

Forschungsprojekt „Sicheres Klassenzimmer“

Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht

Interimsbericht zu den Messergebnissen von
37.000 Unterrichtstagen in 244 Klassenzimmern
im Großraum München und der Stadt Mainz

verfasst von

Prof. Dr. Christian Schwarzbauer

*Projektleitung und Koordination der Öffentlichkeitsarbeit
Fakultät für angewandte Naturwissenschaften und Mechatronik
Hochschule für angewandte Wissenschaften München
E-Mail: christian.schwarzbauer@hm.edu*

München, den 28.12.2022

Danksagung

Für die hilfreichen wissenschaftlichen Anregungen, Beiträge und Diskussionen bedanke ich mich bei:

- ❖ Prof. Dr. Ulrich Pöschl, Dr. Thomas Klimach und Dr. Frank Helleis
Projektteam Lüftung, Luftqualität & Infektionsschutz
Max-Planck-Institut für Chemie, Mainz
- ❖ Prof. Dr. Christina J. Hopfe und Prof. Robert S. McLeod
Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau
Technische Universität Graz
- ❖ Prof. Dr. Henning Wackerhage
Fakultät für Sport- und Gesundheitswissenschaften
Technische Universität München

Für die hilfreichen Anregungen und Diskussionen während der Konzeptionsphase dieses Projekts bedanke ich mich bei:

- ❖ PD Dr. Andreas Wieser
Max von Pettenkofer-Institut für Hygiene und Medizinische Mikrobiologie
Ludwig-Maximilians-Universität München

Weiterhin bedanke ich mich bei folgenden Personen und Institutionen für die aktive Unterstützung des Forschungsprojekts „Sicheres Klassenzimmer“:

- ❖ Reinhard Nowak, Michael Tempelmayr und dem LineMetrics Support Team, LineMetrics GmbH, Haag, Austria, für die herausragende Unterstützung beim Aufbau, der Konfiguration und dem Betrieb des LoRaWAN-Sensor-Netzwerks zur Erfassung und Aufzeichnung der Messdaten.
- ❖ Den teilnehmenden Schulen, insbesondere den Schulleitungen und technischen Hausverwaltungen, für die aktive Unterstützung bei der Installation und Deinstallation der Sensoren.
- ❖ Den teilnehmenden Gemeinden, Landratsämtern und Stadtverwaltungen für die Finanzierung der benötigten Messtechnik (Sensoren, Gateways) sowie für die Unterstützung bei der Projektplanung.
- ❖ Der Truma Stiftung Renate Schimmer-Wottrich und dem Verein Freunde der Hochschule München e.V. für die Bereitstellung der Startfinanzierung für dieses Forschungsprojekt.

Haftungsausschluss

Bei den dargestellten Ergebnissen handelt es sich um vorläufige Ergebnisse einer wissenschaftlichen Studie, die noch der wissenschaftlichen Validierung in Form eines Peer Reviews bedürfen. Die Auswertung der Daten erfolgte mit der üblichen Sorgfalt unter Berücksichtigung des gegenwärtigen wissenschaftlichen Kenntnisstandes. Eine Gewährleistung oder Haftung gleich welcher Art kann deshalb nicht übernommen werden. Nach dem Abschluss weiterer Detailanalysen ist eine Veröffentlichung der Ergebnisse in einer internationalen wissenschaftlichen Fachzeitschrift geplant.

Kurzfassung

Die Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht wurde über den Verlauf des Schuljahres 2021/22 untersucht. Als Grundlage dienten Messdaten (CO₂-Konzentration, Volumenstrom von mobilen Luftreinigern) aus 244 Klassenzimmern an mehr als 37.000 Unterrichtstagen. In den untersuchten Klassenzimmern kamen folgende Lüftungsmethoden zum Einsatz: freie/natürliche Fensterlüftung, freie/natürliche Fensterlüftung kombiniert mit mobilen Luftreinigern, ventilatorgestützte Fensterlüftung, sowie zentrale und dezentrale Raumluftechnik (RLT). Als Indikator für die Luftqualität wurde die CO₂-Konzentration minutengenau aufgezeichnet und ausgewertet. Darüber hinaus wurde ein standardisierter Virusdosisfaktor (VDF) für die Aerosol-Übertragung von Coronaviren (SARS-CoV-2) und Grippeviren (Influenza-A) berechnet, der die potentiell inhalierte Virusdosis im Verhältnis zu einem Referenzklassenzimmer mit idealer Mischlüftung und dreifachem Luftwechsel pro Stunde angibt.

Bei freier Fensterlüftung wurde der CO₂-Leitwert von 1000 ppm während 24% der Unterrichtszeit überschritten (95-Perzentil: 1484 ppm; Maximalwert: 4599 ppm) und der Virusdosisfaktor lag während 40% der Unterrichtszeit über dem Referenzwert von 1,0 (95-Perzentil: 1,59; Maximalwert: 3,0). Durch Kombination von freier Fensterlüftung mit mobilen Luftreinigern konnte zwar der Virusdosisfaktor stark gesenkt werden, die Überschreitungen des CO₂-Leitwerts blieben aber ähnlich hoch wie beim freien Fensterlüften. Mit zentraler RLT wurden deutlich niedrigere CO₂- bzw. VDF-Werte als bei freier Fensterlüftung erreicht, wobei die VDF-Werte nicht so stark reduziert waren wie bei der Kombination der freien Fensterlüftung mit mobilen Luftreinigern. Ein guter Kompromiss (möglichst niedrige VDF-Werte bei gleichzeitig möglichst niedrigen CO₂-Werten) ergab sich für ventilatorgestützte Fensterlüftung oder dezentrale RLT.

Alle untersuchten Lüftungsmethoden zeigten in der warmen Jahreszeit bessere Ergebnisse, d.h. niedrigere CO₂- und VDF-Werte, als in der kalten Jahreszeit. Am stärksten war die Verbesserung beim freien Fensterlüften ausgeprägt, was durch häufigeres bzw. längeres Lüften bis hin zum verbreiteten Dauerlüften in der warmen Jahreszeit erklärbar ist.

Für alle Lüftungsmethoden gäbe es konkrete Ansätze und Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung von Luftqualität und Infektionsschutz. Diese betreffen sowohl den *Faktor Mensch* (Nutzerverhalten, Problembewusstsein) als auch den *Faktor Technik* (technische Hilfsmittel, unabhängiges Monitoring sowie verbesserte Konzeption, Einstellung und Wartung).

1 Einleitung

Gute Luftqualität in Innenräumen ist ein wichtiger Gesundheitsfaktor. Hohe CO₂-Konzentrationen und Schadstoffbelastungen können sich negativ auf das Wohlbefinden und die Leistungsfähigkeit auswirken und zu gesundheitlichen Risiken führen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2012; Umweltbundesamt 2016; United States Environmental Protection Agency 2021). Wirksame Belüftung kann nicht nur die CO₂-Konzentration und Schadstoffbelastung in Innenräumen reduzieren, sondern auch das Infektionsrisiko für luftübertragene Infektionskrankheiten wie Influenza oder Covid-19 (Umweltbundesamt 2020; Lelieveld et al. 2020; Prather et al. 2020; Morawska et al. 2020; Cheng et al. 2021; Edwards et al. 2021; Morawska et al. 2021; WHO 2021; Umweltbundesamt 2022).

Die Verbesserungen der Luftqualität in Unterrichtsräumen wird seit Langem diskutiert und rückte mit der Covid-19-Pandemie ins Zentrum des öffentlichen Interesses. Vor diesem Hintergrund wurden vom Umweltbundesamt und von anderen Seiten eine Reihe von Empfehlungen für das Fensterlüften und für andere Lüftungsmethoden herausgegeben (Umweltbundesamt 2020; Birmili et al. 2021; Pöschl et al. 2021; Helleis et al. 2021; Foitik et al. 2022; McLeod et al. 2022). Doch werden diese Empfehlungen während des realen Unterrichtsbetriebs auch konsequent umgesetzt? Ist es sinnvoll zusätzlich mobile Luftreiniger zur Reduzierung des Infektionsrisikos einzusetzen, oder sind nachrüstbare dezentrale Lüftungsanlagen bzw. einfache Ventilator-Fensterlüftungssysteme bessere Alternativen? Und wie wirksam sind dezentrale Lüftungsanlagen oder zentral verbaute raumluftechnische Anlagen im Praxisbetrieb? Trotz der großen praktischen Bedeutung dieser Fragen, gibt es einen Mangel an aktuellen Daten aus dem realen Unterrichtsbetrieb, auf deren Grundlage evidenzbasierte Entscheidungen getroffen werden können.

Ausgeatmete Luft und darin enthaltene CO₂-Moleküle und Atemaerosolpartikel verbreiten sich rasch in Innenräumen. Die CO₂-Konzentration ist ein Maß für den Anteil der ausgeatmeten Luft und wird häufig als Indikator für die allgemeine Innenraum-Luftqualität verwendet (Sundell 2004; Umweltbundesamt 2008; Guyot et al. 2018; Europäische Norm EN 16798-1:2019; Jones et al. 2021). Auf Grundlage von CO₂-Konzentrationsmessungen kann daher auch die praktische Wirksamkeit der verschiedenen Lüftungskonzepte im realen Unterrichtsbetrieb beurteilt werden.

Ziel des hier beschriebenen Forschungsprojekts „Sicheres Klassenzimmer“ war es, die Luftqualität während des realen Unterrichtsbetriebs in Klassenräumen mit verschiedenen Lüftungsmethoden über einen längeren Zeitraum zu verfolgen. So wurde die CO₂-Konzentration während des Unterrichtsbetriebs in 244 Klassenzimmern an 52 Schulen im Großraum München sowie in der Stadt Mainz über das gesamte Schuljahr 2021/22 minutengenau gemessen und aufgezeichnet. Die Auswahl bestand aus 19 Grundschulen sowie 33 weiterführenden Schulen (Mittelschulen, Realschulen,

Gymnasien, Fachoberschulen und Berufsschulen). Die Datenerhebung umfasste insgesamt mehr als 37.000 Unterrichtstage. Zu den untersuchten Lüftungsmethoden gehören die freie/natürliche Fensterlüftung, mobile Luftreiniger kombiniert mit freier/natürlicher Fensterlüftung, ventilatorgestützte Fensterlüftung, sowie zentrale und dezentrale Raumluftechnik (RLT).

Neben der Messung der CO₂-Konzentration und Wirksamkeit verschiedener Lüftungsmethoden wurde auch ihre Auswirkung auf die potentielle Viruslast durch Anreicherung von Atemaerosolen im Klassenraum untersucht. Hierfür wurde für jedes Klassenzimmer und jeden Unterrichtstag ein standardisierter Virusdosisfaktor berechnet, der die potentiell inhalierte Virusdosis im Verhältnis zu einem Referenzklassenzimmer angibt, welches durch ein Raumvolumen von 200 m³ und eine Lüftungsanlage mit idealer Mischlüftung bei einem Volumenstrom von 600 m³/h (dreimaliger Raumlufwechsel pro Stunde) charakterisiert ist. Ein Virusdosisfaktor von 1,5 würde zum Beispiel bedeuten, dass die potentiell inhalierte Virusdosis im betrachteten Klassenzimmer 1,5-mal so hoch bzw. um 50% höher ist als im Referenzklassenzimmer. Die Bedeutung des Virusdosisfaktors ist intuitiv einfach zu erfassen und unabhängig von der Virusquanta-Erzeugungsrate, d.h. von der Virenmenge, die tatsächlich mit dem Atemaerosol ausgestoßen wird. Wie im Anhang beschrieben, ist der Virusdosisfaktor nur geringfügig abhängig von der Viruslebensdauer und kann neben Coronaviren (SARS-CoV-2 und SARS-CoV-1) auch auf die Aerosol-Übertragung anderer Krankheitserreger, wie zum Beispiel Grippeviren (z.B. Influenza-A-Viren) angewandt werden. Mit dem Virusdosisfaktor steht damit ein vielseitig anwendbares Maß zur Verfügung, um die Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden im Kontext der Lufthygiene und des Infektionsschutzes gegen die Aerosol-Übertragung von Infektionskrankheiten zu bewerten.

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Ergebnisse für das gesamte Schuljahr

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über die Ergebnisse für das gesamte Schuljahr 2021/22. Für jede der untersuchten Lüftungsmethoden wurden hierzu die gemessenen CO₂-Konzentrationen bzw. die berechneten Virusdosisfaktoren in den entsprechenden Klassenzimmern zusammengefasst (gepoolt) und in Form von Histogrammen grafisch dargestellt.

CO₂-Konzentration

Abbildung 1 zeigt die Verteilung der gemessenen CO₂-Konzentrationen für jede der untersuchten Lüftungsmethoden in Form eines Histogramms. Die Balkenbreite entspricht einem CO₂-Konzentrations-Intervall von 100 ppm. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Leitwert von 1000 ppm (Europäische Norm EN 16798-1: 2019; Umweltbundesamt 2022). Dieser Leitwert wurde bei Klassenzimmern mit freier Fensterlüftung während 24% der Unterrichtszeit überschritten, bei

Kombination von freier Fensterlüftung mit mobilen Luftreinigern während 25% der Unterrichtszeit. Bei Klassenzimmern mit zentraler RLT waren die Ergebnisse kaum besser als bei freiem Fensterlüften (21% Überschreitungen). Deutlich bessere Ergebnisse ergaben sich in Klassenzimmern mit Ventilator-Fensterlüftung (16% Überschreitungen) oder mit dezentraler RLT (11% Überschreitungen).

Bei der Überschreitung des Leitwerts wurden Maximalwerte bis zu 4738 ppm gemessen (zentrale RLT), gefolgt von 4599 ppm (Fensterlüftung), 4403 ppm (mobile Luftreiniger in Kombination mit Fensterlüftung), 3474 ppm (Ventilator-Fensterlüftung) und 2568 ppm (dezentrale RLT). Der Maximalwert ist der Höchstwert, der während des gesamten Schuljahrs 2021/22 in allem Klassenzimmern der gleichen Kategorie (Lüftungsmethode) gemessen wurde. Da es sich hierbei um einen einzelnen Messwert handelt, ist der Maximalwert nicht geeignet, um das generelle Ausmaß der Überschreitungen zu charakterisieren.

Das Ausmaß der Überschreitungen kann zum Beispiel durch den 95-Perzentilwert der Messwerte charakterisiert werden. Bei Klassenzimmern mit Fensterlüftung lag der 95-Perzentilwert bei 1484 ppm. Dies bedeutet, dass 95% aller Messwert unter 1484 ppm lagen, oder anders ausgedrückt: 5% aller Messwerte lagen über 1484 ppm. Bei Klassenzimmern in denen mobile Luftreiniger in Kombination mit Fensterlüftung zum Einsatz kamen, lag der 95-Perzentilwert bei 1542 ppm. Niedrigere 95-Perzentilwerte ergaben sich bei Klassenzimmern mit zentraler RLT (1353 ppm), Ventilator-Fensterlüftung (1260 ppm) und dezentraler RLT (1091 ppm).

Die Mittelwerte (Mediane) der CO₂-Konzentrationen lagen bei allen Lüftungsmethoden unter 1000 ppm: 776 ppm bei zentraler RLT, 764 ppm bei Fensterlüftung in Kombination mit mobilen Luftreinigern, 750 ppm bei Fensterlüftung, 710 ppm bei Ventilator-Fensterlüftung und 706 ppm bei dezentraler RLT.

Virusdosisfaktor

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der berechneten Virusdosisfaktoren (VDF) für jede der untersuchten Lüftungsmethoden in Form eines Histogramms. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Referenzwert (VDF = 1), der die potentiell inhalierte Virusdosis im Verhältnis zu einem Referenzklassenzimmer angibt, welches durch ein Raumvolumen von 200 m³ und eine Lüftungsanlage mit idealer Mischlüftung bei einem Volumenstrom von 600 m³/h (dreimaliger Raumlufwechsler pro Stunde) charakterisiert ist (siehe Anhang, Abschnitt A2.4). Als Grundlage für die Berechnung der Virusdosisfaktoren diente die charakteristische Lebensdauer von Coronaviren (Halbwertszeit 1,1 h für SARS-CoV-2 und SARS-CoV-1) in Atemaerosolpartikeln (siehe Anhang, Abschnitt A2.4). Die Ergebnisse für Influenza-A-Viren (Halbwertszeit 32 min) sind sehr ähnlich (siehe Anhang, Abb. A12). Die allgemeine Abhängigkeit des Virusdosisfaktors von der für eine Virusart charakteristische Lebensdauer ist in Abbildung A13 im Anhang dargestellt.

Auffallend in Abbildung 2 ist die breite Verteilung der Virusdosisfaktoren bei freier Fensterlüftung: Der Referenzwert wurde hier bei 40% der Unterrichtstage überschritten. Deutlich geringere Überschreitungen wurden mit allen anderen Lüftungsmethoden erreicht: 17% bei zentraler RLT, 16% bei Ventilator-Fensterlüftung, 13% bei dezentraler RLT und 9% bei der Kombination von Fensterlüftung mit mobilen Luftreinigern.

Das vergleichsweise gute Ergebnis der Kombination von mobilen Luftreinigern mit Fensterlüften lässt sich dadurch erklären, dass zwei unterschiedliche Mechanismen zur Reduktion der Viruslast beitragen: zum einen werden potentiell infektiöse Atemaerosole durch den Luftaustausch über die Fenster aus dem Raum entfernt, zum anderen sie durch die Luftreiniger aus der Raumluft gefiltert bzw. inaktiviert. Wie die entsprechenden CO₂-Histogramme zeigen, wurde in Klassenzimmern mit mobilen Luftreinigern ähnlich gut gelüftet wie in Klassenzimmern mit reiner Fensterlüftung (Überschreitungen des CO₂-Leitwerts nur geringfügig höher, Abb. 1). Dieses Ergebnis zeigt, dass der Betrieb von Luftreinigern nicht notwendigerweise zu einer Verschlechterung im Lüftungsverhalten führt.

Das Ausmaß der Überschreitungen charakterisiert durch die entsprechenden 95-Perzentilwerte lag bei freier Fensterlüftung mit einem Wert von 1,59 ebenfalls deutlich höher als bei den anderen Lüftungsmethoden: 1,20 bei zentraler RLT und bei Ventilator-Fensterlüftung, 1,15 bei der Kombination von Fensterlüftung mit mobilen Luftreinigern und 1,12 bei dezentraler RLT.

Die Mittelwerte (Mediane) der Virusdosisfaktoren lagen bei allen Lüftungsmethoden unter dem Referenzwert von 1: 0,91 bei Fensterlüftung, 0,77 bei dezentraler und zentraler RLT, 0,75 bei Ventilator-Fensterlüftung und 0,64 bei Fensterlüftung in Kombination mit mobilen Luftreinigern.

Wie im Anhang näher erläutert, geht die Berechnung des Virusdosisfaktors vereinfachend davon aus, dass die Atemaerosole mit der Innenraumluft im Klassenzimmer gut durchmischt und gleichmäßig verteilt sind (Mischlüftung). Durch Quelllufteffekte (Verdrängungslüftung) können Atemaerosolen bei jeder Lüftungsmethode, insbesondere bei kontinuierlicher freier Fensterlüftung und bei Ventilator-Fensterlüftung (Mateus & Graça 2015; Helleis et al. 2022), noch wirksamer entfernt werden als durch den Virusdosisfaktor angezeigt (siehe Anhang, Abschnitt A2.5). Umgekehrt können bestimmte Lüftungsmethoden (insbesondere mobile Luftreiniger) Verwirbelungen bzw. Querströmungen im Raum erzeugen bzw. verstärken und dazu führen, dass Atemaerosole von einer infizierten Person zu anderen Personen gelangen bevor sie sich im Raum verteilen, wodurch der effektive Infektionsschutz geringer ausfallen kann, als durch den Virusdosisfaktor angezeigt.

Direkter Vergleich von CO₂-Konzentration und Virusdosisfaktor

Abbildung 3 zeigt einen direkten Vergleich der untersuchten Lüftungsmethoden hinsichtlich CO₂-Konzentration und Virusdosisfaktor (VDF). Abbildung 3a veranschaulicht die Häufigkeit der

Überschreitungen des CO₂-Leitwerts bzw. des VDF-Referenzwerts für die untersuchten Lüftungsmethoden. Der prozentuale Anteil der Unterrichtstage mit einem Virusdosisfaktor VDF > 1 (VDF-Index) aus Abb. 1 ist gegen den prozentualen Anteil der Unterrichtszeit mit einer CO₂-Konzentration > 1000 ppm (CO₂-Index) aus Abb. 2 aufgetragen; wobei niedrige Indexwerte eine bessere praktische Wirkung der Lüftungsmethode anzeigen. Bei freier Fensterlüftung (grünes Symbol) waren sowohl CO₂-Index als auch VDF-Index relativ hoch (24% bzw. 40%). Bei Kombination des freien Fensterlüftens mit mobilen Luftreinigern (oranges Symbol) lag der CO₂-Index hoch, der VDF-Index ergab hingegen den niedrigsten Wert (25% bzw. 9%). Bei Klassenzimmern mit zentraler RLT (gelbes Symbol) lagen die entsprechenden Index-Werte bei 21% bzw. 17%. Ein guter Kompromiss (möglichst niedriger VDF-Index bei gleichzeitig möglichst niedrigem CO₂-Index) ergab sich für Klassenzimmer mit Ventilator-Fensterlüftung (violettes Symbol, CO₂-Index: 16%, VDF-Index: 16%) oder dezentraler RLT (blaues Symbol, CO₂-Index: 11%, VDF-Index: 13%). Nahezu identischer Resultate ergeben sich, wenn anstatt des Virusdosisfaktors für Coronaviren (SARS-CoV-2, SARS-CoV-1) der Virusdosisfaktor für Influenza-A-Viren verwendet wird (siehe Anhang, Abb. A12).

In Abbildung 3b sind die 95-Perzentilwerte der CO₂-Konzentration und des Virusdosisfaktors gegeneinander aufgetragen, welche das Ausmaß der Überschreitungen des CO₂-Leitwerts bzw. des VDF-Referenzwerts charakterisieren. Im Vergleich zu Abbildung 3a zeigt sich ein sehr ähnliches Bild: Die höchsten und damit ungünstigsten 95-Perzentilwerte ergaben sich bei Klassenzimmern mit freier Fensterlüftung (grünes Symbol, 1484 ppm, 1,59). Bei freier Fensterlüftung in Kombination mit mobilen Luftreinigern (oranges Symbol) lagen die 95-Perzentilwerte bei 1542 ppm bzw. 1,15; bei zentraler RLT bei 1353 ppm bzw. 1,20. Ventilator-Fensterlüftung (violettes Symbol, 1260 ppm, 1,20) und dezentrale RLT (blaues Symbol, 1091 ppm, 1,12) ergaben wiederum relativ niedrige Werte in beiden Kategorien.

Mögliche Ursachen für die Überschreitung des CO₂-Leitwerts bzw. des VDF-Referenzwerts

Bei Klassenzimmern mit freier Fensterlüftung kommt es in der Regel zu Überschreitungen des CO₂-Leitwerts, wenn die Fenster nicht ausreichend oft (Stoßlüften) bzw. ausreichend weit (Dauerlüften) geöffnet werden. Abhängig vom individuellen Lüftungsverhalten können dadurch relativ hohe CO₂-Konzentrationen entstehen, der unzureichende Luftaustausch kann zu hohen VDF-Werte führen (Fallbeispiele im Anhang: Abb. A7). Die Wirksamkeit der freien Fensterlüftung hängt deshalb maßgeblich vom *Faktor Mensch* ab.

Mit mobilen Luftreinigern lässt sich die Virenkonzentration im Raum und damit der VDF-Wert deutlich reduzieren, die CO₂-Konzentrationen wird dadurch aber nicht beeinflusst — es muss deshalb stets für eine ausreichende Frischluftzufuhr gesorgt werden. Geschieht dies durch freie Fensterlüftung (wie es bei allen teilnehmenden Klassenzimmern mit mobilen Luftreinigern der Fall war), so hängt

die resultierende CO₂-Konzentration wiederum maßgeblich vom *Faktor Mensch* ab. Hinsichtlich der Reduzierung der Virenkonzentration im Raum kommt aber auch der *Faktor Technik* zum Tragen: die mobilen Luftreiniger müssen abhängig von den räumlichen Gegebenheiten richtig dimensioniert und konfiguriert sein (Kähler et al. 2020). Entscheidend ist aber, dass die Geräte während des Unterrichts in Betrieb sind. Bei manuellem Ein- bzw. Ausschalten ist diese Voraussetzung nicht immer gewährleistet (Fallbeispiele im Anhang: Abb. A8). Wird die Schallemission als störend empfunden, so kann dies dazu beitragen, dass die Geräte bei einem niedrigeren Volumenstrom betrieben werden. Dadurch ist die Wirksamkeit hinsichtlich der Reduzierung der Virenkonzentration beeinträchtigt, was zu einer Erhöhung der VDF-Werte beiträgt.

Bei Klassenzimmern mit zentraler oder dezentraler RLT können sich hohe CO₂-Konzentrationen bzw. hohe VDF-Werte ergeben, wenn die Anlagen nicht richtig eingestellt bzw. konzipiert sind oder bei Betriebsstörungen (Fallbeispiele im Anhang: Abb. A10, A11). Die Luftqualität hängt also in erster Linie vom *Faktor Technik* ab.

Bei der Ventilator-Fensterlüftung kommen beide Faktoren zum Tragen: richtige Konzeption und Einstellung sowie Einschalten des Ventilators und Öffnen eines Fensters für die Frischluftzufuhr (Fallbeispiele im Anhang: Abb. A9).

2.2 Abhängigkeit von der Jahreszeit

Zur Untersuchung der Abhängigkeit von der Jahreszeit wurden zwei spezifische Zeiträume ausgewählt: Januar und Februar (kalte Jahreszeit) sowie Juni und Juli (warme Jahreszeit). Die jahreszeitspezifischen Verteilungen der CO₂-Konzentrationen und Virusdosisfaktoren sind in Abbildungen 4 und 5 als Histogramme dargestellt. Für alle Lüftungsmethoden sind die Verteilungen der warmen Jahreszeit im Vergleich zur kalten Jahreszeit deutlich nach links (d.h. zu niedrigeren Werten) verschoben, was auch für die entsprechenden Mittelwerte (Mediane), 95-Perzentile und Kennzahlen für die Häufigkeit von Überschreitungen des CO₂-Leitwerts (CO₂-Index) und des VDF-Referenzwerts (VDF-Index) gilt.

Abbildung 6 zeigt einen jahreszeitspezifischen Vergleich der untersuchten Lüftungsmethoden hinsichtlich CO₂-Konzentration und Virusdosisfaktor analog zu Abbildung 3. Die Pfeile zeigen von der kalten in Richtung der warmen Jahreszeit. Sowohl anhand der Häufigkeit der Überschreitungen (CO₂/VDF-Index, Abb. 6a) als auch am Ausmaß der Überschreitungen (95-Perzentile, Abb. 6b) ist zu erkennen, dass die praktische Wirkung aller Methoden von der kalten zur warmen Jahreszeit hin deutlich zunimmt. Am stärksten ist die Verbesserung beim freien Fensterlüften ausgeprägt (grüne Symbole), was durch häufigeres bzw. längeres Lüften bis hin zum verbreitetem Dauerlüften in der warmen Jahreszeit erklärbar ist. Bei der Kombination des freien Fensterlüftens mit mobilen

Luftreinigern (orange Symbole) nehmen die CO₂-Werte ebenfalls deutlich ab, wohingegen die VDF-Werte nur geringfügig abnehmen, da sich der Beitrag der mobilen Luftreiniger nicht erhöht. Tatsächlich liegen die VDF-Werte der anderen Lüftungsmethoden in der warmen Jahreszeit ähnlich bzw. teilweise sogar etwas niedriger als beim Einsatz mobiler Luftreiniger. Die jahreszeitlichen Verbesserungen beim Ventilator-Fensterlüften (violette Symbole) lassen sich dadurch erklären, dass es in der warmen Jahreszeit seltener dazu kommt, dass Ventilatoren nicht eingeschaltet oder Fenster nicht geöffnet werden. Die ebenfalls stark ausgeprägten jahreszeitlichen Verbesserungen bei zentraler und dezentraler RLT (gelbe bzw. blaue Symbole) deuten darauf hin, dass zusätzliches oder alternatives Fensterlüften auch in Klassenräumen mit RLT zumindest in der warmen Jahreszeit eine große Rolle spielte und von den Nutzern bevorzugt wurde, was mit den Ergebnissen früherer experimenteller Studien übereinstimmt (Peper et al. 2007; Reiß et al. 2017; Jagnow & Gebhardt 2018). Sowohl in der warmen als auch in der kalten Jahreszeit weisen dezentrale RLT (blaue Symbole) und Ventilator-Fensterlüftung (violette Symbole) relativ niedrige Werte und gute praktische Wirkungen in allen Kategorien auf (CO₂- und VDF-Indizes; 95-Perzentile der CO₂- und VDF-Werte).

2.3 Tagesspezifische Ergebnisse für individuelle Klassenzimmer und Schulen

Für jede der teilnehmenden Schulen wurde nach dem Abschluss der Datenerhebung ein Resümee mit den schulspezifischen Ergebnissen zusammengestellt. Dazu wurden Übersichtsgrafiken der gemessenen CO₂-Konzentrationen und der daraus berechneten Virusdosisfaktoren für jeden Unterrichtstag und jedes der teilnehmenden Klassenzimmer erstellt (Beispiel im Anhang, Abb. A14).

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht wurde über den Verlauf des Schuljahres 2021/22 untersucht. Als Grundlage dienten Messdaten (CO₂-Konzentration, Volumenstrom von mobilen Luftreinigern) aus 244 Klassenzimmern an mehr als 37.000 Unterrichtstagen. In den untersuchten Klassenzimmern kamen verschiedene Lüftungsmethoden zum Einsatz: freie/natürliche Fensterlüftung, freie/natürliche Fensterlüftung kombiniert mit mobilen Luftreinigern, ventilatorgestützte Fensterlüftung, sowie zentrale und dezentrale Raumluftechnik (RLT). Als Indikator für die Luftqualität wurde die CO₂-Konzentration minutengenau aufgezeichnet und ausgewertet. Darüber hinaus wurde für jedes Klassenzimmer und jeden Unterrichtstag ein standardisierter Virusdosisfaktor für die Aerosol-Übertragung von Coronaviren (SARS-CoV-2, SARS-CoV-1) berechnet, der die potentiell inhalierte Virusdosis im Verhältnis zu einem Referenzklassenzimmer mit idealer Mischlüftung und dreifachem Luftwechsel pro Stunde angibt. Der Virusdosisfaktor zeigte über einen weiten Bereich nur eine geringfügige Abhängigkeit von der Viruslebensdauer. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich

daher auch auf den Infektionsschutz gegen die Aerosol-Übertragung anderer Krankheitserreger wie zum Beispiel Grippeviren (Influenza-A-Viren) übertragen.

Für alle untersuchten Lüftungsmethoden und Klassenzimmer wurden die Verteilungen der gemessenen CO₂-Konzentrationswerte und der berechneten Virusdosisfaktoren dargestellt und charakteristische Eigenschaften/Unterschiede erläutert. Als Kenngröße für die Häufigkeit von Überschreitungen des CO₂-Leitwerts und des Referenz-Virusdosisfaktors wurde der prozentuale Anteil der Unterrichtszeit mit einer CO₂-Konzentration über 1000 ppm verwendet (CO₂-Index) bzw. der prozentuale Anteil der Unterrichtstage mit einem Virusdosisfaktor größer 1 (VDF-Index). Die Analysen und Vergleiche wurden sowohl für das gesamte Schuljahr als auch getrennt für die kalte Jahreszeit (Januar-Februar) bzw. warme Jahreszeit (Juni-Juli) durchgeführt.

Bei freier Fensterlüftung wurde der CO₂-Leitwert von 1000 ppm während 24% der Unterrichtszeit überschritten (95-Perzentil: 1484 ppm) und der Virusdosisfaktor lag während 40% der Unterrichtszeit über dem Referenzwert von 1,0 (95-Perzentil: 1,59), was auf deutliche Verbesserungsbedarfe hinweist (z.B. Verwendung von CO₂-Ampeln, *Awareness*-Schulungen, kontinuierliches Lüften). Durch Kombination des Fensterlüftens mit mobilen Luftreinigern konnte zwar der Virusdosisfaktor stark gesenkt werden (VDF-Index: 9%; 95-Perzentil: 1,15), die Überschreitungen des CO₂-Leitwerts blieben aber hoch (CO₂-Index: 25%; 95-Perzentil: 1542 ppm). Auch mit zentraler RLT wurden deutlich niedrigere CO₂- und VDF-Werte als bei freier Fensterlüftung erreicht (CO₂-Index: 21%, 95-Perzentil: 1353 ppm; VDF-Index: 17%, 95-Perzentil: 1,20), wobei die VDF-Werte nicht so stark reduziert waren wie bei der Kombination des freien Fensterlüftens mit mobilen Luftreinigern. Ein guter Kompromiss (möglichst niedrige VDF-Werte bei gleichzeitig möglichst niedrigen CO₂-Werten) ergab sich für die Ventilator-Fensterlüftung (CO₂-Index: 16%, 95-Perzentil: 1260 ppm; VDF-Index: 16%, 95-Perzentil: 1,20) oder dezentrale RLT (CO₂-Index: 11%, 95-Perzentil: 1091 ppm; VDF-Index: 13%, 95-Perzentil: 1,12).

Alle untersuchten Lüftungsmethoden zeigten in der warmen Jahreszeit bessere Ergebnisse, d.h. niedrigere CO₂-Konzentrationen und niedrigere Virusdosisfaktoren, als in der kalten Jahreszeit. Am stärksten war die Verbesserung beim freien Fensterlüften ausgeprägt, was durch häufigeres bzw. längeres Lüften bis hin zum verbreiteten Dauerlüften in der warmen Jahreszeit erklärbar ist. Bei mobilen Luftreinigern kombiniert mit Fensterlüften nahmen die CO₂-Werte ebenfalls deutlich ab, wohingegen die Virusdosisfaktoren nur geringfügig abnahmen, da sich der Beitrag der mobilen Luftreiniger nicht erhöht. Tatsächlich lagen die Virusdosisfaktoren der anderen Lüftungsmethoden in der warmen Jahreszeit ähnlich bzw. teilweise sogar etwas niedriger als beim Einsatz mobiler Luftreiniger. Die jahreszeitlichen Verbesserungen beim Ventilator-Fensterlüften lassen sich dadurch erklären, dass es in der warmen Jahreszeit seltener dazu kommt, dass Ventilatoren nicht eingeschaltet oder Fenster nicht geöffnet werden. Die ebenfalls stark ausgeprägten jahreszeitlichen Verbesserungen

bei zentraler und dezentraler RLT deuten darauf hin, dass zusätzliches oder alternatives Fensterlüften auch in Klassenräumen mit RLT zumindest in der warmen Jahreszeit eine große Rolle spielte und von den Nutzern bevorzugt wurde, was mit den Ergebnissen früherer experimenteller Studien übereinstimmt (Peper et al. 2007; Reiß et al. 2017; Jagnow & Gebhardt 2018). Sowohl in der warmen als auch in der kalten Jahreszeit weisen Ventilator-Fensterlüftung und dezentrale RLT relativ niedrige Werte und gute praktische Wirkung in allen Kategorien auf (CO₂- und VDF-Indizes; 95-Perzentile der CO₂- und VDF-Werte).

Für alle Lüftungsmethoden gäbe es je nach Häufigkeit und Intensität der Überschreitungen verschiedene Ansätze und Möglichkeiten zur weiteren Verbesserung von Luftqualität und Infektionsschutz bzw. Verringerungen der relevanten Kenngrößen wie CO₂-Konzentration und Virusdosisfaktor. Diese können sowohl den *Faktor Mensch* (Nutzerverhalten, Problembewusstsein) als auch den *Faktor Technik* betreffen (technische Hilfsmittel, unabhängiges Monitoring sowie verbesserte Konzeption, Einstellung und Wartung). Dazu zählen beispielsweise: (a) Informationskampagnen, Awareness-Schulungen und gut verständliche Richtlinien zur Bedeutung von Luftqualität und Infektionsschutz sowie zur Belüftung von Klassenräumen; (b) CO₂-Sensoren/Monitore/Ampeln zur Kontrolle des Lüftungserfolges unabhängig von der Lüftungsmethode mit deutlicher Anzeige vor Ort im Klassenraum (Messwert, Ampelsignal, Handy-App) sowie zentrales Monitoring (Haustechnik, Schulleitung); (c) Automatisierung des Betriebs von mobilen Luftreinigern sowie von Fensteröffnung und Ventilatorbetrieb bei Ventilator-Fensterlüftung (z.B. mittels CO₂-Sensoren, Zeitschaltuhren, Bewegungsmelder); und (d) verbesserte Konzeption, Einstellung und Wartung für zentrale und dezentrale RLT. (Peper et al. 2007; Reiß et al. 2017; Jagnow & Gebhardt 2018; Helleis et al. 2022; Hopfe et al. 2022; McLeod et al. 2022)

Bei der Einordnung der Ergebnisse dieser Untersuchung sollte berücksichtigt werden, dass die Datenerhebung während des Schuljahrs 2021/22 erfolgte, welches durch die Covid-19-Pandemie geprägt war. Durch öffentliche Informationskampagnen und Medienberichte wurde die Bedeutung einer guten Luftqualität in Innenräumen mit Blick auf die Reduzierung des Infektionsrisikos intensiv kommuniziert. Bei technischen Lüftungsanlagen wurden vielerorts Volumenstrom und Frischluftanteil erhöht. Aber auch bei der freien/natürlichen Fensterlüftung ist davon auszugehen, dass die entsprechenden Empfehlungen im Allgemeinen konsequenter umgesetzt wurden als in Nicht-Pandemiezeiten.

Der Virusdosisfaktor ermöglicht einen quantitativen Vergleich der praktischen Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich der indirekten Infektionsgefahr, welche durch Fernübertragung von Krankheitserregern über Atemaerosole bzw. Schwebeteilchen zustande kommt. Darüber hinaus bestehen direkte Infektionsgefahren durch Tröpfchen- bzw. Nahübertragung, die während einer Pandemie durch weitere Hygienemaßnahmen eingeschränkt werden können (Abstand, Masken,

Handhygiene). Für einen umfassenden Infektionsschutz in Schulen, Kindertagesstätten und anderen öffentlichen Einrichtungen sollten die hier untersuchten Lüftungsmethoden deshalb immer als Teil einer Bündel-Strategie verschiedener, sich gegenseitig ergänzender Maßnahmen betrachtet werden (McLeod et al. 2022).

Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich auf den Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden für Klassenräume hinsichtlich ihrer praktischen Wirkung auf die Luftqualität (CO₂-Konzentration) und den Infektionsschutz gegen die Übertragung von SARS-CoV-2 und anderen Viren (z.B. Influenza-A-Viren) durch luftgetragene Schwebeteilchen bzw. Atemaerosole. Nicht untersucht wurden Aspekte der Energieeffizienz und der thermischen Behaglichkeit im Sinne der Norm EN ISO 7730, welche das menschliche Wohlbefinden in Abhängigkeit von Zugluft, Raumlufttemperatur, relativer Feuchte und den Temperaturen von abstrahlenden Oberflächen (Wände, Fenster) charakterisiert. Neben der Wirksamkeit, sollten diese Aspekte bei der Auswahl bzw. Bewertung von geeigneten Lüftungsmethoden für Schulen, Kindertagesstätten und anderen öffentlichen Einrichtungen grundsätzlich berücksichtigt werden.

CO₂-Konzentration

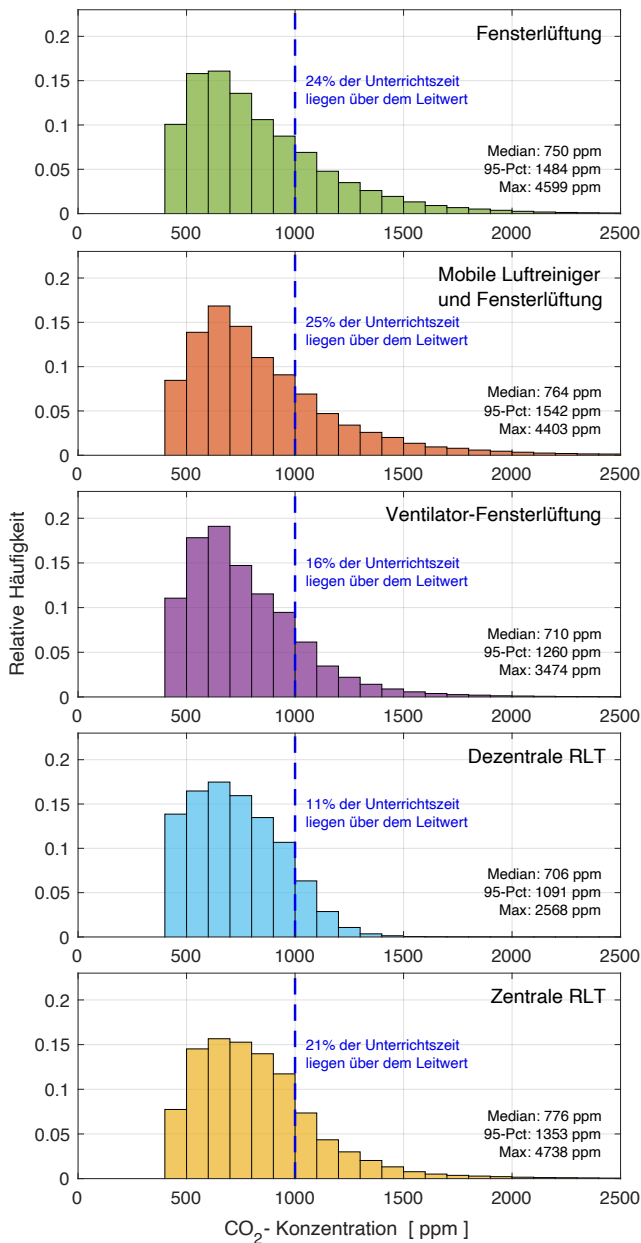


Abb. 1. Verteilung der CO₂-Konzentrationen für die untersuchten Lüftungsmethoden für das Schuljahr 2021/22. Histogramm-Balkenbreite: 100 ppm. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Leitwert von 1000 ppm. Angegebene Werte: prozentuale Überschreitung des Leitwerts sowie Median, 95-Perzentil und Maximum.

Virusdosiseffektor

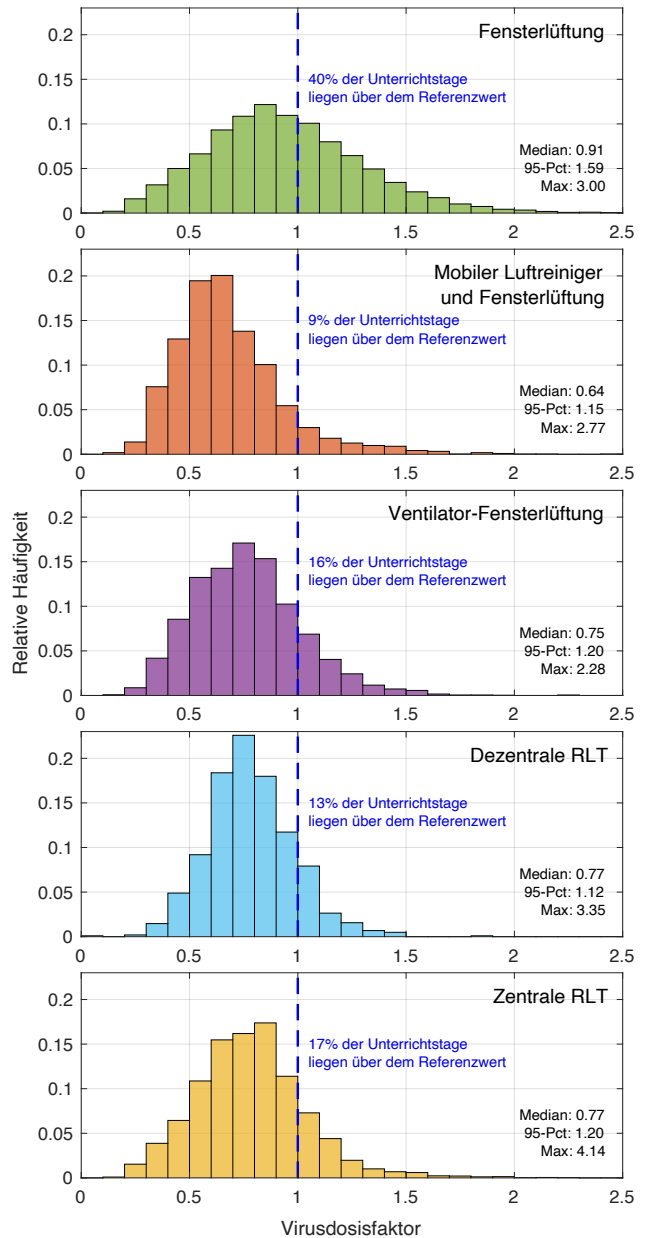


Abb. 2. Verteilung der Virusdosiseffektoren (VDF) für die untersuchten Lüftungsmethoden für das Schuljahr 2021/22. Histogramm-Balkenbreite: 0,1. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Wert für das Referenzklassenzimmer (VDF = 1). Die Berechnung des VDF erfolgte auf der Grundlage der charakteristischen Lebensdauer von Coronaviren (SARS-CoV-2 und SARS-CoV-1) in Atemaerosolpartikeln (siehe Anhang, Methoden). Angegebene Werte: prozentuale Überschreitung des Referenzwerts sowie Median, 95-Perzentil und Maximum.

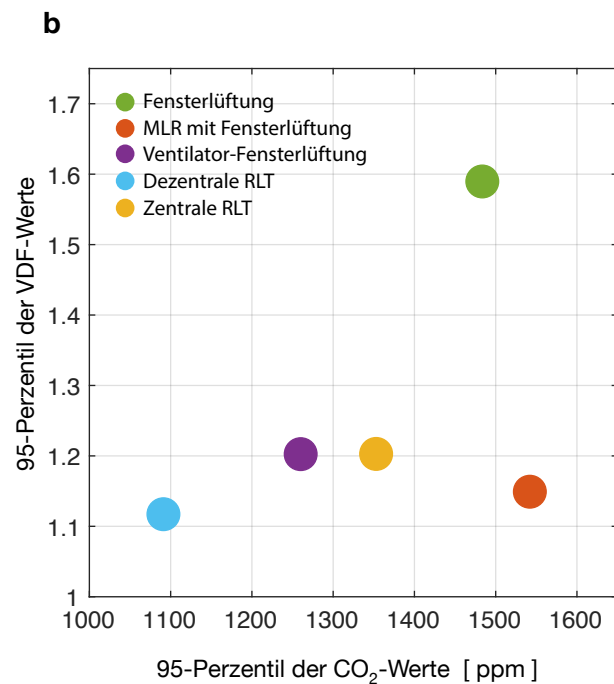
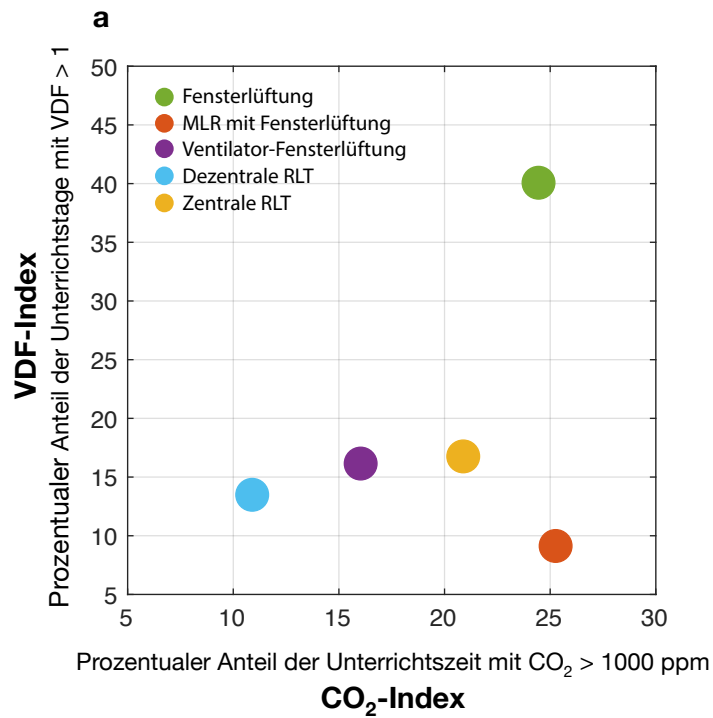


Abb. 3. Vergleich von CO₂-Konzentration und Virusdosisfaktor (VDF) für die untersuchten Lüftungsmethoden für das Schuljahr 2021/22. **a.** Häufigkeit der Überschreitung des CO₂-Leitwerts bzw.VDF-Referenzwerts: Der prozentuale Anteil der Unterrichtstage mit einem Virusdosisfaktor VDF > 1 (VDF-Index) ist gegen den prozentualen Anteil der Unterrichtszeit mit einer CO₂-Konzentration > 1000 ppm (CO₂-Index) aufgetragen. **b.** Ausmaß der Überschreitung des CO₂-Leitwerts bzw.VDF-Referenzwerts charakterisiert durch die entsprechenden 95-Perzentilwerte: Das 95-Perzentil der VDF-Werte ist gegen das 95-Perzentil der CO₂-Werte aufgetragen.

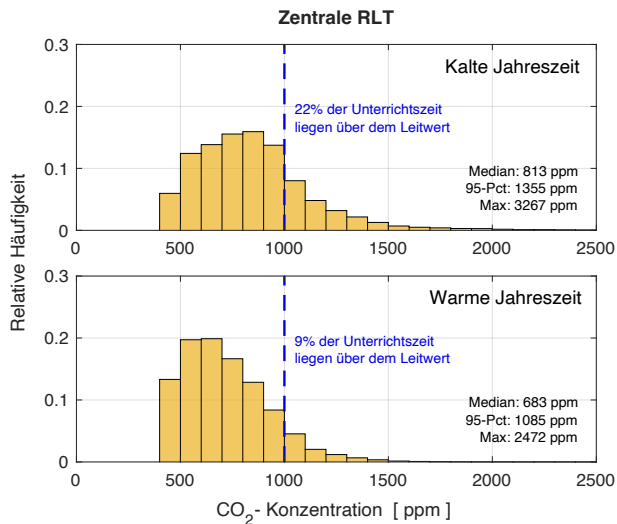
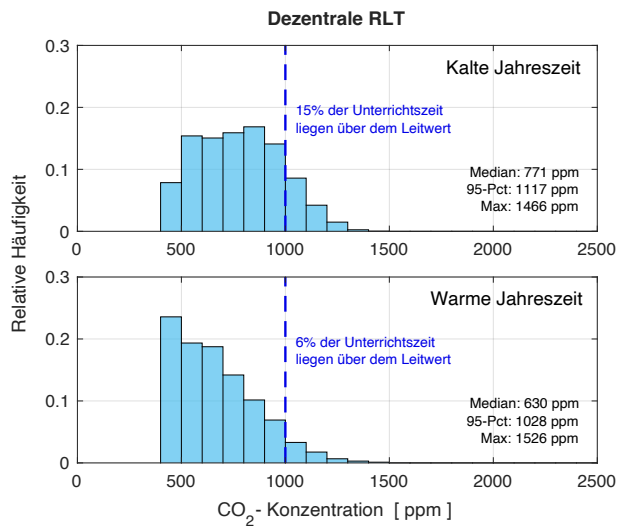
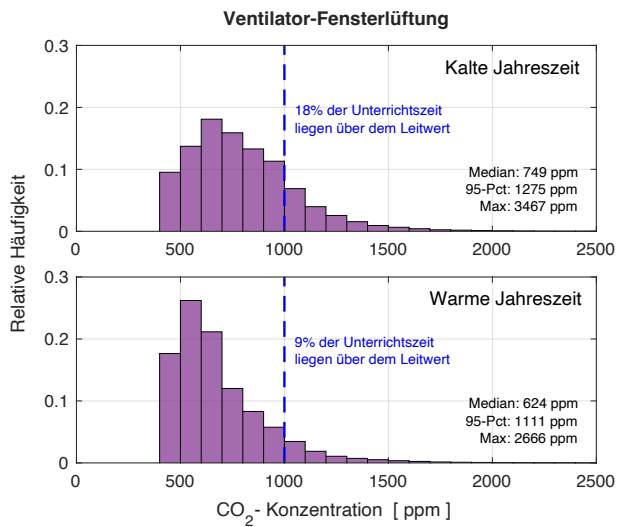
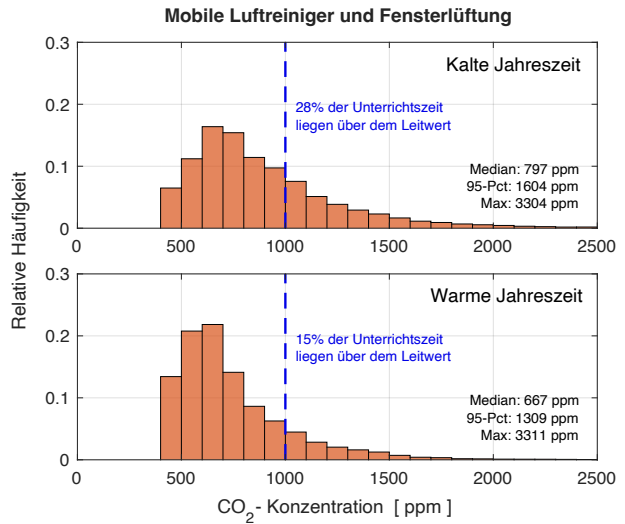
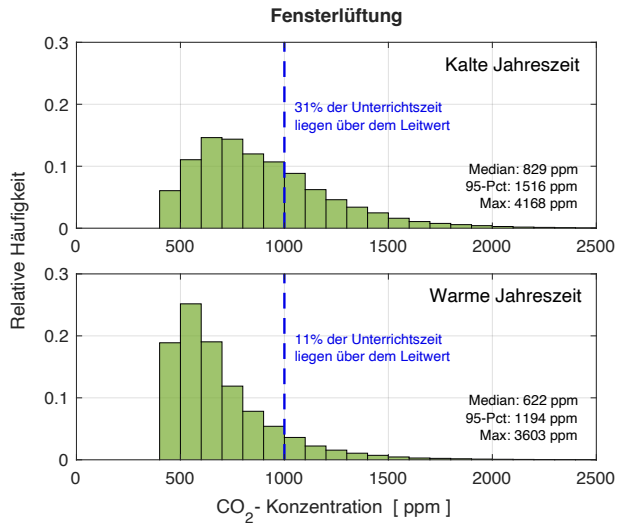


Abb. 4. Jahreszeitspezifische Verteilungen der CO₂-Konzentrationen für die untersuchten Lüftungsmethoden (kalte Jahreszeit: Januar & Februar; warme Jahreszeit: Juni & Juli). Histogramm-Balkenbreite: 100 ppm. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Leitwert von 1000 ppm. Angegebene Werte: prozentuale Überschreitung des Leitwerts sowie Median, 95-Perzentil und Maximum.

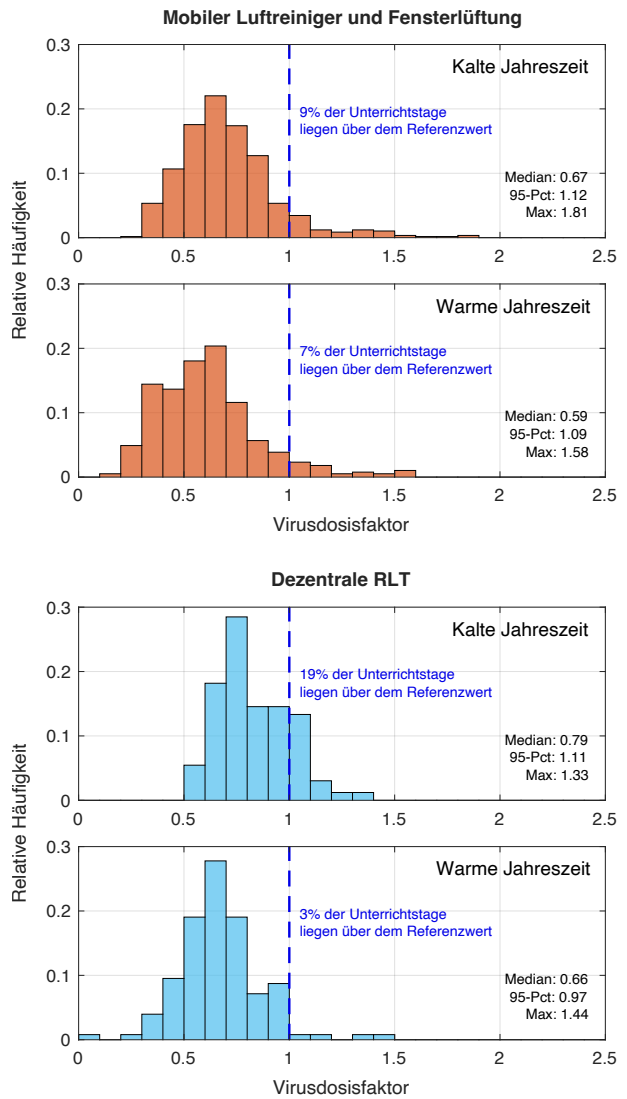
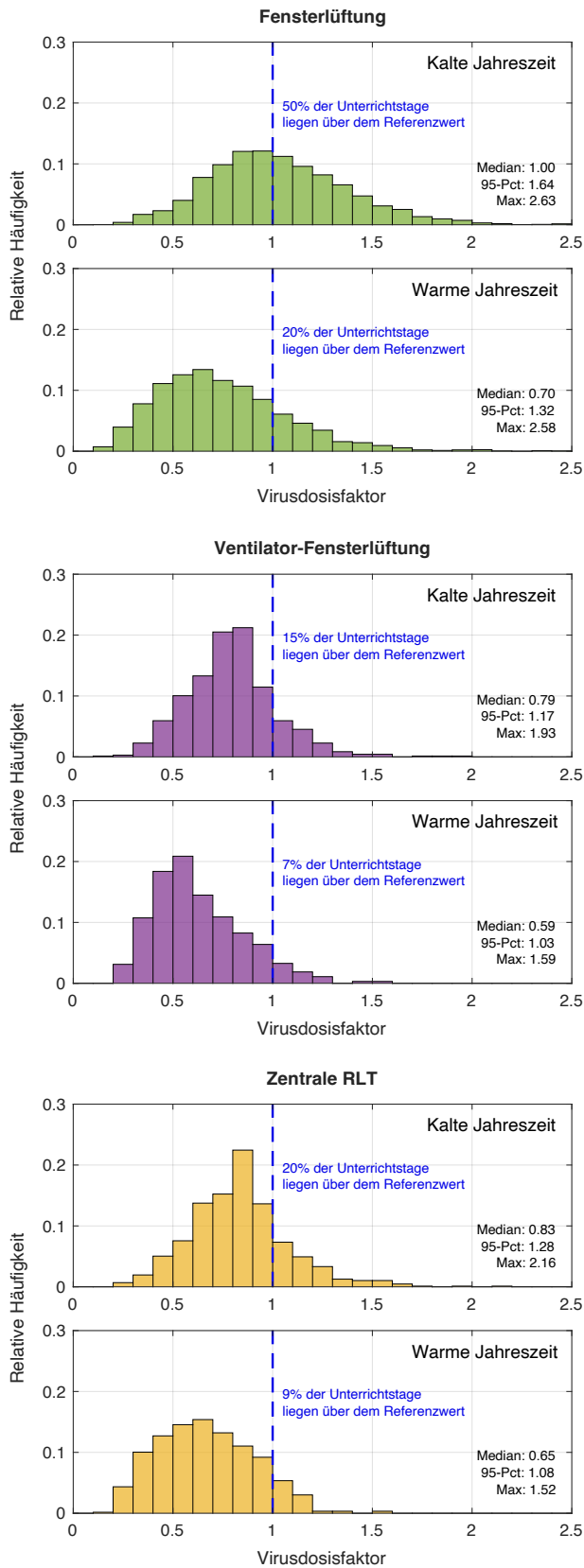


Abb. 5. Jahreszeitspezifische Verteilungen der Virusdosismultiplikatoren (VDF) für die untersuchten Lüftungsmethoden (kalte Jahreszeit: Januar & Februar; warme Jahreszeit: Juni & Juli). Histogramm-Balkenbreite: 0,1. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Wert für das Referenzklassenzimmer (VDF = 1). Die Berechnung des VDF erfolgte auf der Grundlage der charakteristischen Lebensdauer von Coronaviren (SARS-CoV-2 und SARS-CoV-1) in Atemaerosolpartikeln (siehe Anhang, Methoden). Angegebene Werte: prozentuale Überschreitung des Referenzwerts sowie Median, 95-Perzentil und Maximum.

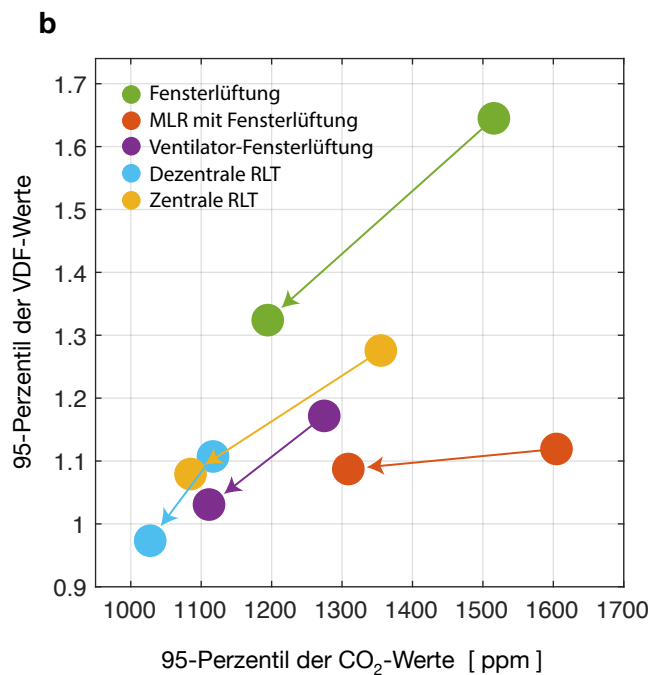
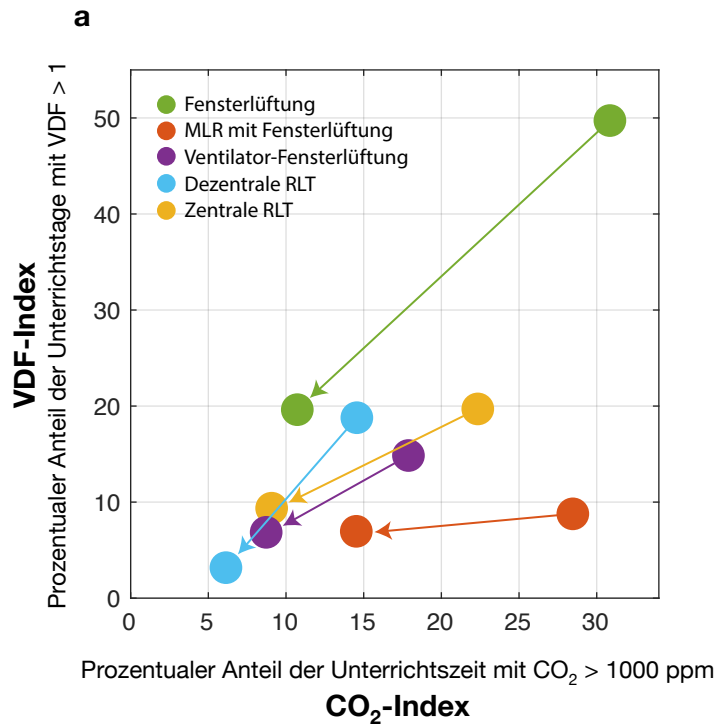


Abb. 6. Jahreszeitspezifischer Vergleich der CO₂-Konzentrationen und Virusdosisfaktoren (VDF) für die untersuchten Lüftungsmethoden (kalte Jahreszeit: Januar & Februar; warme Jahreszeit: Juni & Juli). Die Pfeile zeigen von der kalten in Richtung der warmen Jahreszeit. Der prozentuale Anteil der Unterrichtstage mit einem Virusdosisfaktor VDF > 1 (VDF-Index) ist gegen den prozentualen Anteil der Unterrichtszeit mit einer CO₂-Konzentration > 1000 ppm (CO₂-Index) aufgetragen. **b.** Ausmaß der Überschreitung des CO₂-Leitwerts bzw. VDF-Referenzwerts charakterisiert durch die entsprechenden 95-Perzentilwerte: Das 95-Perzentil der VDF-Werte ist gegen das 95-Perzentil der CO₂-Werte aufgetragen.

Anhang

A1 Theoretische Grundlagen

Die Modellierung der CO₂-Konzentration, der Luftwechselrate sowie der Virusquanta-Konzentration basiert auf der Annahme eines Klassenzimmers mit hinreichend guter Luftdurchmischung (*well-mixed room model*) (Ott et al. 2006; Buonanno et al. 2020; Lelieveld et al. 2020; Jones et al. 2021).

A1.1 Differentialgleichung für CO₂-Konzentration

Die zeitliche Änderung der Anzahl der CO₂-Moleküle im Raum ergibt sich aus der folgenden Teilchenbilanz:

$$\dot{q}(t) = E(t) + F Q(t) - \frac{Q(t)}{V} q(t) \quad [1]$$

q : Anzahl der CO₂-Moleküle im Raum [mol]

V : Raumvolumen [m³]

E : CO₂-Erzeugungsrate [mol/h]

Q : Luftwechsel-Volumenstrom [m³/h]

F : CO₂-Konzentration in der Außenluft (Frischlufte) [mol/m³]

In einer realistischen Situation (z.B. in einem Klassenzimmer während des Unterrichts) sind sowohl Q als auch E zeitlich veränderlich:

- ▶ zu Q : Während des Unterrichts werden Fenster zeitweise geöffnet/gekippt
- ▶ zu E : der Raum ist in der Regel nicht durchgehend belegt (Pausen)

Mit $C(t) = q(t)/V$ ergibt sich aus Gl. [1] die entsprechende Differentialgleichung für die CO₂-Konzentration:

$$\dot{C}(t) = \frac{E(t)}{V} + F \frac{Q(t)}{V} - \frac{Q(t)}{V} C(t),$$

Mit der Definition der Luftwechselrate

$$\lambda_0(t) = \frac{Q(t)}{V}$$

ergibt sich:

$$\dot{C}(t) = \frac{E(t)}{V} - \lambda_0(t) (C(t) - F). \quad [2]$$

Die Konzentration in mol/m³ lässt sich wie folgt in ppm umrechnen:

$$C_{ppm}(t) = \epsilon C(t) \quad \text{mit} \quad \epsilon = \frac{R_g T}{p} 10^6$$

C_{ppm} : CO₂-Konzentration [ppm]

C : CO₂-Konzentration [mol/m³]

T : absolute Temperatur [K]

p : Luftdruck [hPa]

R_g : universale Gaskonstante [m³·hPa·K⁻¹·mol⁻¹]

Aus Gl. [2] ergibt sich damit:

$$\dot{C}_{ppm}(t) = E_{ppm}(t) - \lambda_0(t)(C_{ppm}(t) - F_{ppm}) \quad [3]$$

mit $E_{ppm}(t) = \epsilon \frac{E(t)}{V}$ und $F_{ppm} = \epsilon F$.

A1.2 Berechnung der Luftwechselrate aus dem gemessenen CO₂-Konzentrationsverlauf

Durch Umstellen von Gl. [3] ergibt sich:

$$\lambda_0(t) = \frac{E_{ppm}(t) - \dot{C}_{ppm}(t)}{C_{ppm}(t) - F_{ppm}} \quad [4]$$

Die Werte für V , F_{ppm} und ϵ sind bekannte Konstanten. Aus den Messwerten können folgende Größen bestimmt werden:

- ▶ $C_{ppm}(t)$ und dessen zeitliche Ableitung $\dot{C}_{ppm}(t)$ aus dem gemessenen CO₂-Konzentrationsverlauf
- ▶ $E_{ppm}(t) = E_{ppm}^0 I(t)$, wobei $I(t)$ eine binäre Indikator-Funktion ist, die anzeigt zu welchen Zeiten der Raum belegt war: $I(t)$ hat den Wert 1, wenn vom Bewegungssensor Bewegung detektiert wurde und ansonsten den Wert 0. E_{ppm}^0 ist die CO₂-Erzeugungsrate [ppm/h] aller Personen im Raum. Diese ergibt sich aus der Summe der individuelle CO₂-Erzeugungsraten aller Personen im Raum (siehe Abschnitt A2.4).

A1.3 Differentialgleichung für die Virusquanta-Konzentration

In Analogie zu Gl. [2] erhält man für den zeitlichen Verlauf der Virusquanta-Konzentration folgende Differentialgleichung:

$$\dot{C}_q(t) = \frac{E_q(t)}{V} - \lambda_0(t) C_q(t) - \lambda_v C_q(t) - \lambda_s C_q(t) \quad [5]$$

C_q : Virusquanta-Konzentration [quanta/m³]

E_q : Virusquanta-Erzeugungsrate [quanta/h]

λ_0 : Luftwechselrate [1/h]

λ_v : Biologische Zerfallsrate der Virusquanta [1/h]

λ_s : Sedimentationsrate der Virusquanta [1/h]

Mit der Definition der effektiven Eliminationsrate

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) + \lambda_v + \lambda_s \quad [6]$$

ergibt sich

$$\dot{C}_q(t) = \frac{E_q(t)}{V} - \lambda(t) C_q(t) \quad [7]$$

Wir betrachten zunächst $E_q(t)$ in Gl. [7] und modellieren $E_q(t)$ durch $E_q(t) = E_q^0 I(t)$, wobei $I(t)$ die binäre Indikator-Funktion ist, die anzeigt zu welchen Zeiten der Raum belegt war (siehe oben). E_q^0 ist die Virusquanta-Erzeugungsrate [quanta/h] im Raum und wird als zeitlich konstant angenommen. Multipliziert man beide Seiten von Gl. [7] mit dem Faktor V/E_q^0 so erhält man mit der Substitution

$$A(t) = \frac{V}{E_q^0} C_q(t) \quad [8]$$

die Differentialgleichung

$$\dot{A}(t) = I(t) - \lambda(t) A(t) \quad [9].$$

A : Normierte Virusquanta-Konzentration [h]

I : Binäre Indikator-Funktion, die anzeigt zu welchen Zeiten der Raum belegt war

$A(t)$ kann als normierter Virusquanta-Konzentrationsverlauf interpretiert werden.

Bei der **Verwendung eines Raumlufthereinigers**, kann Gl. [6] wie folgt erweitert werden:

$$\lambda(t) = \lambda_0(t) + \lambda_v + \lambda_s + \lambda_f(t) \quad [10]$$

λ_0 : Luftwechselrate [1/h]

λ_v : Biologische Zerfallsrate der Virusquanta [1/h]

λ_s : Aerosol-Sedimentationsrate [1/h]

λ_f : Filtrerrate (bzw. Inaktivierungsrate bei UVC-Geräten) [1/h]

Der zeitliche Verlauf der effektiven Eliminationsrate $\lambda(t)$ kann wie folgt bestimmt werden:

- ▶ $\lambda_0(t)$ kann mithilfe von Gl. [4] aus dem gemessenen CO₂-Konzentrationsverlauf berechnet werden
- ▶ für λ_v und λ_s können Literaturwerte herangezogen werden (siehe Abschnitt A2.4)
- ▶ $\lambda_f(t)$ ergibt sich aus dem Volumenstrom $Q_f(t)$ des Luftreinigers:

$$\lambda_f(t) = \eta Q_f(t)/V \quad [11]$$

Der Faktor η ($0 \leq \eta \leq 1$) bezeichnet dabei die Effizienz des verwendeten Luftreinigers. Aus den Ergebnissen einer experimentellen Vergleichsstudie (Kähler et al. 2020) wird ersichtlich, dass η je nach Aufstellungsort im Raum variieren kann (siehe Abschnitt A2.4). Der Volumenstrom $Q_f(t)$ des Luftreinigers kann mithilfe einer zuvor bestimmten Eichkurve aus der gemessenen Leistungsaufnahme des Luftreiniger berechnet werden (siehe Abschnitt A2.4).

Die binäre Indikator-Funktion $I(t)$ kann mithilfe eines Bewegungssensors aufgezeichnet werden. Mit den so ermittelten Werten für $I(t)$ und $\lambda(t)$ kann der normierter Virusquanta-Konzentrationsverlauf $A(t)$ durch numerische Integration von Gl. [9] bestimmen (siehe oben).

A1.4 Berechnung der inhalierten Virusquantadosis und des Infektionsrisikos

Die zeitliche Änderung der inhalierten Virusquantadosis lässt sich durch folgende Differentialgleichung beschreiben (Jones et al. 2021):

$$\dot{n}(t) = q_b C_q(t)$$

$n(t)$: Inhalierter Virusquantadosis [quanta]

q_b : Atemzeitvolumen [m^3/h]

C_q : Virusquanta-Konzentration [quanta/ m^3]

Die zum Zeitpunkt t inhalierter Virusquantadosis ergibt sich damit aus

$$n(t) = n_0 + q_b \int_0^t C_q(\tau) I(\tau) d\tau \quad [12]$$

n_0 : Bereits inhalede Virusquantadosis zur Zeit $t = 0$ [quanta]

I : Binäre Indikator-Funktion, die anzeigt zu welchen Zeiten der Raum belegt war

Einsetzen von Gl. [8] ergibt:

$$n(t) = n_0 + q_b \frac{E_q^0}{V} \int_0^t A(\tau) I(\tau) d\tau \quad [13]$$

Der Vorteil dieser Darstellung ist, dass die Abhängigkeiten vom Raumvolumen, von der Virusquanta-Erzeugungsrate und vom Atemzeitvolumen vor dem Integral stehen und bei Bedarf nachträglich dazu multipliziert werden können, wenn z.B. ein konkretes Infektionsrisiko berechnet werden soll.

Die Berechnung des Infektionsrisikos erfolgt auf der Basis des Wells-Riley Modells (Riley et al. 1978; Buonanno et al. 2020; Jones et al. 2021). Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Person infiziert, ergibt sich aus der eingeatmeten Virusquantadosis (Poisson-Verteilung):

$$p = 1 - e^{-n(t)} \approx n(t) \quad [14]$$

Die angegebene Näherung gilt für hinreichend kleine Werte von $n(t)$. Für die Berechnung von $n(t)$ muss die Virusquanta-Erzeugungsrate bekannt sein.

A1.5 Virusdosisfaktor und Referenzklassenzimmer

Im Folgenden berechnen wir die inhalede Virusquantadosis bezogen auf ein Referenzklassenzimmer. Wir definieren dazu den Virusdosisfaktor wie folgt:

$$VDF = \frac{n(t)}{n_{ref}(t)} \quad [15]$$

n : Inhalede Virusquantadosis während der Aufenthaltszeit t im Klassenzimmer

n_{ref} : Inhalede Virusquantadosis während der Aufenthaltszeit t im Referenzklassenzimmer

Im allgemeinen Fall ergibt sich damit

$$VDF = \frac{n_0 + q_b \frac{E_q^0}{V} \int_0^t A(\tau) I(\tau) d\tau}{n_{0,ref} + q_{b,ref} \frac{E_{q,ref}^0}{V_{ref}} \int_0^t A_{ref}(\tau) I_{ref}(\tau) d\tau} \quad [16]$$

Je nach Fragestellung kommen verschiedene Szenarien für die Wahl eines Referenzklassenzimmers in Betracht. Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit von individuellen Klassenzimmern und verschiedenen Lüftungskonzepten zu gewährleisten machen wir die folgenden Modellannahmen:

- ▶ A1: Gleicher Standard-Emittent im Klassenzimmer und Referenzklassenzimmer: $E_q^0 = E_{q,ref}^0$
- ▶ A2: Gleicher Standard-Rezipient im Klassenzimmer und Referenzklassenzimmer: $q_b = q_{b,ref}$
- ▶ A3: Gleiche Belegungszeiten und damit gleiche Expositionszeiten: $I = I_{ref}$

Weiterhin nehmen wir an, dass $n_0 = 0$ gilt, d.h. vor Beginn des Unterrichts (also zur Zeit $t < 0$) wurden noch keine Virusquanta inhaliert.

Damit vereinfacht sich Gl. 16 zu:

$$VDF = \frac{V_{ref} \int_0^t A(\tau) I(\tau) d\tau}{V \int_0^t A_{ref}(\tau) I(\tau) d\tau} \quad [17]$$

Wir bezeichnen diesen Parameter im folgenden als standardisierten Virusdosisfaktor (VDF). Ein Virusdosisfaktor von 1,5 würde zum Beispiel bedeuten, dass die potentiell inhalierte Virusdosis im betrachteten Klassenzimmer 1,5-mal so hoch bzw. um 50% höher ist als im Referenzklassenzimmer. Die Bedeutung des Virusdosisfaktors ist intuitiv einfach zu erfassen und unabhängig von der Virusquanta-Erzeugungsrate, d.h. von der Virenmenge, die tatsächlich mit dem Atemaerosol ausgestoßen wird. Mit dem Virusdosisfaktor steht damit ein vielseitig anwendbares Maß zur Verfügung, um die Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden im Kontext der Lufthygiene und des Infektionsschutzes gegen die Aerosol-Übertragung von Infektionskrankheiten zu bewerten.

A2 Methoden

A2.1 Teilnehmende Schulen

An der Studie nahmen 52 Schulen im Großraum München sowie in der Stadt Mainz teil. Die Auswahl umfasste 19 Grundschulen sowie 33 weiterführende Schulen (Mittelschulen, Realschulen, Gymnasien, Fachoberschulen und Berufsschulen). Pro Schule wurden je nach Schulgröße bis zu 8 Klassenzimmer ausgewählt. Insgesamt nahmen 244 Klassenzimmer an der Studie teil. Die Datenerhebung umfasste insgesamt mehr als 37.000 Unterrichtstage. In 124 Klassenzimmern kam ausschließlich freie Fensterlüftung zum Einsatz, in 42 Klassenzimmern wurden mobile Luftreiniger in Kombination mit freier Fensterlüftung verwendet, 29 Klassenzimmer waren mit ventilatorgestützter Fensterlüftung (Helleis et al., 2022) ausgestattet, 11 mit dezentraler Raumluftechnik (dezentrale Lüftungsanlagen) und 38 mit zentraler Raumluftechnik (raumluftechnische Anlagen). Die Mittelwerte für Jahrgangsstufe, Klassenstärke bzw. Raumvolumen, lagen bei 7,1, 22,6 SchülerInnen bzw. 206 m³. Die entsprechenden Histogramme sind in Abbildung A1 zusammengestellt.

A2.2 Datenerhebung

Die Datenaufnahme wurde derart konzipiert, dass keine Verkabelung in den Klassenzimmern erforderlich war und dass die Datenübertragung von den Schulen ohne Anschluss an schulinterne Datennetzwerke (WLAN, LAN) möglich war. Hierfür kamen Technologien aus den Bereichen *Internet of Things* und *Cloud-Computing* zum Einsatz (siehe Abbildung A2).

Für die Messung der CO₂-Konzentration wurde eine Multisensorbox (ELSYS ERS CO₂, ELSYS Elektroniksystem, Umeå, Schweden) verwendet, welche folgende Sensoren enthält: CO₂-Sensor, Bewegungssensor, Temperatursensor, Feuchtigkeitssensor und Lichtsensor. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden nur die Daten des CO₂-Sensors und des Bewegungssensor ausgewertet. Die Bewegungsdaten wurden verwendet, um automatisch zu dokumentieren zu welchen Zeiten ein Klassenzimmer belegt war. Die Multisensorbox wurde unter Berücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten in einer Höhe zwischen 110 cm und 170 cm mit einem doppelseitigen Klebeband an der Wand befestigt. Die Datenaufnahme erfolgte im Minutentakt.

In Klassenzimmern, in denen mobile Luftreiniger im Einsatz waren, wurden zusätzlich Steckdosenadapter zur Messung der elektrischen Leistungsaufnahme verwendet (Milesight MIL-WS522, Xiamen Milesight IoT Co., Xiamen, China). Über eine zuvor bestimmte Eichkurve wurde aus der gemessenen Leistungsaufnahme der aktuelle Volumenstrom des Raumluftreinigers bestimmt (siehe Abbildung A3). Die Datenaufnahme erfolgte im Zweiminutentakt.

Alle Sensordaten wurden über eine integrierte *LoRaWAN*-Schnittstelle drahtlos an ein *LoRaWAN-Gateway* (LineMetrics Indoor Gateway, LineMetrics GmbH, Haag, Österreich) übertragen. *Long Range Wide Area*

Network (LoRaWAN) ist ein etabliertes *Wireless*-Netzprotokoll im Bereich Internet der Dinge (*Internet of Things*, kurz IoT). *LoRaWAN* zeichnet sich durch seine hohe Reichweite in Gebäuden und seinen geringen Energieverbrauch aus. Die Batterien in den verwendeten Multisensorboxen mussten deshalb während der gesamten Laufzeit der Studie (Schuljahr 2021/22) nicht erneuert werden. Die Sensordaten wurden von den *LoRaWAN-Gateways* gebündelt und über das 4G/LTE-Mobilfunknetz an eine *Cloud* gesendet (LineMetrics Cloud, LineMetrics GmbH, Haag, Österreich). Dadurch war keine Anbindung an schulinterne Datennetzwerke (wie zum Beispiel WLAN oder LAN) erforderlich. Pro Schule wurde in der Regel ein *LoRaWAN-Gateway* verwendet. Lediglich in 2 der 52 teilnehmenden Schulen kamen aufgrund der unzureichenden Reichweite des *LoRaWAN*-Netzwerks zwei *LoRaWAN-Gateways* zum Einsatz. Die *LoRaWAN-Gateways* wurden üblicherweise in einem zentralen Bereich mit hinreichend gutem Mobilfunkempfang aufgestellt (Technikraum, Sekretariat, Lehrerzimmer, Büro). Über ein speziell konzipiertes *Application Programming Interface* (MATLAB-API, LineMetrics GmbH, Haag, Österreich) wurden die Daten für die weitere Auswertung von der *Cloud* heruntergeladen und in eine lokale Datenbank eingepflegt.

Bei der Installation bzw. De-Installation der Sensoren in den Klassenzimmern wurde das Raumvolumen und die Fläche der öffenbaren Fenster bestimmt. In Klassenzimmern, die mit einem mobilen Luftreiniger ausgestattet waren, wurde zusätzlich deren Standort dokumentiert. Darüber hinaus wurde für jedes Klassenzimmer die Jahrgangsstufe, die Klassenstärke und sowie die Anzahl der Lehrkräfte, die sich gleichzeitig im Klassenzimmer aufhalten, dokumentiert; In sonderpädagogischen Förderschulen sind in der Regel mehrere Lehrkräfte im Klassenzimmer anwesend.

A2.3 Datenschutz

Alle Studiendaten wurden in vollständig anonymisierter Form verarbeitet und abgespeichert. Hierfür wurde jeder Schule eine anonyme Codenummer zugewiesen. Alle Messdaten, sowie die Daten aus der Dokumentation der Raumgeometrie bzw. der Raumausstattung wurden unter dieser Codenummer verarbeitet und abgespeichert. Der Codeschlüssel ist nur dem Projektleiter zugänglich. Ohne den Codeschlüssel ist die Identifikation einer teilnehmende Schule nicht möglich. Die Verarbeitung/Archivierung der Daten erfolgte nach den Richtlinien der relevanten gesetzlichen Vorgaben, wie zum Beispiel Art. 4 Nr. 1 DSGVO, sowie den internen Datenschutzrichtlinien der Hochschule München.

A2.4 Datenauswertung

Für die Datenauswertung wurde ein umfassender Programmcode in der Programmiersprache MATLAB (The MathWorks, Natick, Massachusetts, USA) entwickelt. Die folgenden Abschnitte dokumentieren die in MATLAB implementierten Berechnungen.

Höhenkorrektur der gemessenen CO₂-Werte

Für jedes Klassenzimmer und jeden Schultag wurde der gemessene CO₂-Konzentrationsverlauf aus der zuvor erstellten lokalen Datenbank eingelesen. Die CO₂-Messung erfolgte über einen nichtdispersiven Infrarotsensor (NDIR-Sensor). Der angezeigte Messwert in ppm (*parts per million*) bezieht sich auf einen atmosphärischen Normaldruck von 1013 hPa. Da der Großteil der teilnehmenden Schulen auf einer Höhe von mehr als 450 m über dem Meeresspiegel lagen, wurde eine Höhenkorrektur der gemessenen CO₂-Werte durchgeführt. (Der Luftdruck nimmt entsprechend der barometrischen Höhenformel mit steigender Höhe ab.) Die genaue Höhe aller teilnehmenden Schulen wurde wie folgt bestimmt: Die Koordinaten der Schule wurden mithilfe einer digitalen Landkarte (Google Maps, Google LLC, Menlo Park, Kalifornien, USA) bestimmt, die genaue Höhe über dem Meeresspiegel wurden dann für diese Koordinaten mithilfe einer digitalen Höhenkarte bestimmt (www.mapcoordinates.net, Vivid Planet Software GmbH, Henndorf am Wallersee, Österreich). Der atmosphärischen Normaldruck von 1013 hPa wurde dann auf die Höhe der jeweiligen Schule mithilfe der barometrischen Höhenformel umgerechnet. Witterungsbedingte Schwankungen des Luftdrucks wurden nicht berücksichtigt. Ein Korrekturfaktor γ wurde mithilfe einer vom Hersteller zur Verfügung gestellten Korrekturformel berechnet:

$$\gamma = (4,026 \cdot 10^{-4} \cdot p + 5,78 \cdot 10^{-7} \cdot p^2)^{-1} \quad [18]$$

wobei p der atmosphärische Druck in hPa ist. Abbildung A4 zeigt den Korrekturfaktor γ in Abhängigkeit der Höhe über dem Meeresspiegel. Für eine Höhe von 520 m über dem Meeresspiegel (Durchschnittliche Höhe der Stadt München) ergibt sich damit ein Korrekturfaktor von 1,10 (10%), für eine Höhe von 718 m über dem Meeresspiegel (höchst gelegene Schule in dieser Studie) ergibt sich ein Korrekturfaktor von 1,14 (14%). Die CO₂-Sensoren führen eine regelmäßige automatische Basislinienkorrektur durch, wobei ein Basislinienwert von 400 ppm verwendet wird. Dieser Basislinienwert wurde bei der Höhenkorrektur wie folgt berücksichtigt:

$$C_{ppm} = \gamma C_{ppm}^m - 400(1 - \gamma) \quad [19]$$

wobei C_{ppm} bzw. C_{ppm}^m der korrigierte bzw. gemessene CO₂-Wert in ppm ist.

Berechnung der binären Indikator-Funktion aus den Daten des Bewegungssensors

Für jedes Klassenzimmer und jeden Schultag wurden die aufgezeichneten Daten des Bewegungssensors aus der zuvor erstellten lokalen Datenbank eingelesen. Die binäre Indikator-Funktion $I(t)$ wurde dann aus den Daten des Bewegungssensors berechnet. Diese Funktion gibt an zu welchen Zeiten ein Klassenzimmer belegt war und wird für die Berechnung des standardisierten Virusdosisfaktors (siehe Gl. [17]) benötigt.

Jeder der Sensoren in der Multisensorbox verwendet eine eigene, von den anderen Sensoren unabhängige, Zeitbasis. Die Zeitbasis des CO₂-Sensors diente bei der Auswertung als Bezugszeit für die anderen Sensoren

(Bewegungssensor, Sensor zur Leistungsmessung). Die gemessenen Bewegungssensorwerte wurden mittels linearer Interpolation (MATLAB-Funktion *interp1*) auf die Bezugszeit umgerechnet und mit einem Gauß-Filter (Halbwertsbreite: 10 min) geglättet. Die binäre Indikator-Funktion $I(t)$ wurden dann durch anwenden eines Schwellwertfilter berechnet: Werte größer oder gleich Eins wurden auf Eins gesetzt, alle anderen Werte auf Null.

Berechnung des Volumenstroms beim Einsatz von mobilen Luftreinigern

Für jedes Klassenzimmer und jeden Schultag wurde die mit dem Steckdosenadapter gemessene elektrische Leistungsaufnahme aus der zuvor erstellten lokalen Datenbank eingelesen. Die gemessenen Leistungswerte wurden mithilfe lineare Interpolation (MATLAB-Funktion *interp1*) auf die Bezugszeit (Zeitbasis des CO₂-Sensors im Klassenzimmer) umgerechnet und anhand zuvor erstellter Eichkurven der Zeitverlauf des Volumenstroms $Q_f(t)$ [m³/h] ermittelt.

In manchen Klassenzimmern kamen zwei mobile Luftreiniger zum Einsatz. Jeder mobile Luftreiniger war mit einem eigenen Steckdosenadapter ausgestattet. In diesem Fall wurde, wie oben beschrieben, für beide mobilen Luftreiniger der jeweilige Zeitverlauf des Volumenstroms bestimmt. Der resultierende gesamte Volumenstrom wurde dann durch Addition der beiden individuellen Volumenströme berechnet:

$$Q_f(t) = Q_{f_1}(t) + Q_{f_2}(t).$$

Für jedes mobile Luftreinigermodell wurde eine individuelle Eichkurve erstellt. Dazu wurde die elektrische Leistungsaufnahme [Watt] bei verschiedenen Betriebsstufen gemessen. Der Volumenstrom [m³/h] für jede dieser Betriebsstufen wurde aus dem Datenblatt des Herstellers entnommen, mögliche Reduktionen des Volumenstroms durch belegte Filter wurden nicht berücksichtigt. Die Eichkurve wurde dann mithilfe eines Interpolationsverfahrens (*Spline* Interpolation; MATLAB-Funktion: *interp1*) aus den Messwerten der Eichmessung berechnet. Eine exemplarische Eichkurve ist in Abbildung A3 dargestellt.

Berechnung des Luftwechselrate

Die Luftwechselrate $\lambda_0(t)$ wurde mithilfe von Gl. [4] berechnet, wobei für die CO₂-Konzentration in der Außenluft (Frischlufte) ein Wert von $F = 400$ ppm verwendet wurde. Die CO₂-Erzeugungsrates wurde gemäß $E_{ppm}(t) = E_{ppm}^0 I(t)$ berechnet, wobei $I(t)$ die binäre Indikator-Funktion ist, die anzeigt zu welchen Zeiten der Raum belegt war (siehe Abschnitt *Berechnung der Indikator-Funktion aus den Daten des Bewegungssensors*). E_{ppm}^0 ist die CO₂-Erzeugungsrates [ppm/h] aller Personen im Raum. Diese ergibt sich aus $E_{ppm}^0 = N_S E_{ppm}^S + N_L E_{ppm}^L$, wobei N_S bzw. N_L die Anzahl der SchülerInnen bzw. Lehrkräfte im Raum ist und E_{ppm}^S bzw. E_{ppm}^L die entsprechenden alterstypischen individuellen CO₂-Erzeugungsrates. N_S wurde aus der Klassenstärke berechnet, wobei ein Belegungsfaktor von von 0,9 angenommen wurde ($N_S = 0,9 \cdot$ Klassenstärke). Die altersspezifischen individuellen CO₂-Erzeugungsrates wurde auf der Grundlage von Literaturwerten bestimmt (Persily & de Jonge 2017). Aus dieser Veröffentlichung wurden zunächst die

alters- und geschlechtsspezifischen CO₂-Erzeugungsraten für eine metabolische Rate von 1,4 entnommen, was einer moderaten physischen Aktivität entspricht. Das durchschnittliche Alter der SchülerInnen wurde aus der Jahrgangsstufe berechnet (Alter = Jahrgangsstufe + 5,5), für das Alter der Lehrkräfte wurde ein Durchschnittswert von 45 Jahren verwendet. Die alters- und geschlechtsspezifischen CO₂-Erzeugungsraten in der Veröffentlichung (Persily & de Jonge 2017) sind für einen Luftdruck von 1013 hPa und eine Temperatur von 273 K angegeben. Durch die Multiplikation mit dem Umrechnungsfaktor $U = T/273 \cdot 1013/p$ wurden die in der der Veröffentlichung angegeben Werte auf die aktuellen Umgebungsbedingungen umgerechnet. Für T wurde ein Wert von 293 K verwendet (entspricht 20° Celsius), der Wert für p wurde mithilfe der barometrischen Höhenformel aus dem Normaldruck von 1023 hPa berechnet (siehe Abschnitt *Höhenkorrektur der gemessenen CO₂-Werte*). Die jeweiligen geschlechtsspezifischen Werte wurden dann gemittelt. Aus den angegebenen Literaturwerten wurden dann mithilfe eines Interpolationsverfahrens (*Makima* Intepolation; MATLAB-Funktion *interp1*) entsprechende Kurven für die altersspezifische individuellen CO₂-Erzeugungsraten für Frauen, Männer sowie den Mittelwert über beide Geschlechter berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung A5 dargestellt.

Berechnung des Aerosol-Eliminationsrate für mobile Luftreiniger

Für Klassenzimmer mit mobilen Luftreinigern wurde die entsprechende Filtrerrate λ_f gemäß Gl. [11] berechnet. Je nach Klassifizierung des Standorts des mobilen Luftreinigers im Klassenzimmer wurde für den Effizienzfaktor η ein Wert von 0,77 (Kategorie A, günstiger Standort), 0,65 (Kategorie B, günstiger Standort) bzw. 0,53 (Kategorie C, ungünstiger Standort) verwendet. Der Standort der mobilen Luftreiniger wurde bei im Rahmen der Installation der Sensoren in den Klassenzimmer dokumentiert (siehe Abschnitt *Datenerhebung*). Die beiden η -Werte für Kategorie A und B wurden aus einer Veröffentlichung bestimmt, in der die Abhängigkeit der Filtrerrate eines mobilen Luftreinigers vom Standort im Raum gemessen wurde (siehe Tabelle 1 in Kähler et al., 2020). Der η -Wert wurde aus dem Verhältnis des gemessenen Werts zum eingestellten Sollwert berechnet. Dabei wurde für Position A und B der jeweilige Mittelwert über die 6 angegebenen Messpunkte für einen Volumenstrom von $1000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ berechnet. Die in dieser Veröffentlichung beschriebenen Positionen A und B entsprechen der hier verwendeten Kategorien A und B. Der η -Wert für Kategorie C wurde durch lineare Extrapolation der η -Werte für Kategorie A und B bestimmt. Die Kategorisierung des Standorts des mobilen Luftreinigers (MLR) erfolgte nach folgenden Kriterien:

- ▶ Kategorie A: MLR ist etwa mittig entlang einer Raumwand aufgestellt. Der Abstand zur Wand beträgt mindestens 0,5 m.
- ▶ Kategorie B: MLR ist nahe an einer Raumecke aufgestellt und der Abstand zur Wand beträgt mindestens 0,5 m, der Abstand von der Ecke ist mindestens 1,0 m. Oder der MLR ist etwa mittig entlang einer Raumwand aufgestellt, es wurde aber kein nennenswerter Abstand zur Wand eingehalten.

- ▶ Kategorie C: MLR ist in einer Raumecke ohne nennenswerten Abstand zur Wand aufgestellt.

Referenzklassenzimmer

Als Referenzklassenzimmer wurde ein Raum mit einem Volumen von 200 m^3 verwendet, in dem sich 24 SchülerInnen mit einem Durchschnittsalter von 12 Jahren und eine Lehrkraft befinden. Diese Werte entsprechen in etwa dem mittleren Raumvolumen, dem mittleren Alter (mittlere Jahrgangsstufe + 5,5) bzw. der mittleren Raumbelagung der an dieser Studie teilnehmenden Klassenzimmer (siehe Abschnitt A.2.1). Das Referenzklassenzimmer ist mit einer Lüftungsanlage ausgestattet, die das dreifache des Raumvolumens pro Stunde im idealen Mischluftbetrieb durch Frischluft ersetzt, d.h. die entsprechende Luftwechselrate beträgt 3 h^{-1} . Es wird keine zusätzliche Fensterlüftung durchgeführt.

Berechnung des Virusdosisfaktors

Aus der Luftwechselrate $\lambda_0(t)$ wurde dann gemäß Gl. [10] die Aerosol-Eliminationsrate $\lambda(t)$ berechnet. Für die biologische Zerfallsrate der Virusquanta λ_v , sowie die Aerosol-Sedimentationsrate λ_s wurden Literaturwerte verwendet. SARS-CoV-2 bzw. SARS-CoV-1 wurde eine Halbwertszeit von 1,1 bis 1,2 h berichtet (van Doremalen et al., 2020). Die biologische Zerfallsrate der Virusquanta λ_v ergibt sich aus der Halbwertszeit T_h gemäß $\lambda_v = \ln(2)/T_h$. Für $T_h = 1,1 \text{ h}$ ergibt sich damit für das Coronavirus SARS-CoV-2 bzw. SARS-CoV-1: $\lambda_v = 0,63 \text{ h}^{-1}$. Für das Influenza-A-Virus wurde eine Halbwertszeit von 31,6 min berichtet (Schuit et al., 2020), was konsistent mit früheren Ergebnissen von Harper et al. bei einer Raumtemperatur von 20,5 - 24,0 °C und einer relativen Luftfeuchte von 50 - 51% ist (Harper, 1961). Daraus ergibt sich für das Influenza-A-Virus: $\lambda_v = 1,32 \text{ h}^{-1}$. Für die Aerosol-Sedimentationsrate λ_s wurde der Wert $\lambda_s = 0,42 \text{ h}^{-1}$ verwendet, was dem Wert von $\lambda_s = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Jones et al., 2020) entspricht, der auf den Ergebnissen einer früheren Arbeit von Thatcher et al. (2002) basiert. Für Klassenzimmer mit mobilen Luftreinigern wurde die Filterrate λ_f aus Gl. [11] berechnet (siehe Abschnitt *Berechnung des Aerosol-Eliminationsrate für mobile Luftreiniger*). Aus der binären Indikator-Funktion $I(t)$ und der Aerosol-Eliminationsrate $\lambda(t)$ wurde dann der normierter Virusquanta-Konzentrationsverlauf $A(t)$ berechnet; Die Lösung der Differentialgleichung Gl. [9] wurde mithilfe eines numerischen Verfahrens (Runge-Kutta-Verfahren, MATLAB-Funktion *ode45*) berechnet. Analog dazu wurde der normierter Virusquanta-Konzentrationsverlauf $A_{ref}(t)$ für Referenzklassenzimmer berechnet. Für die Luftwechselrate im Referenzklassenzimmer wurde ein konstanter Wert von $\lambda_0(t) = 3 \text{ h}^{-1}$ verwendet (siehe Abschnitt *Referenzklassenzimmer*). Für die biologische Zerfallsrate der Virusquanta und die Sedimentationsrate wurden die oben genannten Literaturwerte verwendet. Der Virusdosisfaktor wurde dann gemäß Gl. [17] berechnet, wobei für V und V_{ref} die entsprechenden Raumvolumina des Klassenzimmers bzw. Referenzklassenzimmer ($V_{ref} = 200 \text{ m}^3$) verwendet wurden. Die entsprechenden Integrale über $A(t)$ und $A_{ref}(t)$ wurden durch numerische Integration berechnet (MATLAB-Funktion *trapz*).

Erstellung der Histogramme für CO₂-Konzentration und Virusdosisfaktor

Für jede der untersuchten Lüftungsmethoden wurden die gemessenen CO₂-Konzentrationen bzw. die berechneten Virusdosisfaktoren (VDF) in den entsprechenden Klassenzimmern zusammengefasst (gepoolt) und in Form von Histogrammen grafisch dargestellt. Dabei wurden nur Unterrichtstage berücksichtigt, an denen die Belegzeit des Klassenzimmers länger als 2 h war. Die Belegungszeit wurde aus der binären Indikator-Funktion $I(t)$ berechnet (siehe Abschnitt *Berechnung der binären Indikator-Funktion aus den Daten des Bewegungssensors*). Die Erstellung der Histogramme erfolgte auf der Basis der CO₂- bzw. VDF-Daten für das gesamte Schuljahr 2021/22 (siehe Abb. 1 und 2). Zusätzlich wurden jahreszeitspezifische Histogramme erstellt (siehe Abb. 4 und 5), für welche die CO₂- bzw. VDF-Daten der Monate Januar und Februar (kalte Jahreszeit) bzw. der Monate Juni und Juli (warme Jahreszeit) zusammengefasst (gepoolt) wurden.

A2.5 Diskussion

Für die Modellierung der CO₂-Konzentration, der Luftwechselrate sowie des Virusdosisfaktors wurde ein *Well Mixed Room* (WMR)-Modell verwendet, das von einer homogenen Verteilung von Emissionen im Raum ausgeht (Ott et al. 2006, Jones et al. 2021). Eine Stratifizierung der Raumluft, die zum Beispiel durch Verdrängungslüftung bzw. durch Quelllufteffekte beim Fensterlüften auftreten kann (Mateus & Graça 2015; Helleis et al. 2022), wird beim verwendeten WMR-Modell nicht berücksichtigt. Das Auftreten von Quelllufteffekten beim Fensterlüften wird vor allem in der kalten Jahreszeit durch den großen Temperaturunterschied zwischen Raumluft und Außenluft begünstigt. Beim Vorliegen derartiger Effekte würde die tatsächliche Luftwechselrate durch das WMR-Modell unterschätzt, was zu einer Überschätzung des daraus berechneten Virusdosisfaktors führen würde. Eine Berücksichtigung von Stratifizierungseffekten ist grundsätzlich durch geeignete Zonen-Modelle möglich (Noakes & Sleigh 2009; Mateus & Graça 2015). Eine sinnvolle Anwendung solcher Modelle setzt aber voraus, dass die Datenerfassung durch eine hinreichende Anzahl von geeignet positionierten Sensoren erfolgt, was eine potentielle Limitation für den Einsatz in größer angelegten Feldstudien darstellt.

Für die Berechnung der CO₂-Erzeugungsrates aller Personen im Raum wurde die Anzahl der SchülerInnen im Klassenzimmer aus der zuvor dokumentierten Klassenstärke berechnet, wobei ein Belegungsfaktor von 0,9 angenommen wurde (siehe Abschnitt A2.4). Liegt die tatsächliche Raumbellegung unter der angenommenen, so tritt ein systematischer Fehler bei der Berechnung des Virusdosisfaktors auf. Abbildung A6 zeigt den prozentualen Fehler des berechneten Virusdosisfaktors in Abhängigkeit von der tatsächlichen Raumbellegung. Die Berechnung erfolgte auf der Basis einer Computersimulation für zwei verschiedene Lüftungsschemata: Stoßlüften alle 20 min für 3 min (günstiges Lüftungsszenario) bzw. Stoßlüften alle 90 min für 3 min (ungünstiges Lüftungsszenario). Die resultierenden CO₂-Konzentrationsverläufe sind im oberen Teil von Abbildung 6 gezeigt. Je niedriger die tatsächliche Raumbellegung im Vergleich zur angenommenen ist, desto größer ist die systematische Unterschätzung des berechneten Virusdosisfaktors. Liegt die tatsächliche Raumbellegung zum Beispiel bei 80% (Belegungsfaktor 0,8), anstatt wie

angenommen bei 90% (Belegungsfaktor 0,9), dann ergibt sich ein relativer Fehler von etwa -10%, d.h. der berechnete Virusdosisfaktor liegt etwa 10% unter dem tatsächlichen. Die Unterschied zwischen den beiden betrachteten Lüftungsschemata ist vergleichsweise gering (vgl. blaue und orange Kurve in Abbildung A6).

Die beobachteten CO₂-Konzentrationen hängen einerseits von der Wirksamkeit der angewandten Lüftungsmethoden ab und andererseits vom Raumvolumen und der CO₂-Gesamtemission, welche wiederum von der Anzahl der Personen im Raum abhängt. Abbildung A15 zeigt die Verteilung des Raumvolumens und der Raumbelugung (Klassenstärke) für jede der untersuchten Lüftungsmethoden. Die Mediane der Verteilungen sind vergleichbar und die Verteilungen weisen keine ausgeprägten Asymmetrien auf. Unter dieser Annahme/Voraussetzung ist ein kategorischer Vergleich der praktische Wirksamkeit der untersuchten Lüftungsmethoden nicht nur auf der Basis der berechneten Virusdosisfaktoren, sondern auch auf der Basis der beobachteten CO₂-Konzentrationen möglich.

Für die Berechnung des Virusdosisfaktors wurde die Viruslebensdauer (Halbwertszeit) in Atemaerosolen berücksichtigt. Die Auswertung erfolgte für die charakteristische Lebensdauer von Coronaviren (SARS-CoV-2, SARS-CoV-1) bzw. Influenza-A-Viren. Die Abhängigkeit des Virusdosisfaktors von der Viruslebensdauer (Halbwertszeit) wurde mittels einer Computersimulation für sechs verschiedene Lüftungsschemata untersucht (Stoßlüften für 3 min alle 20 min, alle 30 min, alle 45 min, alle 60 min, alle 90 min und alle 180 min). Die entsprechenden CO₂-Konzentrationsverläufe sind im oberen Teil von Abbildung 13 dargestellt. Der untere Teil von Abbildung 13 zeigt die Abhängigkeit des Virusdosisfaktors von der Viruslebensdauer. Die Lebensdauern von Coronaviren (SARS-CoV-2, SARS-CoV-1) bzw. Influenza-A-Viren sind durch grau gestrichelte Linien dargestellt. Bei einer hinreichend hohen Luftwechselrate ist die Viruslebensdauer über einen weiten Bereich vernachlässigbar (vgl. Gl. [6] bzw. [10]), was anhand der grünen bzw. blauen Kurve in Abbildung 13 ersichtlich ist (Lüftungsschema 20-3 bzw. 30-3).

Neben den zuvor genannten Aspekten ist bei der Interpretation der Mess- und Rechenergebnisse zu berücksichtigen, dass in einzelnen Klassen auch weitere Umstände und Vorkommnisse auftreten können, die zu Abweichungen von der normalen Wirkung der angewandten Lüftungsmethode führen (z.B. zusätzliches Lüften durch Flurtüren; Abdeckung von Sensoren oder Lufteinlässen bzw. -auslässen; Peper et al. 2007; Reiß et al. 2017; Jagnow & Gebhardt 2018).

Weiterhin sollte bei der Einordnung der Mess- und Rechenergebnisse berücksichtigt werden, dass die Datenerhebung während des Schuljahrs 2021/22 erfolgte, welches durch die Covid-19-Pandemie geprägt war. Durch öffentliche Informationskampagnen und Medienberichte wurde die Bedeutung einer guten Luftqualität in Innenräumen mit Blick auf die Reduzierung des Infektionsrisikos intensiv kommuniziert. Bei technischen Lüftungsanlagen wurden vielerorts Volumenstrom und Frischluftanteil erhöht. Aber auch bei der freien/natürlichen Fensterlüftung ist davon auszugehen, dass die entsprechenden Empfehlungen im Allgemeinen konsequenter umgesetzt wurden als in Nicht-Pandemiezeiten.

Abbildungen zum Anhang

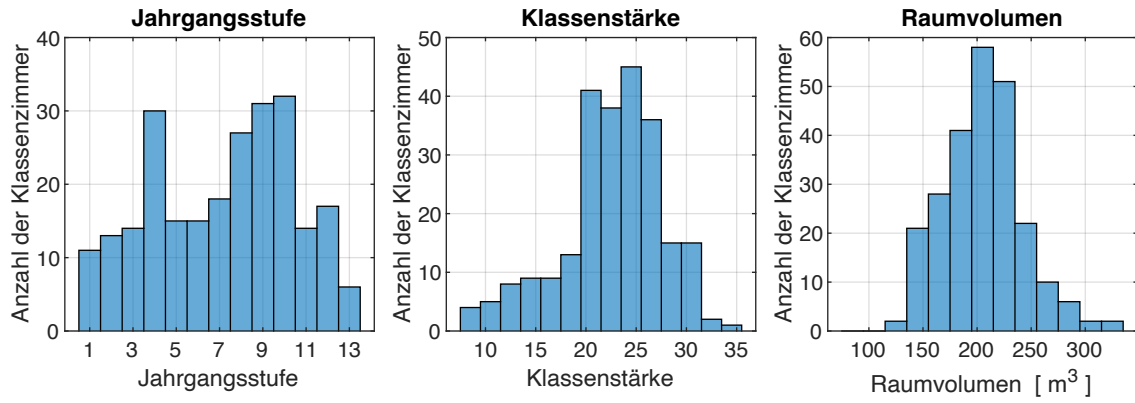


Abb. A1. Histogramme für Jahrgangsstufe, Klassenstärke und Raumvolumen für die teilnehmenden Klassenzimmer.

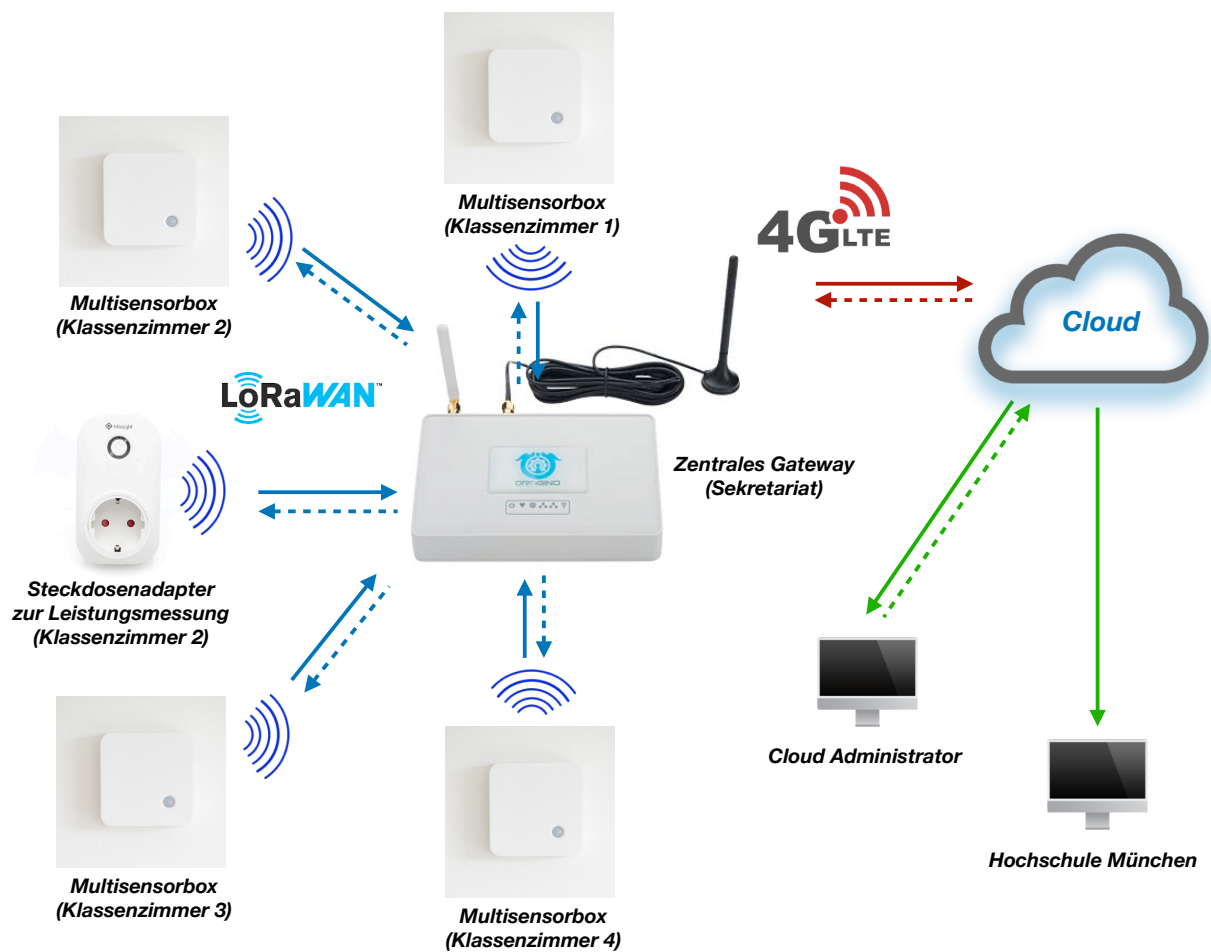


Abb. A2. Konzept der Datenaufzeichnung. Die in den Klassenzimmern aufgenommenen Sensordaten wurden über ein LoRaWAN-Funknetzwerk zu einem zentralen LoRaWAN-Gateway gesendet und von dort über das 4G/LTE an eine Cloud weitergeleitet. In der Cloud wurden die eintreffenden Daten archiviert und konnten über ein geeignetes Application Programming Interface (API) für die weitere Verarbeitung heruntergeladen werden.

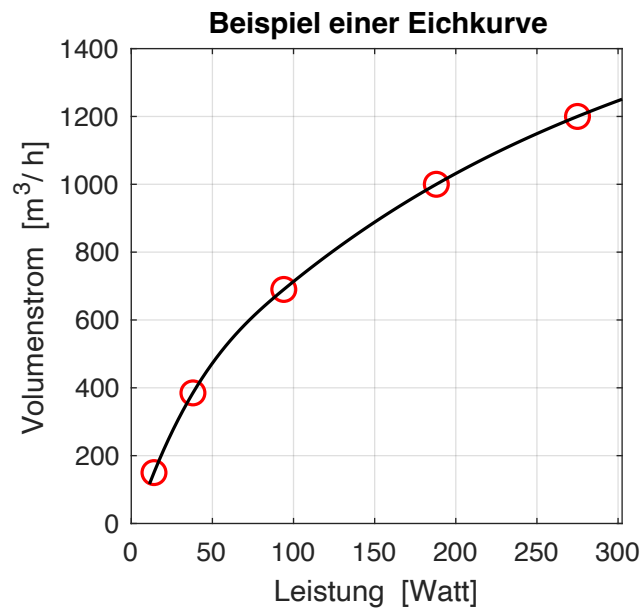


Abb. A3. Exemplarische Eichkurve für einen der verwendeten mobilen Luftreiniger. Aus der gemessenen Leistungsaufnahme des mobilen Luftreinigers kann damit der aktuelle Volumenstrom bestimmt werden. Die Eichkurve (schwarze Linie) wurde mithilfe eines Interpolationsverfahrens (Spline Interpolation) aus den Messwerten einer Eichmessung (rote Kreise) berechnet.

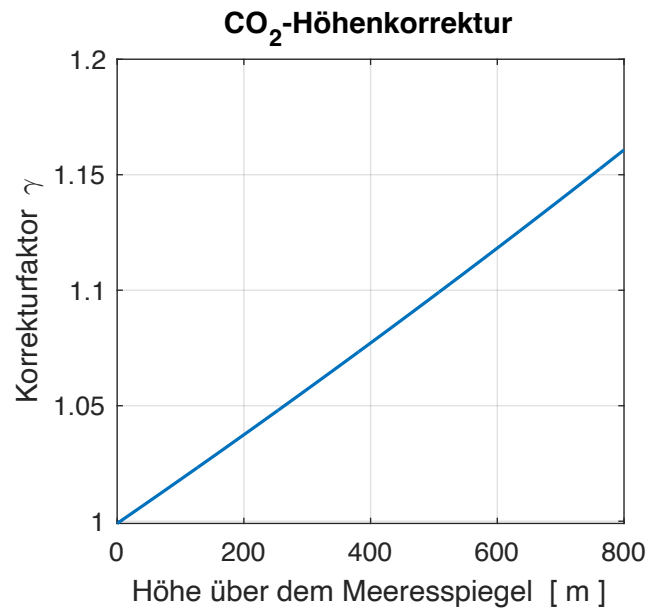


Abb. A4. Höhenkorrektur der CO₂-Werte. Korrekturfaktor γ als Funktion der Höhe über dem Meeresspiegel. Der tatsächliche CO₂-Wert kann damit aus dem gemessenen CO₂-Wert berechnet werden.

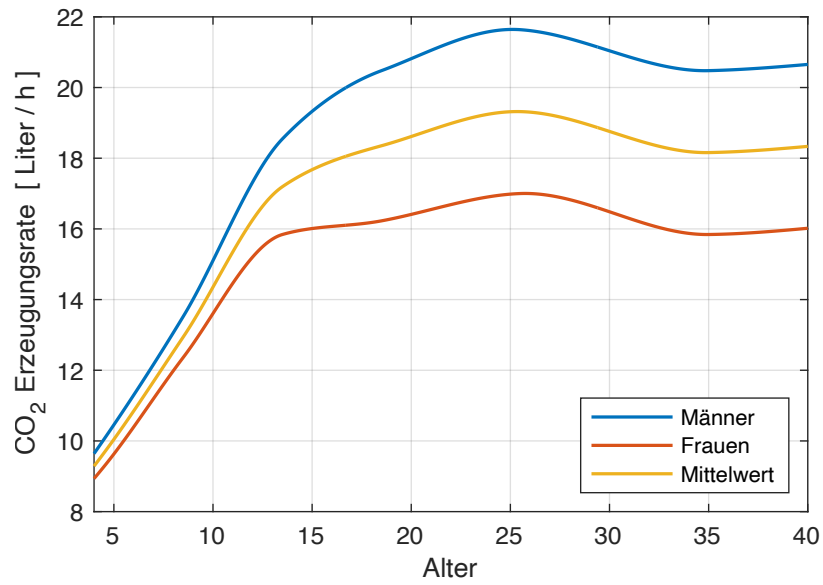


Abb. A5. Altersspezifische individuelle CO₂-Erzeugungsraten. Die Kurven wurden aus Literaturwerten (Persily & de Jonge 2017) für moderate physische Aktivität (metabolisches Äquivalent: 1,4) mittels eines Interpolationsverfahrens (Makima Interpolation) berechnet.

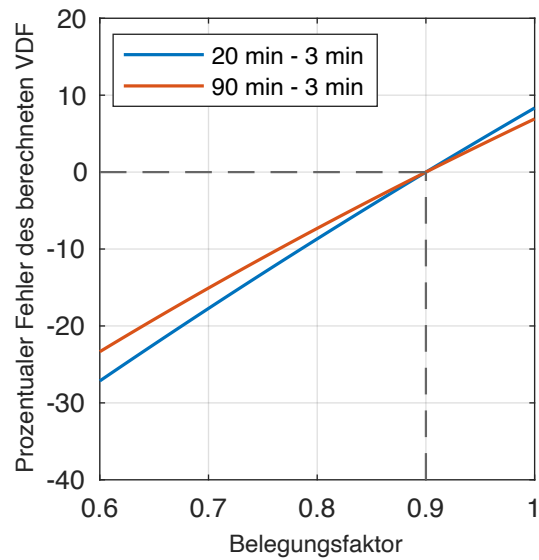
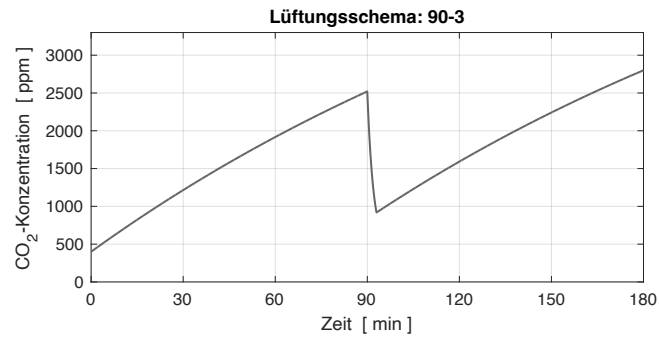
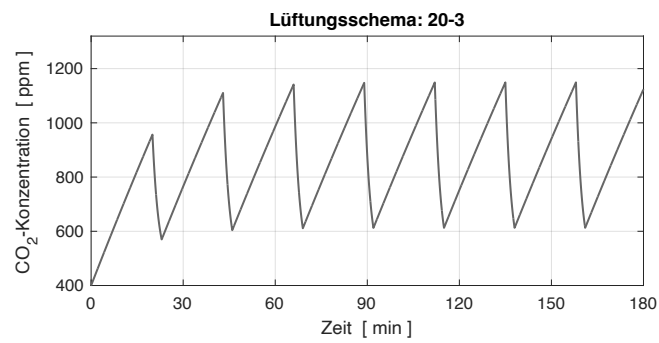


Abb. A6. Prozentualer Fehler des berechneten Virusdosisfaktors in Abhängigkeit von der tatsächlichen Raumebelegung. Die Berechnung erfolgte mittels einer Computersimulation für verschiedene Lüftungsschemata: Stoßlüften alle 20 min für 3 min (günstiges Lüftungsszenario) bzw. Stoßlüften alle 90 min für 3 min (ungünstiges Lüftungsszenario). Stimmt die tatsächliche Raumebelegung mit der angenommenen überein, so tritt kein Fehler auf (grau gestrichelte Linien).

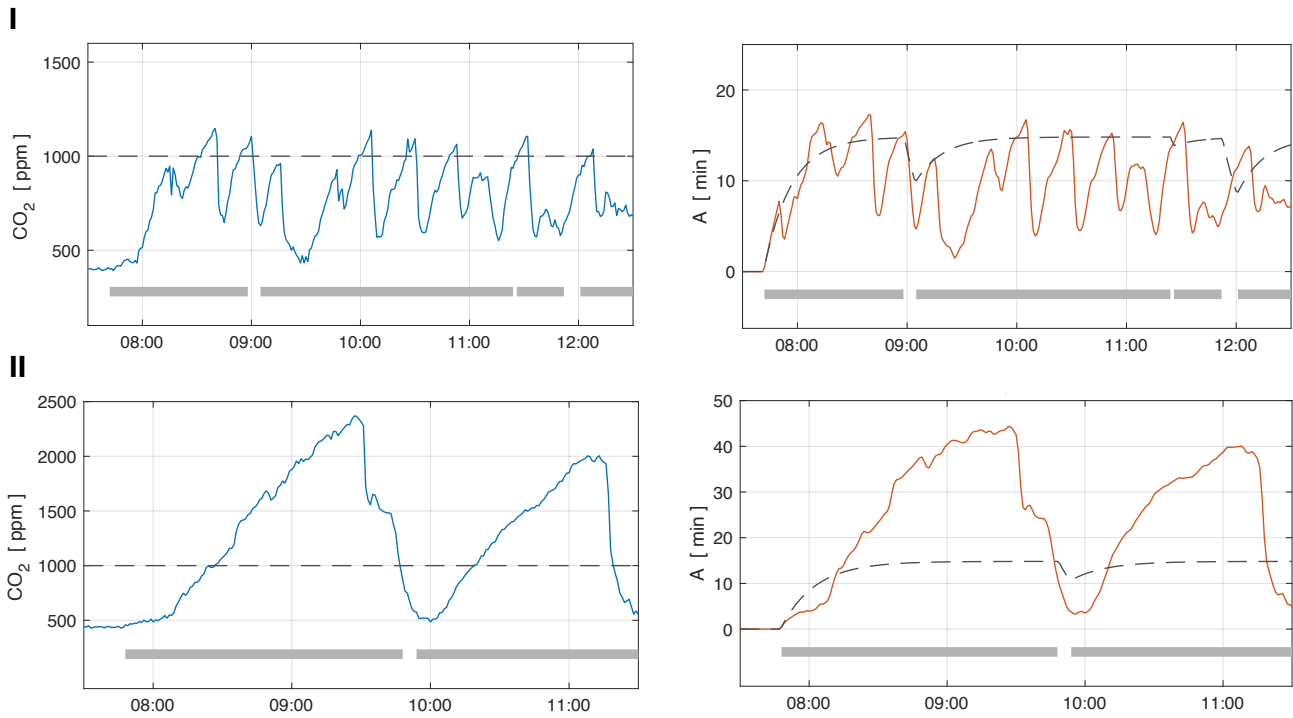


Abb. A7. Fensterlüftung (Fallbeispiele I und II). Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration (blaue Kurven) und der normierten Virusquanta-Konzentration A (orange Kurven). Die gestrichelten Linien zeigen den CO₂-Leitwert von 1000 ppm, bzw. den Verlauf der A-Werte im Referenzklassenzimmer. Die grauen Balken zeigen, zu welchen Zeiten das Klassenzimmer belegt war. **Fallbeispiel I** (Raumvolumen 170 m³, 12. Klasse, 22 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Es wurde im Durchschnitt ca. alle 20 min gelüftet. Die CO₂-Werte bleiben im Wesentlichen unter dem Leitwert von 1000 ppm (gestrichelte Linie), die A-Werte bleiben weitgehend unter der Referenzkurve (gestrichelte Kurve). **Fallbeispiel II** (Raumvolumen 213 m³, 6. Klasse, 25 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Es wurde nur selten gelüftet (nach ca. 90 min bzw. ca. 70 min). Der CO₂-Leitwert wird zeitweise erheblich überschritten, die entsprechenden A-Werte liegen weit über der Referenzkurve.

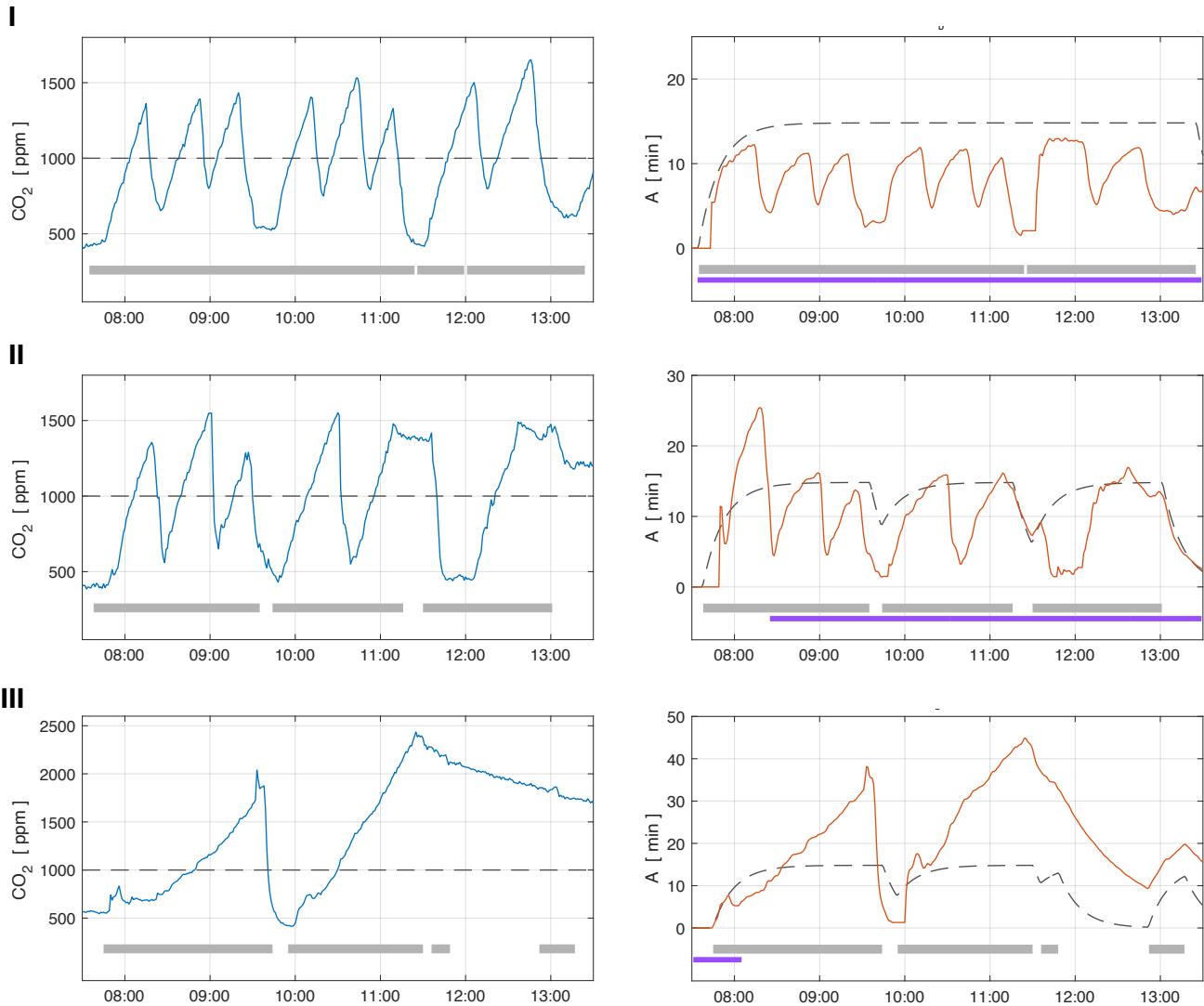


Abb. A8. Mobiler Luftreiniger in Kombination mit Fensterlüftung (Fallbeispiele I, II und III). Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration (blaue Kurven) und der normierten Virusquanta-Konzentration A (orange Kurven). Die gestrichelten Linien zeigen den CO₂-Leitwert von 1000 ppm, bzw. den Verlauf der A-Werte im Referenzklassenzimmer. Die grauen Balken zeigen, zu welchen Zeiten die Klassenzimmer belegt waren, die violetten Balken zeigen, zu welchen Zeiten die mobilen Luftreiniger in Betrieb waren. Was die CO₂-Konzentration angeht, wurde der Leitwert von 1000 ppm bei allen Fallbeispielen regelmäßig überschritten. Insgesamt kann man daraus sehen, dass in keinem der Fallbeispiele ausreichend gelüftet wurde. Besonders deutlich zeigt sich das in Fallbeispiel III. Dennoch liegen die A-Werte im Bereich der Referenzkurve, sofern die mobilen Luftreiniger in Betrieb waren (siehe violette Balken). **Fallbeispiel I** (Raumvolumen 174 m³, 8. Klasse, 17 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Der mobile Luftreiniger war durchgehend in Betrieb, die A-Werte liegen unter der Referenzkurve. **Fallbeispiel II** (gleiches Klassenzimmer wie bei I an anderem Schultag): Der mobile Luftreiniger war zu Beginn des Schultags (bis ca. 08:30 Uhr) nicht eingeschaltet (siehe violette Balken). Die A-Werte liegen während dieser Zeit deutlich über der Referenzkurve, fallen aber nach dem Einschalten des mobilen Luftreinigers gegen 08:30 Uhr deutlich ab und liegen im weiteren Tagesverlauf im Bereich der Referenzkurve. **Fallbeispiel III** (Raumvolumen 207 m³, 4. Klasse, 21 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Der mobile Luftreiniger war nur am Anfang des Schultag (bis ca. 08:10 Uhr) in Betrieb. Darüber hinaus wurde nur einmal während des Vormittags gelüftet (siehe CO₂-Verlauf). Die A-Werte liegt deshalb weit über der Referenzkurve.

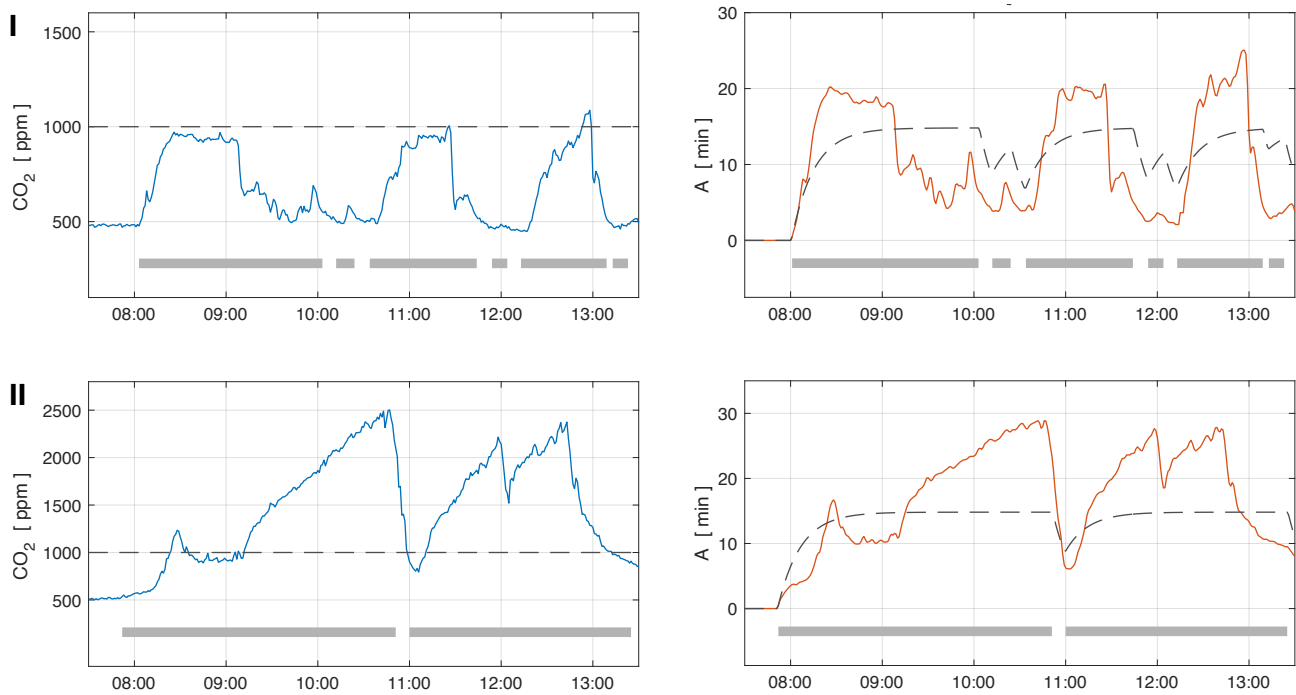


Abb. A9. Ventilator-Fensterlüftung (Fallbeispiele I und II). Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration (blaue Kurven) und der normierten Virusquanta-Konzentration A (orange Kurven). Die gestrichelten Linien zeigen den CO₂-Leitwert von 1000 ppm, bzw. den Verlauf der A-Werte im Referenzklassenzimmer. Die grauen Balken zeigen, zu welchen Zeiten die Klassenzimmer belegt waren. **Fallbeispiel I** (Raumvolumen 220 m³, 3. Klasse, 21 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Die CO₂-Werte bleiben im Wesentlichen unter dem Leitwert von 1000 ppm (gestrichelte Linie). Die A-Werte liegen zeitweise über der Referenzkurve. Eine Absenkung wäre prinzipiell durch eine Erhöhung des Ventilator-Volumenstroms möglich. **Fallbeispiel II** (Raumvolumen 202 m³, 9. Klasse, 30 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Der Ventilator war nicht in Betrieb. Der CO₂-Leitwert wird zeitweise erheblich überschritten, die entsprechenden A-Werte liegen deutlich über der Referenzkurve.

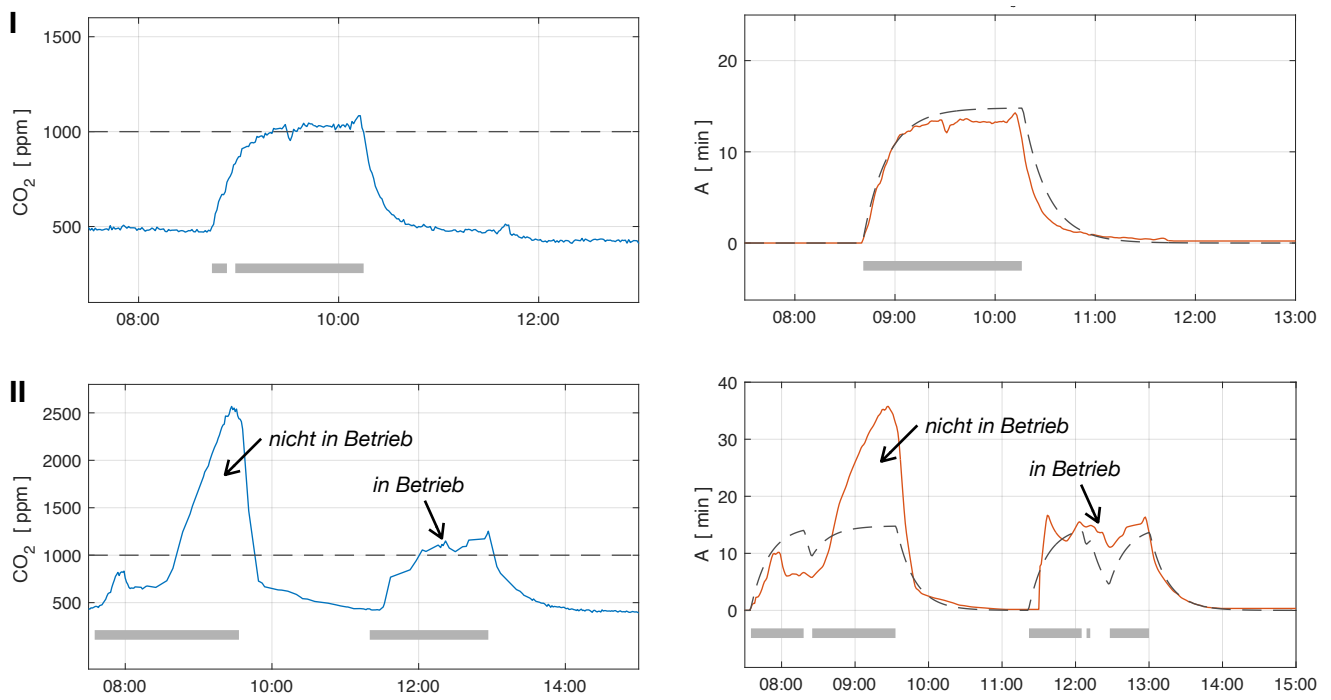


Abb. A10. Dezentrale Raumluftechnik (Fallbeispiele I und II). Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration (blaue Kurven) und der normierten Virusquanta-Konzentration A (orange Kurven). Die gestrichelten Linien zeigen den CO₂-Leitwert von 1000 ppm, bzw. den Verlauf der A-Werte im Referenzklassenzimmer. Die grauen Balken zeigen, zu welchen Zeiten die Klassenzimmer belegt waren. **Fallbeispiel I** (Raumvolumen 187 m³, 7. Klasse, 24 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Die dezentrale Lüftungsanlage war durchgehend in Betrieb. Der CO₂-Leitwert wird relativ gut eingehalten, die entsprechenden A-Werte liegen im Bereich der Referenzkurve. **Fallbeispiel II** (gleiches Klassenzimmer wie bei I an anderem Schultag): Die dezentrale Lüftungsanlage war offensichtlich während der ersten Hälfte des Vormittags nicht in Betrieb. Der CO₂-Leitwert wird während dieser Zeit erheblich überschritten, die entsprechenden A-Werte liegen weit über der Referenzkurve.

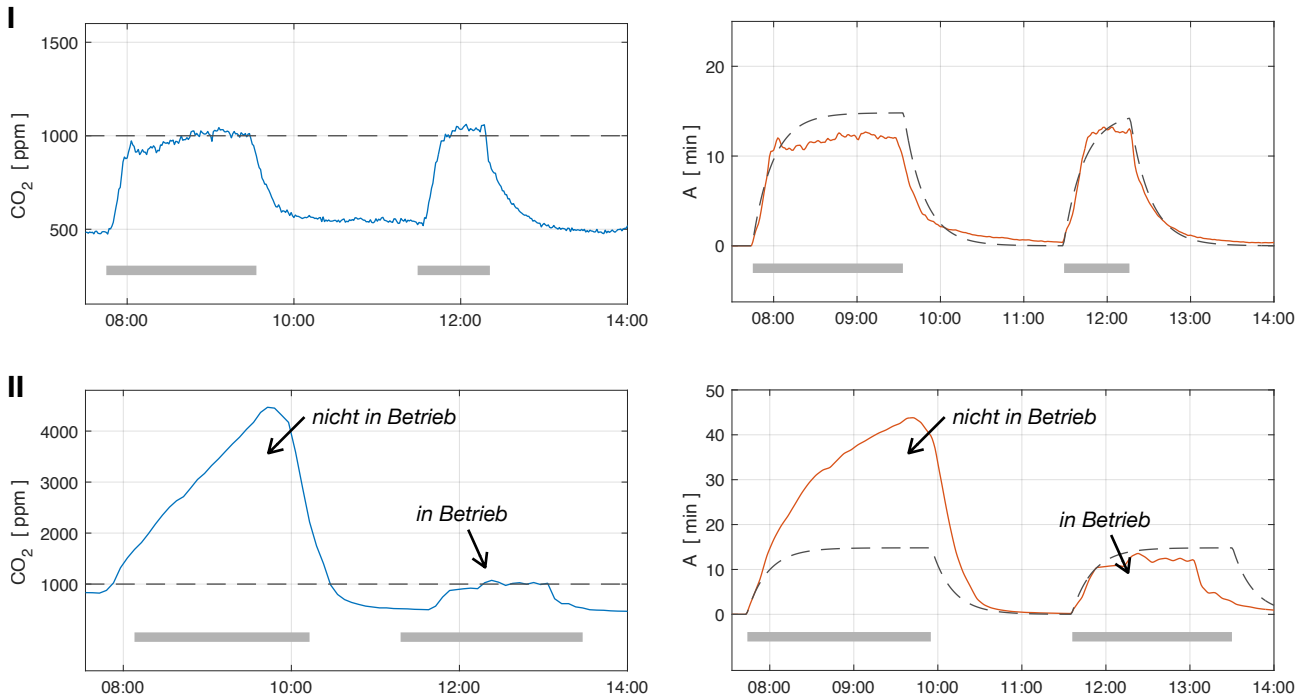


Abb. A1 I. Zentrale Raumluftechnik (Fallbeispiele I und II). Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration (blaue Kurven) und der normierten Virusquanta-Konzentration A (orange Kurven). Die gestrichelten Linien zeigen den CO₂-Leitwert von 1000 ppm, bzw. den Verlauf der A-Werte im Referenzklassenzimmer. Die grauen Balken zeigen, zu welchen Zeiten die Klassenzimmer belegt waren. **Fallbeispiel I** (Raumvolumen 201 m³, 10. Klasse, 27 SchülerInnen + 1 Lehrkraft): Die raumluftechnische Anlage war durchgehend in Betrieb. Der CO₂-Leitwert wird relativ gut eingehalten, die entsprechenden A-Werte liegen im Bereich der Referenzkurve. **Fallbeispiel II** (gleiches Klassenzimmer wie bei I an anderem Schultag): Die raumluftechnische Anlage war offensichtlich während der ersten Hälfte des Vormittags nicht in Betrieb. Der CO₂-Leitwert wird während dieser Zeit erheblich überschritten, die entsprechenden A-Werte liegen weit über der Referenzkurve.

Virusdosismfaktor für Coronaviren

Virusdosismfaktor für Influenza-A-Viren

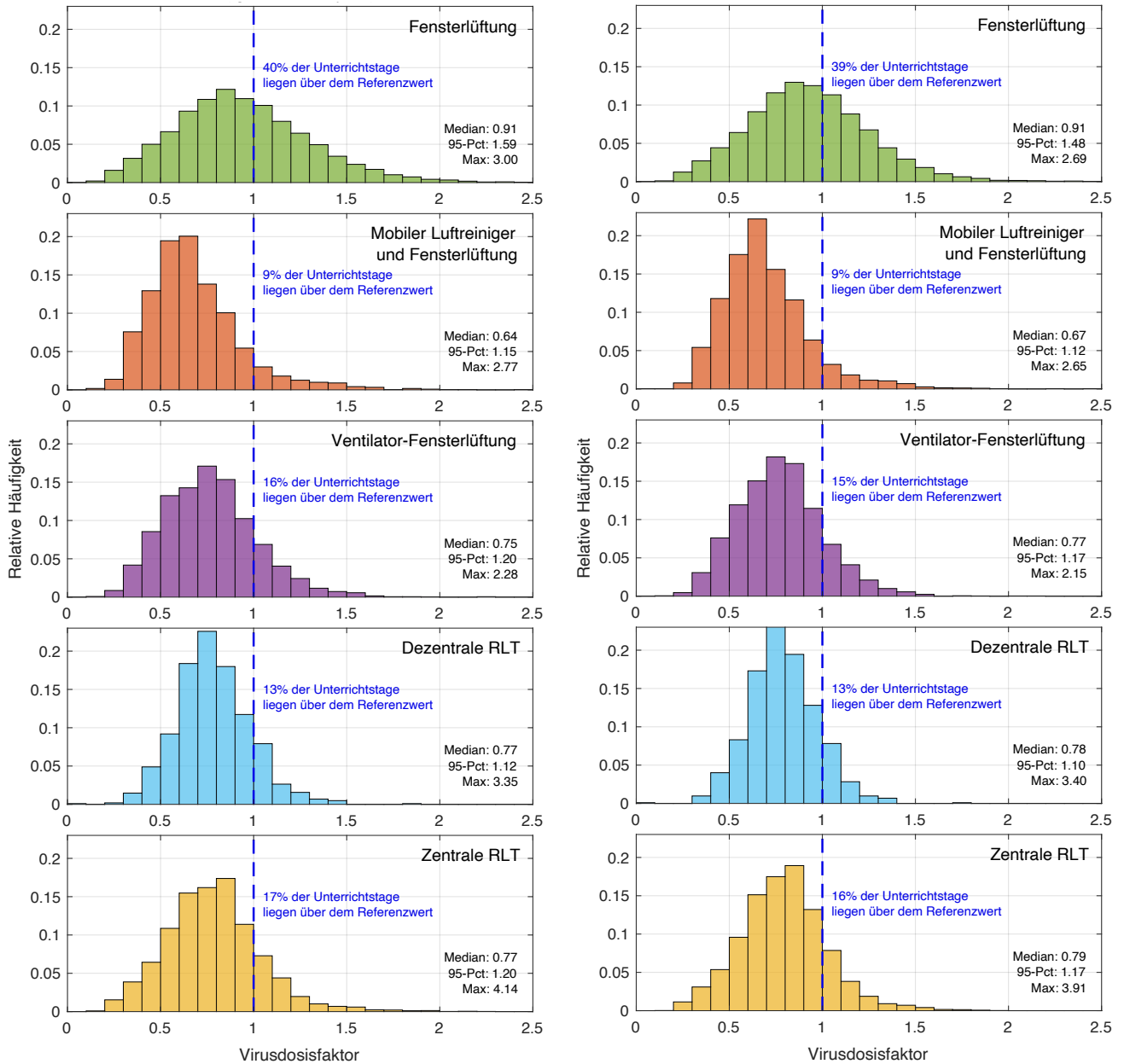


Abb. A12. Vergleich der Histogramme der Virusdosismfaktoren (VDF) für Coronaviren (SARS-CoV-2 / SARS-CoV-1) und Influenza-A-Viren für die untersuchten Lüftungsmethoden. Histogramm-Balkenbreite: 0,1. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Referenzwert (VDF = 1). Die Berechnung des VDF erfolgte auf der Grundlage der charakteristischen Lebensdauer von Coronaviren (SARS-CoV-2 und SARS-CoV-1) bzw. Influenza-A-Viren in Atemaerosolpartikeln.

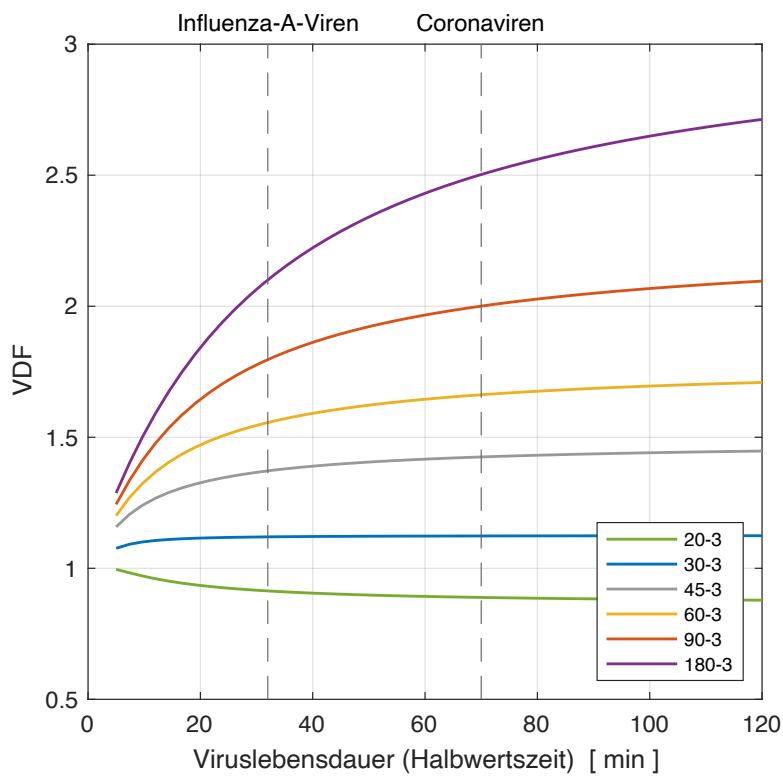
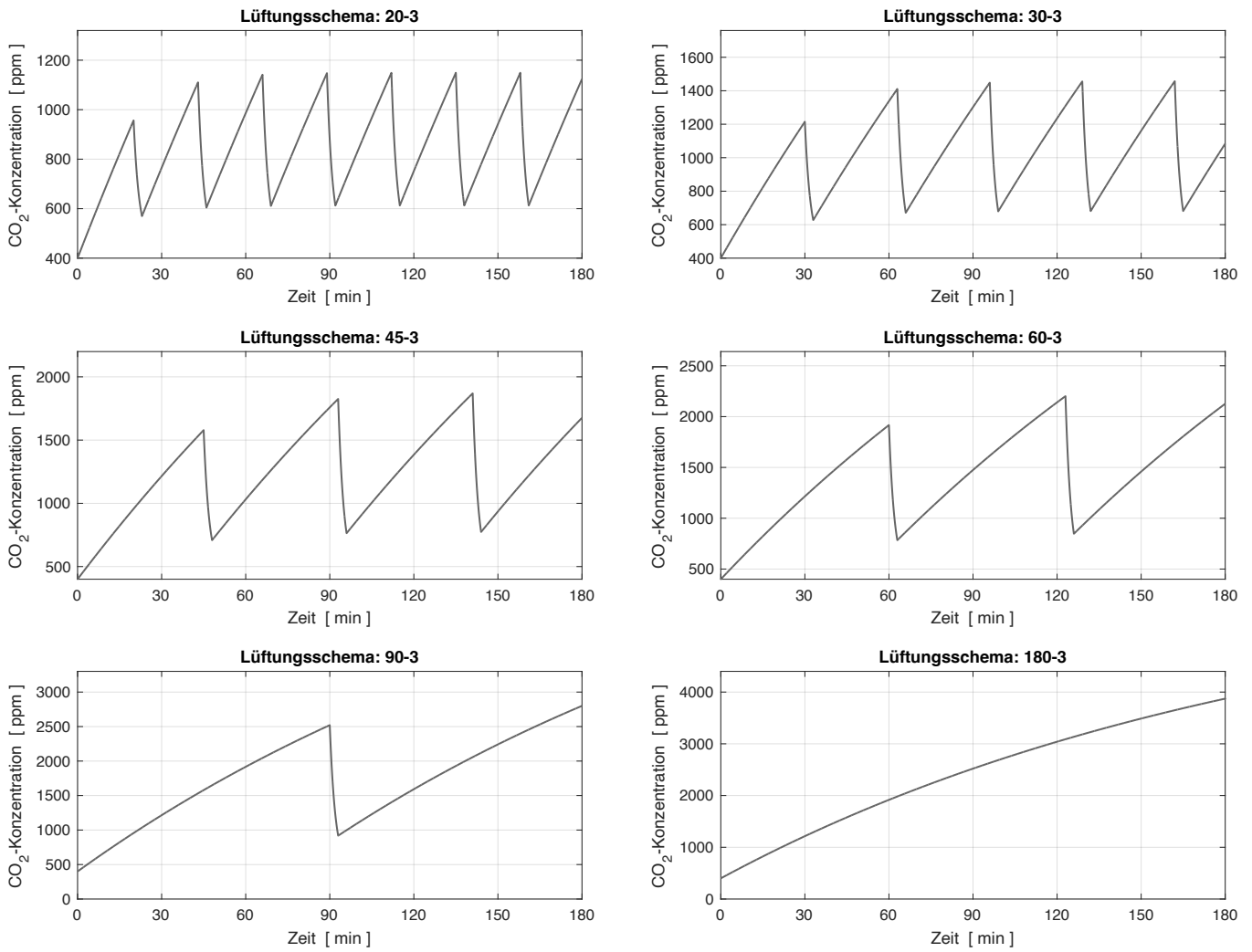


Abb. A13. Abhängigkeit des Virusdosismfaktors von der Viruslebensdauer (Halbwertszeit). Die Berechnung erfolgte mittels einer Computersimulation für verschiedene Lüftungsschemata: Stoßlüften für 3 min alle 20 min, alle 30 min, alle 45 min, alle 60 min, alle 90 min und alle 180 min.

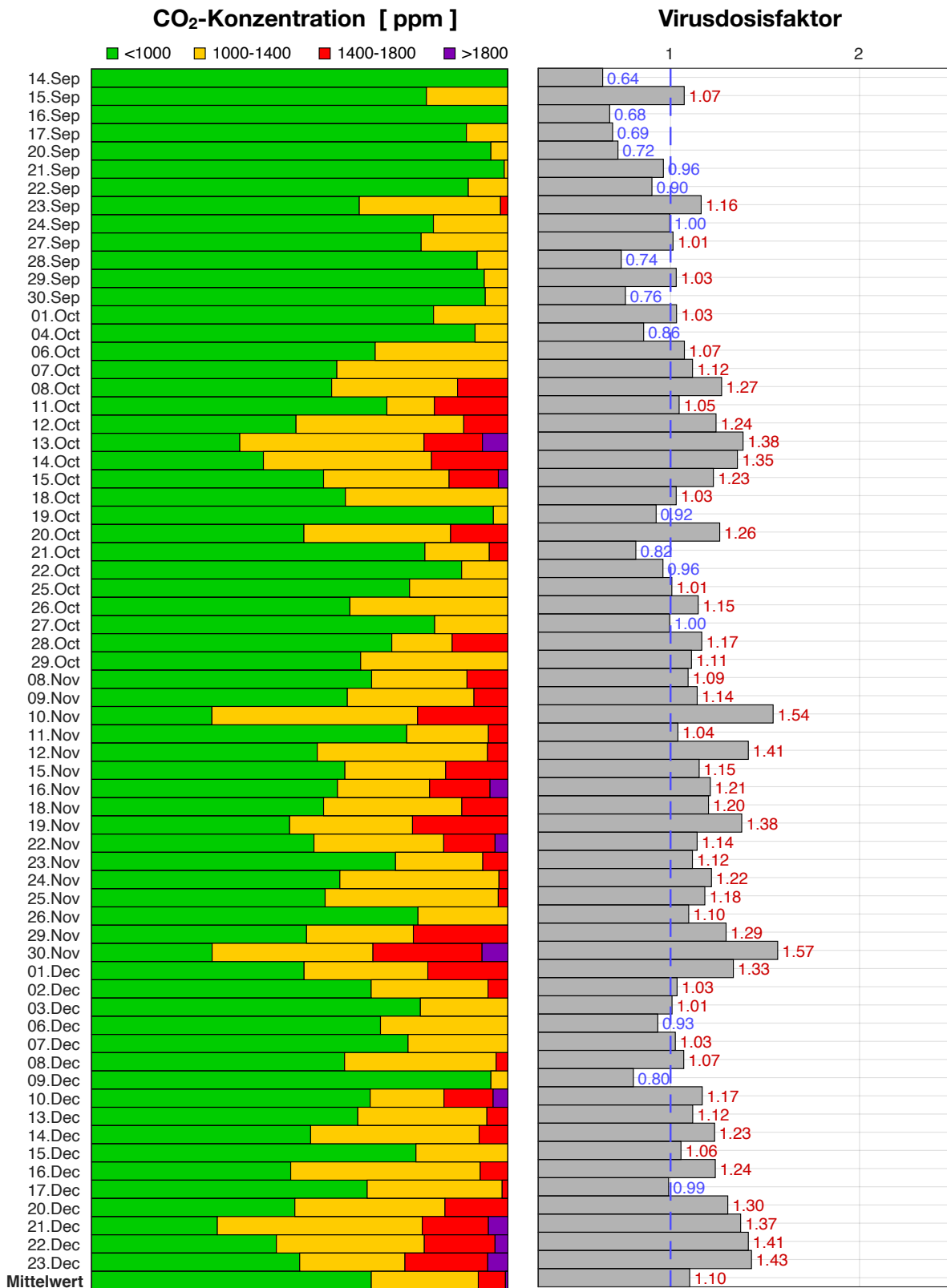


Abb. A14a. Exemplarische Übersichtsgrafik der gemessenen CO₂-Konzentrationen und der daraus berechneten Virusdosisfaktoren für ein Klassenzimmer (K121) mit Fensterlüftung: **I. Tertial: vom Beginn des Schuljahres 2021/22 bis zu den Weihnachtsferien.** Die blau gestrichelte Linie zeigt den Wert für das Referenzklassenzimmer (Virusdosisfaktor = 1). Die Berechnung des Virusdosisfaktors erfolgte auf der Grundlage der charakteristischen Lebensdauer von Coronaviren (SARS-CoV-2 und SARS-CoV-1) in Atemaerosolpartikeln (siehe Abschnitt A2.4).

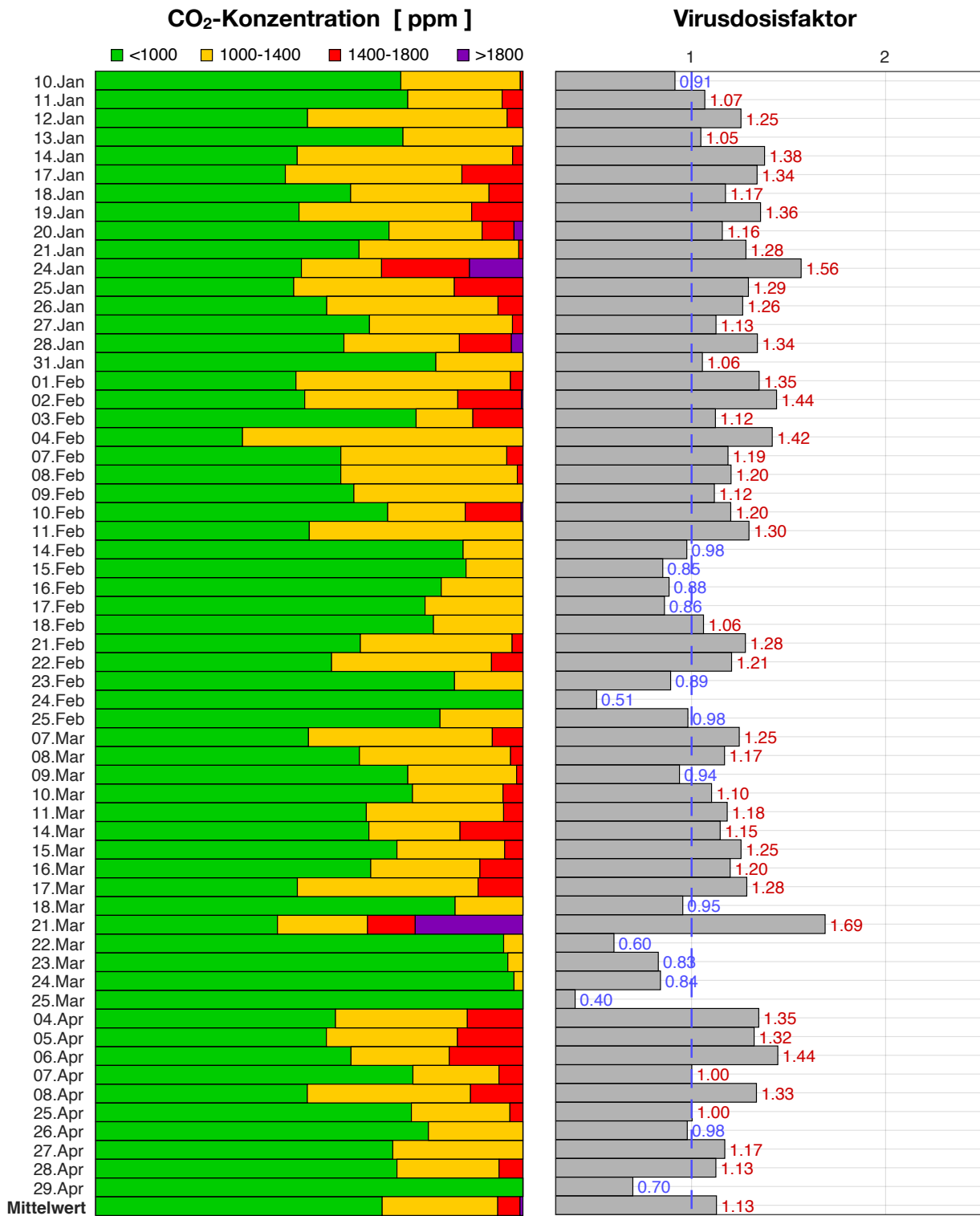


Abb. A14b. Exemplarische Übersichtsgrafik der gemessenen CO₂-Konzentrationen und der daraus berechneten Virusdosisfaktoren für ein Klassenzimmer (K121) mit Fensterlüftung: **2. Tertial: Anfang Januar bis Ende April.**

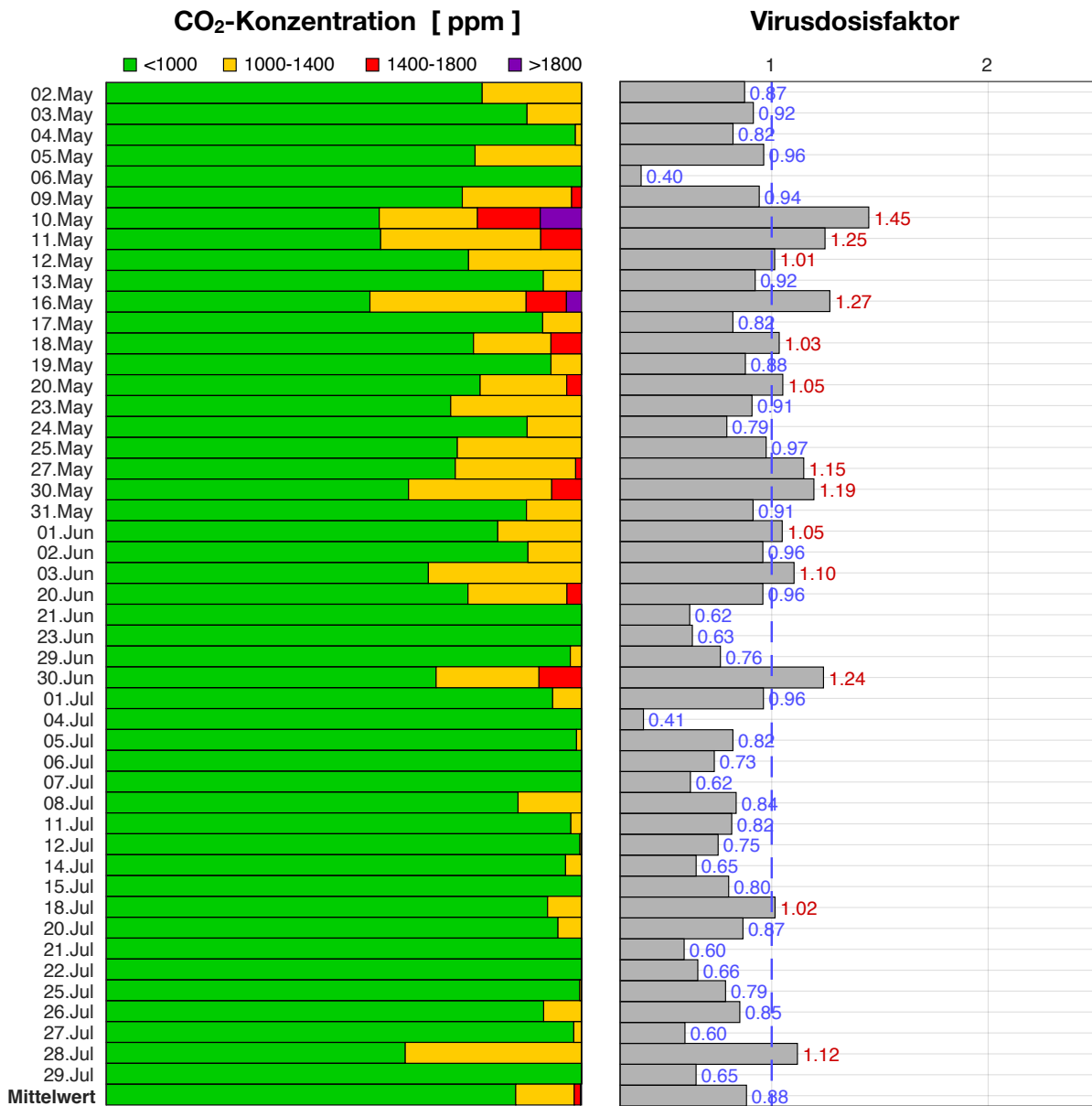


Abb.A14c. Exemplarische Übersichtsgrafik der gemessenen CO₂-Konzentrationen und der daraus berechneten Virusdosisfaktoren für ein Klassenzimmer (K121) mit Fensterlüftung: **3.Tertial:Anfang Mai bis Ende Juli.**

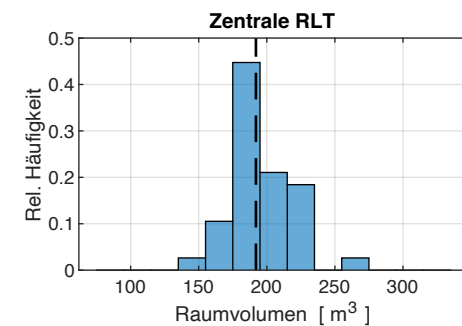
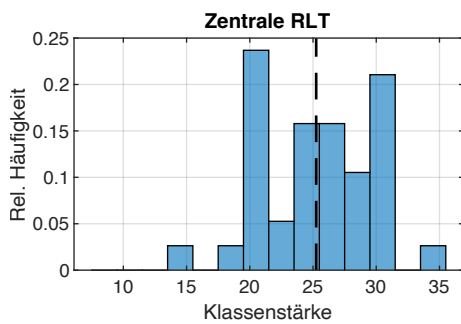
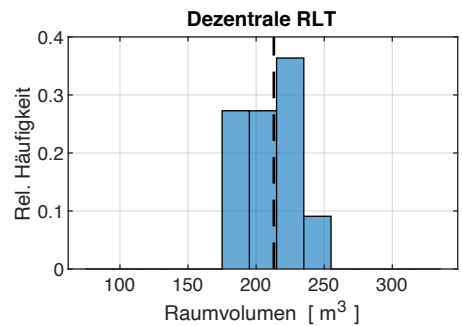
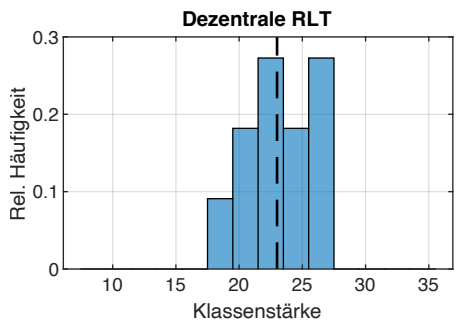
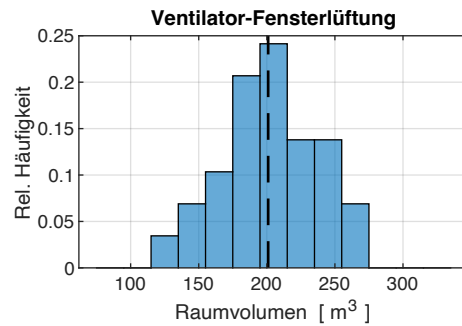
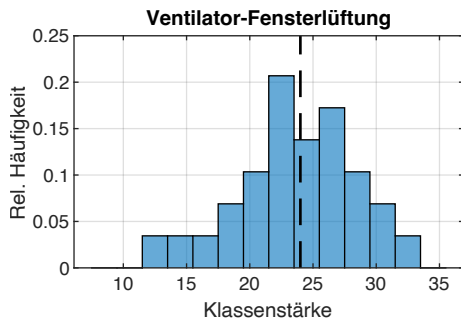
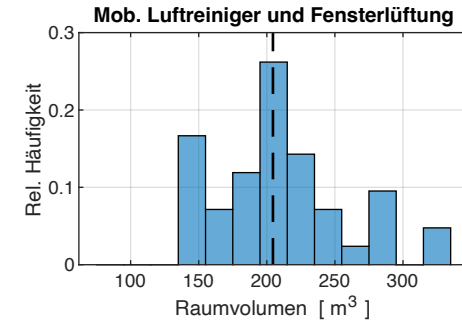
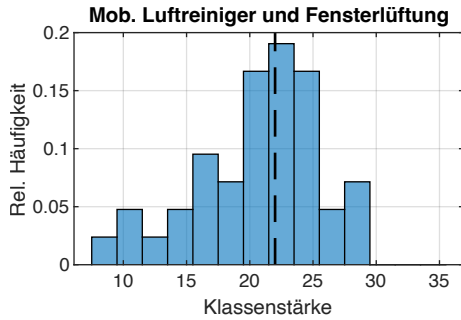
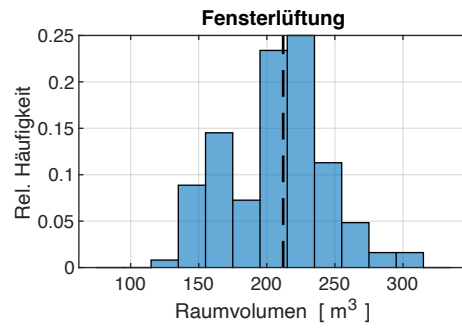
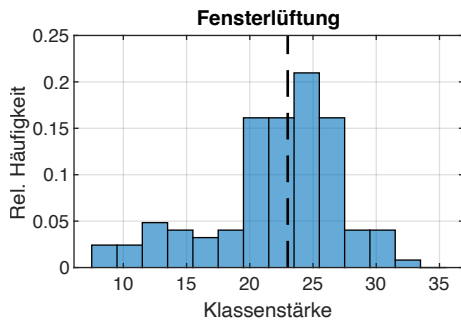


Abb. A15. Verteilung der Raumbelagung (Klassenstärke) und des Raumvolumens für jede der untersuchten Lüftungsmethoden.

Literaturverzeichnis

Birmili et al. (2021): Birmili W, Selinka HC, Moriske HJ, Daniels A, Straff W. Lüftungskonzepte in Schulen zur Prävention einer Übertragung hochinfektiöser Viren (SARS-CoV-2) über Aerosole in der Raumluft. Bundesgesundheitsblatt Gesundheitsforschung Gesundheitsschutz. 2021 Dez;64(12):1570-1580. doi: 10.1007/s00103-021-03452-4.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (2012): Technische Regel für Arbeitsstätten. BAUA ASR A3.6, Ausgabe: Januar 2012. Verfügbar unter: <file:///Users/schwarzbauer/Downloads/ASR-A3-6-2.pdf> (Zugriff am 30.11.2022).

Buonanno et al. (2020): Buonanno G, Stabile L, Morawska L. Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. Environ Int. 2020 Aug;141:105794. doi: 10.1016/j.envint.2020.105794. Epub 2020 May 11. PMID: 32416374; PMCID: PMC7211635.

Cheng et al. (2021): Cheng Y, Ma N, Witt C, Rapp S, Wild PS, Andreae MO, Pöschl U, Su H. Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. Science. 2021 May 20;372(6549):1439–43. doi: 10.1126/science.abg6296. Epub ahead of print. PMID: 34016743; PMCID: PMC8168616.

van Doremalen et al. (2020): van Doremalen N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN, Tamin A, Harcourt JL, Thornburg NJ, Gerber SI, Lloyd-Smith JO, de Wit E, Munster VJ. Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. N Engl J Med. 2020 Apr 16;382(16):1564-1567. doi: 10.1056/NEJMc2004973. Epub 2020 Mar 17. PMID: 32182409; PMCID: PMC7121658.

Edwards et al. (2021): Edwards DA, Ausiello D, Salzman J, Devlin T, Langer R, Beddingfield BJ, Fears AC, Doyle-Meyers LA, Redmann RK, Killeen SZ, Maness NJ, Roy CJ. Exhaled aerosol increases with COVID-19 infection, age, and obesity. Proc Natl Acad Sci U S A. 2021 Feb 23;118(8):e2021830118. doi: 10.1073/pnas.2021830118. Erratum in: Proc Natl Acad Sci U S A. 2021 Jul 6;118(27): PMID: 33563754; PMCID: PMC7923364.

Europäische Norm EN 16798-1:2019: European Standard EN 16798-1: Energy performance of buildings — Ventilation for buildings. Edition: 2019-11-01.

Foitik et al. (2022): Foitik G, Forgo N, Hopfe CJ, Pöschl U, Schmidt AE, Schober B, Siebert U, Wagner M. Empfehlungen und Grundregeln für den Infektionsschutz gegen die Übertragung von SARS-CoV-2/COVID-19 in Schulen. Future Operations Platform 2022. Verfügbar unter: https://futureoperations.at/fileadmin/user_upload/k_future_operations/FOP_GrundregelnSchule_2022_06_01.pdf (Zugriff am 1.12.2022).

Guyot et al (2018): Guyot G., Sherman MH, Walker IS (2018). Smart ventilation energy and indoor air quality performance in residential buildings: A review. Energy and Buildings, 165, 416-430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.12.051>

Harper (1961): Harper GJ. Airborne micro-organisms: survival tests with four viruses. J Hyg (Lond). 1961;59(4):479-486. doi:10.1017/s0022172400039176.

Helleis et al. (2021): Helleis F, Klimach T & Pöschl U (2021). Vergleich von Fensterlüftungssystemen und anderen Lüftungs- bzw. Luftreinigungsansätzen gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5154017>.

Helleis et al. (2022): Helleis F, Klimach T & Pöschl U (2022). Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumlufttechnik und Luftreiniger. Zenodo. 10.5281/zenodo.6049289.

Hopfe et al. (2022): Hopfe CJ, Klimach T, McLeod RS, Pöschl U. Leitfaden zum Gebrauch von CO₂-Sensoren zur Verbesserung von Luftqualität und Infektionsschutz in Innenräumen, 2022, Verfügbar unter: https://futureoperations.at/fileadmin/user_upload/k_future_operations/Leitfaden-CO2-Sensoren_2022-11-02_Final.pdf (Zugriff am 26.12.2022).

Jagnow & Gebhardt (2018): Jagnow K, Gebhardt M. Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule: Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise. Abschlussbericht Teil 7: Lüftung und Erdwärmeübertrager, 2018.

Jones et al. (2021): Jones B, Sharpe P, Iddon C, Hathway EA, Noakes CJ, Fitzgerald S. Modelling uncertainty in the relative risk of exposure to the SARS-CoV-2 virus by airborne aerosol transmission in well mixed indoor air. Build Environ. 2021 Mar 15;191:107617. doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107617. Epub 2021 Jan 19. PMID: 33495667; PMCID: PMC7816614.

Kähler et al. (2020): Kähler CJ, Fuchs T & Hain R (2020). Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? <https://www.unibw.de/lrt7/raumlufreiniger.pdf> (Zugriff am 31.10.2022).

Lelieveld et al. (2020): Lelieveld J, Helleis F, Borrmann S, Cheng Y, Drewnick F, Haug G, Klimach T, Sciare J, Su H, Pöschl U. Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. *Int J Environ Res Public Health*. 2020 Nov 3;17(21):8114. doi: 10.3390/ijerph17218114. PMID: 33153155; PMCID: PMC7662582.

Mateus & da Graça (2015): Mateus NM, da Graça GC. A validated three-node model for displacement ventilation. *Building and Environment*, 84, 50-59 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.10.029>

McLeod et al. (2022): McLeod RS, Hopfe CJ, Bodenschatz E, Moriske HJ, Pöschl U, Salthammer T, Curtius J, Helleis F, Niessner J, Herr C, Klimach T, Seipp M, Steffens T, Witt C, Willich SN. A multi-layered strategy for COVID-19 infection prophylaxis in schools: A review of the evidence for masks, distancing, and ventilation. *Indoor Air*. 2022 Oct;32(10):e13142. doi: 10.1111/ina.13142. PMID: 36305077.

Morawska et al. (2020): Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer S, Floto A, Franchimon F, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Mazzarella L, Melikov AK, Miller S, Milton DK, Nazaroff W, Nielsen PV, Noakes C, Peccia J, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe SI, Tellier R, Tham KW, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environ Int*. 2020 Sep;142:105832. doi: 10.1016/j.envint.2020.105832. Epub 2020 May 27. PMID: 32521345; PMCID: PMC7250761.

Morawska et al. (2021): Morawska L, Allen J, Bahnfleth W, Bluysen PM, Boerstra A, Buonanno G, Cao J, Dancer SJ, Floto A, Franchimon F, Greenhalgh T, Haworth C, Hogeling J, Isaxon C, Jimenez JL, Kurnitski J, Li Y, Loomans M, Marks G, Marr LC, Mazzarella L, Melikov AK, Miller S, Milton DK, Nazaroff W, Nielsen PV, Noakes C, Peccia J, Prather K, Querol X, Sekhar C, Seppänen O, Tanabe SI, Tang JW, Tellier R, Tham KW, Wargocki P, Wierzbicka A, Yao M. A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science*. 2021 May 14;372(6543):689-691. doi: 10.1126/science.abg2025. PMID: 33986171.

Noakes & Sleigh (2009): Noakes CJ & Sleigh PA. Mathematical models for assessing the role of airflow on the risk of airborne infection in hospital wards *J. R. Soc. Interface*, 6S791–S800 (2009). <http://doi.org/10.1098/rsif.2009.0305.focus>

Ott et al. (2006): Ott WR, Steinemann AC, Wallace LA (2006). Exposure analysis. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420012637>

Peper et al. (2007): Peper S, Kah O, Pfluger R, Schnieders J. Passivhausschule Frankfurt Riedberg, Messtechnische Untersuchung und Analyse, 2007)

Persily & de Jonge (2017): Persily A, de Jonge L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air*. 2017 Sep;27(5):868-879. doi: 10.1111/ina.12383. Epub 2017 Apr 27. PMID: 28321932; PMCID: PMC5666301.

Pöschl et al. (2021): Pöschl U, Helleis F, Klimach T, et al. . Wissenschaftliche Stellungnahme und Empfehlung für VentilatorFensterlüften zum Infektionsschutz gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen, 30. September 2021. <https://www.pmicde/5040628/statement-empfehlung-fensterlueften-2021>.

Prather et al. (2020): Prather KA, Wang CC, Schooley RT. Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science*. 2020 Jun 26;368(6498):1422-1424. doi: 10.1126/science.abc6197. Epub 2020 May 27. PMID: 32461212.

Reiß et al. (2017): Reiß J, Illner M, Erhorn H, Roser A, Schakib-Ekbata K, Gruber E, Winkler M, Jensch W. Wissenschaftliche Begleitforschung zum Forschungsvorhaben „Energieeffiziente Schulen“ Abschlussbericht Phase 2 (2017).

Riley et al. (1978): Riley EC, Murphy G, Riley RL. Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *Am J Epidemiol*. 1978 May;107(5):421-32. doi: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112560. PMID: 665658.

Schuit et al. (2020): Schuit M, Gardner S, Wood S, Bower K, Williams G, Freeburger D, Dabisch P. The Influence of Simulated Sunlight on the Inactivation of Influenza Virus in Aerosols. *J Infect Dis*. 2020 Jan 14;221(3):372-378. doi: 10.1093/infdis/jiz582. PMID: 31778532.

Sundell (2004): Sundell, J. On the history of indoor air quality and health. *Indoor air*, 14(s 7), 51-58 (2004). 10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x

Thatcher et al. (2002): Thatcher TL, Lai AC, Moreno-Jackson R, Sextro RG, Nazaroff WW. Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors, *Atmos. Environ.* 36: 1811–1819. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00157-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00157-7)

Umweltbundesamt (2008). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. *Bundesgesundheitsblatt* 2008; 51:1358–69. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/kohlendioxid_2008.pdf (Zugriff am 29.10.2022).

Umweltbundesamt (2016): Innenraumluft. Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft> (Zugriff am 29.10.2022).

Umweltbundesamt. (2020). Richtig Lüften in Schulen. Umweltbundesamt. Text, Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen> (Zugriff an 07.07.2021).

Umweltbundesamt (2021). Lüftung, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen. Umwelt Bundesamt website. September 10, 2021. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an> (Zugriff am 11.11.2011).

Umweltbundesamt (2022): Infektiöse Aerosole in Innenräumen. Umweltbundesamt. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/infektiuese-aerosole-in-innenraeumen> (Zugriff am 29.10.2022).

United States Environmental Protection Agency (2021): Introduction to Indoor Air Quality. Verfügbar unter: <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/introduction-indoor-air-quality> (Zugriff am 29.10.2022).

WHO (2021): Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. World Health Organization. Verfügbar unter: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions> (Zugriff am 07.07.2021).