

# Was kann die freie Lüftung zur Reduktion einer Virenlast in Schulräumen leisten?

W. Raatschen

**ZUSAMMENFASSUNG** Dieser Beitrag liefert quantitative Aussagen über die Virenlastreduktion bei Stoßlüftung von unterschiedlich langer Dauer und stellt sie vergleichend den Ergebnissen gegenüber, die durch das Aufstellen von CO<sub>2</sub>-Ampeln und durch dezentrale Filtersysteme erzielt werden. Vergleichsparameter sind die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die potenzielle Virenexposition im Raum. In einem kleinen Büroraum und einem Klassenraum wurde bei Windstille und einseitiger Fensteröffnung der Luftaustausch ohne Querlüftung gemessen. Dieser bildet sich nur aufgrund von Temperaturunterschieden aus. Die Untersuchungen erfolgten für Fensteröffnungsdauern von 1 bis 4 min mit der GC-ECD-Tracergasmesstechnik (GC-ECD = Gaschromatograph mit Electron Capture Detector). Bei der Untersuchung im Klassenraum wurde an einem Sitzplatz ein zweites Tracergas zeitlich konstant ausgebracht, um die durch einen infizierten Schüler verursachte Virenausbreitung im Raum nachzubilden. Die verwendete Tracergasmesstechnik ermöglicht eine einfache und engmaschige Probenahme an vielen Stellen im Raum, wodurch die zeitliche und örtliche Virenausbreitung analysiert werden kann. So lassen sich auch Aussagen über die räumliche Verteilung und den Anstieg der Virenkonzentrationen im Raum nach dem Schließen der Fenster machen. Mit den Messdaten wurde ein Simulationsprogramm kalibriert, um die Wirksamkeit verschiedener Lüftungsvarianten der eines Raumluftfiltergeräts gegenüberzustellen.

## 1 Einleitung

Zurzeit findet eine Diskussion statt, welche Lüftungsmethode in Klassenräumen am besten geeignet ist, um eine potenzielle Virenlast effizient zu reduzieren. Eine große Lücke ist dabei das Wissen um die Wirksamkeit der Stoßlüftung. Wie viel Luft wird bei der Öffnung eines oder mehrerer Fensterflügel in typischen Klassenräumen ausgetauscht? Ziel der Untersuchungen war es zudem, den ungünstigsten Fall einer freien Lüftung zu bewerten, d. h. den ohne Windeinfluss. Wind vergrößert die ausgetauschten Luftmengen, weshalb die Betrachtungen und Messungen an windstillen Tagen gemacht wurden. Zudem blieben Türen geschlossen, damit keine Querlüftungseffekte den freien Luftaustausch erhöhen.

Die Messergebnisse sind nicht auf alle Klassenräume übertragbar, weil sich Raumgröße und Belegung, aber insbesondere die Fläche der offenbaren Fenster unterscheiden.

Der Beitrag zeigt eine Methodik, wie ein Vergleich verschiedener Maßnahmen durchgeführt werden kann. Er zeigt auch, welches Potenzial die freie Lüftung hat und dass es über einfache Tracergasmessungen möglich ist, wichtige Kennwerte wie Lüftungsdauer und Lüftungshäufigkeit bei verschiedenen Außentem-

## To what extent can plug ventilation reduce viral loads in classrooms?

**ABSTRACT** This paper provides quantitative information on the virus load reduction with plug ventilation of different durations and compares them with the results obtained by setting up CO<sub>2</sub> traffic lights and decentralized filter systems. Comparison parameters are CO<sub>2</sub> concentration and potential virus exposure in the room. In a small office room and in a classroom, the air exchange without cross-ventilation was measured when there was no wind and the windows were opened on one side only. Thus, ventilation is induced only due to temperature differences. The investigations were carried out for window opening durations of 1 min to 4 min using the Gas Chromatograph with Electron Capture Detector (GC-EC) tracer gas measurement technique. During the test in the classroom, a second tracer gas was constantly injected at a seat in order to simulate the spread of viruses in the room caused by an infected pupil. The tracer gas measurement technique used allows for easy and close-meshed sampling at many locations in the room, making it possible to analyze the temporal and spatial spread of viruses. This also allows conclusions to be made about the spatial distribution and increase in virus concentrations in the room after windows are closed again. A simulation program was calibrated with the measurement data in order to compare the effectiveness of different ventilation variants with that of a room air filtration unit.

peraturen zu ermitteln und das Infektionsrisiko bei freier Lüftung dem Infektionsrisiko mit Raumluftfiltergerät gegenüberzustellen.

## 2 Verwendete Tracergasmesstechnik

Um zu untersuchen, wie sich Schadstoffe in einem Raum ausbreiten, ist es notwendig, an möglichst vielen Stellen zur gleichen Zeit Konzentrationen messen zu können. Aus den aktuellen Forschungsergebnissen ist bekannt, dass Coronaviren an Aerosolpartikel gebunden übertragen werden. Große Partikel ( $> 5 \mu\text{m}$ ) zeigen bei den üblichen Raumluftgeschwindigkeiten bei geschlossenen Türen und Fenstern ein Sedimentationsverhalten und sinken zu Boden. Sie verhalten sich deshalb anders als Luftmoleküle und Tracergase. Man spricht hier von Tröpfcheninfektion oder direkter Infektion. Diese kann nicht über Tracergasmessungen nachgebildet werden.

Es wurde nachgewiesen, dass beim Atmen, Sprechen und Husten 80 % der gefundenen Aerosolpartikel kleiner als  $1 \mu\text{m}$  und über 99,9 % kleiner als  $5 \mu\text{m}$  sind und damit als luftgetragen betrachtet werden können [4], das heißt, der Virentransport in einem Raum ist identisch mit dem Luft- oder Tracergastransport. Eine Infektion über luftgetragene Viren bezeichnet man als indi-



**Bild 1.** Mitfahrerin in einem Pkw mit Injektionsschlauch vor dem Mund und Injektionsapparatur im Vordergrund. Bild: Fa. TracerTech

rekte Infektion. Im Folgenden wird ausschließlich nur das Infektionsrisiko bei indirekter Infektion betrachtet.

Viren werden über Aerosolpartikel beim Ausatmen, Niesen oder Husten mit einem gewissen Impuls in die Raumluft geschleudert. Möchte man diesen Emissionsimpuls bei der Messung mit einem Tracer gas nachbilden, dann müssen dessen Volumenstrom sehr gering und seine Dichte identisch mit der von Luft sein und das Gas muss entsprechend der Aktivität (Atmen, Husten, Niesen) des Infizierten in den Raum strömen. Dies wurde bei den vorgestellten Untersuchungen dadurch erreicht, dass das Tracer gas über einen kleinen 3-mm-Schlauch direkt vor dem Mund der Testperson ausströmte, damit es direkt mit der Atemluft oder entsprechend über einen Hust- oder Niesvorgang in den Raum befördert wird.

Die Analyse mit einem Gaschromatographen (GC) mit Electron Capture Detektor (ECD) ermöglicht Messungen von Schwefelhexafluorid ( $\text{SF}_6$ ) und Perfluorcarbon-Tracern im Konzentrationsbereich von wenigen ppt bis 100 ppb. Die Raumluftkonzentrationen sind gering, weshalb dieses in Richtlinie VDI 4300 Blatt 7 beschriebene Verfahren auch in Schulen, Kindergärten und Altersheimen eingesetzt werden darf. Die geringen Konzentrationen erfordern die Freisetzung nur sehr geringer Tracer gasmengen, z. B. für eine Luftwechselfmessung in einem typischen Klassenraum nur ca. 5 bis 10 ml.

Ein weiterer Vorteil liegt in dem nur geringen erforderlichen Probenvolumen von 10 ml, das einfach mit einer 60-ml-Plastikspritze (z. B. aus dem Medizinbedarf) genommen werden kann. So lassen sich in kurzer Zeit an vielen Stellen im Raum Proben für die anschließende Laboranalyse nehmen. Die GC-ECD-Tracergastechnik ermöglicht die gleichzeitige Verwendung von  $\text{SF}_6$  und 3 bis 5 Perfluorcarbon-Tracern, die in einem Vorgang analysiert werden. So lässt sich die Ausbreitung von Viren aus mehreren verschiedenen Quellen nachbilden und die Wirksamkeit von Lüftungsmaßnahmen mit nur einem Versuch prüfen.

Für die Simulation eines infizierten Schülers wird eine kontinuierliche Tracer gasquelle benötigt. Ein Tracer gasvolumenstrom von 20 ml/min ist bei der Analyse mit GC-ECD ausreichend, um das Ausbreitungsmuster des Tracers respektive von luftgetragenen Viren in Klassenräumen zu untersuchen. Die Injektionskonzentration des Tracers, hier Perfluordimethylcyclobutan (PDCB), liegt bei einem Volumenanteil von 0,21 % in Stickstoff ( $\text{N}_2$ ). Damit ist das Tracer gasgemisch nahezu identisch mit der Dichte der Raumluft. Eine 1-l-Gasflasche reicht aus, um Messungen während mehrerer Stunden durchführen zu können. Die Injektionseinheit ist transportabel, batteriebetrieben und somit auch netzunabhängig einsetzbar.

### 3 Versuchsplanung

Die Luftströmung bei geöffnetem Fenster ist inhomogen und es ist entsprechend aufwendig, die Ein- und Ausströmung zeitlich und örtlich zu messen. Zur Vermessung einer Stoßlüftung ist das aber auch nicht notwendig. Entscheidend ist es zu wissen, wieviel Luft während einer festgelegten Fensteröffnungszeit in den Raum hinein- und hinausströmt. Dies lässt sich folgendermaßen messen:

- Man bringt bei geschlossenen Fenstern eine bestimmte Menge Tracer gas ein und wartet oder durchmischt aktiv, bis sich das Tracer gas homogen in der Raumluft verteilt hat. Über lokale Messungen im Raum wird diese Voraussetzung überprüft.
- Dann werden die Fenster geöffnet und es findet ein Luftaustausch statt.
- Nach einer festgelegten Zeit werden alle Fenster wieder geschlossen.
- Nach Fensterschließung ist das im Raum verbliebene Tracer gas inhomogen in der Raumluft verteilt. Man kann es jetzt wieder aktiv vermischen oder einige Minuten abwarten, bis die Durchmischung wieder homogen ist. Jetzt werden wieder mehrere lokale Proben im Raum genommen, um die vollständige Durchmischung nach Fensterschließung zu überprüfen. Über die Anfangs- und Endkonzentration kann jetzt sehr genau das ausgetauschte Luftvolumen während dieser Zeit berechnet und mit Hilfe der Öffnungsdauer auch eine Luftwechselfzahl (LWZ) ermittelt werden.
- Nach dem Schließen der Fenster dauert es noch eine gewisse Zeit, bis die Raumluft wieder gut durchmischt ist. Während dieser Zeit nimmt die Konzentration entsprechend dem Luftwechsel (LW) bei geschlossenen Fenstern geringfügig ab. Dies lässt sich im Prinzip korrigieren, wenn die LWZ bei geschlossenen Fenstern zuvor gemessen wurde, ist aber hier vernachlässigbar.
- Die Simulation der Virenemission erfolgt über eine kontinuierliche Tracer gasemission aus einer Gasflasche, wobei der gewünschte Tracer gasvolumenstrom mit einem Durchflussregler eingestellt und über einen Schlauch direkt vor dem Mund des

Probanden ausgebracht wird. **Bild 1** zeigt beispielhaft eine Probandin bei einem ähnlichen Versuch in einem Pkw.

## 4 Versuchsdurchführung

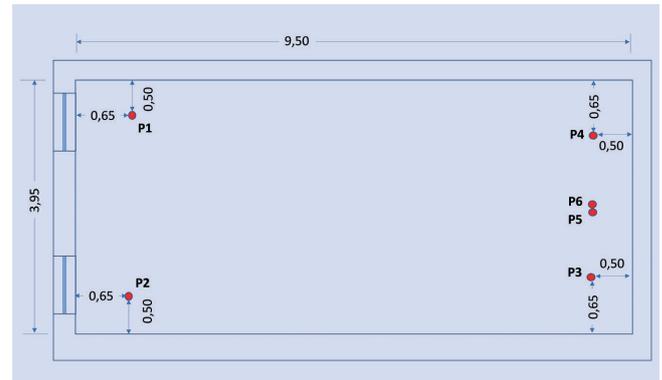
Die erste Messreihe wurde in einem Büroraum ohne lokale Emission durchgeführt, die zweite in einem unbelegten Klassenraum mit einer lokalen Quelle.

### 4.1 Büroraum

In dem Raum mit einem Raumvolumen von  $92 \text{ m}^3$  sind sechs Messstellen verteilt. Die genauen Positionen sind **Bild 2** zu entnehmen. Während P1 bis P4 jeweils in der Aufenthaltszone ( $h = 1,25 \text{ m}$ ) liegen, sind P5 in  $2,1 \text{ m}$  Höhe in der Mitte des hinteren Bereiches und P6 in Bodennähe  $0,2 \text{ m}$  über dem Boden angeordnet. Beide Fenster links werden zur Stoßlüftung geöffnet. Jedes Fenster hat eine Breite von  $0,82 \text{ m}$ , eine Höhe von  $1,43 \text{ m}$  und liegt  $0,53 \text{ m}$  oberhalb des Fußbodens. Die Raumhöhe beträgt  $2,45 \text{ m}$ . Es wurden drei Versuche durchgeführt: bei 1 min, bei 2 min und bei 3 min Fensteröffnungszeit. Beim ersten Versuch wurde nach Fensterschließung noch ca. 5 min gewartet, anschließend die Raumluft manuell durchmischt und Proben genommen. Beim 2. und 3. Versuch wurde so lange gewartet, bis sich die Raumluft ohne zusätzliche manuelle Vermischung homogenisiert hatte. Das Wetter war weitgehend windstill und die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen betrug jeweils  $10 \text{ K}$ , bei Versuch 1 und 2 war die Temperatur innen  $21 \text{ }^\circ\text{C}$  und außen  $11 \text{ }^\circ\text{C}$ , bei Versuch 3 innen  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  und außen  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Raum hatte Fußbodenheizung, so dass es nur ein geringes Temperaturprofil über der Raumhöhe gab und konvektive Prozesse im Raum gering waren.

**Bild 3** zeigt eine Anfangskonzentration des Tracergases von  $20,5 \text{ ppb}$  mit  $4 \%$  Standardabweichung, was auf eine gute Durchmischung hinweist. Eine Minute lang waren beide Fensterflügel  $90^\circ$  geöffnet. Danach wurden die Konzentrationen an den verschiedenen Messpunkten ermittelt.

Die kalte Außenluft strömt im unteren Bereich der Fenster ein. Deshalb ging auch die Konzentration bei P6 schnell nach unten und glich sich dann allmählich an. Der Messpunkt P5 unterhalb der Decke fiel dagegen nur langsam ab. Die Endkonzentration lag nach einer Minute bei  $14,3 \text{ ppb}$ . Der Luftwechsel während



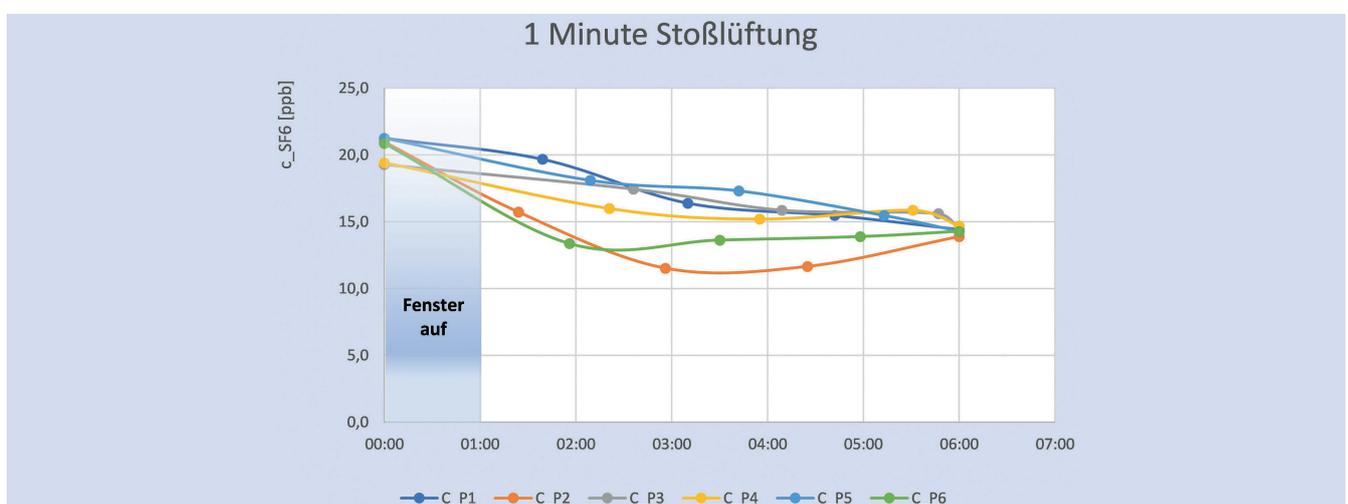
**Bild 2.** Büroraum mit Messstellen. Bild: Fa. Tracer Tech

dieser kurzen Öffnungszeit betrug  $21,6 \text{ h}^{-1}$ , der mittlere ein- und ausströmende Luftstrom berechnete sich zu  $2001 \text{ m}^3/\text{h}$ , wobei während der einminütigen Fensteröffnung insgesamt  $33,3 \text{ m}^3$  einströmten. Damit wurde über diese eine Minute Stoßlüftung die simulierte Virenbelastung von  $100 \%$  auf  $70 \%$  reduziert.

Der Versuch wurde mit 2 min Stoßlüftung wiederholt (**Bild 4**). Hier waren der steile Abfall von P6 und der langsame Abfall bei P5 noch deutlicher ausgeprägt. 10 min nach Fensterschließung hatten sich die Raumluftkonzentrationen wieder nahezu ausgeglichen. Insgesamt ist die Raumluftkonzentration von anfangs  $20,0$  auf  $9,8 \text{ ppb}$  abgefallen. Die mittlere LWR berechnet sich jetzt zu  $21,5 \text{ h}^{-1}$ , der mittlere Luftvolumenstrom zu  $1996 \text{ m}^3/\text{h}$  und die während der 2 min ausgetauschte Luftmenge zu  $66,5 \text{ m}^3$ . Damit ist die hypothetische Virenbelastung im Raum auf  $49 \%$  durch die Lüftung abgefallen.

Die Situation nach 3 min zeigt **Bild 5**. Die Anfangskonzentration fiel von  $18,8 \text{ ppb}$  auf  $6,63 \text{ ppb}$ , der mittlere Luftwechsel betrug  $20,9 \text{ h}^{-1}$ , der mittlere Volumenstrom  $1931 \text{ m}^3/\text{h}$  und die ausgetauschte Luftmenge im Raum erhöhte sich auf  $96,5 \text{ m}^3$ . Nach 3 min Stoßlüftung wurde eine Abnahme von  $100 \%$  auf  $35 \%$  erzielt.

Die Messungen zeigen, dass die in den Raum einströmenden Luftmengen zeitlich nahezu konstant bleiben. Die während der kurzen Zeit etwas abfallende Raumtemperatur hat keine messbare Auswirkung auf den Luftaustausch gezeigt.



**Bild 3.** Konzentrationsverläufe an verschiedenen Stellen im Raum nach 1 min Stoßlüftung. Bild: Fa. Tracer Tech

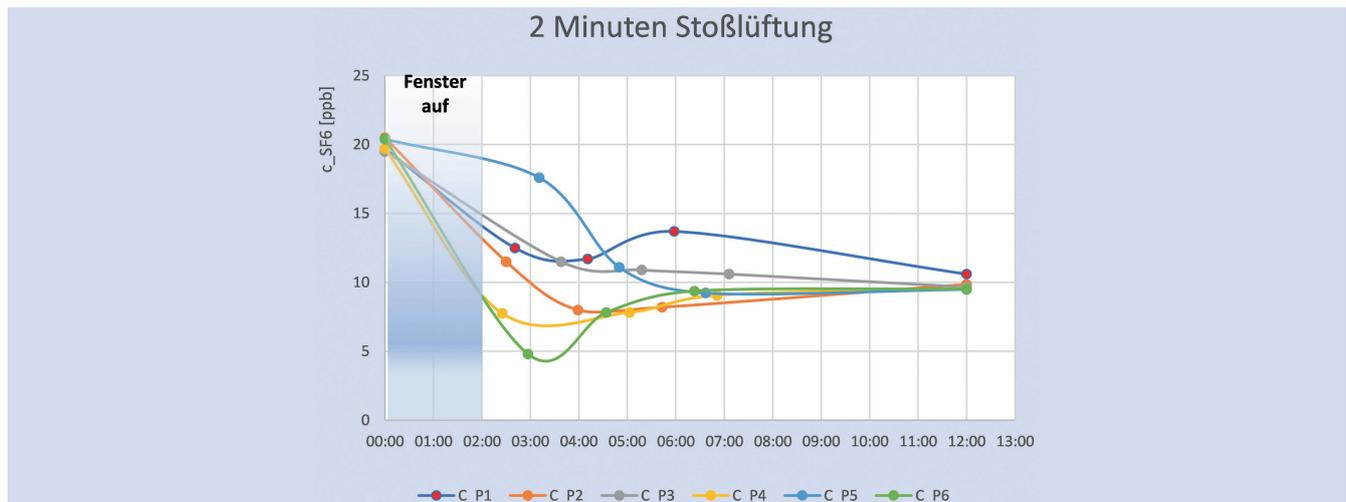


Bild 4. Konzentrationsverläufe an verschiedenen Stellen im Raum nach 2 min Stoßlüftung ohne manuelle Durchmischung. Bild: Fa. Tracer Tech

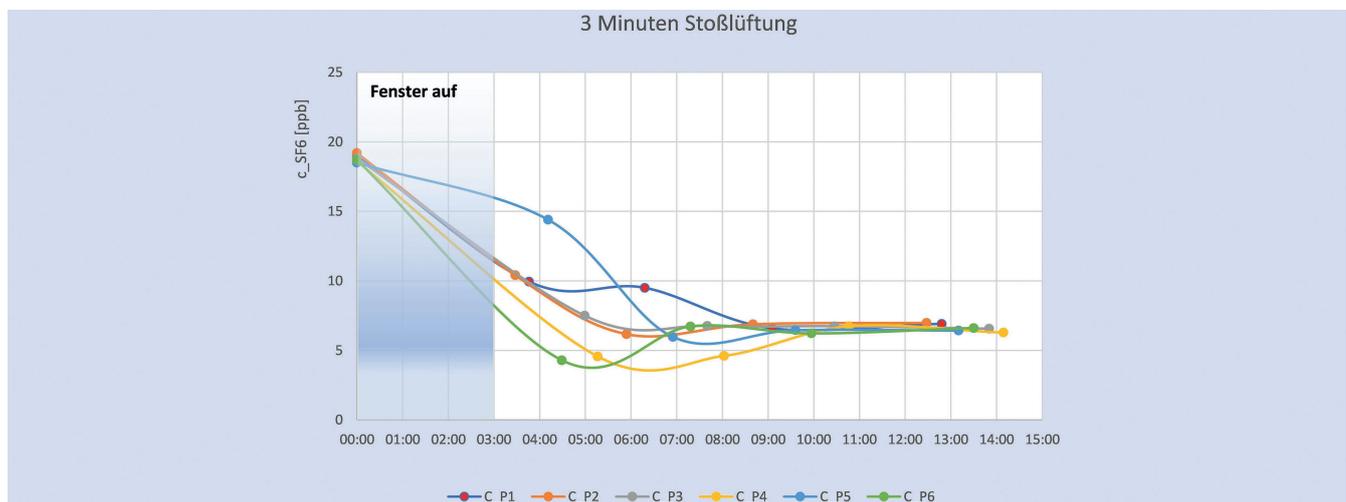


Bild 5. Konzentrationsverläufe an verschiedenen Stellen im Raum nach 3 min Stoßlüftung. Bild: Fa. Tracer Tech

Tabelle 1. Luftaustauschkennwerte für verschiedene Stoßlüftungsdauern.

Stoßlüftungsdauer [min]	LWZ [h <sup>-1</sup> ]	Q [m <sup>3</sup> /h]	V <sub>ein</sub> [m <sup>3</sup> ]	V <sub>ein,korr</sub> [m <sup>3</sup> ]	Virenlastreduktion [%]
1	21,6	2,001	33,3	30,5	70
2	21,5	1,991	66,5	61,9	49
3	20,9	1,931	96,6	93,7	35

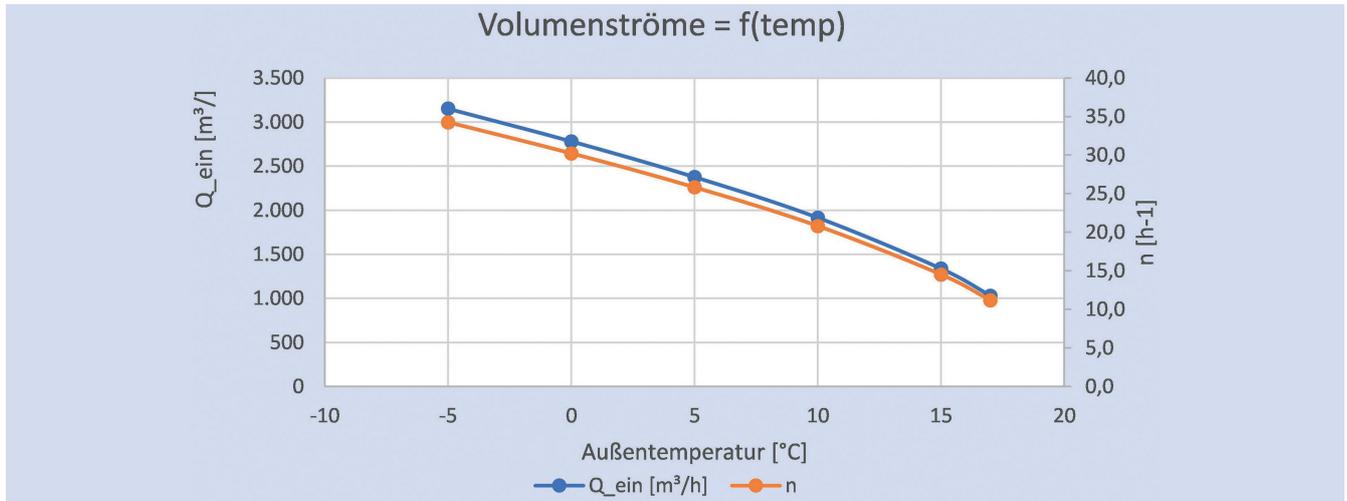
Die LWZ dieses Raumes bei geschlossenen Fenstern wird zu  $0,30 \pm 0,03 \text{ h}^{-1}$  ermittelt, das heißt, es strömten  $28 \text{ m}^3/\text{h}$  Luft bei geschlossenen Fenstern in diesen Raum hinein. In den 5 bis 10 min, die nach Fensterschließung bis zur Endkonzentrationsbestimmung verstrichen waren, ist somit ein Volumen zwischen  $2,3$  und  $4,6 \text{ m}^3$  in den Raum nachgeströmt, mit dem die gemessenen Luftmengen im Prinzip noch korrigiert werden müssten. **Tabelle 1** zeigt alle Kenndaten im Überblick.

### 5 Stoßlüftung bei anderen Außenlufttemperaturen

Kalibriert man ein Simulationsprogramm mit diesen Messergebnissen, so kann man mit guter Genauigkeit die Luftaustau-

schraten bei veränderlichen Außenlufttemperaturen berechnen. In **Bild 6** ist dies für die durchgeführten Messungen dargestellt. Diese Volumenströme gelten nur für kurze Stoßlüftungszeiten von wenigen Minuten. Nach längeren Öffnungszeiten würde sich die Raumlufttemperatur merklich abgekühlt haben, wodurch sich dann auch die Volumenströme reduzieren. Diese großen Zeitspannen sind aber bei einer Stoßlüftung nicht von Interesse.

Bild 6 zeigt, dass der Luftaustausch bei Windstille mit geringer werdendem Temperaturunterschied zwischen innen und außen gegen null geht, bei größer werdender Differenz aber stetig ansteigt. Ist z. B. eine 5-minütige Lüftung bei  $10 \text{ °C}$  Außenlufttemperatur ausreichend, so sind für die gleiche Reduktion bei  $0 \text{ °C}$  nur noch  $3,4 \text{ min}$  und bei  $-5 \text{ °C}$  nur noch  $3 \text{ min}$  Lüften nötig. Kennt man diesen Zusammenhang, dann ist auch das Behaglich-



**Bild 6.** Luftwechselzahlen und eintretende Volumenströme bei einseitiger Stoßlüftung und einer Raumlufttemperatur von 20 °C. Bild: Fa. TracerTech

keitsproblem bei sehr geringen Außenlufttemperaturen etwas relativiert, weil weniger lang gelüftet werden muss, um eine bestimmte Virenlastreduktion zu erreichen.

## 6 Messung in einem Klassenraum

Bei der Messung waren keine Schüler anwesend. Der Klassenraum ist ein beidseitig mit Fenstern ausgestatteter Eckraum, wobei die beiden Fenster auf der schmalen Seite während der Messung immer geschlossen blieben und nur die sechs Fensterflügel auf der Längsseite zeitweise zur Stoßlüftung geöffnet wurden. **Bild 7** und **Bild 8** zeigen das Klassenzimmer, in dem 24 Grundschüler unterrichtet werden.



**Bild 7.** Foto des Klassenraums mit Blick auf die schmale Fensterfront, rechts geöffneter Flügel der Längsfront. Bild: Fa. TracerTech

### 6.1 Versuchsaufbau

**Bild 9** zeigt eine schematische Darstellung des Klassenraums mit den Messstellen. Die Messpunkte P1 bis P4 liegen an den Eckpunkten der Tischkonstellation. P5 liegt 0,25 m oberhalb des Fußbodens an der gegenüberliegenden Wand der Fensterfront, und P6 liegt in einer Höhe von 2,85 m. Ein weiterer Messpunkt P7 befindet sich in Kopfhöhe an der Tafel. Die Raumlänge beträgt 10,2 m, die Breite 6,5 m und die Höhe 3,5 m, woraus sich eine Fläche von 66,3 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen von 232 m<sup>3</sup> ergeben. In der Mitte der Schülertische steht eine Tracer-Injektionsapparatur (**Bild 10, Punkt I 1**), die in Sitzhöhe den PDCB-Tracer mit 26,4 ml/min ausströmen lässt.



**Bild 8.** Foto des Klassenraums mit Blick auf die lange Fensterfront mit geöffneten Flügeln. Bild: Fa. TracerTech

### 6.2 Versuchsdurchführung

Bei geschlossenen Fenstern und geschlossener Tür wurde 8 ml des ersten Tracers (SF<sub>6</sub>) in den Raum injiziert und gut mit der Raumluft vermischt. Nach ca. 10 min wurde an allen Messstellen eine Probe gezogen, um die vollständige Durchmischung zu prüfen. Danach, zum Zeitpunkt  $t = 0$ , wurden alle sechs Fensterflügel der Längsseite für 2 min vollständig geöffnet. Anschließend wurde eine Unterrichtsstunde (45 min) lang alle 5 min an allen Stellen eine Probe genommen. Danach wurden die sechs Fensterflügel wieder geöffnet, nun aber für 4 min. Nach dem Fensterschließen wurden nochmals je vier Proben genommen. Kurz vor der ersten Fensteröffnung wurde die PDCB-Injektion gestartet.

### 6.3 Versuchsauswertung

#### 6.3.1 Luftwechsel

Über den Konzentrationsabfall während der 45 min, in denen die Fenster geschlossen waren, wurde die Infiltrationsrate – also der LW – über Fugen, Risse oder sonstige Undichtigkeiten in der Gebäudehülle, gemessen. Die Lufttemperatur im Klassenraum betrug 19 °C, die Außentemperatur 5,5 °C. Es war nahezu windstill.

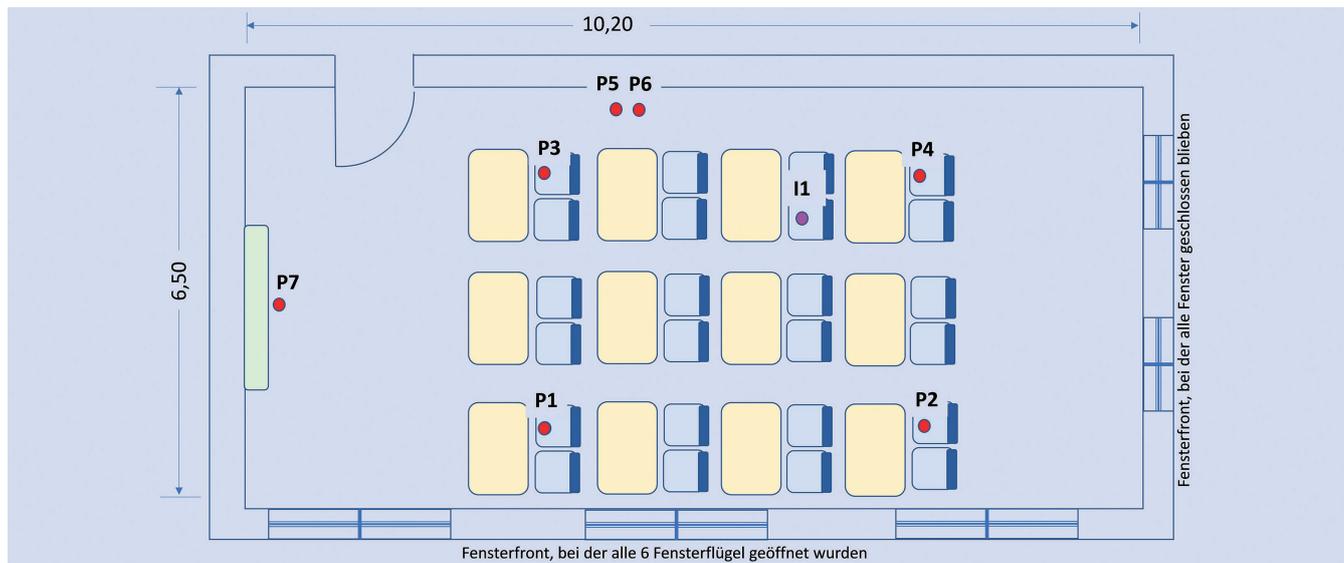


Bild 9. Schematische Darstellung des Schulraums mit der Messkonfiguration. Bild: Fa. Tracer Tech



Bild 10. Tracergasinjektionseinrichtung mit PDCB-Tracer zur Modellierung der Emission eines infizierten Schülers. Bild: Fa. Tracer Tech

Bild 11 zeigt einen sehr langsamen Abfall der  $SF_6$ -Konzentration im Raum, wodurch dann auch die geringe LWZ von  $0,081 \text{ h}^{-1}$  zustande kommt. Pro Stunde strömen somit  $18,7 \text{ m}^3/\text{h}$  in den Raum. Die Streuung der Messwerte ist darin begründet, dass die Raumluft nach dem 2-minütigen Lüften nicht manuell vermischt wurde, um das Ausbreitungsverhalten des zweiten Tracers (PDCB) im Raum nicht zu beeinflussen. Auf der anderen Seite gibt es sieben räumlich gut verteilte Messstellen, so dass der Mittelwert über alle Messpunkte die mittlere  $SF_6$ -Raumkonzentration ausreichend gut repräsentiert, um die Infiltrationsrate mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen.

### 6.3.2 Stoßlüftung

Der Gesamtverlauf der  $SF_6$ -Konzentration von der Injektion bis zum Zeitpunkt nach der zweiten Stoßlüftung ist in Bild 12 dargestellt. Gut erkennbar sind die Ausgleichsvorgänge bei der Vermischung der alten Raumluft mit der neu eingeströmten Außenluft. Nach 2 min Stoßlüftung ist die Anfangskonzentration von  $34,7 \text{ ppb} \pm 1,2 \%$  auf  $18,1 \text{ ppb} \pm 3,0 \%$  abgesunken. Die LWZ beträgt  $19,5 \text{ h}^{-1}$  und die eingeströmte Luftmenge  $151 \text{ m}^3$ .

Dadurch wird die Anfangskonzentration von 100 % auf 52 % gesenkt. Während der Messung fällt die Raumtemperatur in Raummitte um 2 K ab.

Bei der Stoßlüftung über 4 min fällt die mittlere Raumkonzentration von  $18,1 \text{ ppb}$  auf  $6,0 \text{ ppb}$ , die LWZ ergibt sich zu  $16,6 \text{ h}^{-1}$ . Hierbei strömen  $257 \text{ m}^3$  Außenluft in den Klassenraum. Die 4-minütige Stoßlüftung führt zu einer Konzentrationsreduktion auf 33 %. D.h. in diesem Raum bei diesen Wetterbedingungen führt eine 4-minütige Stoßlüftung zu einer Virenreduktion im Raum von 67 %.

Bei dieser Messung zeigt sich ein geringer Rückgang der LWZ von  $19,5 \text{ h}^{-1}$  bei 2 min Fensteröffnung auf  $16,6 \text{ h}^{-1}$  bei 4 min Fensteröffnung, was durch die Abnahme der Raumtemperatur während der längeren Lüftungsphase begründet ist.

### 6.3.3 Simulierte Virenfreisetzung

Bild 13 zeigt den zu Bild 12 zeitlich identischen Verlauf des PDCB-Tracers, der die Virenemission eines infizierten Schülers nachbildet. Es ist erkennbar, dass es größere Ausschläge an einigen Messpunkten gibt. Die rot gestrichelte Linie zeigt den berechneten Konzentrationsanstieg bei vollständiger Durchmischung, der trotz der Schwankungen den Mittelwert aller Messpunkte gut abbildet. Aufgrund des geringen Luftwechsels bei geschlossenen Fenstern ähnelt diese Linie fast einer Geraden.

Zur Bewertung eines Infektionsrisikos ist die Exposition die relevante Kenngröße und nicht die Konzentration. Bild 13 zeigt, dass es deshalb besser ist, eine Probenahmespritze über eine Zeitdauer von 1 bis 2 min aufzuziehen, weil dadurch kurzzeitige Konzentrationsspitzen ausgeglichen werden und dadurch das Expositionsergebnis genauer wird. Der Raum war mit Radiatoren unter den Fenstern beheizt. Dadurch entstehen Konvektionsströme, die das Strömungsmuster im Raum mitbestimmen. Die Schwankungen lassen erkennen, wie ungleichmäßig sich Gase in Räumen verteilen. Über eine Tracergasmessung lässt sich eine potenzielle Virenausbreitung quantitativ bestimmen. Die PDCB-Konzentrationsreduktion nach 4 min Stoßlüftung betrug 32 %, was sich mit den Messergebnissen der  $SF_6$ -Reduktion deckte.

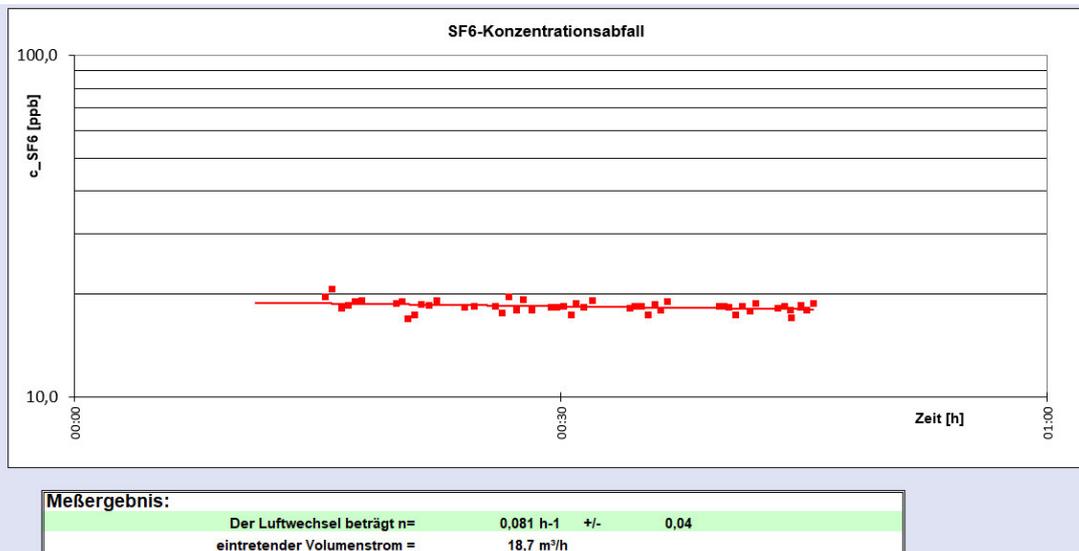


Bild 11. Luftwechsel durch Infiltration. Bild: Fa. Tracer Tech

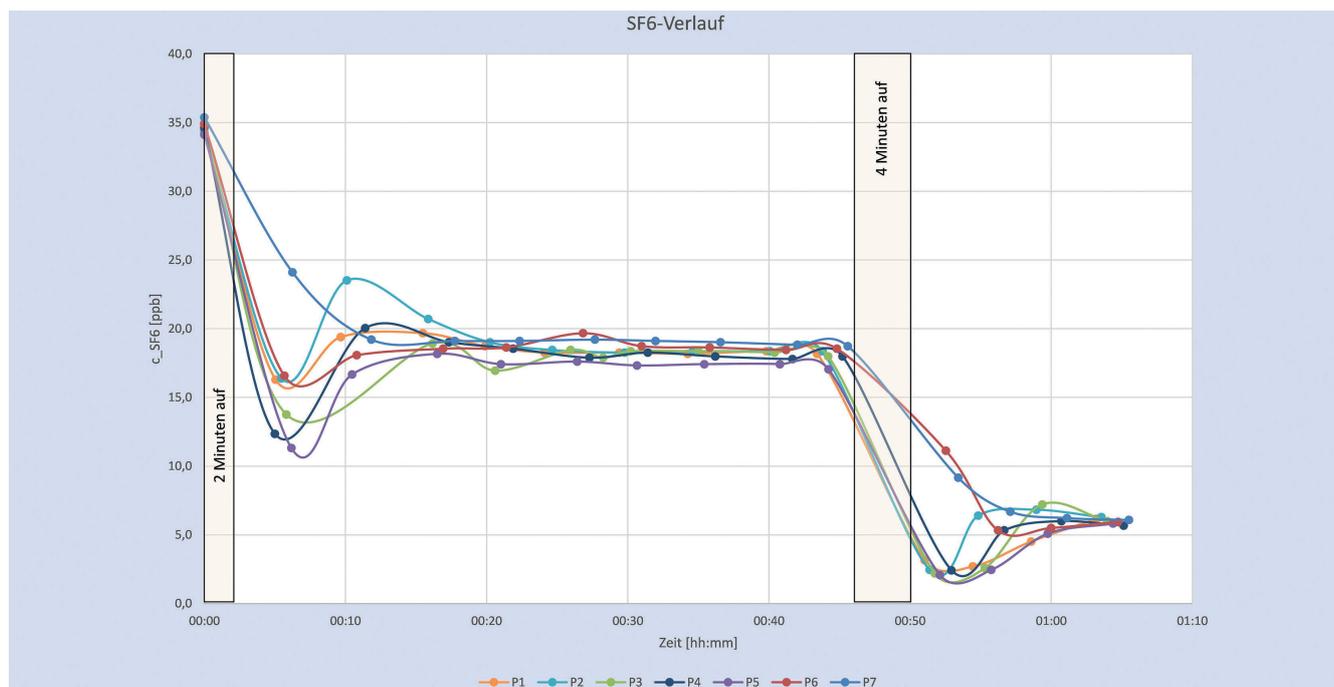


Bild 12. Konzentrationsabfall und räumliche Verteilung des SF6-Tracers. Bild: Fa. Tracer Tech

## 7 Berechnung der CO<sub>2</sub>-Exposition und simulierten Virenexposition

Für diesen vermessenen Klassenraum werden im Folgenden fünf Lüftungsvarianten untersucht:

1. Basisvariante: CO<sub>2</sub>- und Virensituation während eines Schultages, an dem die Schüler in den Pausen den Schulraum verlassen und die Fenster nur in den Pausen öffnen
2. Lüftungsvariante 1: CO<sub>2</sub>- und Virensituation während eines Schultages, an dem die Schüler in den Pausen den Schulraum verlassen und während des Unterrichts die Fenster alle 22 min für 2 min öffnen
3. Lüftungsvariante 2: CO<sub>2</sub>- und Virensituation während eines Schultages, an dem die Schüler in den Pausen den Schulraum

verlassen und während des Unterrichts die Fenster alle 22 min für 3 min öffnen

4. Lüftungsvariante 3: CO<sub>2</sub>- und Virensituation während eines Schultages, an dem die Schüler in den Pausen den Schulraum verlassen und während des Unterrichts die Fenster alle 22 min für 4 min öffnen
5. Raumluftreiniger: CO<sub>2</sub>- und Virensituation während eines Schultages, an dem die Schüler in den Pausen den Schulraum verlassen, in den Pausen die Fenster öffnen und ein Raumluftreiniger durchgehend im Raum betrieben wird.

Grundlage für die Lüftungssimulation sind die zuvor präsentierten Messergebnisse. Das Simulationsprogramm setzt eine vollständige Durchmischung der Raumluft voraus. Wie zuvor beschrieben, ist das in der Realität nicht der Fall. Das Simulations-

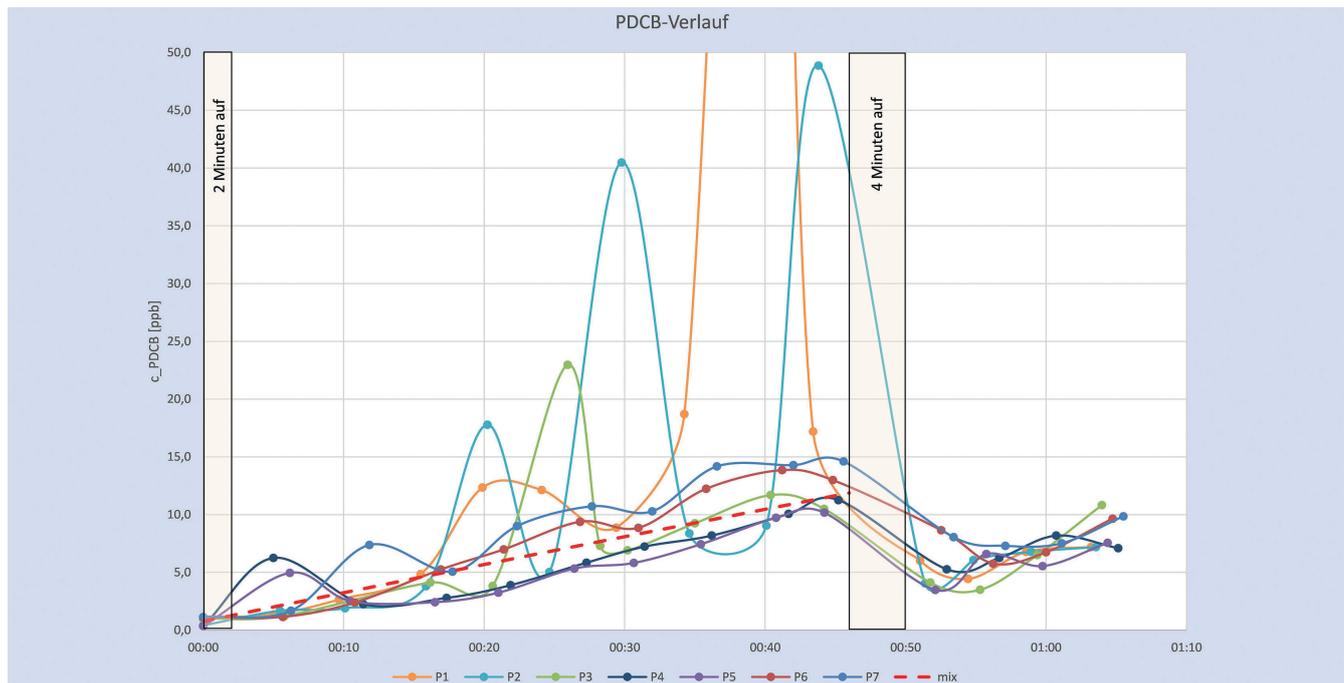


Bild 13. Konzentrationsabfall und Konzentrationsverteilung des PDCB-Tracers. Bild: Fa. Tracer Tech

00:00	07:20		Fenster zu
07:20	07:30		Fenster auf
07:30	09:00	Unterricht	
09:00	09:15	Pause	Fenster auf
09:15	10:00	Unterricht	
10:00	10:05	Pause	Fenster auf
10:05	10:50	Unterricht	
10:50	11:00	Pause	Fenster auf
11:00	11:45	Unterricht	
11:45	11:55		Fenster auf
11:55	00:00		Fenster zu

Bild 14. Typischer Stundenplan einer Schule. Bild: Fa. Tracer Tech

programm wurde aber so kalibriert, dass bei 2-minütiger Fensteröffnung genau 151 m<sup>3</sup> und bei 4-minütiger Fensterlüftung genau 257 m<sup>3</sup> ausgetauscht werden, womit die Ergebnisse die Realität genau abbilden.

Es sind 24 Grundschüler und ein Lehrer im Raum. Deren CO<sub>2</sub>-Emissionsrate wird gemäß [5] zu 0,041 kg/Pers. festgelegt. Die Außentemperatur beträgt 5,5 °C, die Raumtemperatur 19 °C. Es gibt einen infizierten Schüler im Raum, dessen Virenfreisetzung mit 300 Viren/s (Einheit im folgenden Text mit #/s bezeichnet) frei festgelegt wird. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Außenluft wird auf 420 ppm festgelegt.

Für den Raumlüftreiner wird ein Luftdurchsatz von 1 020 m<sup>3</sup>/h angenommen, das entspricht dem 4,4-fachen LW des Raumes (siehe Abschnitt 8.1). Die Abscheiderate ist 99,99 %.

Für alle vier Varianten wurde der in Bild 14 dargestellte Stundenplan angenommen.

### 7.1 Basisvariante

Bild 15 zeigt, dass mit Unterrichtsbeginn um 07:30 bereits nach 15 min der Pettenkofer-Wert für CO<sub>2</sub> von 1 000 ppm erreicht ist. In der Spitze werden knapp 4 000 ppm nach der Doppelstunde am Morgen erreicht. Die große Pause ist lang genug, um den Raum vollkommen durchzulüften. Bei den kleinen Pausen danach reicht die Zeit nicht ganz aus. Die Schüler lernen bei einer über einen Schultag gemittelten CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2 276 ppm, gerechnet über die Anwesenheit im Klassenraum. Das ist eine Raumluftqualität, die grundsätzlich verbessert werden sollte.

Bild 16 zeigt den Verlauf der Viruskonzentration, der identisch mit dem CO<sub>2</sub>-Verlauf sein muss, nur, dass er bei einer Konzentration von 0 #/m<sup>3</sup> beginnt. Auch hier ist wieder erkennbar, dass nur nach der großen Pause die Luft wieder fast virenfrei ist. Die mittlere Virenkonzentration während des Unterrichts beträgt 3 375 #/m<sup>3</sup>.

Die Virenexposition eines Schülers entspricht der Summe der Einzelflächen unterhalb der Kurven in Bild 16 während der Zeitintervalle, in denen sich der Schüler im Klassenraum befindet.

### 7.2 Lüftungsvariante 1

Bild 17 zeigt den CO<sub>2</sub>-Verlauf im Klassenraum, wenn die sechs Fensterflügel alle 22 min für 2 min geöffnet werden. Im Vergleich zur Basisvariante in Bild 15 reduziert sich hierdurch die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2 276 ppm auf 1 578 ppm. Das entspricht einer Reduktion auf 62 % gegenüber der Basisvariante. Der Spitzenwert fällt sogar um 50 % von knapp 4 000 ppm auf 2 000 ppm ab.

Die mittlere Viruskonzentration geht von 3 375 #/m<sup>3</sup> auf 2 029 #/m<sup>3</sup> zurück.

### 7.3 Lüftungsvarianten 2 und 3

Wird das Stoßlüftungsintervall von 2 auf 3 min verlängert, dann nimmt das mittlere CO<sub>2</sub>-Niveau im Klassenraum nochmals

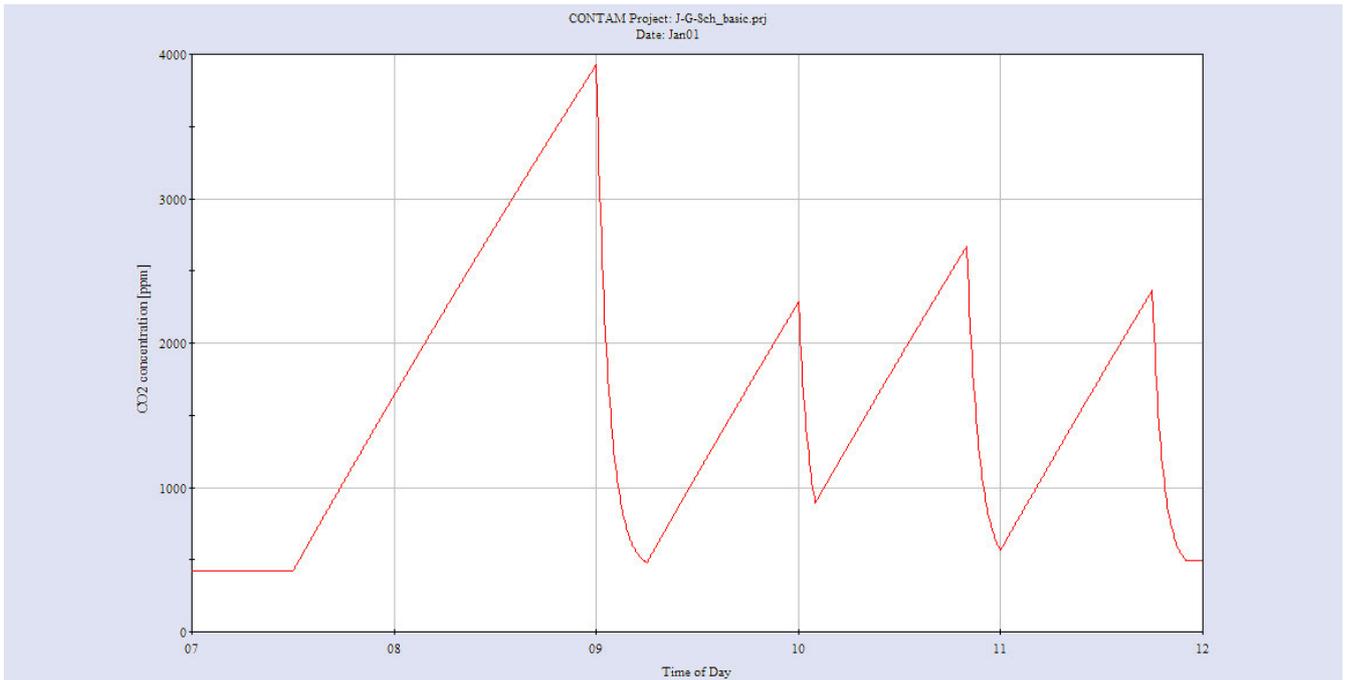


Bild 15. CO<sub>2</sub>-Raumluftkonzentration, wenn nur während der Pausen gelüftet wird. Bild: Fa. Tracer Tech

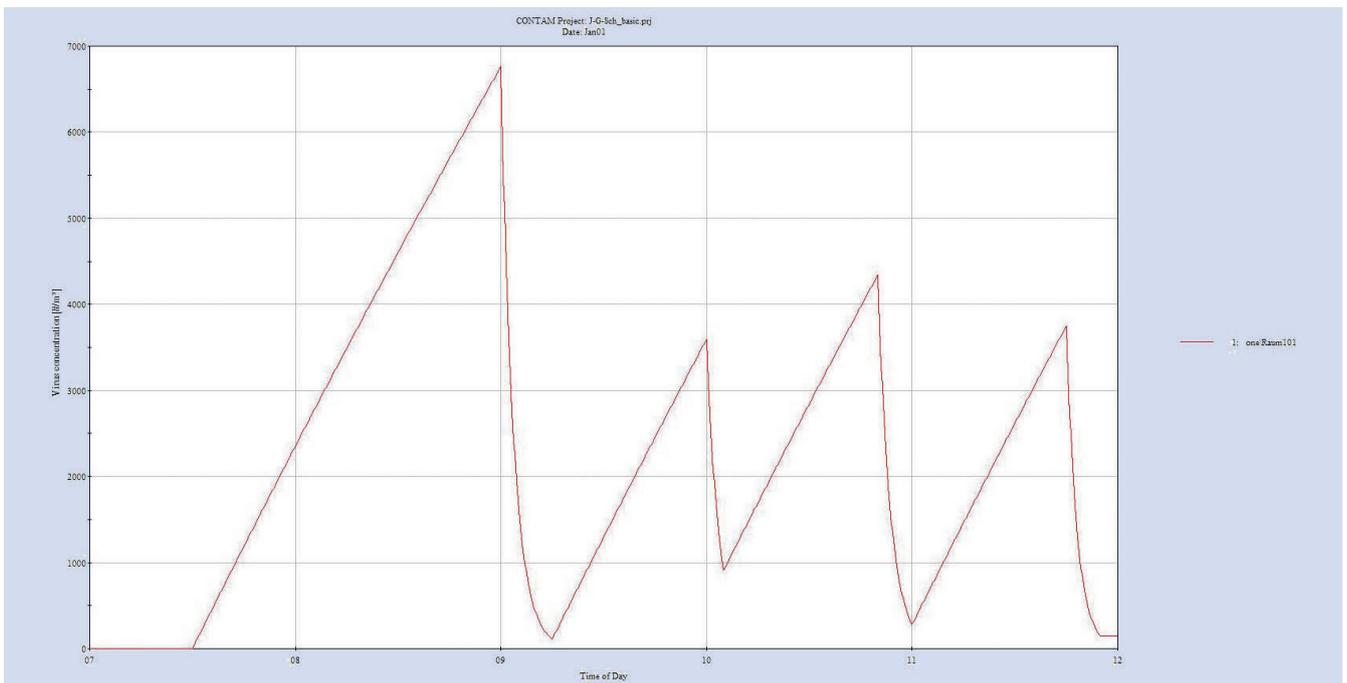


Bild 16. Virus-Raumluftkonzentration, wenn nur während der Pausen gelüftet wird. Bild: Fa. Tracer Tech

von 1 578 ppm auf 1 449 ppm ab (Bild 18). Das entspricht einer Reduktion gegenüber der Basisvariante auf 52 %.

Ähnliche Bilder ergeben sich bei einer Öffnungsdauer von 4 min, nur auf geringerem Niveau.

#### 7.4 Luftreiniger

Da der Luftreiniger kein CO<sub>2</sub> aus der Raumluft ausfiltern kann, ist der CO<sub>2</sub>-Verlauf identisch mit der Basisvariante in Bild

15. Die Viruskonzentration während der Schulstunden ist in Bild 19 dargestellt.

Über die Dauer eines Schultages ist bei dieser Variante ein Schüler einer mittleren Virenkonzentration von 1 096 #/m<sup>3</sup> ausgesetzt. Damit wird also eine Reduktion gegenüber der Basisvariante auf 33 % und gegenüber der Lüftungsvariante 2 von nochmals 19 % erreicht. Tabelle 2 fasst alle Ergebnisse nochmals zusammen.

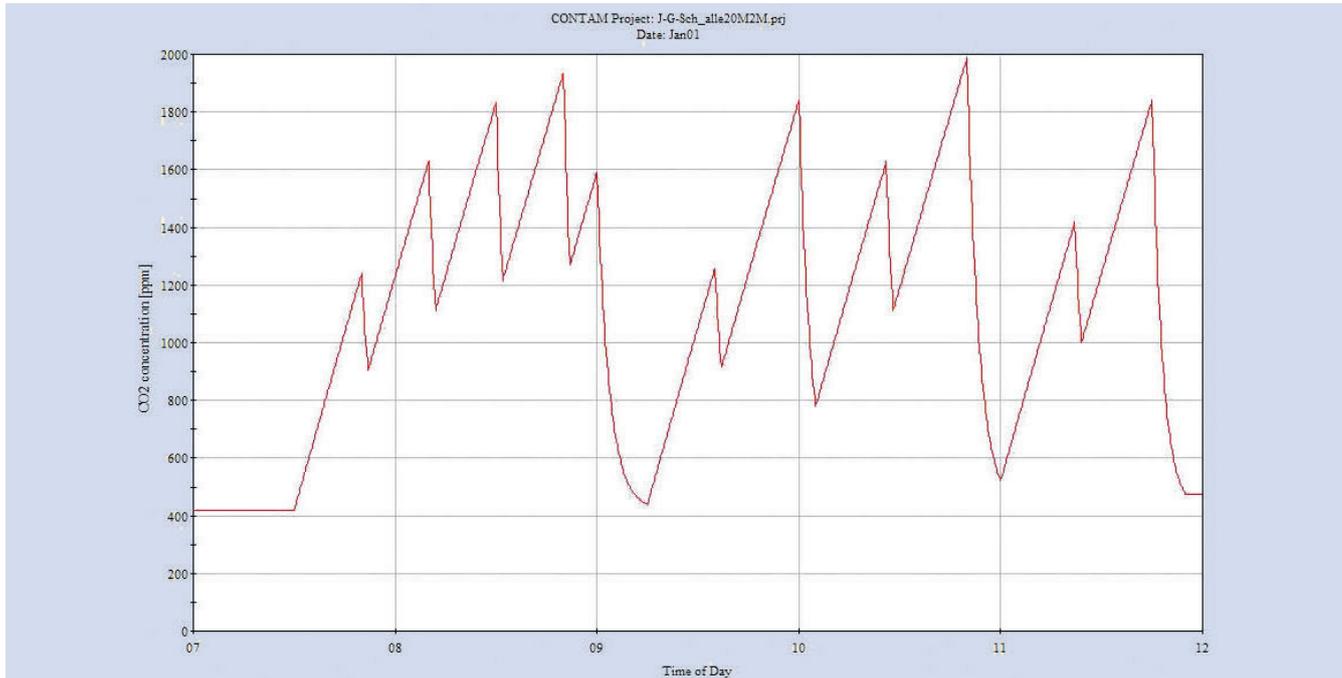


Bild 17. CO<sub>2</sub>-Raumluftkonzentration, wenn alle 22 min für 2 min und während der Pausen gelüftet wird. Bild: Fa. TracerTech

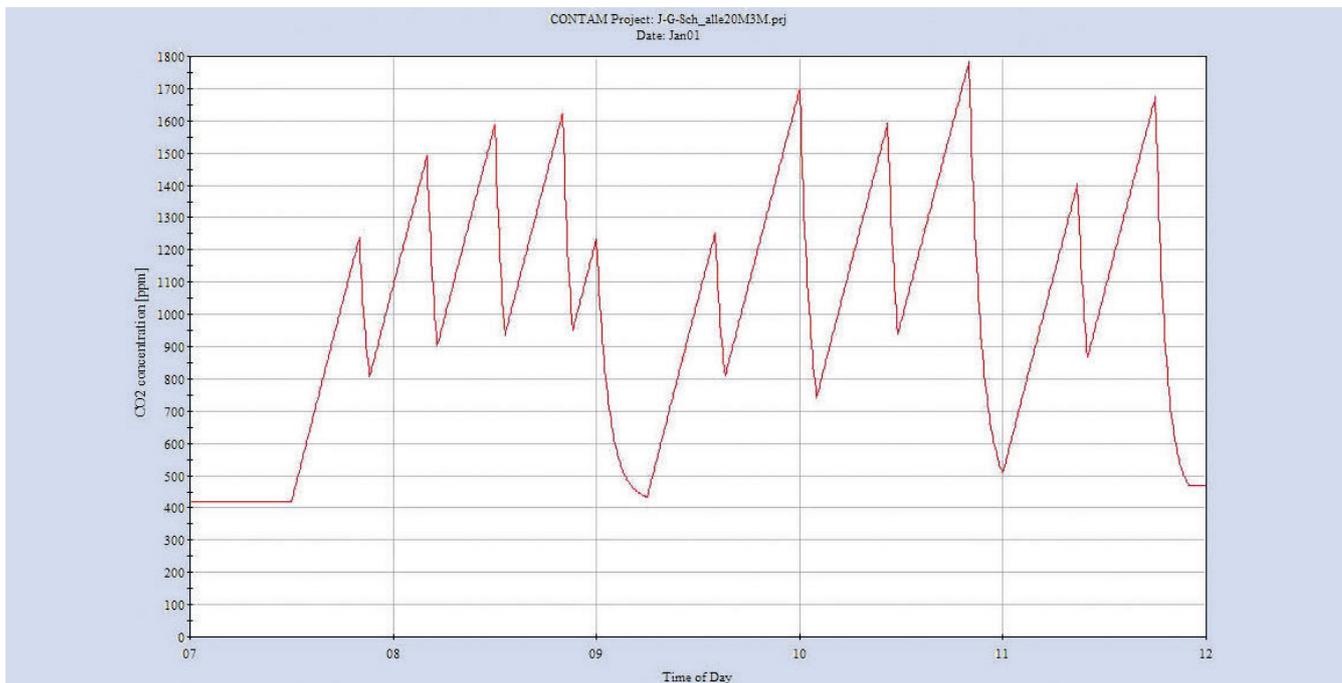


Bild 18. CO<sub>2</sub>-Raumluftkonzentration bei Stoßlüftung alle 22 min für 3 min und Lüftung in den Pausen. Bild: Fa. TracerTech

## 8 Vergleich der Virenreduktionsstrategien

Ohne Definition von Anforderungen an die Luftqualität – hier die maximale tolerable Virenexposition über eine bestimmte Zeitdauer – kann keine Aussage gemacht werden, ob ein Raum sicher ist, man sich also nicht mit Viren infizieren kann. Somit ist eine absolute Aussage zu den betrachteten Luftreinigungsvarianten nicht möglich. Sie sind nur zueinander bewertbar. Zu einer absoluten Bewertung gehört sowohl die Definition einer Quellstärke als auch einer Konzentration bzw. Exposition über eine zu defi-

nierende Zeitdauer, bei der eine Infektion unwahrscheinlich ist oder ausgeschlossen werden kann. Im Falle von Sars-CoV-2-Viren ist dies schwierig, weil zum einen nicht bekannt ist, ob an einem Tag ein infizierter Schüler oder mehrere gleichzeitig in einen Klassenraum kommen. Zum anderen ist unklar, wie viele Viren ein infizierter Schüler emittiert. Abschätzungen hierzu sind in der Literatur verfügbar. Über die Virenexposition, die zu einer Infektion führt, ist heute wenig bekannt. Nach [1] haben luftgetragene Sars-CoV-2-Viren eine Halbwertszeit von 0,64 bis 2,64 h in der Raumluft. Diese Passivierungsrate wurde bei den zuvor ge-



Bild 19. Viruskonzentration bei Einsatz eines Luftreinigers. Bild: Fa. Tracer Tech

machten Betrachtungen nicht berücksichtigt, um den Worst Case bei freier Lüftung darstellen zu können.

Die Unkenntnis über eine tolerable Virenexposition kann dazu führen, dass diejenige Luftreinigungsvariante als die beste bewertet wird, die die größte Virenreduktion bewirkt. Ob diese starke Reduktion dann, gesundheitlich betrachtet, wirklich notwendig ist oder ausreicht, muss von Medizinern und Virologen beantwortet werden. Das gleiche Dilemma ergibt sich, wenn Normen für Krankenhäuser und OP-Räume als Maßstab für die Luftqualität in Schulen herangezogen werden.

Mit einer über eine Messung kalibrierten Lüftungssimulation ist es möglich, verschiedene Luftreinigungsvarianten quantitativ miteinander zu vergleichen. Erst wenn die Datenbasis (Virenemission, Infektionswahrscheinlichkeit bei definierter Virenexposition) von Virologen und Medizinern für Schulen und andere Einrichtungen festgelegt ist, lässt sich beurteilen, welche Luftreinigungsvariante für welche Anwendung ausreichend und sicher ist und welche Variante die Anforderungen nicht erfüllt oder auch übererfüllt. Zum heutigen Datum liegt dem Autor diese Datenbasis nicht vor. Somit ist auch keine Aussage möglich, welche der betrachteten Varianten sicher ist.

### 8.1 Raumluftfilter

Raumluftfilter haben den Vorteil, dass sie kontinuierlich in Betrieb sein können und damit kontinuierlich Viren aus der Luft filtern. Bei Abscheidungsgraden von über 99 % kann man von einer sehr guten Filterwirkung sprechen. In [2] wurde ein Raumluftfilter in einem Raum von 200 m<sup>3</sup> untersucht. Den Versuchsergebnissen kann man entnehmen, dass der Luftdurchsatz mit 1 200 m<sup>3</sup>/h so groß ist wie der 6-fache LW, die Filterwirkung aber nur der eines 4,4-fachen LW entspricht. In der Diskussion mit dem Autor wurde bestätigt, dass, bedingt durch den großen Luftdurchsatz, ein Teil der gesäuberten Luft auf kurzem Wege wieder angesaugt wurde und dadurch nicht die theoretische Fil-

terwirkung von einem 6-fachen LW bei 99,99 % Abscheidegrad erreicht wurde. Das ist der Grund, warum bei der Klassenraumsimulation in Abschnitt 7 ein Luftdurchsatz, der dem 4,4-fachen LW entspricht, als Vergleichsbasis zugrunde gelegt wurde.

Das Messergebnis in [2] zeigt, dass es ein Trugschluss ist, allein auf einen guten Abscheidegrad zu schauen, weil für ein Gerät, das frei Luft im Raum ansaugt, das Produkt aus Luftdurchsatz, Abscheidegrad und Partikelkonzentration am Filtereinlass maßgebend ist. Im oben genannten Fall hat ein Raumluftfilter mit dem 6-fachen LW und 75 % Abscheidegrad, bei dem es zu keiner Kurzschlussströmung kommt, die gleiche Wirksamkeit. Die vielfach geäußerte Forderung, dass mindestens die Qualität eines HEPA-Filters in einem Raumfiltergerät notwendig ist, kann durch die Messergebnisse in [2] und [3] nicht bestätigt werden. Entscheidend für die Wirksamkeit ist die Minimierung des Kurzschlussanteils beim Raumfiltergerät. Dies kann aber nur über einen Partikeltest mit einem speziellen Raumluftfilter in einem Klassenraum an einem definierten Aufstellungsplatz nachgewiesen werden, was in der Praxis schwer durchführbar ist. Aus diesen Gründen ist auch die vom Hersteller angegebene Filterwirkung nicht in jedem Raum erreichbar.<sup>1</sup>

Wie auch in den Untersuchungen von [3] zum Ausdruck kommt, ist der Grad der Kurzschlussströmung stark von der Gerätebauart, dem Raum und dem Aufstellungsort abhängig. Diese Kurzschlussströmung ist bei vielen der in [3] getesteten Raumluftfilter nachgewiesen worden. Eine Forderung nach einem Mindestluftdurchsatz von Raumluftfiltern von 6 LW oder noch mehr

<sup>1</sup> In sensiblen Räumen (OP-Räume, Reinräume etc.), wo Luft ausschließlich über eine Lüftungsanlage zugeführt wird, ist ein hoher Abscheidegrad sehr wichtig. Bei im Raum arbeitenden Filtern kommt die zu filternde Luft von allen Seiten im Raum. Dort ist der Anteil von Kurzschlussströmen immer vorhanden und damit die Güte des Filters alleine kein Bewertungskriterium.

**Tabelle 2.** Gegenüberstellung von mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration, Viruskonzentration sowie Virusexposition bei fünf verschiedenen Luftreinigungsvarianten (Av = average; Int. Virus\_exp = Integral der Viruskonzentration über der Zeit).

	c_CO2_Av [ppm]	c_Virus_Av [# / m <sup>3</sup> ]	Int. Virus_exp. [#xs/m <sup>3</sup> ]	Reduktion auf
Basisvariante	2276	3375	3,53E+07	100 %
Lüftungsvariante 1, alle 22 min für 2 min Stoßlüftung	1578	2029	2,18E+07	62 %
Lüftungsvariante 2, alle 22 min für 3 min Stoßlüftung	1449	1757	1,85E+07	52 %
Lüftungsvariante 3, alle 22 min für 4 min Stoßlüftung	1310	1513	1,63E+07	46 %
Raumluftfilter 4,4 LW	2276	1096	1,18E+07	33 %

ist so alleinstehend nicht sinnvoll, zumal mit höherem Luftdurchsatz bei einem dezentralen Gerät, das Zu- und Abluft in einem Kubus vereint, das Kurzschlussrisiko zunimmt. Wenn also bei einem 6-fachen LW ein Kurzschlussanteil von 25 % in einem Raumvolumen von 200 m<sup>3</sup> besteht, dann kann es nicht sinnvoll sein, den Volumenstrom zu erhöhen. Dann sollte ein zweites Gerät aufgestellt werden, wenn eine bestimmte Virenreduktion gefordert ist.

Bei der Untersuchung in [3] zeigen viele Raumfiltergeräte hohe Schalldruckpegel. Ein Grund hierfür ist die häufige Verwendung von Filtern der Klasse H13 oder H14, die wegen des hohen Druckverlustes einen starken Ventilator benötigen. Geräuschärmere Filtergeräte lassen sich dadurch erreichen, dass Filterklassen mit geringerem Druckverlust und damit geringerem Abscheidegrad, z. B. E11 oder E12, verwendet werden, aber gleichzeitig die Größe von Kurzschlussströmen minimiert und damit die Raumdurchströmung optimiert wird. Ein weiterer Nachteil der in [3] getesteten Raumluftfilter zeigt sich in teilweise gravierenden Zugscheinungen im Nahbereich der Geräte.

## 8.2 CO<sub>2</sub>-Ampeln

Das von Personen ausgeatmete CO<sub>2</sub> ist ein guter Indikator für die Luftqualität. Dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Schulen wegen unzureichender Lüftung häufig sehr hoch sind und weit oberhalb des empfohlenen Wertes von 1 000 ppm liegen, ist nachgewiesen und weitgehend bekannt. Ist eine Person infiziert, ist deren Virenausstoß genauso wie deren CO<sub>2</sub>-Ausstoß zeitlich weitgehend konstant. Somit steigt mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration auch die Virenbelastung im Raum. Allerdings ist es aus den zuvor genannten Gründen wegen Unkenntnis der Viren-Quellstärke und maximaler Exposition nicht möglich, einen CO<sub>2</sub>-Grenzwert festzulegen, um Sicherheit gegen eine Vireninfektion zu bekommen.

Eine CO<sub>2</sub>-Ampel signalisiert über Farben oder Töne die gemessene Luftqualität. Eine übliche Einteilung, die konsistent mit den einschlägigen Normen über die Luftqualitätsbewertung ist, ist:

- < 1 000 ppm = grün
- 1 000 ppm bis 1 500 ppm = gelb
- > 1 500 ppm = rot

Bei der Basisvariante und der Raumluftfiltervariante würde die Ampel bereits nach 15 min auf gelb und nach 30 min auf Rot gehen und für den Rest der Stunde rot bleiben. Bei den Stoßlüftungsvarianten würden die Ampeln fast immer zwischen gelb und rot pendeln. Eine grüne Ampel ist nur erreichbar, wenn so viel gelüftet wird, dass mindestens 36 m<sup>3</sup>/(h × Person) an Frischluft dem Klassenraum zugeführt wird. In dem vermessenen Klassenraum wären das 900 m<sup>3</sup>/h oder ein kontinuierlicher Luftwechsel von 3,9 h<sup>-1</sup>. Diese Dauerlüftung führt in der kalten Jahreszeit zu Behaglichkeits- und damit Akzeptanzproblemen. Die kurze Abkühlung bei einer Stoßlüftung wird eher akzeptiert.

So mag es psychologisch sinnvoll sein, eine CO<sub>2</sub>-Ampel aufzustellen. Eine Uhr, die ans Fensteröffnen erinnert, würde den gleichen Zweck erfüllen.

## 8.3 Stoßlüftung

Da, wo es möglich ist und ausreichend Fenster geöffnet werden können, ist die Stoßlüftung eine wirkungsvolle Maßnahme, um Raumkonzentrationen in kurzer Zeit zu reduzieren. In Schulräumen ohne maschinelle Lüftung ist es grundsätzlich sinnvoll, alle 15 bis 20 min eine kurze Stoßlüftung durchzuführen, um Luftqualitäten zu erreichen, bei denen sich Schüler konzentrieren können. Mit zusätzlich geöffneter Klassenraamtür während der Stoßlüftung vergrößert sich der Luftaustausch. Er vergrößert sich auch mit zunehmender Temperaturdifferenz und Wind, so dass deutlich mehr Luft in der gleichen Zeit ausgetauscht wird als bei der konservativen Messung und dem konservativen Vergleich in diesem Beitrag.

## 8.4 Zusammenfassende Bewertung

Es ist zurzeit nicht möglich, eine klare Aussage zu machen, ob ein Raumluftfiltergerät oder ein Lüftungskonzept mit regelmäßiger Stoßlüftung eine Raumluftqualität gewährleisten, in der sich Personen nicht indirekt infizieren können. Erst wenn von medizinischer Seite klar ist, welche Virenbelastung in Abhängigkeit von einer bestimmten Zielgruppe zu einer Infektion führt, lassen sich sichere Aussagen machen.

Der betrachtete Raumluftfilter bewirkt in diesem Beispiel die größte Reduktion, ist somit an diesem Punkt besser als die Stoßlüftung. Jedoch macht er Geräusche und sorgt für eine intensive Durchmischung der Raumluft und damit auch von potenziellen Viren – allerdings bei geringer Virenlast im Raum. Das CO<sub>2</sub>-Problem ohne zusätzliche freie Lüftung bleibt.

Die freie Lüftung sorgt für gute Raumluft und gleichzeitig für eine deutliche Reduktion der Virenlast im Raum, die bei Querlüftung und Wind noch verstärkt wird. Im Vergleich zur Basisvariante sorgt die Lüftungsvariante 3 für eine Reduktion auf mindestens 46 %, der Raumluftreiniger auf 33 %.

Es ist über eine einfache Tracergasinjektion und Probenahme, die jeder Lehrer oder Hausmeister durchführen kann, mit anschließender Analyse im Labor möglich, relativ sicher zu sagen, welche Virenreduktion über die freie Lüftung bei welcher Außentemperatur und bei welchem Lüftungskonzept erreicht werden kann. Hierzu ist es notwendig, bei einer Außentemperatur den Luftaustausch zu messen, der bei geöffneten Fenstern und Windstille ohne Querlüftungseffekte zustande kommt. Mit diesem Messwert kann mit Hilfe der Simulation berechnet werden, was die freie Lüftung speziell für dieses Gebäude bzw. diesen Klassenraum mindestens leisten kann. Eine zweite Messung mit geöffneter Klassenraamtür bei typischen Windverhältnissen würde die Realität noch besser abbilden.

Sind z. B. die Öffnungsmöglichkeiten eingeschränkt und es ergeben sich zu geringe Volumenströme oder zu häufige und zu lange Öffnungsintervalle, kann der Nutzer selbst entscheiden, ob die Vor- und Nachteile eines Raumlufiltergerätes gegenüber den Vor- und Nachteilen der freien Lüftung überwiegen. Die Unsicherheit bei Raumlufiltergeräten, ob sie in diesem Raum die vom Hersteller angegebene Reduktionswirkung haben, wird allerdings bleiben.

---

#### Literatur

- [1] *Lelieveld, J.; Helleis, F.; Borrmann, S.; Cheng, Y.; Drewnick, F.; Haug, G.* et al.: Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (2020), S. 8114. <https://doi.org/10.3390/ijerph17218114>.

- [2] *Kähler, C. J.; Fuchs, T.; Mutsch, B.; Hain, R.*: Schulunterricht während der SARS-CoV-2-Pandemie – Welches Konzept ist sicher, realisierbar und ökologisch vertretbar? Hrsg.: Universität der Bundeswehr München, 2020.
- [3] Video: Schetter Raumlufreiniger. Internet: [www.is.gd/Luftfilter](http://www.is.gd/Luftfilter).
- [4] *Hartmann, A.; Lange, J.; Rotheudt, H.; Kriegel, M.*: Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. Hrsg.: Hermann-Rietschel-Institut, 2020. <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10332>.
- [5] *Recknagel, H.; Sprenger, E.*: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. Ausgabe 2019/2020, S. 1949.

---

Dr.-Ing. **Willigert Raatschen**,  
TracerTech GmbH, Immenstaad am Bodensee.