
3. mittig unter die Folie ein kleines Glas oder ähnliches (Höhe ca 8 cm) stellen (Bild 17a)
4. Metallreif auf die Folie legen und mit einem Folienmarker die Kontur des Metallreifs auf die Folie übertragen (Bild 17a)
5. Metallreif und Glas entfernen und in 4-5 cm Abstand zur Markierung rundherum ausschneiden (Bild 17b).
6. Alle ca. 15 cm einen Schnitt Richtung Mitte bis zur Makierungslinie machen (Bild 17b).
7. Reif wieder auflegen, dann umlaufend die eingeschnittenen Segmente der Folie wieder bis zur Makierung umschlagen und festtackern (Bild 17c)
8. !!!Wichtig!!!! Schwerpunkt bestimmen (Bild 17d) und drumherum ein Loch mit Durchmesser 50 mm-60 mm schneiden (Bild 17e)
9. Vorsichtig die Folie über ein HT-PP-Winkel-Rohrstück schieben (Bild 17f).



(a) a

(b) b

(c) c



(d) d

(e) e

(f) f

Abbildung 17: (a) Flachfolie und Metallreif mit Schweißnaht für Haube + kleines Glas in Mitte, (b) Metallreif markieren + rund ausschneiden + Schnitt quer zur Markierung, (c) Segmente um Metallreif tackern, (d) Schwerpunkt der Haube suchen und markieren, (e) Loch aus Mitte schneiden und (f) Rohrstück durch die Mitte schieben.

10.9 Draht zuschneiden

Vor dem Aufhängen die Clips an den richtigen Punkten an der Decke befestigen und den Eisendraht zuschneiden.

- Das Zentralrohr sollte ca in 2,3 m bis 2,5 m Höhe hängen. Wir haben je Verteiler einen Draht genutzt. Die nötige Drahtlänge ergibt sich zu etwa: 2x(Deckenhöhe - 2,5 m)+106 cm. Das Drahtstück wird an beiden Enden um ca 3 cm zu einem einfachen Haken umgebogen. Beim Aufhängen wird eine Seite des Drahts in die entsprechende Deckenbefestigung eingehängt, unten um einen Verteiler herumgeführt, und dann auch das zweite Ende in die Deckenbefestigung eingehängt.
- Die Unterkanten der Hauben sollten möglichst nah über den Personen hängen, ohne diese beim Aufstehen oder im Alltag zu behindern. In den Schulen haben wir eine Höhe der Haubenunterkante von etwa 2,0 m angepeilt. Die Hauben mit Winkelstück haben selbst eine Höhe von ca. 20 cm und es werden wieder 3 cm an jedem Ende als Haken benötigt. So ergibt sich die Drahtlänge von Deckenhöhe - 1,9 m.

10.10 Aufhängen

Es hat sich als vorteilhaft herrausgestellt zunächst die Teile des Zentralrohrs von außen nach innen aufzuhängen, anschließend die Mittelsegmente einzusetzen und dann die Absaugrohre anzubringen. Nicht genutzte Öffnungen an den Verteilern müssen verschlossen werden.

10.11 Lüfter

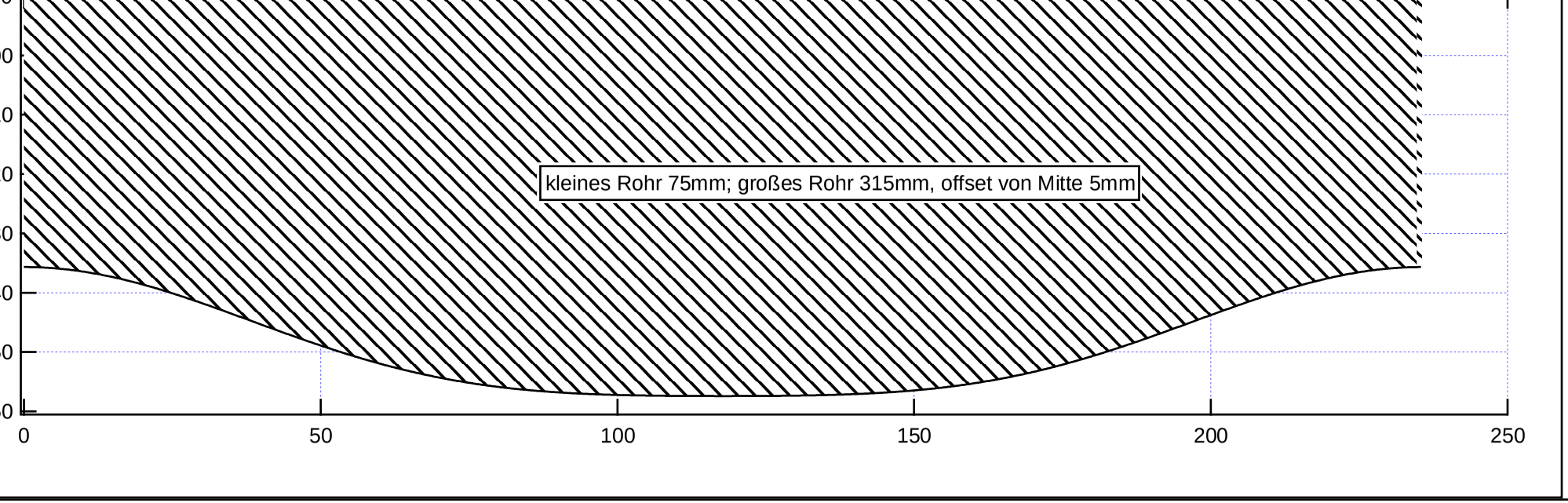
!!!ACHTUNG Änderungen an elektrischen Geräten nur bei eigener Eignung und nach Absprache mit den verantwortlichen Personen durchführen!!!

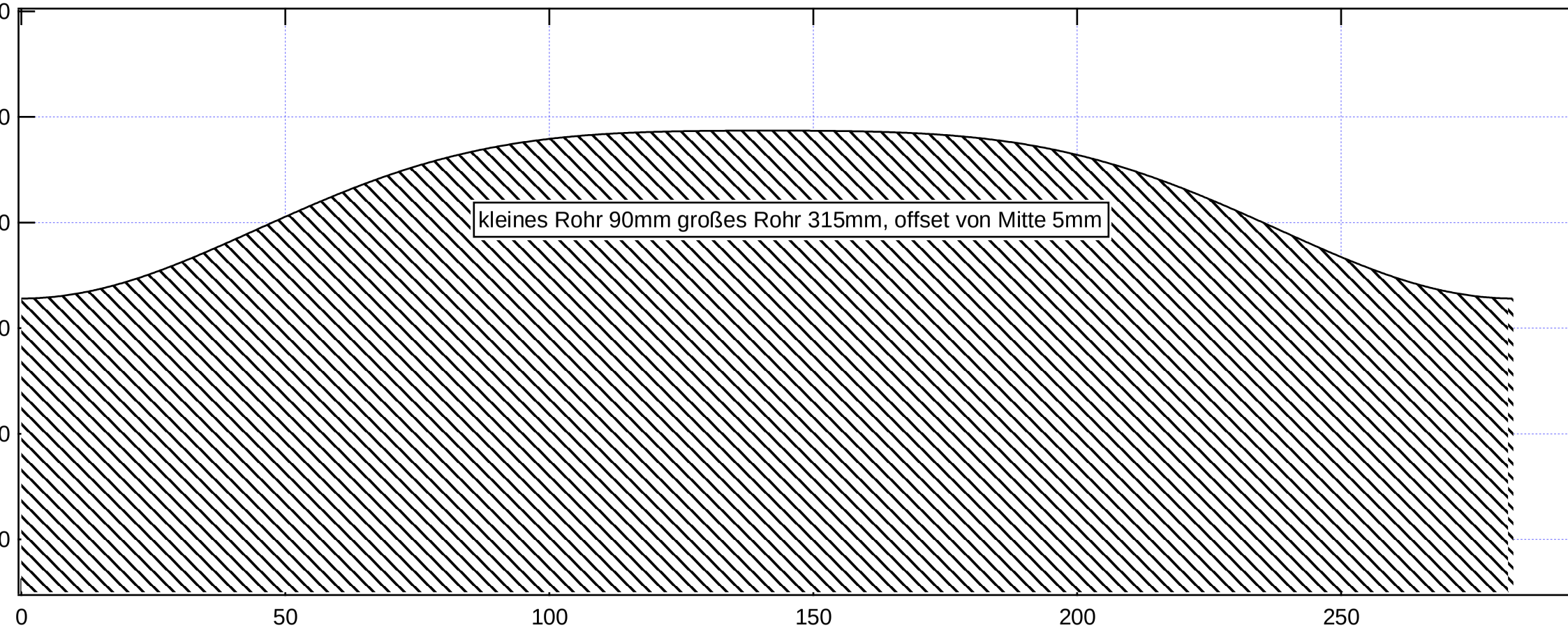
Bei Lüftern gibt es viele Alternativen. Wir haben uns für einen einfachen Tischventilator (Tristar ve-5953) aus Metall entschieden, der 30 cm Durchmesser hat und in 3 Stufen laufen kann. Um den Ventilator verwenden zu können muss er wie folgt modifiziert werden. Alternativ gibt es auch Axial-Rohr-Ventilatoren, die direkt in das Zentralrohr passen, aber noch eine Drehzahlregelung benötigen.

1. Motor vom Standfuß nehmen
2. Gitter auf richtigen Durchmesser abflexen
3. Flachmaterial schneiden 181 mm x 1000 mm
4. zu Rohrstück zusammenschweißen
5. Motor mit Kabelbinder an Rohrstück befestigen
6. vor dem Einbau ins Rohr auf Stufe 1 oder 2 stellen.

10.12 Fensteranschluss

Der Fensteranschluss ist sehr individuell. Am einfachsten ist es, von einer geeigneten Person eine Glasscheibe auf der richtigen Höhe durch ein Brett ersetzen zu lassen, sodass der Ventilator relativ ungehindert nach außen pusten kann. Andere Möglichkeiten sind die Benutzung von Fensterdichtungen, wie sie für mobile Klimageräte vertrieben werden, oder der Bau einer Kiste vor dem Fenster (siehe Bild 8)


kleines Rohr 75mm; großes Rohr 315mm, offset von Mitte 5mm
0
50
100
150
200
250


kleines Rohr 90mm großes Rohr 315mm, offset von Mitte 5mm
0
50
100
150
200
250

(a) a (b) b

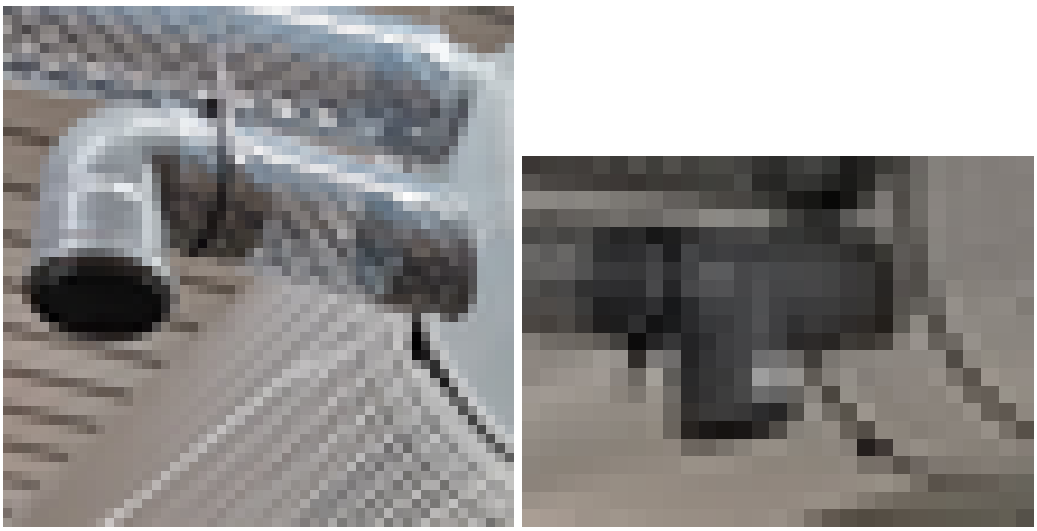
Abbildung 18: (a) Stützgitter PE N902 zuschneiden in 26 cm Streifen und (b) Stützgitter PE N903

(a) a (b) b

Abbildung 19: (a) Folienschlauch 500 mm 0,2 mm für große Rohre und (b) Folienschlauch 125 mm 0,2 mm für kleine Rohre

Abbildung 20: Kabelbinder zur Befestigung

Abbildung 21: Schweißdraht für Verteiler



(a) a (b) b

Abbildung 22: (a) HT-Winkel DN 75 87° und (b) HT-Abzweigung DN 75 87°

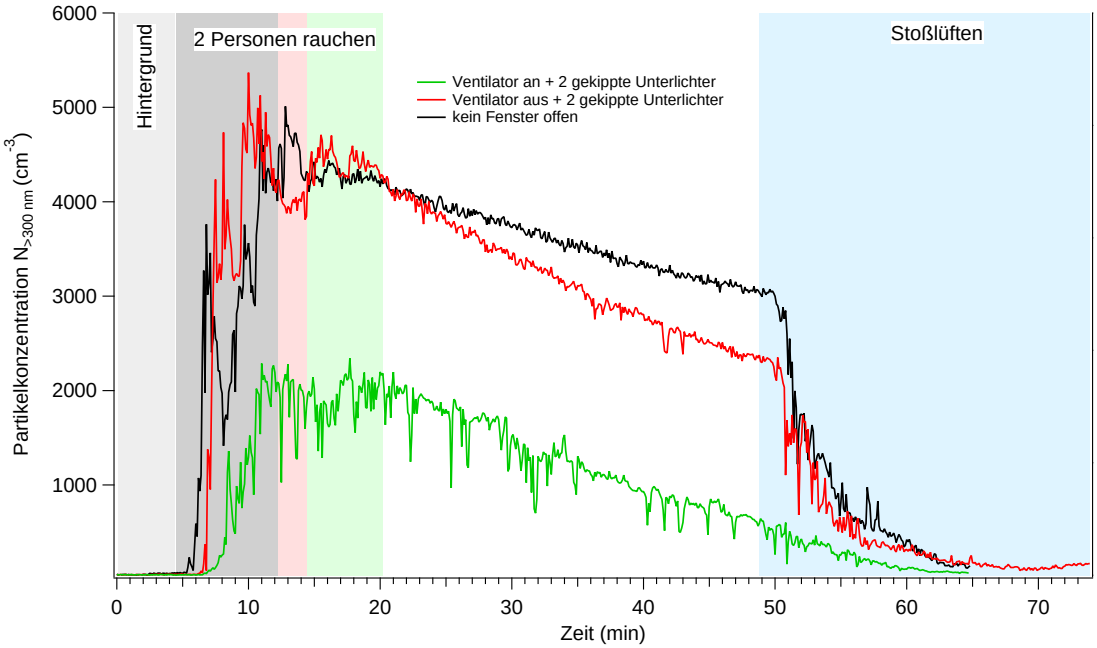


Abbildung 23: Aerosolmessungen zur Effizienz der Anlage an der IGS-Bretzenheim. Die Messungen wurde mit Rauchern in einem Klassenraum durchgeführt. In drei verschiedenen Szenarien haben jeweils zwei Raucher eine Zigarette geraucht. Dabei wurde die Aerosol-Konzentration im Raum auf Kopfhöhe gemessen. Durch den direkten Effekt der Anlage werden ca. 40% des erzeugten Aerosols direkt nach draußen transportiert, bevor sie sich effektiv in die Raumluft mischen.

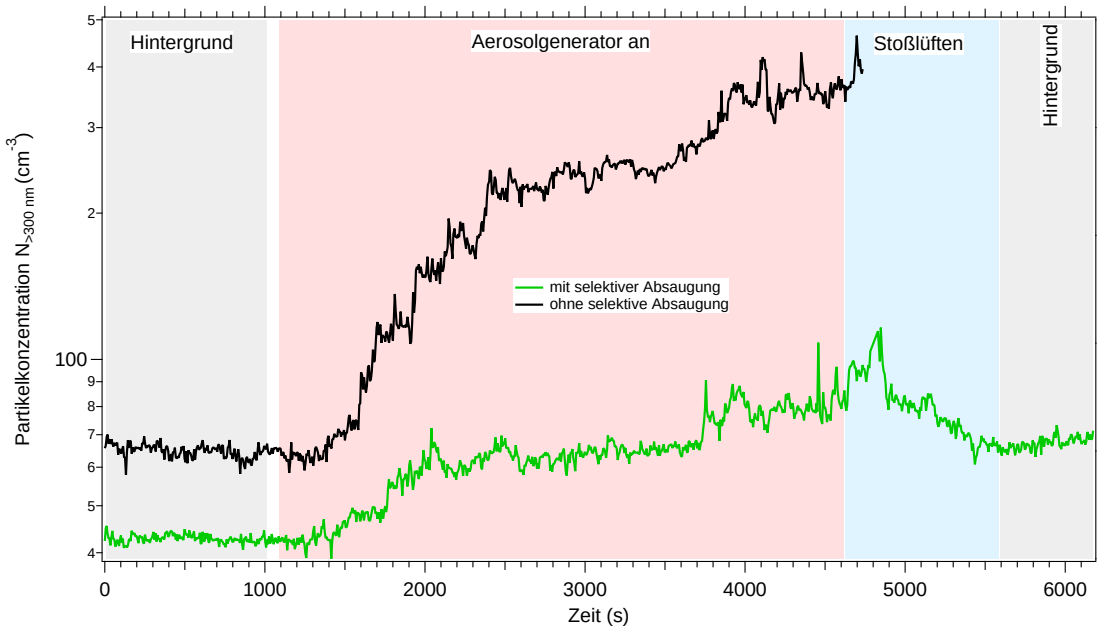


Abbildung 24: Aerosolmessungen zur Effizienz der Anlage an der Brunnenschule Mainz-Marienborn. Die Messungen wurde mit künstlich erzeugtem Salz-Aerosol das zusammen mit einer Wärmequelle in einer Kiste erzeugt wurde durchgeführt. Sitz die Aerosol/Wärmequelle unterhalb einer Haube steigt die Aerosol-Konzentration im Raum über die Dauer 1h 15m um ca. 40 /ccm. Stellt man den Generator ohne Abzug auf Steigt die Konzentration um ca 270 /ccm. Es wurde also ca 85% des Testaerosols direkt abgesaugt.

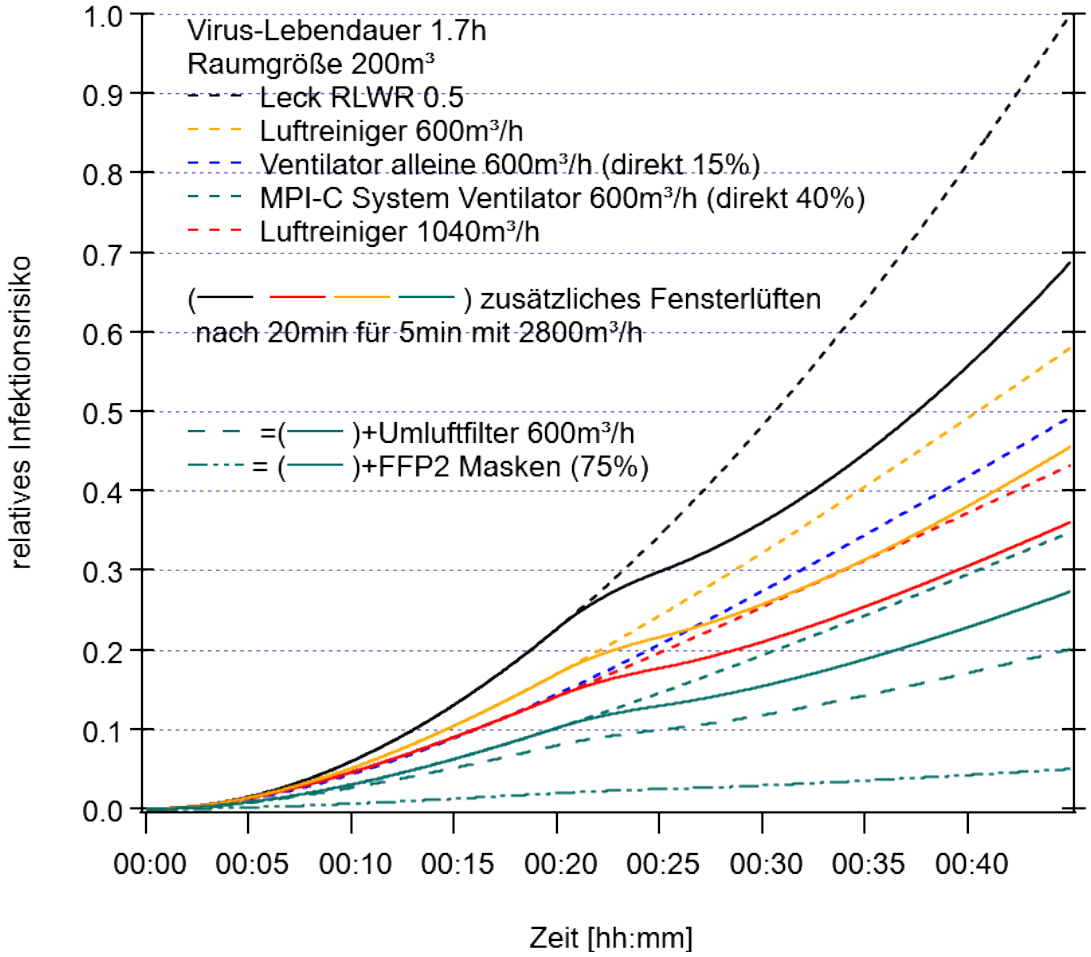


Abbildung 25: Infektionsrisiko bei verschiedenen Lüftungsszenarien Vergleich verschiedener Lüftungsszenarien über 45min hinsichtlich des Infektionsrisikos. Referenz ist ein Klassenzimmer mit geschlossenen Fenstern. Es wird davon ausgegangen, dass sich zu Beginn der Stunde noch keine Viren in der Raumluft befinden und infektiöse Partikel mit einer konstanten Rate in die Raumluft eingebracht werden. Für das Szenario mit Ventilator alleine wird ein direkt abgesaugter Anteil von 15% angenommen, was in etwa dem Verhältnis von ausgetauschter zu maximal im Raum umgewälzter Luft entspricht. Für das MPI-C System wird ein Anteil von 40% angenommen, dieser Wert wurde aus ersten Messungen mit Rauchern gewonnen.