

Eignung von Lüftungs-Paneelen zur dauerhaften Senkung des CO₂-Gehaltes in Klassenräumen

von Peter Eyerer, Markus Palic, Klaus Weber und Udo Schmid*

Ausgangslage

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein Abbauprodukt der menschlichen Atmung. Dessen Konzentration gilt als zentraler Indikator für die Raumluftqualität in Daueraufenthaltsräumen und bildet den Leitparameter zu deren Beurteilung. In Schulen ist eine hohe Raumluftqualität eine wichtige Voraussetzung für die Konzentrationsfähigkeit von Schüler*innen und Lehrer*innen. Obschon die CO₂-Konzentration in keinem direkten Zusammenhang zur Virenlast, insbesondere mit Blick auf Aerosole des SARS-CoV-2, in einem Raum steht, reduziert eine hohe Luftqualität das gegenseitige Ansteckungsrisiko der Anwesenden erheblich [1,2,3].

Zur Verbesserung der Raumluftqualität in Schulräumen werden bei Räumen ohne „Raumlufttechnische Anlagen“, ausgehend von einer Vorbelastung von 300-500 ppm, bei Erreichen einer CO₂-Konzentration zwischen 1000 und 1500 ppm üblicherweise die Fenster und die Klassenzimmertür zur Stoß- und/oder Querlüftung geöffnet. Die Lüftung kann je nach Größe und Belegung des Klassenraums, sowie je nach Höhe des Staudrucks auf die Fassade und der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen, 5 bis 15 Minuten dauern [3]. Dabei kommt es bei tieferen Außentemperaturen zur temporären Abkühlung des Klassenraums, den die in den Wänden und im Mobiliar gespeicherte Wärme sowie die Wärmeabgabe der Anwesenden in der Regel nach wenigen Minuten ausgleicht. Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der CO₂-Konzentration besteht in der dauerhaften oder sporadischen Kipplüftung von kippbaren Fenstern, soweit Klassenzimmer hierüber verfügen.

Eine Alternative zur manuellen sporadischen Fenster- bzw. dauerhaften Kipplüftung bieten Lüftungs-Paneele, die im Austausch gegen eine oder mehrere Fensterscheiben in die Fenster eingebaut werden und eine dauerhafte Querlüftung erzwingen. Das „Lüfterfenster“ wird dabei so angeordnet, dass es nach Möglichkeit zu einer Lüftung entlang der Zimmerdiagonalen kommt. So kann die vorgewärmte und wenig vorbelastete Flur-Luft durch die teilweise oder ganz geöffnete Klassenzimmertür angesaugt und durch die Lüfter des Paneels nach Außen befördert werden. Eine dauerhafte, zumindest teilweise Öffnung der Klassenzimmertür ist hierfür eine unabdingbare Voraussetzung.

Der Beitrag zeigt die Ergebnisse eines Realversuchs, in dem die Wirksamkeit und die Eigenschaften des Lüftungs-Paneels AirContinui® von Brach & Gräßer zur kontinuierlichen Reduktion des CO₂-Gehalts in einem nicht klimatisierten und nicht automatisch belüfteten Klassenraum, als Alternative zur Stoß- bzw. Kipplüftung, untersucht wurden.

* Prof. Dr.-Ing. Peter Eyerer, vorm. Institutsleiter, Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), Pfinztal

Dipl.-Ing. Markus Palic, Geschäftsführer TagungsgesellschaftEnergie mbH, vorm. u. a. Geschäftsführer Westenergie und Verkehr GmbH und NEW Re (Gesellschaft für regenerative Energieerzeugung), Karlsruhe

Dipl.-Soz. päd. Klaus Weber, vorm. Bad. Landesverein f. Innere Mission, Karlsruhe

Dipl.-Ing. (FH) Udo Schmid, Geschäftsführer Brach & Gräßer Metallverarbeitung, Malsch

Alle Autoren sind Mitglieder der Offenen Jugendwerkstatt Karlsruhe e. V.

Aufbau und Funktionsweise des Lüftungs-Paneels

Das zur Messung eingesetzte Paneel besteht aus einer undurchsichtigen Blech-Kunststoff-Konstruktion. Es verfügt über 8 eingelassene Lüfter mit einer Betriebsspannung von 12 V, einer gemessenen elektrischen Gesamtleistungsaufnahme von 7,5 W und einer schiebbaren Verschlussklappe, so dass die Ventilationsfläche verschlossen werden kann. Ein an der Außenseite angebrachtes, engmaschiges Edelstahldrahtgewebe verhindert den unerwünschten Eintritt von Insekten. Das Paneel wurde individuell in den Abmessungen der auszutauschenden Glasscheibe gefertigt. Der mit dem Paneel bestückte Fensterflügel lässt sich sowohl vollständig öffnen als auch kippen (Bild 1).



Bild 1 Lüftungs-Paneel „AirContinui“ – Innenansicht (a) und Außenansicht (b)

Versuchsaufbau- und Durchführung

Vor den Messungen veranlasste die Herstellerfirma den Austausch der Glasscheibe bei einem von vier Flügel Fenstern in einem Standard-Klassenzimmer einer Karlsruher Gesamtschule mit einem freien Durchströmungsquerschnitt (in geöffnetem Zustand) von ca. 1m^2 , gegen das zu prüfende Lüftungs-Paneel. Der Raum entspricht einem durchschnittlichen Klassenzimmer für eine Belegung von maximal 30 Schüler*innen. Mit einer Fensterfrontlänge von 9,53 m, einer Breite von 7,2 m und einer Höhe von 3,16 m fasst er ein Volumen von ca. 217 m^3 , bzw. $7,3\text{ m}^3$ pro Schüler*in bei Vollbelegung. Er liegt damit über dem in der Fachliteratur [4] genannten Mindest-Luftvolumen von 6 m^3 pro Schüler*in.

Die Messungen fanden bei Corona bedingter Teilbelegung mit 12 Probanden (9 Schüler und 3 Erwachsene) über einen Zeitraum von ca. 4 Stunden während des regulären Unterrichts und einer schriftlichen Prüfungsstunde statt.

Für die Messungen kamen drei CO_2 -Logger, SA 1200P von Conrad Elektronik SE, eine Wetterstation, CTW-902 Wi von Sainlonic auf dem Gebäudedach, ein handelsübliches Anemometer zur Erfassung der Luftströmung im Klassenraum, ein Schallpegelmesser und zwei CO_2 -Ampeln, eine V2 von FabLab Karlsruhe e. V. und eine CO2A 100 von MB-Systemtechnik zum Einsatz.

Vor der regulären CO₂-Messung wurden im unbelegten Zustand des Klassenzimmers sowohl eine Schallpegel- als auch eine Windgeschwindigkeitsmessung durchgeführt. Bei Vollbetrieb der Lüfter ergab die Schallmessung in einer Entfernung von 2 m, dem am nächsten gelegenen Sitzplatz eines Probanden zum Lüfterfenster, einen Wert von 43 dB. Der Hersteller gibt den Schalldruckpegel eines einzelnen Lüfters mit 40 dB an. Bei der Wiederholung der Schallpegelmessung mit einer Belegung von 13 Probanden ergaben sich im Vergleich zum unbelegten Klassenzimmer nur marginale Veränderungen. Hier überwog der Schalldruckpegel der Hintergrundgeräusche innerhalb des Klassenzimmers.

Die Windgeschwindigkeitsmessung sank in einem Abstand von weniger als 20 cm von der Mitte eines Lüfters unter die Ansprechgrenze des Anemometers von 0,1 m/s. Selbst bei dieser kurzen Entfernung vom Paneel war kein Luftzug wahrnehmbar.

Die Messungen des CO₂-Konzentrationsverlaufs erfolgten in drei Durchläufen. Bei der Anordnung der drei CO₂-Logger im Klassenraum wurde darauf geachtet, die Schadstoffkonzentration an verschiedenen Stellen zu messen, um, bei mutmaßlich unterschiedlichen Konzentrationen in den verschiedenen Raumteilen, einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten.

Ein Logger wurde auf die erste Schulbank neben der Klassenzimmertür, der zweite auf einer Schulbank in der fensterlosen „toten Ecke“ und der dritte auf der Fensterbrüstung diagonal zur Klassenzimmertür platziert (Bild 2). An allen drei Messpunkten betrug der Abstand zu einem Probanden mindestens 1,5 m. Die Ergebnisse der Messungen notierten die Probanden in Messtabellen mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 5 Minuten. Bei der Festlegung der Messfrequenz wurde die Trägheit der Messinstrumente berücksichtigt.

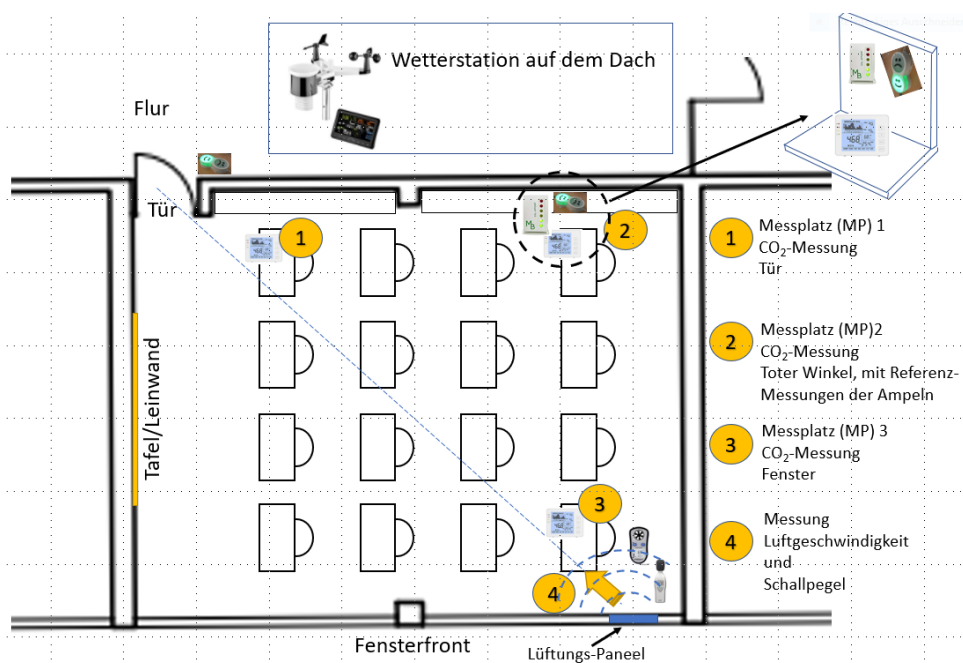


Bild 2 Schematische Darstellung des Klassenzimmers mit den verschiedenen Messpunkten

Auswertungen

Der erste von drei Messdurchläufen erfolgte bei geschlossenen Fenstern und geschlossener Klassenzimmertür als „Referenzszenario“ zur Ermittlung des CO₂-Konzentrationsverlaufs im Raum

ohne Lüftung. Während des Versuchsdurchlaufs herrschten Windgeschwindigkeiten von 0,7 bis 2,2 km/h aus wechselnden Richtungen, so dass man in guter Näherung einen hermetisch abgeschlossenen Klassenraum ohne nennenswerte Fugenlüftung unterstellen kann. Die erste Messung über 25 Minuten begann bei 539 ppm und endete bei Erreichen der CO₂-Konzentration von ca. 1000 ppm am Messpunkt 2, an dem auch die CO₂-Ampeln platziert waren (toter Winkel). Die mittlere CO₂-Konzentration aus den drei Messstellen im Raum betrug zu diesem Zeitpunkt 933 ppm. Nach einer 5minütigen Stoßlüftung, während der die mittlere Konzentration im Raum auf 588 ppm sank, wurden die Fenster und Türen erneut geschlossen und bis zum Erreichen des kritischen Wertes von 1500 ppm am Messplatz 2 geschlossen gehalten. Den CO₂-Konzentrationsverlauf des ersten Durchlaufs zeigt Bild 3, rote Punkte. Dabei stammen erwartungsgemäß der jeweils höchste Wert vom Messplatz 2 (toter Winkel), der niedrigste Wert von Messplatz 3 (Fensterhöhe) und der dazwischenliegende vom Messplatz 1 (Türhöhe). Der in Rot dargestellte Kurvenverlauf folgt dabei den arithmetischen Mittelwerten der Messungen an den drei Messplätzen.

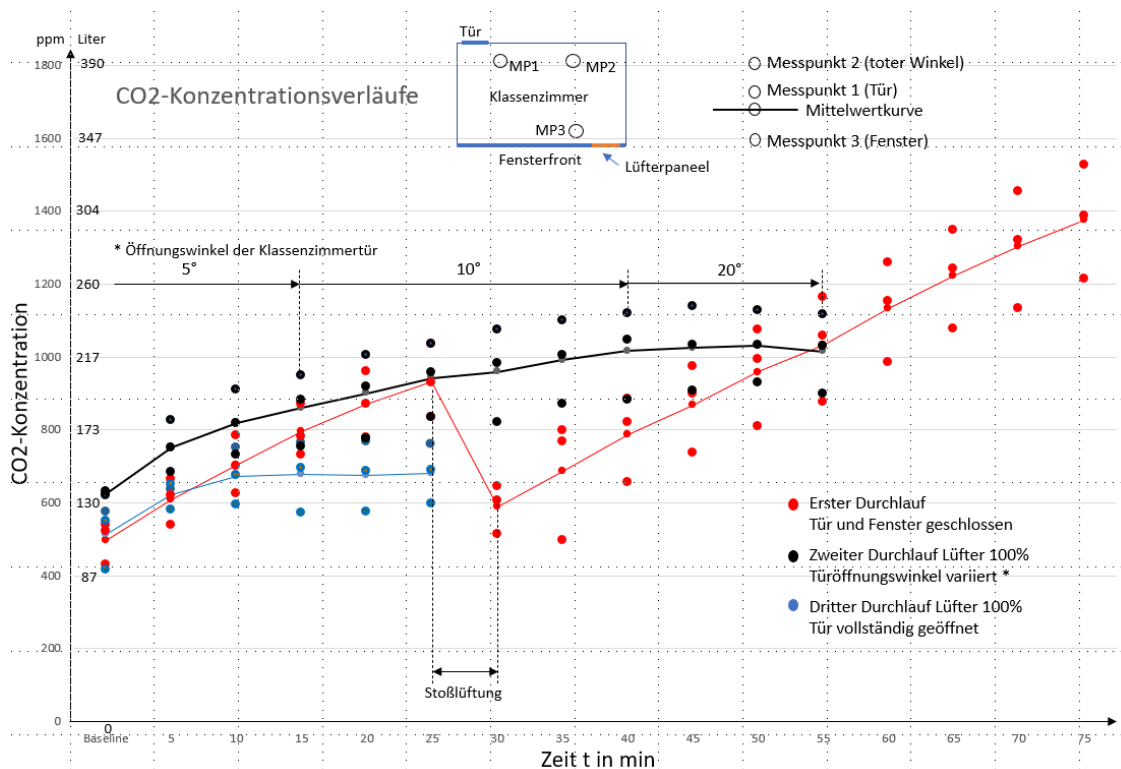


Bild 3 CO₂-Konzentrationsverläufe im Klassenzimmer während der Versuchsmessungen in den drei Durchläufen. Jeder Durchlauf beginnt bei der Zeit t=0

Zur Berechnung des Konzentrationsverlaufs werden die Anfangs- und Endwerte der CO₂-Konzentrationen in Liter (l) umgerechnet. Demzufolge entsprechen 497 ppm (mittlerer Ausgangswert vor dem ersten Durchlauf) 0,0479 vol.%, und unter Berücksichtigung des gesamten Raumvolumens von 217.000 l einer Anfangskonzentration von 108 l CO₂.

Die **gemessene** Konzentrationszunahme (Progression) im geschlossenen Klassenzimmer ergibt sich aus der ersten Teilmessung im ersten Durchlauf zu:

$$CO_{2KM} = (K_{CO_2E} - K_{CO_2A})/t = (202 \text{ l} - 108 \text{ l})/25 \text{ min} = \mathbf{3,8 \text{ l/min}} \quad \{1\}$$

Hierbei bedeuten:

CO_{2KM} gemessene Konzentrationszunahme von CO_2 in l/min

t Zeitdauer der Messung in min

K_{CO_2E} Endkonzentration nach t in l

K_{CO_2A} Anfangskonzentration zu Messbeginn in l

Aus der zweiten Teilmessung folgt:

$$(289 \text{ l} - 127 \text{ l})/45 \text{ min} = \mathbf{3,6 \text{ l/min}}$$

Beide Messungen kommen nahezu zu demselben Ergebnis. Insoweit kann gefolgert werden, dass es sich um valide, auf diesen Raum und die Zahl der anwesenden Probanden bezogene CO_2 -Progressionen handelt.

Die **zu erwartende** Progression errechnet sich über die Anzahl der Probanden und ihrer spezifischen CO_2 -Emissionen, die sie durch die Atmung verursachen. In [6] und [7] finden sich folgende Exhalationswerte:

	Atemfrequenz 1/min	Atemzugvolumen l/1	CO_2 -Ausstoß %
Schüler*innen	20	0,4*	4
Erwachsene	15	0,5	4

* In der angegebenen Literatur werden bei Schüler*innen als Atemzugvolumen 350 ml angegeben. Da es sich bei den Probanden um Schüler*innen der Klasse 10 handelt, wurde das Atemzugvolumen auf 400 ml leicht angehoben.

In allen Durchläufen befanden sich im Mittel 9 Schüler und 3 Erwachsene im Raum. Demnach wäre folgende Konzentrationszunahme zu erwarten:

$$CO_{2KR} = n_P \cdot X \cdot A_F \cdot X \cdot AZ_V \cdot X \cdot CO_{2A} = 9 \text{ Sch.} \times 20 \text{ 1/min} \times 0,4 \text{ l/1} \times 0,04 = \mathbf{2,88 \text{ l/min Schüler*innen}} \quad \{2\}$$

$$= 3 \text{ Erw.} \times 15 \text{ 1/min} \times 0,5 \text{ l/1} \times 0,04 = \mathbf{0,9 \text{ l/min Erwachsene}} \quad \{3\}$$

Hierbei bedeuten:

CO_{2KR} rechnerische Konzentrationszunahme von CO_2 in l/min

n_P Anzahl der Personen

A_F Atemfrequenz in 1/min

AZ_V Atemzugvolumen in l/1

CO_{2A} CO_2 -Ausstoß pro Atemzug in %

Insgesamt ergibt sich eine rechnerische Konzentrationszunahme von $CO_{2KR} = \mathbf{3,8 \text{ l/min}}$. Die gemessenen und die errechneten CO_2 -Progressionen zeigen eine ausgesprochen hohe Korrelation und dienen im Folgenden als Referenzwert für die Messdurchläufe mit dem aktiven Lüftungspaneel.

Messungen mit aktivem Lüftungs-Paneel

Im zweiten Durchlauf wurde die Wirksamkeit des mit voller Leistung arbeitenden Lüftungspaneels bei unterschiedlichen Öffnungswinkeln der Klassenzimmertür gemessen (Bild 3, schwarze Punkte). Auch hier zeigen die höheren Messwerte die Konzentration im Messpunkt 2, dem toten Winkel, der

Messpunkt in Fensternähe, die niedrigsten und der Messpunkt in der Nähe der Tür die Werte dazwischen. Die schwarze Kurve zeigt den Verlauf der arithmetischen Mittelwerte der drei Messpunkte.

Während der ersten 15 min betrug der Öffnungswinkel 5°. Hier verlief die Konzentrationszunahme anfänglich nahezu parallel zu derjenigen ohne Lüftung. Der Durchströmungsquerschnitt des schmalen Türspalts entspricht zwar dem vielfachen derjenigen des Lüfterensembles im Paneel, reichte aber nicht für eine wirksame Durchlüftung. Erst während der darauffolgenden 25 min, bei einem Öffnungswinkel von 10°, flachte die Progression leicht ab. Ein Hinweis darauf, dass ein gewisses Maß an Durchlüftung stattfand. Erst nach der Öffnung der Zimmertür nach 40 min auf 20° setzte eine ungehinderte Durchlüftung ein, die sich, wie im dritten Durchlauf zu sehen sein wird, auch bei vollständig geöffneter Tür nicht weiter steigern ließ. Der flache Kurvenverlauf in dieser Messesequenz deutet darauf hin, dass die „Reinigungsleistung“ des Paneels ausreicht, um eine weitere Progression der CO₂-Konzentration bei vorliegender Raumgröße und Belegung zu verhindern. In der letzten Messesequenz (Tür 20° auf) in diesem Durchlauf ergibt sich rechnerisch der nachfolgende Konzentrationsverlauf.

$$CO_{2PM} = (K_{CO_2E} - K_{CO_2A})/t = (224 \text{ l} - 227 \text{ l})/15 \text{ min} = -0,2 \text{ l/min} \quad \{4\}$$

Über diese Messesequenz sank die CO₂-Konzentration im Raum demnach minimal ab. Die Reinigungsleistung bei diesem Konzentrationsniveau beträgt somit:

$$CO_{2GES} = CO_{2KR} - CO_{2PM} = 3,8 \text{ l/min} - (-0,2) \text{ l/min} = 4,0 \text{ l/min} \quad \{5\}$$

Hierbei bedeutet:

$$CO_{2GES} \quad \text{ermittelte Reduktion der CO}_2\text{-Konzentration im Raum in l/min}$$

Für den dritten Durchlauf blieb die Klassenzimmertür nach einer längeren Lüftungspause, sowie Abnahme der mittleren CO₂-Konzentration im Raum auf 514 ppm, vollständig offen, und das Lüftungs-Paneel arbeitete während des Durchlaufs mit Volllast. Die Darstellungen der Messergebnisse aus diesem Durchlauf sind in Bild 3 als blaue Punkte in derselben Art und Weise dargestellt, wie in den ersten beiden Durchläufen. Die mittlere CO₂-Konzentrationszunahme steigt zunächst stark an und verflacht zusehends. Bereits nach 10 min geht sie, ähnlich wie die Kurve aus dem letzten Abschnitt des zweiten Durchlaufs, in einen Parallellauf mit der Abszisse über und bestätigt die Annahme, dass das Lüftungs-Paneel in der vorliegenden Dimensionierung gerade ausreicht, um die ohne Lüftung stattfindende CO₂-Konzentrationszunahme im gewählten Klassenzimmer und der Anzahl und Art der am Versuch teilnehmenden Probanden zu kompensieren. Bei einem kleineren Raum bzw. bei einer höheren Belegungszahl ist eine höhere Reinigungsleistung vorzusehen.

Messergebnisse und Auswertung

Die einzelnen Kurvenverläufe zeigen eine auffallende Zunahme des hier als Reinigungsleistung bezeichneten Vermögens des Lüftungs-Paneels, der zunehmenden CO₂-Konzentration im Raum entgegenzuwirken. Dies zeigt sich deutlich bei jedem Beginn einer Messung. Gleichgültig ob mit oder ohne Lüfterbetrieb, nimmt die CO₂-Konzentration bei niedrigem Konzentrationsniveau im Raum erst einmal rasch zu. Mit höher werdender absoluter Konzentration nimmt die Reinigungsleistung des

Paneels zu. Eine seriöse, quantitative Aussage zu diesem Phänomen ist allerdings nach den vorliegenden Messversuchen nicht möglich. Für eine genauere Beurteilung sind die Messfrequenz in der Anfangsphase der Messungen zu gering und die Reaktionszeit der verwendeten Messgeräte zu lang.

Um die Wirksamkeit der Stoßlüftung und der erzwungenen Dauerlüftung durch das Lüftungs-Paneel vergleichen zu können, werden im Folgenden die Luftwechselraten aus den Messergebnissen und den Herstellerangaben für beiden Varianten berechnet.

Die Lüftungsleistung des Paneels lässt sich über den Luftstrom bestimmen. Diesen gibt der Hersteller mit 66,3 m³/h je Ventilator an. Die offene Siebfläche des Insektenschutzes beträgt 42 % und reduziert den Luftstrom entsprechend. Demnach ergibt sich der wirksame Luftstrom zu 27,8 m³/h je Ventilator und bei 8 Ventilatoren zu 222,8 m³/h des eingesetzten Paneels. Bei 217 m³ Raumvolumen beträgt die **Luftwechselrate ca. 1/h**.

Der Luftwechsel durch die 5minütige Stoßlüftung im ersten Versuchsdurchlauf lässt sich anhand der CO₂-Konzentrationsänderung während der Lüftung über die Mischungsformel bestimmen. Dabei gilt:

$$V_R \times K_E = V_V \times K_V + V_F \times K_F \quad \{6\}$$

Hierin bedeuten:

V _R	Raumvolumen des Klassenzimmers in m ³
K _E	CO ₂ -Konzentration im Raum am Ende der Lüftungspause 588 ppm
V _V	Volumen der verbrauchten, hinausbeförderten Raumluft in m ³
K _V	CO ₂ -Konzentration vor der Lüftungspause 988 ppm
V _F	Volumen der frischen, nachströmenden Raumluft in m ³
K _F	CO ₂ -Konzentration in der Frischluft 350 ppm

Aufgelöst nach dem rechnerischen Frischluftvolumen V_F im Raum folgt nach 5 min:

$$V_F = V_R \times (K_V - K_E) / (K_V - K_F) = V_R \times (988 \text{ ppm} - 588 \text{ ppm}) / (988 \text{ ppm} - 350 \text{ ppm}) = V_R \times 0,62$$

Hochgerechnet beträgt die **Luftwechselrate ca. 7,5/h**.

Wärmebilanz

Geht man davon aus, dass zur Reduktion der CO₂-Konzentration einmal pro Schulstunde eine 5minütige Stoßlüftung durchgeführt wird, so muss die nachströmende Frischluft, unabhängig von den im Raum vorhandenen Wärmespeicherkapazitäten, auf das Temperaturniveau des Innenraums erwärmt werden. Hierfür ist folgende Wärmemenge erforderlich [8]:

$$\text{Bei der Stoßlüftung:} \quad Q_S = L_S \times V_R \times \rho_{\text{Luft}} \times C_{\text{Luft}} \times (\vartheta_I - \vartheta_A) \quad \{7\}$$

$$\text{Mit dem Lüftungs-Paneel:} \quad Q_P = L_P \times V_R \times \rho_{\text{Luft}} \times C_{\text{Luft}} \times (\vartheta_I - \vartheta_F) \quad \{8\}$$

Hierbei bedeuten:

Q _S	erforderliche Wärmemenge bei der Stoßlüftung in kWh
Q _P	erforderliche Wärmemenge bei der Paneel-Lüftung in kWh
L _S	Luftwechselrate bei der Stoßlüftung 0,62 in 5min
L _P	Luftwechselrate bei der Paneel-Lüftung 0,77 in 45min
V _R	Raumvolumen 217 m ³
ρ _{Luft}	Dichte von Luft 1,19 kg/m ³
C _{Luft}	Speicherkapazität von Luft 0,00028 kWh/kgK
ϑ _I	Norminnentemperatur 20 °C

ϑ_A Mittlere Außentemperatur während der Heizperiode 3,3 °C (langjähriges Mittel)

ϑ_F Flurtemperatur* 13 °C

* Die Normtemperatur für Flure und Treppenhäuser beträgt 15 °C. In der folgenden Berechnung wird durch den Betrieb von Lüftungs-Paneeelen in allen Klassenzimmern eine Absenkung der Flurtemperatur durch gekippte Flurfenster um 2 K angenommen.

Für die 5minütige Stoßlüftung ergibt sich eine Wärmemenge von

$$Q_S = 0,62 \times 217 \text{ m}^3 \times 1,19 \text{ kg/m}^3 \times 0,00028 \text{ kWh/kgK} \times (20 \text{ °C} - 3,3 \text{ °C}) K = \mathbf{0,74 \text{ kWh}},$$

und für die 45minütige Paneel-Lüftung eine Wärmemenge von

$$Q_P = 0,77 \times 217 \text{ m}^3 \times 1,19 \text{ kg/m}^3 \times 0,00028 \text{ kWh/kgK} \times (20 \text{ °C} - 13 \text{ °C}) K = \mathbf{0,39 \text{ kWh}}.$$

Demzufolge beträgt die benötigte Wärmemenge zur Erwärmung der nachströmenden Luft, unter der zuvor genannten Bedingung, dass die Flurtemperatur bei 13 °C bleibt, etwa halb so viel, wie bei der Stoßlüftung.

Test der CO₂-Ampeln

Während des ersten Durchlaufs wurden die Anzeigen der CO₂-Ampeln mit aufgezeichnet (Bild 4). Der Messplatz 2 (toter Winkel) umfasste neben der CO₂-Logger-Messung auch die Aufzeichnungen zur Wirkungsweise der beiden mitgeprüften Ampeln.

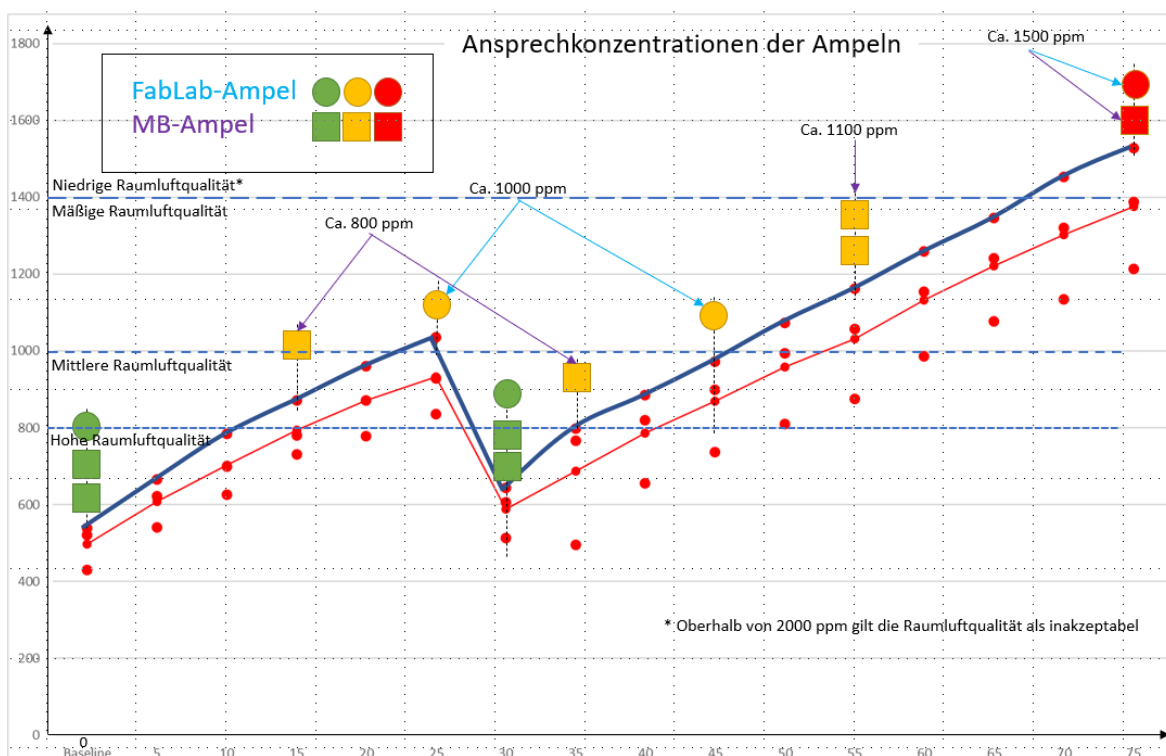


Bild 4 Anzeigen der CO₂-Ampeln im ersten Versuchsdurchlauf

Die Anzeige der FabLab-Ampel besteht aus zwei kreisrunden Leuchtanzeigen, von denen eine sowohl grün als auch gelb (mit einem erfreuten Smilie) und die zweite rot (mit einem traurigen Smilie) leuchtet. Die Schwellenwerte betragen ca. 1000 ppm für die Umschaltung von Grün auf Gelb und ca. 1500 ppm für die Umschaltung von Gelb auf Rot.

Die MB-Ampel besitzt je zwei kleine Leuchtanzeigen für alle drei Farben. Die Schwellenwerte sind hier differenzierter. Bereits bei ca. 800 ppm springt die Ampel von grün auf eine gelbe Anzeige. Bei ca. 1100 ppm leuchtet das zweite Gelblicht mit auf. Bei 1500 ppm springt sie auf eine Anzeige in Rot. Bei welcher Konzentration sie auf zweifach Rot schaltet, konnte nicht ermittelt werden, da der Versuch bei Erreichen von 1500 ppm beendet wurde. Bereits bei ca. 1200 ppm hatten Schüler*innen vereinzelt das Bedürfnis, die Fenster zu öffnen.

In der einschlägigen Literatur [1,2,4] werden die Luftqualitäten in Anlehnung an die inzwischen nicht mehr geltende, aber nach wie vor zu berücksichtigende DIN EN 13779 bei CO₂-Konzentrationen bis 800 ppm als hoch, bis 1000 ppm als mittel, bis 1400 ppm (in manchen Literaturstellen auch 1500 ppm) als niedrig und oberhalb von 2000 ppm als inakzeptabel bezeichnet. Insoweit erfüllen beide getesteten Ampeln die Anforderungen sehr gut.

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Messungen und Berechnungen der „Reinigungsleistung“ des Lüftungs-Paneels ergeben unter den gewählten Versuchsbedingungen bei acht eingesetzten Ventilatoren eine Raumlufwechslerate von ca. einmal pro Stunde und unter diesen Bedingungen eine rechnerische „Kompensationswirkung“ von 4 l CO₂/min. Bei einem schülerspezifischen Ausstoß von 0,32 l CO₂/min aus {2} ist bei der vorliegenden Lüfterdimensionierung der Daueraufenthalt von ca. 13 Schüler*innen ohne Stoß- oder Kipplüftung möglich. Umgerechnet wäre je ca. 1,6 Schüler*innen ein Ventilator in der hier verbauten Leistungsklasse erforderlich. Hieraus ergibt sich die Bestimmungsgleichung für die Anzahl von Ventilatoren wie folgt:

$$n_{V28} \approx n_S / 1,6 \quad \{9\}$$

oder allgemein:

$$n_V \approx 1750 \times n_S / (\dot{v}_V \times A_S) \quad \{10\}$$

Hierin bedeuten weiterhin:

n_{V28} erforderliche Anzahl von Ventilatoren (freier Luftstrom 28 m³/h)

n_V erforderliche Anzahl von Ventilatoren allgemein

n_S Anzahl der Schüler*innen

\dot{v}_V Luftvolumenstrom pro Ventilator in m³/h

A_S Offene Siebfläche (Durchlassgrad) des Insektengitters in %

Geltungsbedingungen für die Gleichungen:

Die Berechnungsformeln gelten für Schüler*innen der oberen Klassen (Kassen 10/11) und einem spezifischen Raumvolumen von ca. 7 m³/Schüler*in. Durch den festgestellten Effekt, wonach die Reinigungsleistung mit zunehmendem CO₂-Konzentrationsniveau wächst, könnte es einen Degressionseffekt für die Bestimmung der Anzahl an Ventilatoren geben. Hierzu lässt sich aus den durchgeführten Versuchen aber kein seriöser Hinweis ableiten. Insoweit befindet sich die Dimensionierung über die Gleichung {10} stets auf der sicheren Seite. Bei den Gleichungen handelt es sich um zugeschnittene Größengleichungen, deshalb müssen die einzelnen Größen zwingend in den angegebenen Einheiten eingesetzt werden.

Etwaige strömungstechnische Verschattungswirkungen der Ventilatoren untereinander dürften vernachlässigbar gering sein und bleiben hier unberücksichtigt. Bei Einsatz von Ventilatoren mit

einem höheren Luftstrom und/oder bei Verwendung eines Insektengitters mit einem höheren Durchlassgrad kann die Anzahl der Ventilatoren entsprechend {10} verringert werden.

Zusammenfassung

In drei Versuchsdurchläufen wurden die Wirksamkeit und die Eigenschaften des Lüftungs-Paneels „AirContinui®“ von Brach und Gräßer in einem Durchschnittsklassenzimmer einer Karlsruher Schule überprüft. Als Referenzwert für die Konzentrationszunahme diente der erste Versuch mit geschlossenen Fenstern und geschlossener Klassenzimmertür sowie einer 5minütigen Stoßlüftung nach einer Unterrichtszeit von 25 min. Nach der Lüftungspause lief der Versuch bis zum Erreichen der kritischen Konzentration von 1500 ppm. Dabei zeigte sich die typische, in vielen Literaturstellen skizzierte „Sägezahnkurve“. Beim zweiten Versuch wurde während des Paneel-Betriebs die Klassenzimmertür schrittweise geöffnet und der Öffnungsgrad ermittelt, bei dem die CO₂-Konzentration nicht mehr weiter anstieg. Der Dritte Versuch fand bei einer von Anbeginn offenen Tür und aktivem Paneel so lange statt, bis die CO₂-Konzentration ebenfalls nicht weiter anstieg. Das Lüftungspaneel konnte in der vorliegenden Dimensionierung mit 8 Lüftern und einem, durch das Insektengitter um 58% geminderten Luftstrom von je 28 m³/h, bei einer coronabedingt reduzierten Belegung mit 13 Personen die CO₂-Konzentration dauerhaft unter 1000 ppm halten. Voraussetzung hierfür war eine, um mindestens 20° geöffnete Standard-Klassenzimmertür mit den Abmessungen 1m x 2m.

Die aus dem Flurbereich angesaugte, in der Heizperiode vorgewärmte und in der Sommerzeit vorgekühlte Luft wird über die Zimmerdiagonale zum Lüftungs-Paneel geführt und hinausgeblasen. Auf diese Weise kompensiert das Lüftungs-Paneel die, durch das Atmen der Anwesenden entstehende CO₂-Aufkonzentration kontinuierlich.

Auf Basis der Versuchsergebnisse wird ein allgemeines Berechnungsschema für die Paneel-Dimensionierung für variable Belegungszahlen abgeleitet und vorgestellt. Auf dessen Basis lassen sich Anzahl und Luftstrom der Ventilatoren für Räume mit höheren Belegungszahlen ermitteln. Bei der Wärmebilanz zur Erwärmung der nachströmenden Luft zeigt das Lüftungs-Paneel durch die Ansaugung vorgewärmter Flur-Luft gegenüber der Stoßlüftung mit offenen Fenstern und der kalten Außenluft einen deutlichen Vorteil. Der Wärmebedarf bei der Durchlüftung mit dem Paneel liegt halb so hoch, wie bei der Stoßlüftung.

Die im Versuch mitgetesteten CO₂-Ampeln von FabLab e. V. Karlsruhe und MB Systemtechnik geben bei den, in der Literatur genannten Grenzwerten von 1000 und 1500 ppm durch entsprechende Lichtzeichen korrekte Hinweise zum Lüften.

Literatur

1. Neumann, H.-D., Buxtrup, M.: Beurteilung der CO₂-Konzentration in Klassenräumen in Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 74 (2014) Nr. 6 - Juni
2. Neumann, H.-D.: Abschätzung der CO₂-Konzentration in Räumen anhand empirisch gewonnener Daten in Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft, 78 (2018) Nr. 11/12 – November/Dezember
3. Moriske H.-J.: Das Risiko einer Übertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen lässt sich durch geeignete Lüftungsmaßnahmen reduzieren, Stellungnahmeder Kommission Innenraumlufthygiene am Umweltbundesamt (8/2020)

4. Fader, B. et al.: Sichere Schule Lernraum/Unterrichtsraum in DGUV Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (2014), S. 21 ff.
5. Thews O., Kunzelmann K.: Ventilation und Atemmechanik in Physiologie des Menschen. 32. Auflage. Springer-Verlag, Berlin 2019.
6. Pasch T., Kraye H., Brunner H. R.: Definition und Messgrößen der akuten respiratorischen Insuffizienz: Ventilation, Gasaustausch, Atemmechanik in Grundzüge der Beatmung. Springer, Berlin 1991.
7. N. N.: Deutsches Rotes Kreuz: Sanitätsausbildung: Atemstörungen - Funktion der Atmungsorgane.
8. Palic, M.: Elektrische Wärme- und Heiztechnik, Expert-Verlag Ehningen (1991)
9. N. N.: AFRISO-EURO-INDEX GmbH: Infektionsrisiko reduzieren durch CO₂-Raumluftkontrolle, Güglingen 2021.
10. DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an die Lüftungs- und Klimaanlage, (09/2007), Beuth-Verlag GmbH, Berlin