Kommentar zu *„Wirksamkeit der einseitigen Fensterlüftung in Klassenräumen – Stoßlüftung“* von Ostmann et al. 2022

Frank Helleis und Thomas Klimach, Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz

Version 1.2, 28.04.2023

Zusammenfassung

Ostmann et al. (2022) simulieren mit aufwändigen CFD-Rechnungen die thermischen und lufthygienischen Verhältnisse in einem Klassenraum, der nach UBA-Empfehlung stoßgelüftet werden soll. Aus der Auswertung schließen die Autoren: „*Für den in dieser Untersuchung betrachteten Fall einer einseitigen Fensterlüftung wird der von der DIN EN 16798 [5] geforderte Mindestluftvolumenstrom von 25m3/h für die Kategorie 2 unter Einhaltung der 20/5/20-Regel nicht erreicht.“*

Bei eingehender Analyse der Simulationsergebnisse zeigt sich jedoch, dass die Auswertungen von Ostmann et al. (2022) die Fensterlüftungsempfehlungen des UBA nicht abbilden. Daher erscheint es wissenschaftlich nicht gerechtfertigt, dass Ostmann et al. (2022) ihre Simulationsergebnisse und Schlussfolgerungen auf die UBA-Empfehlungen beziehen.

Bei Anwendung wissenschaftlich üblicher Methoden zeigt sich, dass durch Fensterlüften nach UBA-Empfehlung sowohl mittlere Außenluftvolumenströme nach EN 16798 Kategorie II als auch CO_2-Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können - siehe Anhang. Darüber hinaus bestätigen die Simulationsergebnisse die Wirksamkeit kontinuierlichen Fensterlüftens nach gültigen Arbeitsstättenrichtlinien (BAUA ASR A3.6 2012). Insgesamt bietet die Studie von Ostmann et al. (2022) ein Beispiel dafür, wie aus nützlichen und positiven Simulations-ergebnissen gegenteilige Schlüsse gezogen werden können.

Ergebnisse und Diskussion

Ostmann et al. (2022) beschreiben den Schwerpunkt ihrer Studie wie folgt (Seite 2): *„In der Strömungssimulation wird die vom UBA empfohlene 20/5/20-Lüftungsstrategie [13] untersucht.“*

Als zentrale Ergebnisse der Studie stellen Ostmann et al. (2022) mit Bezug auf das vom UBA empfohlene Fensterlüften fest:

- „*Für den in dieser Untersuchung betrachteten Fall einer einseitigen Fensterlüftung wird der von der DIN EN 16798 [5] geforderte Mindestluftvolumenstrom von 25m3/h für die Kategorie 2 unter Einhaltung der 20/5/20-Regel nicht erreicht.“* (Seite 10)
- *„Der Großteil der Schulstunde findet damit im „hygienisch auffälligen“ Bereich statt [12].“* (Seite 8)
- *„Insbesondere bei geringen Außentemperaturen werden die thermischen Komfortgrenzen deutlich verletzt. Im Fußbereich bleiben die Temperaturen auch für einen längeren Zeitraum nach der Lüftungsphase unterhalb von 20 °C, sodass unter diesen Bedingungen keine optimale Lernumgebung bei einer einseitigen Fensterlüftung bereitgestellt wird.“* (Seite 11)

Tatsächlich empfiehlt die von Ostmann et al. zitierte „Handreichung des Umweltbundesamts 2020“ jedoch Folgendes: **„***Während des Unterrichts wird alle 20 Minuten mit weit geöffneten Fenstern gelüftet…. Daher ist bei kalten Außentemperaturen im Winter ein Lüften von ca. 3-5 Minuten ausreichend. An warmen Tagen muss länger gelüftet werden (ca. 10-20 Minuten) … Zudem soll nach jeder Unterrichtsstunde über die gesamte Pausendauer gelüftet werden, auch während der kalten Jahreszeit.“* (Umweltbundesamt 2020)

Daraus ergeben sich folgende Punkte:

- In der vorliegenden Version der Publikation des UBA vom 15.10.2020 existiert weder der Begriff „20/5/20 Regel“, noch beschreibt der Text des UBA den von Ostmann et al. (2022) unterstellten Prozess.
- Für die gewählte Mittelungsmethode (Integrationsintervall) wurde keine nachvollziehbare Begründung oder Referenz angegeben, die eine Anwendung im gegebenen Kontext rechtfertigen würde oder sinnvoll erscheinen ließe (siehe Anhang).
- Im Unterschied zur Empfehlung des UBA vernachlässigt die Bewertung von Ostmann et al. (2022) die Option dynamisch an die Außentemperatur angepasster Lüftungszeiten (z.B. mit Hilfe von CO_2-Ampeln). Die Schlussfolgerungen zum thermischen Komfort sowohl bei 5°C (Komforteinbußen, Heizenergieverschwendung durch Überlüftung) als auch bei 20°C (zu niedriger Luftvolumenstrom) wären damit nicht mehr haltbar.
- Im Unterschied zur Empfehlung des UBA vernachlässigen Ostmann et al. (2022) bei Berechnung der mittleren ausgetauschten Luftvolumenströme jene Luftmenge, die während der Lüftung in den Pausen ausgetauscht wird.
- Bei Annahme experimentell validierter pro-Kopf CO_2-Emissionen (17 l/(h p)) und realistischer mittlerer Raumbelegungen (25 p) ergeben sich mittlere CO_2-Konzentrationen von ca. 890 ppm. Sie liegen also im Gegensatz zu den Berechnungen von Ostmann et al. (2022) während des größten Teils der Schulstunde im hygienisch unauffälligen Bereich (Persily 2017; Reiß et al. 2017; Sakamoto et al. 2022; Schwarzbauer 2022).
- Von Ostmann et al. (2022) werden Simulationen bei 5°C, 15°C und 20°C Außentemperatur präsentiert. Die mittlere Jahresaußentemperatur in Deutschland beträgt derzeit ca. 10.5°C, typische Heizgrenzen in Schulen liegen bei 10...12°C. Durch Interpolation lässt sich für 10°C abschätzen, dass die Außenluftvolumenströme im Normbereich liegen würden. Auch die Komfortbedingungen würden während der Schulzeit meist innerhalb des Normbereichs liegen (siehe Anhang).
- Ostmann et al. (2022) geben bei ihrer Simulation eine Komfortgrenze von 20°C an. Dieser Schlüsselparameter für die Bewertung der thermischen Umgebung wurde weder anhand gültiger Normen, noch durch eine wissenschaftliche Referenz noch durch eine plausible Begründung nachgewiesen – siehe Anhang (DIN EN 16798 2019).
- Durch keine Referenz wurde belegt, dass die Einhaltung von Kat II Umgebungs-bedingungen eine „optimale Lernumgebung bereitstellen“. Ebenso wurde kein wissenschaftlicher Nachweis für den kausalen Zusammenhang zwischen der Qualität der Lernumgebung und der Temperatur im Fußbereich gegeben (siehe Anhang).

Da weder Eingabeparameter noch Auswertung der Simulationsergebnisse die Empfehlungen des UBA abbilden, sind die Schlussfolgerungen von Ostmann et al. (2022) weder zur

lufthygienischen noch zur thermischen Bewertung der Stoßlüftung von Klassenräumen nach UBA-Empfehlung geeignet.

Dass Ostmann et al. (2022) explizit beanspruchen, durch die Auswertung ihrer Strömungssimulation die Lüftungsempfehlungen des UBA und die „Wirksamkeit der einseitigen Fensterlüftung - Stoßlüftung“ zu untersuchen, ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar, da der Prozess gar nicht abgebildet wird.

Analysiert man die Simulationsergebnisse mit wissenschaftlich üblichen Methoden wie im Anhang beschrieben (Mittelung über vollständige Lüftungszyklen; Verwendung anerkannter Literaturdaten für CO_2-Emissionen), so zeigt sich, dass durch Fensterlüften nach UBA-Empfehlung sowohl mittlere Außenluftvolumenströme nach EN 16798 Kategorie II als auch CO_2-Mittelwerte unter 1000 ppm erreicht werden können.

Anhang

Mindestaußenluftvolumenstrom

Die Autoren beschreiben den Schwerpunkt ihrer Studie wie folgt: *„In der Strömungssimulation wird die vom UBA empfohlene 20/5/20-Lüftungsstrategie [13] untersucht.“* (Seite 2)

Als ein zentrales Ergebnis der Studie stellen die Autoren fest: „*Für den in dieser Untersuchung betrachteten Fall einer einseitigen Fensterlüftung wird der von der DIN EN 16798 [5] geforderte Mindestluftvolumenstrom von 25m3/h für die Kategorie 2 unter Einhaltung der 20/5/20-Regel nicht erreicht.“* (Seite 10).

Zunächst ist festzustellen, dass die DIN EN 16798 keine Mindestaußenluftvolumenströme für Klassenräume ***fordert***, sondern Raumluftkategorien mit zugehörigen Mindestluftvolumenströmen ***definiert***, um Rechtssicherheit zwischen Planern, Ausführenden und Bauherren herzustellen (DIN EN 16798 2019). Die ASR3.6 des BAUA fordert: „*In umschlossenen Arbeitsräumen muss* ***gesundheitlich zuträgliche*** *Atemluft in* ***ausreichender*** *Menge vorhanden sein.“* Mindestluftvolumenströme sind aufgrund unterschiedlicher Prozess- und Gebäudeemissionen gar nicht definierbar. Ansonsten gibt es lediglich einschlägige ***Empfehlungen*** dazu vom UBA, BAUA und diversen Fachverbänden, z.B. (BAUA ASR A3.6 2012; FGK 2004; Umweltbundesamt 2021).

Tatsächlich empfiehlt die von den Autoren zitierte „Handreichung des Umweltbundesamt 2020“ aber folgendes: ***„****Während des Unterrichts wird alle 20 Minuten mit weit geöffneten Fenstern gelüftet…. Daher ist bei kalten Außentemperaturen im Winter ein Lüften von ca. 3-5 Minuten ausreichend. An warmen Tagen muss länger gelüftet werden (ca. 10-20 Minuten) … Zudem soll nach jeder Unterrichtsstunde über die gesamte Pausendauer gelüftet werden, auch während der kalten Jahreszeit.“*(Umweltbundesamt 2020).

In der uns vorliegenden Version der Publikation vom 15.10.2020 des UBA existiert weder der Begriff „20/5/20 Regel“, noch beschreibt der Text des UBA den von den Autoren unterstellten Prozess. Der von Ostmann et al. hergestellte Zusammenhang mit den UBA Empfehlungen ist sachlich nicht gegeben.

Des Weiteren wurden keine nachvollziehbaren Begründungen oder Referenzen angegeben, die eine Anwendung der gewählten Mittelungsmethode im gegebenen Kontext untermauern würde. Nach allgemein anerkannter Methodik ist bei der Berechnung von Zeitmittelwerten über vollständige Prozesszyklen zu integrieren.

Ostmann et al. räumen ein: *„Die Ergebnisse bei Betrachtung einer vollen Stunde sind abhängig von dem weiteren Lüftungsverhalten in den Pausenzeiten. Wird am Ende der Schulstunde erneut gelüftet, steigt die Luftwechselrate an, da innerhalb der betrachteten Zeitspanne … mehr Frischluft eingebracht wird.“* (Seite 7). Für diese Ergebnisse liegen allerdings keine numerischen Daten vor und sie gehen nicht nachvollziehbar in die Gesamtbewertung ein.

Um zu realistischen Berechnungen von CO2-Mittelwerten bzw. mittleren Luftvolumenströmen beim Stoßlüften zu kommen, müssen mindestens Doppelstunden oder besser ganze Schultage mit allen Pausen simuliert werden, siehe z.B. (Helleis et al. 2023).

Nachweis der Einhaltung der EN 16798 KAT II anhand von Ostmann et al.

Auf Basis der Simulationsergebnisse der Studie von Ostmann et al. lassen sich die tatsächlichen Luftvolumenströme und damit die Wirksamkeit der einseitigen Fensterlüftung einfach bestimmen. Für den vom UBA empfohlenen regelmäßigen 20/5 min Zyklus inklusive Pausenlüftung sind die Ergebnisse unserer Rechnungen anhand der Simulationsdaten von Ostmann et al. in untenstehender Tabelle gezeigt (Ostmann et al. 2022; Umweltbundesamt 2020, 2021). Die zeitgemittelten Volumenströme während der 5-minütigen Fensteröffnungszeit wurden Abb. 8 und Tab. 3 entnommen (2. Spalte). Das stündlich im Mittel ausgetauschte Luftvolumen beträgt 20% davon (5 min / 25 min, 3. Spalte). Das zu reiner Mischlüftung äquivalente Luftvolumen wird durch Multiplikation mit der in Tab. 4 gegebenen Lüftungseffizienzen berechnet (4. Spalte). Die aus einem Klassenraumvolumen von 200m³ berechnete effektive Luftwechselrate ist ebenfalls gegeben (5. Spalte).

Tabelle 1. Berechnung der Luftvolumenströme bei Fensterlüftung nach UBA Empfehlung und den Volumenstrom Daten von Ostmann et. al.

Außen-Temperatur	Volumenstrom Fenster, m³/h	ausgetauschtes Volumen, m³/h	Mischlüftungs-äquivalentes Volumen, m³/h	effektive Luftwechselrate, Klassenraum 200m³, 1/h
5°C	5160	1032	1162	5.8
15°C	3636	727	880	4.4
20°C	2676	535	683	3.4

Für die in der Studie betrachteten 29 anwesende Personen ergibt sich auf Grundlage der DIN EN 16798 Kategorie II ein Mindestaußenluftvolumenstrom von

$$29\,p * 25m^3/(h\,p) = 725\,m^3/h$$

Im Gegensatz zur Schlussfolgerung der Autoren werden die Mindestaußenluftvolumenströme nach EN 16798 Kategorie II bis 15°C Außentemperatur durch Fensterlüftung nach UBA problemlos erreicht. Für 20°C Außentemperatur ergibt sich ebenfalls kein Problem, das UBA empfiehlt bei wärmeren Außentemperaturen eine Verlängerung der Lüftungszeiten (Umweltbundesamt 2020). Bereits mit einer Änderung auf 18 min / 7 min würden die spezifizierten Mindestaußenluftvolumenströme erreicht.

Für 5°C Außentemperatur würden sogar die Kategorie I durch Fensterlüftung nach UBA knapp erreicht.

Die von den Autoren in Tab. 3 angegeben mittleren stündlichen Luftwechselraten sind nur etwa halb so groß wie die bei konsequenter Rechnung nach UBA Empfehlung, was an der Wahl des Mittelungszeitraumes von einer Unterrichtsstunde ohne vorangegangene bzw. nachfolgende Lüftungsphase liegt (siehe oben).

Mittlere CO_2 Konzentration

Als weiteres zentrales Ergebnis stellen die Autoren fest: *„Der Großteil der Schulstunde findet damit im „hygienisch auffälligen“ Bereich statt [12]. Die in der Simulation errechneten Werte stehen in einer guten Übereinstimmung mit den Messergebnissen in Schulen, die vor der Pandemie in der wärmeren Jahreszeit durchgeführt wurden. [2, 9]*

Zunächst ist festzustellen, dass sich die gegebenen Referenzen ausnahmslos auf Feldstudien von Autoren beziehen, die auch an der vorliegenden Studie beteiligt waren.

Laut der im Papier gegeben Daten ergibt sich für die CO2 Emission einer Person (20°C, 1013 hPa):

$$0.54\ m\text{^}3/h * 0.0792\ kg/m\text{^}3\ * 24.06\ l/mol * 22.72\ mol/kg = \mathbf{23.4\ l/h}$$

Zur Berechnung der CO_2 Emissionen von Personen wird eine Website zitiert (www.co2online.de). Die Autoren stellen fest: *„Im vorliegenden Fall eines Klassenraums handelt es sich hauptsächlich um jüngere Personen, weshalb die getroffene Annahme … eine konservative Annahme darstellt.“* (Seite 2)

Nach der ebenfalls zitierten Referenz Persily 2017 ergeben sich bei Mittelung der relevanten Altersbereiche von 11-16 und 16-21 Jahren allerdings lediglich 17 l/h (MET 1.2, Tabelle 4), in guter Übereinstimmung mit den gemittelten 16.2 l/h im Lecture Classroom, Tabelle 5 und neueren Referenzen (Persily 2017; Sakamoto et al. 2022). Für 29 Personen ergeben sich mit dem größeren Wert damit CO_2 Anstiegsraten von ca.

$$29 * (0.017\ m^3/h)/(200\ m\text{^}3) = 2465\ ppm/h$$

Damit würde die CO_2 Konzentration bis zum Lüftungsintervall also lediglich um ca. 2465ppm/h * 0.33h = 822 ppm, also auf 1230 ppm statt auf 1552 ppm ansteigen – vgl. Abb. 9 der Studie. Im darauffolgenden Intervall wäre nach Absenkung auf ca. 550 ppm ein ca. linearer Anstieg auf einen Spitzenwert von ca. 1371 statt 1800 ppm zu erwarten. Die zeitgemittelte CO_2 Konzentration läge damit unter 1000 ppm.

$$(550\ +\ 1371)\ ppm/2 = \mathbf{961\ ppm}$$

Unter der Annahme realistischer pro-Kopf Emissionen liegt die CO2 Konzentrationen während des größten Teils der Schulstunde also im hygienisch unauffälligen Bereich.

Nimmt man die in üblichen Simulationssettings angenommenen und für die Praxis relevanten gemittelten 25 Personen pro Klassenraum und die Persily Daten für den Klassenraum (Müller et al. 2020; Peper et al. 2007; Reiß et al. 2017; Schwarzbauer 2022), ergäben sich

$$25 * (0.0162\ m^3/h)/(200\ m\text{^}3) = 2025\ ppm/h$$

Mit einem Hub von 2025 ppm/h * 0.33h = 675 ppm, würde die Konzentration auf 1225 ppm ansteigen, die mittlere CO2 Konzentration läge dann bei

$$(550\ +\ 1225)\ ppm/2 = \mathbf{888\ ppm}$$

Bei Nutzung realistischer pro-Kopf Emissionen und realistischer mittlerer Raumbelegungen lägen die simulierten CO2 Konzentrationen während des größten Teils der Schulstunde also weit im hygienisch unauffälligen Bereich – im Gegensatz zu den Aussagen der Autoren.

Komforteinbußen durch Stoßlüften

Dass sich durch das weite Öffnen von Fenstern bei winterlichen Außentemperaturen – im Mittel ca. 5°C während der Nutzungszeit – zeitlich beschränkte Komforteinbußen besonders im Fensterbereich und im fensternahen Bodenbereich ergeben, ist durch viele Studien nachgewiesen und aus allgemeiner persönlicher Erfahrung wohl bekannt.

Ostmann et al. stellen fest: *„Insbesondere bei geringen Außentemperaturen werden die thermischen Komfortgrenzen deutlich verletzt. Im Fußbereich bleiben die Temperaturen auch für einen längeren Zeitraum nach der Lüftungsphase unterhalb von 20 °C, sodass unter diesen Bedingungen keine optimale Lernumgebung bei einer einseitigen Fensterlüftung bereitgestellt wird.“* (Seite 11).

Nach EN 16798 Kat II beträgt die untere Grenze der operativen Temperatur in natürlich belüfteten Gebäuden bei 10° Außentemperatur und darunter (running mean) ca. 18°C. Die Lufttemperatur läge bei Dauerlüften mit 17°C mittlere Lufttemperatur (2 K Differenz Luft/Wand) also durchaus im Komfortbereich (DIN EN 16798 2019). Der zulässige Temperaturgradient liegt bei 3 K zwischen Fuß und Kopfbereich (DIN EN 16798 2019), so dass von einer minimalen normgerechten Temperatur im Fußbereich von ca. 15 °C auszugehen ist. Ostmann et al. gehen bei ihrer Simulation von einer Komfortgrenze von 20 °C aus. Dieser Schlüsselparameter für die Bewertung der thermischen Umgebung ist weder durch gültige Normen, noch durch eine wissenschaftliche Referenz, noch durch eine plausible Begründung nachgewiesen. Es wird durch keine Referenz belegt, dass die Einhaltung von Kat II Umgebungsbedingungen eine „optimale Lernumgebung bereitstellen" – im Gegenteil, es ist trivial zu widerlegen (Kat I). Ebenso wurde kein wissenschaftlicher Nachweis für den kausalen Zusammenhang zwischen der Qualität der Lernumgebung und der Temperatur im Fußbereich gegeben.

Helleis et al. haben sowohl im Experiment als auch im Modell nachgewiesen, dass durch sanfteres, aber länger andauerndes Lüften bis hin zur Kippdauerlüftung aufgrund der steigenden Lüftungseffizienz, wie sie auch von Ostmann et al. beobachtet wird, und des reduzierten Impulseintrags gleichzeitig Luftqualität und Behaglichkeit erheblich erhöht und der Heizwärmeverbrauch verringert werden können (Helleis et al. 2023). Da alle gängigen Komfortmodelle den Bekleidungsgrad berücksichtigen (müssen), wäre eine Anpassung z.B. des winterlichen Schuhwerks an konstant niedrigere Raumlufttemperaturen z.B. im Bodenbereich zu erwarten, so dass nicht von erheblichen Beeinträchtigungen der Nutzerzufriedenheit auszugehen ist. (DIN EN 16798 2019; Humphreys und Nicol 2002; ISO 7730 2006).

Studiendesign

In der vorliegenden Studie werden Simulationen bei 5°C, 15°C und 20°C Außentemperatur präsentiert. Die mittlere Jahresaußentemperatur in Deutschland beträgt derzeit ca. 10.5°C, typische Heizgrenzen in Schulen liegen bei 10…12°C. Warum dieser thermisch interessante Bereich nicht ebenfalls untersucht wurde, ist wissenschaftlich nicht nachvollziehbar. Jedenfalls lässt sich durch Interpolation abschätzen, dass die Mindestaußenluftvolumenströme in jedem Fall über dem Normbereich und die Komfortbedingungen am unteren Ende des Normbereichs bzw. nicht weit davon entfernt liegen würden, so dass ganzjährig größere thermische und lufthygienische Probleme vermeidbar erscheinen.

Referenzen

BAUA ASR A3.6. (2012). *Technische Regel für Arbeitsstätten*. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A3-6.pdf?__blob=publicationFile. Zugegriffen: 17. Mai 2021

DIN EN 16798. (2019). Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik. Beuth Verlag. https://www.beuth.de/de/norm/din-en-16798-1/264630492

FGK, e. V. (2004, November). FGK Statusreport 22 - Lüftung von Schulen. https://downloads.fgk.de/174_SR_22_Schullueftung_V4_Internet_010611.pdf. Zugegriffen: 5. Juli 2021

Helleis, F., Klimach, T., & Pöschl, U. (2023). *Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz in Innenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumlufttechnik und Luftreiniger*. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7586167

Humphreys, M. A., & Nicol, F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy and Buildings*, *34*(6), 667–684. https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00018-X

ISO 7730. (2006, Mai). Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005. https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naerg/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:89417255. Zugegriffen: 25. August 2021

Müller, D., Burgholz, T. M., Rewitz, K., Bardey, J., Derwein, D., Tappler, P., & Schweiker, M. (2020). *Empfehlung zum erforderlichen Luftwechsel in Schulen, Großraumbüros, Hörsälen und Turnhallen zur Reduzierung eines aerosolgebundenen Infektionsrisikos* (No. RWTH-2020-10366). Institut für Arbeits- und Sozialmedizin. https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-10366

Ostmann, P., Derwein, D., Kremer, M. T., Rewitz, K., & Müller, D. (2022). *Wirksamkeit der einseitigen Fensterlüftung in Klassenräumen : Stoßlüfung. 12 Seiten (2022). doi:10.18154/RWTH-2022-01310* (S. pages 12 Seiten). RWTH Aachen University. https://doi.org/10.18154/RWTH-2022-01310

Peper, S., Kah, O., Pfluger, R., & Schnieders, J. (2007, Juli). Passivhausschule Frankfurt Riedberg. PASSIVHAUS INSTITUT. https://passiv.de/downloads/05_passivhaus-schule_riedberg.pdf. Zugegriffen: 10. Februar 2021

Persily, A. K. (2017). Carbon Dioxide Generation Rates for Building Occupants. https://www.nist.gov/publications/carbon-dioxide-generation-rates-building-occupants-1. Zugegriffen: 20. Februar 2022

Reiß, J., Illner, M., Erhorn, H., Roser, A., Schakib-Ekbata, K., Gruber, E., et al. (2017, Dezember 1). Wissenschaftliche Begleitforschung zum Forschungsvorhaben „Energieeffiziente Schulen“ Abschlussbericht Phase 2. https://edocs.tib.eu/files/e01fb18/1010951262.pdf. Zugegriffen: 10. Februar 2022

Sakamoto, M., Li, M., Kuga, K., Ito, K., Bekö, G., Williams, J., & Wargocki, P. (2022). CO2 emission rates from sedentary subjects under controlled laboratory conditions. *Building and Environment*, *211*, 108735. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108735

Schwarzbauer, C. (2022). Forschungsprojekt „Sicheres Klassenzimmer“: Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht. https://doi.org/10.5281/zenodo.7496827

Umweltbundesamt. (2020, Oktober 15). Richtig Lüften in Schulen. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen. Zugegriffen: 4. Juli 2021

Umweltbundesamt. (2021, Juli 9). Lüftung, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an. Zugegriffen: 19. August 2021