

## 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<sub>2</sub>-Messungen wurden am zentralen Tisch der Anordnung 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 mit Nebelmaschinen) und eine CO<sub>2</sub>-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<sub>2</sub>-Messgerät (Gascard NH, Edinburgh

Instruments) geführt. Dadurch konnte an verschiedenen Positionen relativ zur Quelle und zur Absaugung die Aerosol- und die CO<sub>2</sub>-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 größenordnungsmäßig ca. 10 cm/s, was im Vorfeld zur Dimensionierung der Anlage genutzt wurde (s.o.).
- Die Strömungsgeschwindigkeiten in den 6 langen Ansaugrohren betragen 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<sub>2</sub>-Messung im Zentralrohr vor dem Ventilator wurden die Raumlftwechselraten bei verschiedenen Ventilator Drehzahlen 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 Raumlftwechselrate von 1,5/h gemessen, siehe Bild 1.

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 Raumlft (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 Raumlft (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.

Die Messung erfolgte in 3 Blöcken

1. Aerosol-Messung ohne Abzugshaube bis die Konzentration in der Raumlft 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 Raumlft-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.)

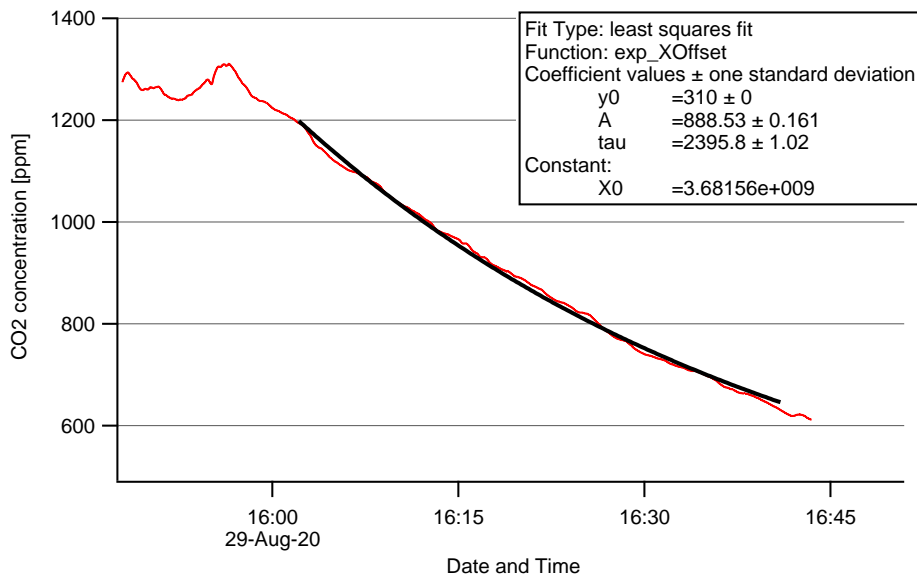


Abbildung 1: Messung der Raumlftwechselrate mit CO<sub>2</sub>, der exponentielle Fit ergibt 3600 s/h / 2423 s = ca. 1.5/h.

### 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 Raumlftwechselrate von 1,5/h bleibt ca 1/h, siehe Bild 3.

### 5.2.2 Effizienz ohne Haube

Im ersten Messblock ohne Abzugshaube (Fig. 4) wurde in verschiedenen Abstnden 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 lsst sich Folgendes beobachten:

- Die unterschiedlichen Abstnde des Probeneinlasses zum Zentrum des Absaugrohres ergeben keine signifikanten Unterschiede in der Raumlft-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.

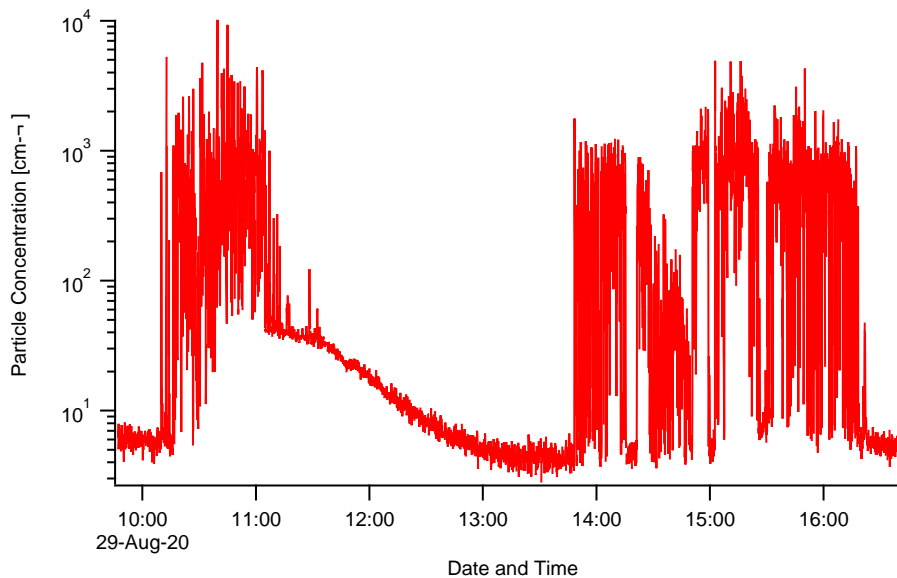


Abbildung 2: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel

- Beim Beprobieren des Zentrums der Absaugöffnung werden im Maximum ca. 1.000 Aerosolpartikel/cm<sup>3</sup> 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<sup>3</sup> \* 9.000 cm<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>. Gemessen wurden am Ende des ersten Messblocks um 11:30 aber nur eine stabile Raumluftkonzentration von ca. 30 Partikeln/cm<sup>3</sup>. 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<sup>3</sup> vor der Aerosolerzeugung (10:00 h) abgezogen.

### 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.

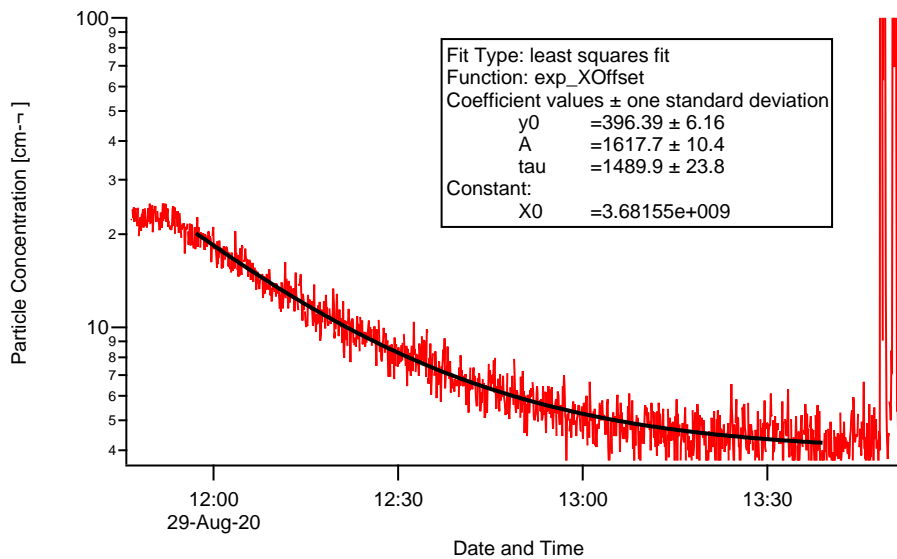


Abbildung 3: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel, Aerosolgenerator abgeschaltet

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<sup>3</sup> gemessen. Hier würde man mit nicht selektiver Absaugung eine steady-state Konzentration von ca. 40 Partikeln/cm<sup>3</sup> im Hintergrund erwarten. Gemessen wurden im Hintergrund im Mittel aber nur ca. 7/cm<sup>3</sup>, was sich um ca. 1/cm<sup>3</sup> 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 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 die quantitative Absaugung der Partikel auch bei Störungen der Luftbewegung z.B. durch Winddruck auf das spaltoffenen Unterlicht im Raum erheblich unterstützt.

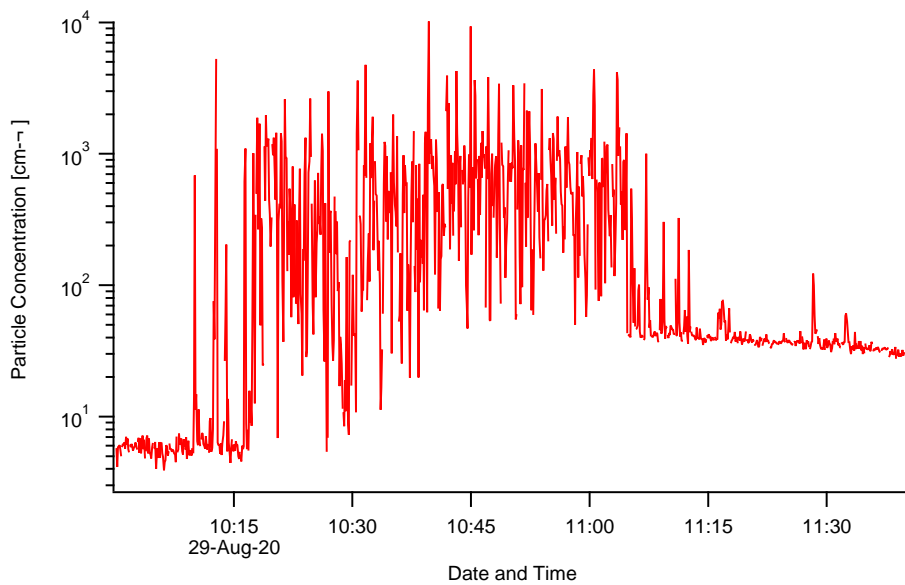


Abbildung 4: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel, ohne Abzugshaube

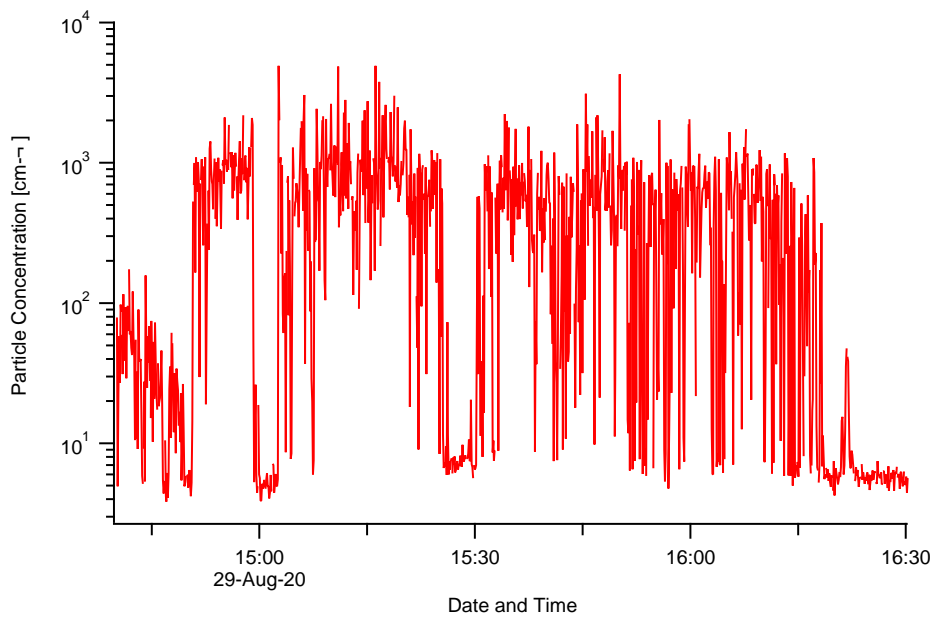


Abbildung 5: Gesamtkonzentration der durch den OPC gemessenen Partikel, mit Abzugshaube

### 5.3 Simulationen

Im Verlauf der Messungen haben wir auch überlegt, inwieweit Heizung und kalte Fensterfront im Winter die Konvektionsdynamik im Klassenraum stören könn-

ten. 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 eher unterstützt als abgeschwächt.

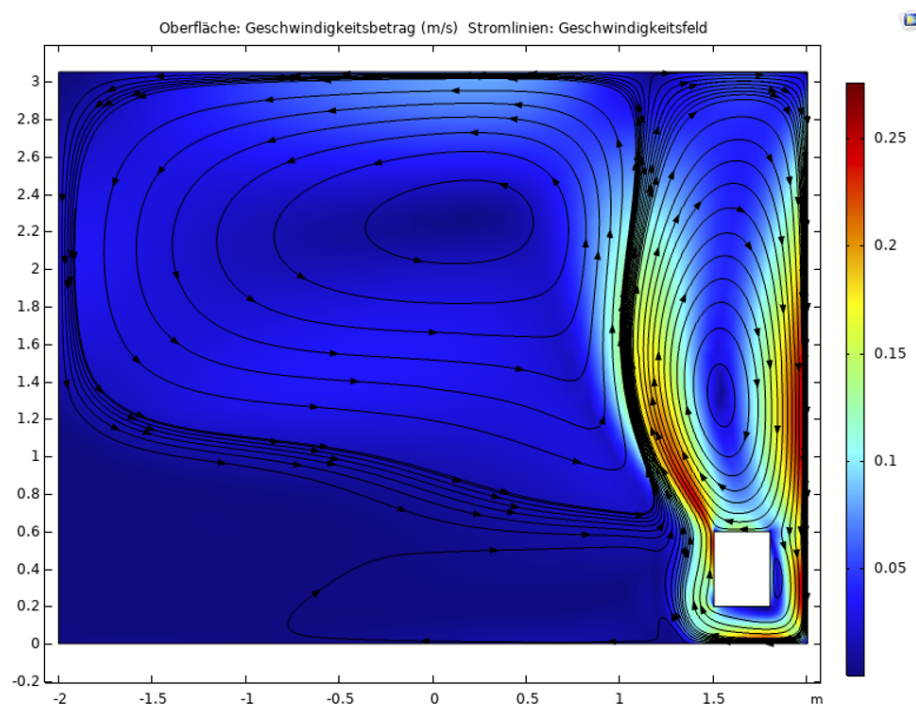


Abbildung 6: Simulation der Raumluftrömung Heizung/Fenster ohne Schüler

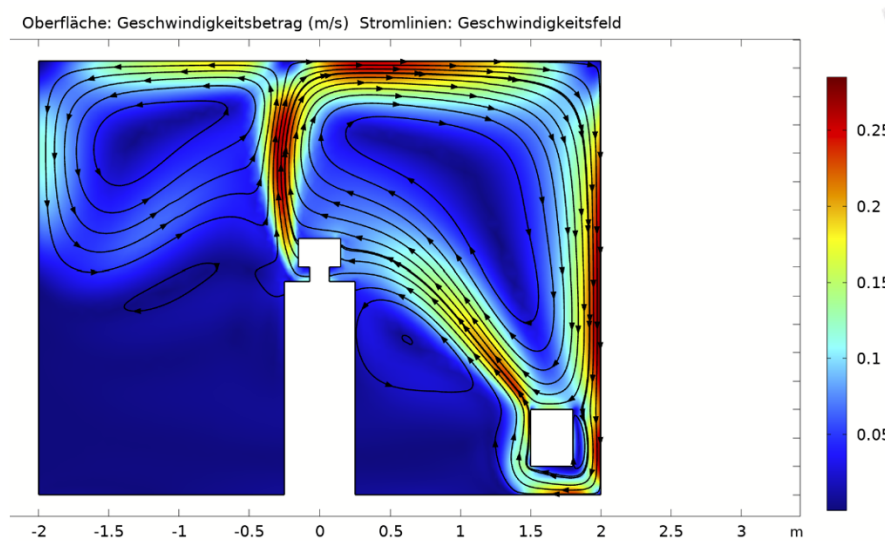


Abbildung 7: Simulation der Raumluftströmung Heizung/Fenster mit Schüler

## 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 um 90%) und motivieren uns, ein massentaugliches System zu entwickeln.