Vergleich von Fensterlüftungssystemen und anderen Lüftungs- bzw. Luftreinigungsansätzen gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen

Frank Helleis, Thomas Klimach, Ulrich Pöschl
Max-Planck-Institut für Chemie, Hahn-Meitner-Weg 1, 55131 Mainz, Deutschland
Kontakt: frank.helleis@mpic.de, t.klimach@mpic.de

Version 1.0, 6. Juli 2021

Kurzfassung

Diese Studie vergleicht die Wirksamkeit verschiedener Lösungsansätze für infektionsschutzgerechte Lüftung bzw. Luftreinigung zur Eindämmung der COVID-19-Pandemie und zur Erhöhung der Luftqualität in Klassenräumen.

Wir zeigen, dass Fensterlüften ergänzt durch einfache technische Hilfsmittel sehr gut und effizient für die Aufrechterhaltung guter Luftqualität und den Infektionsschutz gegen Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 eingesetzt werden kann - auch im Vergleich zu konventionellen raumlufttechnischen Anlagen sowie zu filter- oder UV-strahlungsbasierten Luftreinigungsgeräten. Besonders wirksam ist eine Verdrängungslüftung (Quelllüftung) mit bodennaher Frischluftzufuhr durch Fenster und verteilter Abluftabsaugung über potentiell infektiösen Personen. Bei geringen Temperaturdifferenzen und geringen Windgeschwindigkeiten, d.h., speziell im Sommer, ist Fensterlüften unterstützt durch Ventilatoren deutlich effektiver als freies Fensterlüften.

In Schulklassen, wo viele Personen auf engem Raum zusammenkommen und Wärme sowie Feuchte abgeben, bringt eine Behandlung der stets nötigen Zuluft zwecks Rückgewinnung von Wärme oder Feuchte nach unseren Ergebnissen weder bezüglich der Primärenergie noch bezüglich der Raumfeuchte wesentliche Vorteile. Eine einfache Zufuhr von Frischluft durch Fenster nach dem Quellluft-Prinzip erscheint deutlich sinnvoller als eine Behandlung der Zuluft mit technischen Komponenten, die hygienische Probleme bereiten können und einen erhöhten Wartungsaufwand verursachen.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass Fensterlüften mit einfachen technischen Hilfsmitteln wie Ventilatoren und Abzugshauben nicht nur kostengünstig und leicht realisierbar ist, sondern auch besonders effektiv in der Luftreinhaltung und gegen die Aerosolübertragung von Infektionskrankheiten wie COVID-19 oder Influenza.

Um zur Eindämmung der aktuellen Pandemie sowie allgemein zur Verbesserung der Luftqualität in Schulklassen beizutragen, empfehlen wir den Einbau und Betrieb solcher Fensterlüftungssysteme in allen Klassenräumen, die nicht bereits mit ähnlich wirksamen Hilfsmitteln ausgestattet sind. Aus unserer Sicht sollte es mit relativ geringem Aufwand und in kurzer Zeit machbar sein, alle Klassenräume mit einem geeigneten Abluftventilator auszustatten. Um die COVID-19-Pandemie möglichst schnell und wirksam einzudämmen, sollte der Abluftventilator nach Möglichkeit mit einer verteilten Abluftabsaugung kombiniert werden. Nach der Pandemie kann die verteilte Absaugung nach Bedarf weiter genutzt werden – z.B. in schlecht lüftbaren Räumen und bei Grippewellen – oder flexibel abgebaut bzw. modifiziert werden, was aufgrund der geringen Kosten und der modularen Bauweise leicht möglich ist. Unabhängig von der verteilten Absaugung bieten ventilatorgestützte Fensterlüftungssysteme mit geringem Aufwand zuverlässige Abhilfe für seit langem bestehende Innraumluftqualitätsprobleme in Schulen.

1. Einleitung

Effizientes Lüften spielt eine wichtige Rolle zur Gewährleistung guter Luftqualität und zur Begrenzung von Infektionsrisiken in Innenräumen (FGK e.V. 2021; Lelieveld et al. 2020; Morawska et al. 2020, 2021; Prather et al. 2020; Umweltbundesamt 2020a; WHO 2021).

Da Raumlufttechnik nur in ca. 10% des Schulbestandes in Deutschland verbaut ist (Umweltbundesamt 2021b), stellt sich die Frage, wie gut verschiedene technische Nachrüstlösungen wie mobile Luftfiltergeräte, UV-C Desinfektionsgeräte oder dezentrale Lüftungsgeräte im Vergleich zur einfachen Fensterlüftung abschneiden.

Entscheidend für das Infektionsrisiko durch Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 ist der zeitliche Verlauf der Konzentration potentiell infektiöser Atemluftaerosolpartikel in der Raumluft. Daraus lässt sich die Dosis potentiell infektiöser Atemluftaerosolpartikel, die von Personen im Raum inhaliert werden, und das damit verbundene Infektionsrisiko ermitteln (siehe Anhang A.1) (Cheng et al. 2021b; Kriegel und Hartmann 2021; Lelieveld et al. 2020; Peng et al. 2021; Pöhlker et al. 2021).

Neben dem Infektionsschutz sind weitere Anforderungen an die Innenraumluftqualität zu beachten, insbesondere eine Begrenzung der CO_2-Konzentration nach den geltenden technischen Regeln für Arbeitsstätten (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2012; Umweltbundesamt 2008a). Zudem kann die CO_2-Konzentration als Indikator für das Infektionsrisiko dienen (Peng und Jimenez 2021). Daher vergleichen wir verschiedene Lüftungs- bzw. Luftreinigungsansätze hinsichtlich Infektionsschutz und CO_2-Konzentrationsverlauf anhand etablierter Rechenmethoden und Szenarien für Schulklassen. Darüber hinaus gehen wir auch auf relevante Wärme- und Feuchtebilanzen ein.

2. Methoden

Unserer Vergleichsstudie zugrunde liegt ein etabliertes Schulklassen-Szenario aus der Studie von Müller et al.(Müller et al. 2020) mit 25 Personen in einem typischen Klassenraum mit 200 m³ Raumvolumen (ca. 7 m x 9 m x 3,2 m, B x L x H) und einer längsseitigen Fensterfront aus sechs Drehflügelfenstern (0,95 m x 1,5 m) und je vier kippbaren Ober und Unterlichtern (1,5 m x 0,6 m; B x H). Pro Person wird ein durchschnittliches Atemvolumen von 0,54 m³/h angenommen, was einer sitzenden Tätigkeit entspricht (Müller et al. 2020; Shimer et al. 1995). Der CO_2-Gehalt der Ausatemluft beträgt etwa 4,0 % (40.000 ppm) (Klinke und Silbernagl 2001). Die Gleichungen und Methoden zur Berechnung der CO_2-Konzentration sowie der Dosis potentiell infektiöser Atemluftaerosolpartikel, die von Personen im Raum inhaliert werden, sind in Anhang A.1 beschrieben.

Wir betrachten einen Schultag bestehend aus 3 Doppelstunden (je 2 x 45 min getrennt durch eine kleine Pause von 5 Minuten) und zwei großen Pausen (15 min), in denen der Raum von allen Personen verlassen wird (Beginn 8:00 Uhr, Gesamtdauer 5 h 15 min). Je nach Lüftungsmethode werden die großen Pausen und nach Bedarf auch die kleinen Pausen oder zusätzliche Lüftungspausen von jeweils 5 Minuten zum Stoßlüften genutzt. Angaben zur Wirksamkeit des Stoßlüftens sowie zur Durchmischung der Klassenraumluft sind in Anhang A.2 beschreiben.

Tabelle 1 bietet einen Überblick der in dieser Studie betrachteten Lüftungsmethoden und der damit verbundenen Kenngrößen (Anhänge A.2 und A.3). Den Begriff Lüftungsmethoden verwenden wir hier sowohl für Luftaustausch- als auch für Luftreinigungsansätze. Gleichungen und Methoden zur Berechnung von Wärme- und Feuchtigkeitsflüssen sowie damit verbundenen Parametern sind in den Anhänge A.4 und A.5 beschrieben.

Die untersuchten Lüftungsmethoden können wie folgt in vier Gruppen eingeteilt werden:

Freies Fensterlüften: (a) Stoßlüften nach jeder Schulstunde, d.h., in allen regulären Pausen; (b) Stoßlüften nach UBA-Empfehlung, d.h., in allen regulären Pausen und zusätzlich für 5 Minuten nach 20 min Unterricht (Umweltbundesamt 2020b, 2020c); (c) Stoßlüften nach CO_2-Monitor immer wenn die CO_2-Konzentration auf den Leitwert von 1000 ppm ansteigt; (d) Dauerlüften über Kippfenster mit Volumenströmen und Luftwechselraten basierend auf Literaturdaten und eigenen Messungen (Tab. 1; Anhang A.3, (British Standards Institution und British Standards Institution 1991; Erhart et al. 2015; Helleis und Klimach 2021). Für ungünstige Bedingungen empfiehlt auch das UBA, die Anzahl bzw. Dauer der Lüftungspausen zu erhöhen oder einen CO2-Monitor zu nutzen (Umweltbundesamt 2020b, 2020c). In diesem Fall würde die UBA-Empfehlung zu Ergebnissen ähnlich der Lüftung nach CO2-Monitor führen.

Ventilatorgestützte Fensterlüftungssysteme (FLS): (a) FLS mit einfachem Abluftventilator in Deckennähe; (b) FLS mit verteilter Abluftabsaugung entwickelt am Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC, (Helleis und Klimach 2021; Klimach und Helleis 2021)). In beiden FLS erfolgt die Zufuhr von Frischluft in Bodennähe (Quellluftprinzip) durch ein geöffnetes Fenster, das nach Bedarf mit einem Vorhang oder Vorbau abgedeckt wird. Die Abluft wird mit Hilfe eines Ventilators durch ein anderes Fenster nach außen geleitet, mit Volumenströmen angelehnt an kommerziell erhältliche Ventilatoren (Tab. 1, Anhänge A.3 und A.6, Abbildungen A3 bis A6).

Lüftungsgeräte: (a) Verdünnungs- bzw. Mischlüftung angelehnt an Müller et al.(Müller et al. 2020) und an marktübliche maschinelle Lüftungsanlagen; (b) Verdrängungs- bzw. Quelllüftung kombiniert mit Raumluftfilterung angelehnt an ein kommerziell erhältliches Lüftungssystem (Tab. 1, Anhang A.3).

Luftreinigungsgeräte: (a) Filter-Luftreiniger angelehnt an marktübliche Luftfiltergeräte, deren Reinigungswirkung wissenschaftlich untersucht wurde (Curtius et al. 2021; Kähler et al. 2020); (b) UV-C-Luftreiniger angelehnt an kommerziell erhältliche Geräte zur Desinfektion mit UV-C-Strahlung. Da diese Umluftgeräte keine Frischluft zuführen, sondern die Raumluft umwälzen und reinigen, ist bei ihrem Einsatz zusätzliches Lüften erforderlich (Umweltbundesamt 2021b), um auch auf CO_2 bezogen gute Luftqualität zu erreichen (Tab. 1, Anhang A.3).

Für jede Lüftungsmethode simulieren wir jeweils einen günstigen und einen ungünstigen Fall, um den erwartbaren Ergebnisbereich im praktischen Einsatz abzudecken. Dabei variieren wir die Luftwechselrate beim Stoßlüften wegen der variablen Eigenschaften von Fensterfronten (Anzahl, Größe, Position der Fenster) und Umweltbedingungen (Temperaturdifferenz, Wind); den wirksamen Volumenstrom bei Lüftungs- und Luftreinigungsgeräten wegen der Einflüsse von Aufstellort, den Raumgegebenheiten und Geräteeigenheiten; den Quellluftteffekt wegen variabler Temperatur- und

Konzentrationsgradienten; und den Direktabsaugungs- bzw. Haubeneffekt wegen variabler Auftriebsvolumenströme und Durchmischungseffekte (Tab. 1, Anhang A.2).

Selbstverständlich können die Lüftungsbedingungen in realen Klassenräumen noch günstiger oder ungünstiger ausfallen, als in unseren Szenarien angenommen (unterschiedliche Anzahl oder Atmungsaktivität der Personen; größere oder geringere Luftwechselraten beim Stoßlüften; stärkere oder schwächere Durchmischung der Raumluft; größere oder geringere Quellluft- und Haubeneffekte). Wir gehen aber davon aus, dass die von uns gewählten Parameterkombinationen für günstige und ungünstige Bedingungen einen großen Teil der in Klassenräumen real vorliegenden bzw. erwartbaren Bedingungen abdecken.

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Kohlendioxid

Kohlendioxid dient allgemein als Marker für die Luftqualität in Innenräumen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2012; Umweltbundesamt 2008a), und kann auch als Indikator für das COVID-19-Infektionsrisiko verwendet werden (Morawska et al. 2021; Peng und Jimenez 2021). Die CO_2-Konzentration zeigt an, wie stark belastet die Raumluft mit bereits veratmeter Luft und darin enthaltenen Stoffen wie z.B. Atemluftaerosolpartikeln ist. In frischer Außenluft liegt die CO_2-Konzentration bei etwa 410 ppm (Müller et al. 2020; NOAA 2021; Umweltbundesamt 2021a), und die Zunahme in Klassenräumen ist normalerweise hauptsächlich auf die Atmung der darin befindlichen Personen zurückzuführen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2012; Umweltbundesamt 2008a).

Abbildung 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO_2-Konzentration in dem betrachteten Klassenraum während eines Schultags über drei Doppelstunden für verschiedene Lüftungsmethoden, wobei in Abb. 1a jeweils günstige Bedingungen und in Abb. 1b jeweils ungünstige Bedingungen angenommen werden (Tab. 1, Anhang A.2). Die entsprechenden Maximalwerte der CO_2-Konzentration sind in Abbildung 2 zusammengefasst.

Abbildung 3 zeigt eine Klassifizierung der Luftqualität nach Zeitanteilen verschiedener CO_2-Konzentrationsbereiche in dem betrachteten Klassenraum gemäß Einteilung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2008b): unbedenklich (<1000 ppm, grün), auffällig (1000-2000 ppm, gelb) und inakzeptabel (>2000 ppm, rot). Die Farbschattierungen (hell/dunkel) bezieht sich auf weitere gebräuchliche Kategorien für Raumluftqualität: hoch (<800 ppm), mittel (800-1000 ppm), mäßig (1000-1400 ppm) und niedrig (>1400 ppm) (DIN EN 13779 2007). Die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit früheren experimentellen Untersuchungen zum Lüften in Klassenzimmern (Fromme et al. 2008; Grams et al. 2003; Schibuola et al. 2016; Umweltbundesamt 2008b).

Der CO_2-Leitwert von 1000 ppm (Pettenkofer-Zahl; (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2012; Umweltbundesamt 2008b; von Pettenkofer 1858)) wird nur bei Lüftungsmethoden mit ausreichend starker kontinuierlicher Frischluftzufuhr durchgehend eingehalten sowie bei häufigem Stoßlüften mit CO2-Monitor.

Ventilatorgestützte Fensterlüftungssysteme: Das am MPIC entwickelte FLS mit verteilter Absaugung und bodennaher Frischluftzufuhr bleibt durch Ausnutzung von Quellluftteffekt

und Direktabsaugung (Haubeneffekt) trotz eines vergleichsweise geringen Luftdurchsatzes (Tab. 1) deutlich unter dem Leitwert von 1000 ppm und bietet so auch Reserven für Klassen, die dichter besetzt oder stärker aktiv sind und mehr Atemluft verbrauchen. Je nach Stärke der Quellluft- und Haubeneffekte liegen die erwartbaren CO_2-Konzentrationen bei rund 600-700 ppm (Abb. 2). Auch das Fensterlüftungssystem mit einem einfachen Abluftventilator erzielt sehr gute Ergebnisse mit CO_2-Konzentrationen bei rund 700-900 ppm je nach Stärke des Quellluftefekts (Abb. 2). Dementsprechend halten beide Methoden bereits ohne Stoßlüften auch unter ungünstigen Bedingungen die Luftqualität durchgehend im grünen Bereich (Abb. 3).

Freies Fensterlüften: Stoßlüften nach Maßgabe eines CO_2-Messgerätes (CO_2-Monitor) kann die CO_2-Konzentration auch unter dem Leitwert halten, erfordert aber speziell bei geringen Temperaturdifferenzen und Windstärken ein häufiges Öffnen der Fenster (mehr als 10 Mal pro Doppelstunde, Abb. 1b). Dauerlüften mit gekippten Fenstern kann die CO_2-Konzentration bei günstigen Bedingungen ebenfalls unter dem Leitwert halten (rund 700 ppm) und liegt selbst bei ungünstigen Bedingungen nicht allzu weit darüber (rund 1300 ppm, Abb. 2), sofern die Fenster gut an den Raum angepasst und zum Dauerlüften geeignet sind (Anhang A.3). Beim Stoßlüften nach UBA-Empfehlung, d.h., während der großen und kleinen Pausen und zusätzlich für je fünf Minuten nach 20 Minuten Unterricht, liegen die maximalen CO_2-Konzentrationen hingegen deutlich über dem Leitwert (rund 1400-2400 ppm). Wenn nur in den Pausen nach jeder Schulstunde stoßgelüftet wird, liegen die maximalen CO_2-Konzentrationen noch höher (rund 2400-3400 ppm). Abbildung 3 zeigt die starke Abhängigkeit der freien Fensterlüftung von den äußeren Bedingungen und damit verbundenen Luftwechselraten (Anhang A.2). So bleibt die CO_2-Konzentration beim Stoßlüften nach UBA-Empfehlung unter günstigen Bedingungen meist in der Nähe des Leitwerts und steigt kaum auf 1400 ppm (Abb. 1), während sie unter ungünstigen Bedingungen zu mehr als 70% der Zeit über 1400 ppm liegt (Abb. 3).

Lüftungsgeräte: Bei maschineller Mischlüftung bleibt die CO_2-Konzentration auch ohne Fensterlüften und in Übereinstimmung mit Müller et al.(Müller et al. 2020) in der Nähe des Leitwerts (rund 1000-1100 ppm, Abb.2). Das Lüftungssystem mit kombinierter Quelllüftung und Raumluftfilterung liegt jedoch deutlich darüber (rund 1200-1600 ppm). Die Wirksamkeit dieser Art von Raumlufttechnik hängt ab von der Anordnung der Zuluft- und Abluftöffnungen, von der Durchmischung des Raumes, und ggf. von der Luftwechselrate bei ergänzendem Stoßlüften in den Pausen (Anhang A.3). Dementsprechend bleibt die Luftqualität bei der maschinellen Mischlüftung durchgehend im grünen Bereich, wohingegen das Lüftungssystem mit kombinierter Quelllüftung und Raumluftfilterung unter ungünstigen Bedingungen zu mehr als 65% der Zeit über 1400 ppm liegt (Abb. 3).

Luftreinigungsgeräte: Die Umluftgeräte können zwar Atemluftaerosolpartikel entfernen (Filter) bzw. desinfizieren (UV-C), bewirken aber keine Frischluftzufuhr. Daher hängt die Luftqualität in Bezug auf CO_2 von der damit kombinierten Fensterlüftung ab. Unter günstigen Bedingungen bei Stoßlüften nach UBA-Empfehlung mit hohen Luftwechselraten (Anhang A.2) bleibt die CO_2-Konzentration meist in der Nähe des Leitwerts und steigt kaum auf 1400 ppm (Abb. 1). Unter ungünstigen Bedingungen mit Stoßlüften nur in den Pausen nach jeder Schulstunde und mit mäßigen Luftwechselraten (Anhang A.2) steigt die CO_2-Konzentration jedoch auf über 3400 ppm (Abb. 1 und 2), und bleibt zu mehr als 60% der Zeit im roten Bereich über 2000 ppm (Abb. 3).

In Überstimmung mit experimentellen Untersuchungen (Fromme et al. 2008; Grams et al. 2003; Schibuola et al. 2016; Umweltbundesamt 2008b) verdeutlichen Abbildungen 1 bis 3, dass der seit über 150 Jahren empfohlene Leitwert von 1000 ppm CO_2 für die Luftqualität in Klassenräumen nur mit kontinuierlicher Frischluftzufuhr oder mit häufigem Stoßlüften dauerhaft einzuhalten ist. In dieser Hinsicht bieten die ventilatorgestützten Fensterlüftungssysteme mit geringem Aufwand zuverlässige Abhilfe für seit langem bestehende Innenraumluftqualitätsproblem in Schulen (Neumann 2011; Umweltbundesamt 2008b; von Pettenkofer 1858)

Die betrachteten marktüblichen Lüftungsgeräte sind weniger effizient, aber das konventionelle Mischlüftungsgerät kann die CO_2-Konzentration zumindest in der Nähe des Leitwertes halten (< 1200 ppm). Bei Verwendung von Filter- und UV-C-Luftreiniger kann die CO_2-Konzentration unter ungünstigen Bedingungen jedoch für einen Großteil der Unterrichtszeit auf inakzeptabel hohe Werte ansteigen (>2000 ppm) – selbst wenn die Umluft-Geräte mit Stoßlüften nach jeder Schulstunde kombiniert werden.

3.2 Atemluftaerosolpartikel

Das Infektionsrisiko durch Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen steigt mit der Konzentration bzw. mit der Dosis potentiell infektiöser Atemluftaerosolpartikel, die von Personen im Raum inhaliert werden (Cheng et al. 2021a; Kriegel und Hartmann 2021; Lelieveld et al. 2020; Peng et al. 2021; Pöhlker et al. 2021; Umweltbundesamt 2021c).

Abbildung 4 zeigt die zeitliche Zunahme der Dosis an Atemluftaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedene Lüftungsmethoden zum Einsatz kommen, wobei in Abb. 1a jeweils günstige Bedingungen und in Abb. 1b jeweils ungünstige Bedingungen angenommen werden (Tab. 1, Anhang A.2). Die Ergebnisse sind normiert auf ein Referenz-Gesamtdosis (Endwert) von 100% für die maschinelle Mischlüftung nach Müller et al. (Müller u. a. 2020) unter günstigen Bedingungen. In Abbildung 5 sind die Endpunkte der Kurven aus Abbildung 4 zusammengefasst. Diese entsprechen der relativen Dosis insgesamt inhalierter Atemluftaerosolpartikel bzw. dem relativen Risiko einer SARS-CoV-2-Infektion durch Aerosolübertragung unter virus-limitierten Bedingungen (Cheng et al. 2021b; Lelieveld et al. 2020). Je nach Lüftungsmethode und Bedingungen variiert die relative Gesamtdosis von rund 30% bis 280% (Tab. 2).

Die in Abbildung 6 dargestellten Verbesserungsfaktoren beziehen sich auf die am wenigsten wirksame der betrachteten Lüftungsmethoden, das Stoßlüften in den Pausen nach jeder Schulstunde unter ungünstigen Bedingungen. Sie zeigen, dass die inhalierte Dosis bzw. das relative Infektionsrisiko durch Einsatz besserer Lüftungsmethoden um Faktoren bis zu etwa 9 gesenkt bzw. um bis zu etwa 90% reduziert werden kann (Tab. 2). Bezogen auf eine Situation, in der noch weniger gelüftet wird (z.B. nur in den großen Pausen zwischen den Doppelstunden) oder wenn die Umgebungsbedingungen noch ungünstiger sind (z.B. bei besonders geringen Temperaturdifferenzen und Windstärken), wären die Verbesserungsfaktoren noch größer (bis zu Faktor ~11; Tab. 1 und 2).

Ventilatorgestützte Fensterlüftungssysteme: Durch Nutzung von Quellluftеffekten und Haubeneffekten hält das MPIC-FLS mit verteilter Absaugung und bodennaher Frischluftzufuhr die inhalierte Dosis an Atemluftaerosolpartikeln deutlich niedriger als die anderen Lüftungsmethoden, obwohl der nominelle Luftdurchsatz nicht besonders hoch ist (Tab. A.1). Je nach Stärke der Quellluft- und Haubeneffekte liegt die inhalierte Dosis bei

rund 30-60% im Vergleich zur maschinellen Mischlüftung (Abb. 5). Auch das Fensterlüftungssystem mit einem einfachen Abluftventilator erzielt sehr gute Ergebnisse mit einer relativen Dosis von rund 55-90% je nach Stärke des Quellluftteffekts (Abb. 5). Die Verbesserungsfaktoren der beiden Fensterlüftungssysteme gegenüber Stoßlüften nach jeder Schulstunde liegen zwischen 3 und 9 (Abb. 6). Selbst unter ungünstigen Bedingungen schneidet das MPIC-FLS mit verteilter Absaugung ähnlich gut ab wie die wirksamsten anderen Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (Abb. 5 und 6).

Freies Fensterlüften: Stoßlüften mit CO_2-Monitor kann die relative Dosis ähnlich aber nicht ganz so gering halten wie das FLS mit einem einfachen Ventilator (rund 65-95%, Abb. 5, Tab. 2), erfordert aber speziell bei geringen Temperaturdifferenzen und Windstärken ein häufiges Öffnen der Fenster (mehr als 10 Mal pro Doppelstunde, Abb. 1b). Dauerlüften mit gekippten Fenstern kann die relative Dosis bei günstigen Bedingungen ebenfalls unter dem Referenzwert der maschinellen Mischlüftung halten (rund 75%), steigt bei ungünstigen Bedingungen aber auf höhere Werte (rund 140%, Abb. 5, Tab. 2). Beim Stoßlüften nach UBA-Empfehlung, liegt die inhalierte Dosis praktisch gleichauf mit dem Referenzwert (rund 100%), steigt bei ungünstigen Bedingungen aber auf deutlich höhere Werte (rund 220%, Abb. 5, Tab. 2). Die Verbesserungsfaktoren der genannten Fensterlüftungsvarianten gegenüber dem Stoßlüften nur nach jeder Schulstunde liegen je nach Umgebungsbedingungen zwischen etwa 1,3 und 4,5 (Abb. 6).

Lüftungsgeräte: Bei maschineller Mischlüftung (Referenzwert 100%) kann die relative Dosis unter ungünstigen Bedingungen etwas ansteigen (auf etwa 120%), was durch Kurschlussströme bedingt ist. Das Lüftungssystem mit kombinierter Quelllüftung und Raumluftfilterung kann die relative Dosis unter günstigen Bedingungen deutlich geringer halten und liegt dann auf einem ähnlichen Niveau wie das Stoßlüften mit CO_2-Monitor (rund 65%). Unter ungünstigen Bedingungen steigt die relative Dosis jedoch stärker an und nähert sich dem Niveau der maschinellen Mischlüftung (rund 110%; Abb. 5, Tab. 2), was durch die Abhängigkeit von der Anordnung der Zuluft- und Abluftöffnungen, von der Durchmischung des Raumes, und ggf. von der Luftwechselrate bei ergänzendem Stoßlüften in den Pausen bedingt ist (Anhang A.3). Die Verbesserungsfaktoren der Lüftungsgeräte gegenüber dem Stoßlüften nach jeder Schulstunde liegen zwischen 2 und 4 (Abb. 6).

Luftreinigungsgeräte: Der Filter-Luftreiniger kombiniert mit Stoßlüften kann die relative Dosis ähnlich geringhalten wie das FLS mit einem einfachen Ventilator (rund 55-90%), wofür das FLS jedoch ohne Stoßlüften auskommt. Der UV-C-Luftreiniger kombiniert mit Stoßlüften schneidet mit einer relativen Dosis von rund 65-120% deutlich schlechter ab, was auf den deutlich geringeren Volumenstrom des Geräts im Vergleich zum Luftfiltergerät zurückzuführen ist (Tab. 1, Anhang A.2). Dabei ist zu beachten, dass auch für den Filter-Luftreiniger geringere Flussraten einstellbar sind und empfohlen werden, um die Geräuschbelastung und den Energieverbrauch zu reduzieren (Curtius et al. 2021; Kähler et al. 2020; Steffens und Seipp 2021a); Anhang A.3). Die Verbesserungsfaktoren der Luftreinigungsgeräte kombiniert mit Stoßlüften gegenüber dem einfachen Stoßlüften nach jeder Schulstunde ohne Geräte liegen bei 3 bis 5 (Abb. 6). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Verbesserungsfaktoren unter günstigen Bedingungen etwa zur Hälfte auf das ohnehin erforderliche Stoßlüften zurückzuführen sind. Als Umluftgeräte wirken die Luftreiniger nicht besonders gut mit dem Stoßlüften zusammen, da während und nach jedem Stoßlüften die Raumluft weitgehend frei von Atemluftaerosolen ist und die Luftreiniger in dieser Zeit kaum Wirkung erzielen können.

Insgesamt zeigen Abbildungen 4 bis 6, dass das MPIC-FLS mit verteilter Abluftabsaugung den anderen betrachteten Lüftungsmethoden zum Zweck des Infektionsschutzes gegen Aerosolübertragung von COVID-19 deutlich überlegen ist, obwohl es im Vergleich zu den marktüblichen Raumlufttechnik-Geräten mit wesentlich geringerem Aufwand und geringeren Kosten installiert und betrieben werden kann. Selbst das noch weniger aufwändige FLS mit einem einfachen Abluftventilator schneidet im Vergleich zu den betrachteten marktüblichen Lüftungsgeräten und Luftreinigungsgeräten ähnlich gut oder besser ab.

Die besonders hohe Wirksamkeit des MPIC-FLS beruht auf dem Prinzip der Verdrängungslüftung (Quelllüftung) mit bodennaher Frischluftzufuhr durch Fenster in Kombination mit verteilter Abluftabsaugung über potentiell infektiösen Personen (Direktabsaugungs- bzw. Haubeneffekt). Selbst bei konservativen Annahmen zur Wirksamkeit dieser Effekte (Tab. 1, Anhang A.2, (Helleis und Klimach 2021; Klimach und Helleis 2021) kann das MPIC-FLS die inhalierte Dosis an Atemluftaerosolpartikeln und das damit verbundene Infektionsrisiko geringer halten als die andere Lüftungsmethoden. Die geringere Wirksamkeit des FLS mit einfachem Abluftventilator beruht darauf, dass in diesem Fall nur der Quellluftеffekt ohne Direktabsaugungseffekt zum Tragen kommt.

Freies Fensterlüften kann unter günstigen Bedingungen auch sehr wirksam sein, insbesondere wenn es sich um Dauerlüften durch geeignete Kippfenster handelt oder mit Unterstützung eines CO_2-Monitors erfolgt. Unter ungünstigen Bedingungen, speziell bei sommerlich geringen Temperaturdifferenzen und geringen Windgeschwindigkeiten, ist das freie Fensterlüften jedoch wesentlich weniger effektiv als die ventilatorgestützten Fensterlüftungssysteme. In ungünstigen Fällen kann das Stoßlüften nur in den Pausen nach jeder Schulstunde sowie das Stoßlüften nach UBA-Empfehlungen im Klassenraum zu sehr hohen Belastungen mit potentiell infektiösen Atemluftaerosolpartikeln führen – um bis zu einen Faktor 9 höher als bei Verwendung des MPIC-FLS.

Der Vergleich zeigt, dass Fensterlüften mit einfachen technischen Hilfsmitteln wie Ventilatoren und Abzugshauben nicht nur kostengünstig und leicht realisierbar ist (Anhang A.3), sondern auch besonders effektiv in der Luftreinhaltung und gegen die Aerosolübertragung von Infektionskrankheiten wie COVID-19 oder Influenza (Pöhlker et al. 2021; Cheng et al. 2021).

3.3 Wärme und Feuchte

Oft werden Vorteile zentraler Raumlufttechnik bzw. dezentraler Lüftungsgeräte gegenüber freier Lüftung genannt (Burgholz 2019; DGUV 2016; FGK e.V. 2021; Rief und Jurecic 2014). Insbesondere Anlagen bzw. Geräte mit Wärmerückgewinnung und aktiver Befeuchtung bzw. passiver Feuchterückgewinnung werden sowohl für die Ausstattung von Neubauten als auch für die Nachrüstung in Bestandsbauten als Stand der Technik propagiert (FGK e.V. 2004; Tecalor GmbH 2021; Viessmann Climate Solutions SE 2021; WOLF GMBH 2017; WOLF GmbH 2021). Im Zusammenhang mit COVID-19 wird mitunter auch dem Parameter relative Luftfeuchte ein hoher Stellenwert für die Reduktion von Infektionsrisiken durch Inaktivierung und Sedimentation von Aerosolpartikeln zugeschrieben (Božič und Kanduč 2021; FGK e.V. 2020; Moriyama et al. 2020). Unsere Ergebnisse zeigen, dass die genannten Argumente auch jenseits der Eindämmung der COVID-19-Pandemie für Klassenräume kaum relevant sind (Helleis 2021).

3.3.1. Wärmerückgewinnung

Zur Beurteilung der Notwendigkeit und des Nutzens von Wärmerückgewinnung (WRG) wurden in einer ergänzenden Studie (Helleis 2021) die Wärmebilanzen eines realen Klassenraums (Altbau IGS Bretzenheim), eines Großraumbüros und einer Zwei-Zimmer-Wohnung mit anteiligen Verkehrswegen unter Berücksichtigung realer Wetterdaten detailliert mit Stundenwerten und gegebenen bzw. gemessenen Parametern berechnet (Anhang A.4).

Nach unseren Ergebnissen (Abb. A1), lassen sich durch Nachrüstung von Raumlufttechnik (RLT) mit Wärmerückgewinnung (80%) im Kompaktbau ca. 13% Primärenergie gegenüber dem Bestand sparen. Die Hochrechnung auf eine reale Schule (kein Kompaktbau) ergibt ein Einsparungspotential von ca. 8%. Im Vergleich dazu lassen sich durch die Fassadensanierung bis zu 70% Primärenergie einsparen, mit Quelllüftung sogar 80%. Der Betrieb von WRG im Neubau bzw. zusätzlich zu energetischer Fassadensanierung ist demnach auch ökologisch nicht zielführend, da der Verbrauch an elektrischer Energie für den Betrieb der RLT die Einsparungen an Heizenergie durch WRG überkompensiert (Helleis 2021).

Die Gründe dafür liegen am geringen Nutzungsgrad von Schulgebäuden (über 80% Leerstand), dominanten Transmissionsverlusten, ausreichendem Feuchteschutz durch Infiltration und der zeitlichen Korrelation von Personen-, Sonnen- und Beleuchtungsgewinnen mit den Lüftungsverlusten (Anhang A.4) (Helleis 2021).

Berücksichtigt man zudem Investitionskosten und jährliche Wartungskosten, so erscheint aus unserer Sicht weder wirtschaftlicher Betrieb noch Amortisation innerhalb der Lebensdauer möglich. Um ökologische, ökonomische und hygienische Vorteile zu erzielen, sollten vorzugsweise energetische Fassadensanierung mit preiswerter lokaler CO_2- und temperaturgeführter Ablufttechnik und Quelllüftungseinlässen kombiniert werden.

3.3.2 Feuchterückgewinnung und aktive Befeuchtung

Relative Luftfeuchten gelten im Bereich zwischen ca. 30% und 70% als behaglich, und selbst geringere Werte zwischen 20% und 30% werden als „noch behaglich“ eingestuft (DGUV 2016). Nach (DIN EN 15251 2007) sind raumlufttechnische Anlagen für Kat 2 Räume bei einer operativen Temperatur von 20°C auf eine Befeuchtungsschwelle von 25% relativer Luftfeuchte auszulegen. Nach einer ausführlichen Literaturrecherche des BAUA (Bux und von Hahn 2020) ist keine eindeutige Korrelation zwischen dem Einsatz von Raumlufttechnik und dem Auftreten typischer Trockenheitssymptome feststellbar. Experimentelle Untersuchungen (Zeidler et al. 1999) zeigen, dass Mischlüftung durch den höheren Turbulenzgrad und die höheren Strömungsgeschwindigkeiten zu signifikant höheren Verdunstungsraten führt als Quelllüftung und damit Austrocknungserscheinungen an Haut und Augen befördert.

Zur Beurteilung der Notwendigkeit von Feuchterückgewinnung bzw. aktiver Raumluftbefeuchtung zur Vermeidung der Austrocknung von Schleimhäuten der Atemwege wurde in einer ergänzenden Studie (Helleis 2021) die Feuchtebilanz eines realen Klassenraums (Altbau IGS Bretzenheim) unter Berücksichtigung realer Wetterdaten detailliert mit Tageswerten und gegebenen bzw. gemessenen Parametern berechnet (Anhang A.5).

Berücksichtigt man nur die Tage, an denen die Raumluftfeuchte unterhalb der jeweiligen Auslegungsfeuchte lag, läge der Beitrag von RLT bei Kat 2 Räumen bei lediglich 1.7% der aufzubringenden Gesamtbefeuchtungsleistung, selbst in Komfortbereichen würde er 3.3%

nicht überschreiten. Dieser geringe Anteil kann auch durch die Schleimhäute gesunder Personen im Klassenraum aufgebracht werden.

Durch passive Membrantauscher erreichbare Feuchterückgewinnung (z.B. Vitovent 200-P) können je nach zusätzlicher Stoßlüftungsaktivität lediglich 50-75% des 2.9%igen Personenanteils im Raum gehalten werden (Abb. A2, Anhang A.5). Daher erscheint der mögliche Nutzen von Feuchterückgewinnung oder aktiver Befeuchtung in Klassenräumen als marginal, insbesondere im Vergleich zu den Herausforderungen der COVID-19-Pandemie. Größere Beiträge zur Erhöhung der Behaglichkeit sind durch Investitionen in Quelllüftung, Abschattung, Kühlung oder Entfeuchtung zu erwarten (Helleis 2021).

3.3.3 Inaktivierung und Sedimentation infektiöser Aerosolpartikel

Laut Moriyama et al. (Moriyama et al. 2020) soll eine optimale Raumluftfeuchte von 40-50% die Lebensdauer von SARS CoV im Aerosol deutlich reduzieren. Nach van Doremalen et al.(van Doremalen et al. 2020) beträgt die gemessene Lebensdauer in diesem Feuchtebereich rund 1.7 h. Die mittlere Verweilzeit der Atemluftaerosolpartikel im Klassenraum beträgt aber bei der als Referenz genutzten Mischlüftungsmethode nur 0.2 h und ist bei wirksameren Lüftungsmethoden noch kürzer - etwa 0,1 h für FLS mit verteilter Abluftabsaugung. Durch wirksame Lüftung werden infektiöse Aerosolpartikel also rund zehnmal schneller aus der Raumluft entfernt als durch Inaktivierung entsprechend ihrer Lebensdauer, die nur eine untergeordnete Rolle spielt. Darüber hinaus sind nach (DIN EN 15251 2007, S. 152) für Kat 2 Räume raumlufttechnische Anlagen auf eine Befeuchtungsschwelle von 25% Luftfeuchte auszulegen und liegen damit weit unterhalb des optimalen Feuchtebereichs, so dass durch den Betrieb solcher Anlagen in Schulen keine nennenswerten Inaktivierungseffekte zu erwarten sind.

Laut FGK e.V. (Božič und Kanduč 2021; FGK e.V. 2020) soll eine optimale Raumluftfeuchte von 40-50% die Verweilzeit von Aerosolpartikeln in der Schwebe wesentlich verkürzen, weil die Partikel nicht ganz austrocknen, größer und schwerer bleiben, und dadurch schneller sedimentieren. Messungen des Deliqueszenzverhaltens und des hygroskopischen Wachstums von Aerosolpartikeln aus Atemwegsflüssigkeit zeigen jedoch, dass die Partikel bei 40% Luftfeuchte bereits weitgehend trocken sind und dass ihre Größe mit Luftfeuchten zwischen 40% und 60% nur wenig zunimmt (Mikhailov und Vlasenko 2020; Pöhlker et al. 2021). Nach (Asadi et al. 2019) weist die Anzahl-Größenverteilung der unter diesen Bedingungen ausgetrockneten Atemluftpartikel ein Maximum bei ca. 1 µm auf. Die entsprechende Sedimentationsgeschwindigkeit beträgt ca. 30 µm/s, sodass Partikel aus der Nasenhöhe einer sitzenden Person ca. 8 h benötigen würden, um den Boden zu erreichen. Im realen Klassenraum von uns gemessene Sedimentationszeiten im Mikrometergrößenbereich betragen ca. 2.5 h (Helleis 2021). Durch wirksame Lüftung werden infektiöse Aerosolpartikel also rund zehnmal schneller aus der Raumluft entfernt als durch Sedimentation, die nur eine untergeordnete Rolle spielt. Da normgerecht parametrierte raumlufttechnische Anlagen erst weit unterhalb von 40% Luftfeuchte mit aktiver Befeuchtung beginnen (s.o., (DIN EN 15251 2007, S. 152)), sind durch den Betrieb solcher Anlagen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Sedimentation infektiöser Atemluftaerosolpartikel zu erwarten.

3.3.4 Hygienerisiken durch Zuluftbehandlung

Ein sicherer, hygienischer und zur Infektionsabwehr optimierter Betrieb RLT-Anlagen mit Zuluftbehandlung ist nach Einschätzung seitens Experten und Kommission Innenraum-Lufthygiene am Umweltbundesamt (Umweltbundesamt 2020a) nicht ohne weiteres gegeben. Dies führt auch zu häufigen Novellen der vom VDI als Stand der Technik propagierten Regelwerke. Einen Eindruck davon kann man beim Studium der in der Branche geführten Diskussionen zur Einführung von VDI 6022 bekommen. So werden Probleme im Zuluftbereich nicht nur im Bestand, sondern auch in der Umsetzung der Richtlinie bei Neuinstallationen diskutiert (FGK e.V. 2003).

Vor potentiellen Investitionsentscheidungen zugunsten zuluftbehandelnder Raumlufttechnik in Klassenräumen sollte berücksichtigt werden, dass

- die Anforderungen der Richtlinie in der Praxis letztlich durch die planenden, installierenden und wartenden Fachfirmen eigenverantwortlich umgesetzt werden,
- die Verantwortung für sachgerechten Betrieb nach der Erstinspektion auf den Betreiber übergeht,
- ein Betrieb ohne speziell ausgebildetes Fachpersonal bzw. Wartungsverträge in der Praxis kaum möglich ist,
- für Bestandsanlagen selbst bei ständiger Überarbeitung der Normen Bestandschutz besteht,
- eine hygienische Überprüfung nur alle zwei bis drei Jahre erforderlich ist,
- zeitnaher Handlungsbedarf erst durch schwere Befindlichkeitsstörungen der Nutzer angezeigt wird,
- bei öffentlichen Ausschreibungen der günstigste konform erscheinende Dienstleister den Zuschlag bekommt.

4. Schlussfolgerungen

Nach unseren Ergebnissen ist Fensterlüften ergänzt durch einfache technische Hilfsmittel sehr gut und effizient für die Aufrechterhaltung guter Luftqualität und den Infektionsschutz gegen Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 geeignet.

Besonders wirksam sind Fensterlüftungssysteme mit bodennaher Frischluftzufuhr (Quelllüftung) und verteilter Abluftabsaugung über potentiell infektiösen Personen.
Das MPIC-FLS ist den anderen betrachteten Lüftungsmethoden sowohl im Infektionsschutz gegen Aerosolübertragung von COVID-19 als auch in der Aufrechterhaltung hoher Luftqualität im Klassenraum deutlich überlegen, obwohl es im Vergleich zu marktüblichen Raumlufttechnik-Geräten mit wesentlich geringerem Aufwand und geringeren Kosten installiert und betrieben werden kann. Auch das FLS mit einfachem Abluftventilator ohne verteilte Absaugung schneidet in Sachen Infektionsschutz und Raumluftqualität gleich gut oder besser ab als die anderen Lüftungsmethoden und ist um ein Vielfaches kostengünstiger als die aufwändigeren raumlufttechnischen Geräte.

Bezüglich marktüblicher Luftreiniger ist darauf hinzuweisen, dass sich Reinigungseffekte von mehr als 99% nicht auf die Aerosolkonzentration im Raum, sondern nur auf das Konzentrationsverhältnis zwischen eingezogener und austretender Luft bezieht. Da die Personen im Klassenraum jedoch kontinuierliche Quellen potentiell infektiöser Atemluftaerosole darstellen, die tatsächliche Wirksamkeit bezogen auf den Klassenraum wesentlich geringer. Im Vergleich zum Stoßlüften, welches für die Aufrechterhaltung guter Luftqualität im Klassenraum ohnehin unerlässlich ist, verringert sich die inhalierte Dosis potentiell infektiöser Atemluftaerosolen und das damit verbundene Infektionsrisiko lediglich um etwa 30-60% (Abb. 5, Tab. 2).

Bei allen Lösungsansätzen, die weiterhin der Unterstützung durch Stoßlüftung bedürfen (z.B. Luftfilter- und UV-C-Desinfektionsgeräte), ist davon auszugehen, dass die Behaglichkeit gegenüber Dauerlüftung (z.B. RLT, FLS, Kippfenster) nicht zunimmt, sondern eher abnimmt. Nachhaltige Nutzungsmöglichkeiten nach der Pandemie sind für die Umluftgeräte im Vergleich zu Lüftungssystemen mit Frischluftzufuhr sehr begrenzt.

Nach unseren Ergebnissen lohnt sich die Nachrüstung von Raumlufttechnik mit Wärmerückgewinnung in Bestandschulen weder ökologisch noch ökonomisch. Wegen des hohen Leerstandes (~80%) beträgt der Anteil der Lüftungsverluste an den gesamten Energieverlusten nur ca. 10%. Durch energetische Fassadensanierung sind bei vergleichbaren Investitionskosten und ohne zusätzliche Wartungs- und Energiekosten bis zu etwa sieben Mal höhere Primärenergieeinsparungen zu erwarten.

Nach unseren Erkenntnissen lohnt sich auch die Nachrüstung von Raumlufttechnik mit Feuchterückgewinnung oder aktiver Befeuchtung (RLT parametriert nach EN 15251 Kat 2) nicht zur Verbesserung der Behaglichkeit und des Infektionsschutzes. Aufgrund fundamentaler Eigenschaften von Atemwegsaerosolen ergibt sich bezüglich der Sedimentation bzw. Inaktivierung von Pathogenen keine nennenswerte Wirkung.

Bei allen Lüftungsmaßnahmen mit Zuluftbehandlung (z.B. RLT mit Zuluftführung, Wärmerückgewinnung, Befeuchtung) ist zu beachten, dass ein störungsfreier und hygienischer Betrieb nach den einschlägigen Normen (VDI 6022) nur durch regelmäßige und kompetente Wartung sicherzustellen ist. Da nach diversen Analysen der Nutzen derartiger RLT in Schulen unverhältnismäßig gering ist, sollten die verbleibenden Hygienerisiken und die ökonomischen Faktoren zur Kontraindikation ausreichen.

Fensterlüftungssysteme wie das MPIC-FLS können unter Ausnutzung von Quellluft- und Direktabsaugungseffekten die Atemluftaerosolbelastung und das Infektionsrisiko in einem Ausmaß verringern (Abb. 6), das mit konventioneller Mischlüftung nur unter hohem Aufwand erreichbar wäre. Bei besonders hohen Ansprüchen an die Raumluftqualität z.B. während einer Pandemie, kann mit Hauben über den Arbeitsplätzen eine erhebliche zusätzliche Reduktion des Infektionsrisikos erzielt werden. Im Unterschied zu Raumlufttechnik mit Zuluftbehandlung entstehen dadurch praktisch keine zusätzlichen Hygienerisiken.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass Fensterlüften mit einfachen technischen Hilfsmitteln wie Ventilatoren und Abzugshauben nicht nur kostengünstig und leicht realisierbar ist, sondern auch besonders effektiv in der Luftreinhaltung und gegen die Aerosolübertragung von Infektionskrankheiten wie COVID-19 oder Influenza.

Um zur Eindämmung der aktuellen Pandemie sowie allgemein zur Verbesserung der Luftqualität in Schulklassen beizutragen, empfehlen wir den Einbau und Betrieb solcher Fensterlüftungssysteme in allen Klassenräumen, die nicht bereits mit ähnlich wirksamen Hilfsmitteln ausgestattet sind. Aus unserer Sicht sollte es mit relativ geringem Aufwand und in kurzer Zeit machbar sein, alle Klassenräume mit einem geeigneten Abluftventilator auszustatten. Um die COVID-19-Pandemie möglichst schnell und wirksam einzudämmen, sollte der Abluftventilator nach Möglichkeit mit einer verteilten Abluftabsaugung kombiniert werden.

Nach der Pandemie kann die verteilte Absaugung nach Bedarf weiter genutzt werden – z.B. in schlecht lüftbaren Räumen und bei Grippewellen – oder flexibel abgebaut bzw. modifiziert werden, was aufgrund der geringen Kosten und der modularen Bauweise leicht möglich ist. Unabhängig von der verteilten Absaugung bieten ventilatorgestützte Fensterlüftungssysteme mit geringem Aufwand zuverlässige Abhilfe für seit langem bestehende Innraumluftqualitätsprobleme in Schulen.

Nach Bedarf und Gelegenheit könnten die Fensterlüftungssysteme auch mit anderen Methoden kombiniert werden, beispielsweise mit Stoßlüften nach UBA-Empfehlung oder mit verteilten Luftreinigern. Um zu prüfen, ob dadurch ein substantieller Mehrwert entsteht, stellen wir auch das Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung, welches für die Vergleichsstudie entwickelt und genutzt wurde ((Klimach 2021); https://bit.ly/3xfmz). Damit können verschiedene Kombinationen der Lüftungsmethoden und Variationen der Kenngrößen untersucht und verglichen werden.

Beiträge und Danksagungen

F. Helleis initiierte das Projekt am Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC) und an der Integrierten Gesamtschule (IGS) Bretzenheim im Austausch mit U. Rack, D. Lebershausen und R. Wollowski.

F. Helleis, T. Klimach und F. Köllner entwickelten das Fensterlüftungssystem und bauten mit U. Rack den Prototypen mit verteilter Absaugung (MPIC-FLS). F. Helleis und T. Klimach führten die weitere Entwicklung und die experimentelle Validierung mit Unterstützung zahlreicher Kolleginnen und Kollegen im Umfeld des MPIC durch (F. Köllner, F. J. Schneider, G. Haug, S. Borrmann, J. Lelieveld, U. Pöschl et al.).

Der Einbau des MPIC-FLS in mehr als 450 Klassenzimmern an Schulen in der Stadt Mainz erfolgte mit Unterstützung der IGS Bretzenheim und der Gebäudewirtschaft Mainz (O. Fuchs, A. Hoppe, P. Schickle, G. Korte et al.) unter Beteiligung zahlreicher Eltern und Schulvertreter, Koordination durch E. Klimach, und Dienstleistungen von Schepp Verpackungen und K4 Messebauer (R. Schepp, J. Schäfer et al).

Anregende Diskussionen zu verschiedenen Lüftungsmethoden erfolgten im Austausch mit G. Paulus (Friedrich-Schiller-Universität Jena), C. Hopfe, R. McLeod (TU Graz), M. Linder (Energiemanagement Frankfurt), H.-J. Moriske, W. Birmili (UBA), J. Curtius (Goethe-Universität Frankfurt), D. Müller (RWTH Aachen), C. Kaup (HOWATHERM, Hochschule Trier), und M. Kriegel (HRI und TU Berlin).

Die vorliegende Vergleichsstudie wurde erstellt von F. Helleis, T. Klimach und U. Pöschl mit Unterstützung weiterer Kolleginnen und Kollegen am MPIC (S. Benner, T. Raber, C. Pöhlker, M. Pöhlker, Y. Cheng, H. Su et al.). T. Klimach und F. Helleis führten die Berechnungen durch und erstellten die Abbildungen. F. Helleis, T. Klimach und U. Pöschl diskutierten die Ergebnisse und erstellten das Manuskript.

Referenzen

Albers, K.-J., Recknagel, H., & Sprenger, E. (Hrsg.). (2020). *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte* (80. Auflage.). Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH.

Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*, *9*(1), 2348. https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z

Božič, A., & Kanduč, M. (2021). Relative humidity in droplet and airborne transmission of disease. *Journal of Biological Physics*, *47*(1), 1–29. https://doi.org/10.1007/s10867-020-09562-5

British Standards Institution & British Standards Institution. (1991). *Ventilation principles and designing for natural ventilation*. London: British Standards Institution.

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

Burgholz, T. (2019, November 14). *Wärme, Luft und Akustik in Unterrichtsräumen – Ergebnisse einer Feldstudie in Nordrhein-Westfalen*. 6. Kongress ZUKUNFTSRAUM SCHULE. Zugegriffen: 18. Mai 2021

Bux, K., & von Hahn, N. (2020). „Trockene Luft“ - Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit. https://doi.org/10.21934/BAUA:BERICHT20200624

Cheng, Y., Ma, N., Witt, C., Rapp, S., Wild, P., Andreae, M. O., et al. (2021a). High efficacy of face masks explained by characteristic regimes of airborne SARS-CoV-2 virus abundance. *medRxiv*, 2020.09.10.20190348. https://doi.org/10.1101/2020.09.10.20190348

Cheng, Y., Ma, N., Witt, C., Rapp, S., Wild, P. S., Andreae, M. O., et al. (2021b). Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. *Science*, *372*(6549), 1439–1443. https://doi.org/10.1126/science.abg6296

Curtius, J., Granzin, M., & Schrod, J. (2021). Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. *Aerosol Science and Technology*, *55*(5), 586–599.

de.trotec.com. (2021). Raumluftreiniger TAC V+ in basaltgrau/schwarz + Schallschutzhaube. https://de.trotec.com/shop/raumluftreiniger-tac-v-in-basaltgrau-schwarz-schallschutzhaube.html. Zugegriffen: 4. Juli 2021

DGUV. (2016). DGUV Information 215-510 „Beurteilung des Raumklimas – Handlungshilfe für kleine und mittlere Unternehmen“, 32.

DIN EN 13779. (2007). *DIN EN 13779. Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme. (Wurde mit Veröffentlichung der DIN EN 16798-3 im Nov. 2017 zurückgezogen.)* (S. 19). Beuth Verlag.

DIN EN 15251. (2007). *DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, 08/2007, Beuth-Verlag GmbH. Berlin.* (S. 19). Beuth Verlag.

DWD. (2021). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Kostenfreie Gradtagzahlen/Gradtage. https://www.dwd.de/DE/leistungen/gtz_kostenfrei/gtz_kostenfrei.html. Zugegriffen: 4. Juli 2021

ebm-papst GmbH. (2021a). W3G300CK1332. https://www.ebmpapst.com/de/de/products/axial-fans/p/W3G300CK1332.html. Zugegriffen: 28. Juni 2021

ebm-papst GmbH. (2021b). W3G350CG0332. https://www.ebmpapst.com/de/de/products/axial-fans/p/W3G350CG0332.html. Zugegriffen: 28. Juni 2021

energie-experten. (2021). Ratgeber. *energie-experten*. https://www.energie-experten.org/ratgeber. Zugegriffen: 5. Juli 2021

Erhart, T., Guerlich, D., Schulze, T., & Eicker, U. (2015). Experimental Validation of Basic Natural Ventilation Air Flow Calculations for different Flow Path and Window Configurations. *Energy Procedia*, *78*, 2838–2843. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.644

FGK e.V. (2003, August). Die Umsetzung der Richtlinie VDI 6022-Hinweise für Anwender der VDI Richtlinie 60. https://downloads.fgk.de/84_Umsetzung_VDI6022_MGV2003.pdf. Zugegriffen: 4. Juli 2021

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

FGK e.V. (2020, August 3). Betrieb von Lüftungs- und Klimaanlagen während der Covid-19-Pandemie. https://www.fgk.de/index.php/114-betrieb-von-lueftungs-und-klimaanlagen-waehrend-der-covid-19-pandemie. Zugegriffen: 5. Juli 2021

FGK e.V. (2021, Januar). Anforderungen an Lüftung und Luftreinigung zur Reduktion des Infektionsrisikos über den Luftweg. https://downloads.fgk.de/372_SR52_RLT_und_Covid19_V1_210122.pdf. Zugegriffen: 17. Mai 2021

Fitzner, K., & Finke, U. (2012). *Lüftungsregeln für freie Lüftung: Projekt F 2072*. Dortmund: BAuA.

Fromme, H., Heitmann, D., Dietrich, S., Schierl, R., Körner, W., Kiranoglu, M., et al. (2008). Raumluftqualität in Schulen-Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO2), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. *Das Gesundheitswesen*, *70*(02), 88–97.

Grams, H., Hehl, O., & Dreesman, J. (2003). „Aufatmen in Schulen"-Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. *Das Gesundheitswesen*, *65*(07), 447–456.

Haustechnik Handrich GmbH. (2021). Viessmann Vitovent 200-P, Lüftungs-System mit Raumluftreinigung. *Haustechnik Handrich GmbH*. https://www.haustechnik-handrich.de/viessmann-systemtechnik/viessmann-vitovent-200-p-lueftungs-system-mit-raumluftreinigung. Zugegriffen: 4. Juli 2021

Helleis, F. (2021). Vergleich verschiedener Sanierungsmaßnahmen zum Wärmeschutz von Klassenzimmern, Büroräumen und Privatwohnungen (in Vorbereitung).

Helleis, F., & Klimach, T. (2021, Mai). Lüftung von Schulräumen -ein „frischer" Blick von draußen. https://ventilation-mainz.de/lowcostVent_MPIC_german.pdf. Zugegriffen: 18. Mai 2021

Heraeus Noblelight GmbH. (2021, Mai). Soluva Air W, Heraeus.com. https://www.heraeus.com/media/media/landingpages_1/soluva_1/documents_2/brochures_2/Soluva_Air_W_DE.pdf. Zugegriffen: 25. Juni 2021

IBC Ingenieurbau-Consult GmbH, H. M. (2020). Brandschutztechnische Begutachtung einer dezentralen Abluftanlage für Klassenräume in Schulen, 13.

Kähler, C. J., Fuchs, T., & Hain, R. (2020). Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren. *Hg. v. Universität der Bundeswehr München. Strömungsmechanik und Aerodynamik. Online verfügbar unter https://www. unibw. de/lrt7/raumluftreiniger. pdf, zuletzt geprüft am*, *18*, 2020.

Klimach, T. (2021). *Vergleichsmodellierung von Lüftungsmethoden für Klassenzimmer*. https://bit.ly/3xfmz

Klimach, T., & Helleis, F. (2021). Vorläufige Dokumentation Abluftanlage für Klassenräume, 27.

Klinke, R., & Silbernagl, S. (Hrsg.). (2001). *Lehrbuch der Physiologie* (3., vollst. bearb. Aufl.). Stuttgart: Thieme.

Kriegel, M., & Hartmann, A. (2021). SARS-CoV-2-Aerosolpartikel: Inhalierte Dosen im Vergleich zwischen gar nicht, mäßig, gut und sehr gut belüfteten Räumen. https://doi.org/10.25646/8394

Lelieveld, J., Helleis, F., Borrmann, S., Cheng, Y., Drewnick, F., Haug, G., et al. (2020). Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(21), 8114. https://doi.org/10.3390/ijerph17218114

MeinHausShop. (2021). tecalor Lüftungsgerät mit Zu-/Abluftgitter LTM dezent 800 topline KE GIT. *MeinHausShop*. https://www.meinhausshop.de/tecalor-Lueftungsgeraet-mit-Zu/Abluftgitter-LTM-dezent-800-topline-KE-GIT. Zugegriffen: 4. Juli 2021

Melikov, A. K. (2015). Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction. *Building and Environment*, *91*, 70–77. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.010

Mikhailov, E. F., & Vlasenko, S. S. (2020). High-humidity tandem differential mobility analyzer for accurate determination of aerosol hygroscopic growth, microstructure, and activity coefficients over a wide range of relative humidity. *Atmospheric Measurement Techniques*, *13*(4), 2035–2056. https://doi.org/10.5194/amt-13-2035-2020

Morawska, L., Allen, J., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., et al. (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science*, *372*(6543), 689–691. https://doi.org/10.1126/science.abg2025

Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluyssen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., et al. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, *142*, 105832. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105832

Moriyama, M., Hugentobler, W. J., & Iwasaki, A. (2020). Seasonality of Respiratory Viral Infections. *Annual Review of Virology*, *7*(1), 83–101. https://doi.org/10.1146/annurev-virology-012420-022445

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

Neumann, H.-D. (2011). Luftqualität und Lüftung in Schulen. *Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft*, *71*(11), 495.

NOAA. (2021). Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases. https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html. Zugegriffen: 5. Juli 2021

Peng, Z., Bahnfleth, W., Buonanno, G., Dancer, S. J., Kurnitski, J., Li, Y., et al. (2021). Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and

their application to COVID-19 Outbreaks. *medRxiv*, 2021.04.21.21255898. https://doi.org/10.1101/2021.04.21.21255898

Peng, Z., & Jimenez, J. L. (2021). Exhaled CO2 as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities. *Environmental Science & Technology Letters*, *8*(5), 392–397. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.1c00183

Philips GmbH Market DACH. (2021). Produkt Philips 2000 Series Luftreiniger AC2887/10 Luftreiniger kaufen. *Philips*. https://www.philips.de/c-p/AC2887_10/2000-series-luftreiniger. Zugegriffen: 28. Juni 2021

Pöhlker, M. L., Krüger, O. O., Förster, J.-D., Berkemeier, T., Elbert, W., Fröhlich-Nowoisky, J., et al. (2021). Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. *arXiv:2103.01188 [physics]*. http://arxiv.org/abs/2103.01188. Zugegriffen: 17. Mai 2021

Prather, K. A., Wang, C. C., & Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science*, *368*(6498), 1422–1424. https://doi.org/10.1126/science.abc6197

Rief, S., & Jurecic, M. (2014). LUFTFEUCHTIGKEIT AM BÜROARBEITSPLATZ. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgar.

Rietschel, H., & Fitzner, K. (Hrsg.). (2008). *Raumklimatechnik: Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik* (16. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68267-7

Schibuola, L., Scarpa, M., & Tambani, C. (2016). Natural Ventilation Level Assessment in a School Building by CO2 Concentration Measures. *Energy Procedia*, *101*, 257–264. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.033

Shimer, D. A., Jenkins, P. L., Hui, S. P., & Adams, W. C. (1995). 132 MEASUREMENT OF BREATHING RATE AND VOLUME IN ROUTINELY PERFORMED DAILY ACTIVITIES. *Epidemiology*, *6*(2), S30.

shop.heraeus-soluva.com. (2021). Soluva® Air W - Weiß | Luftdesinfektion | Produkte | Heraeus Noblelight Soluva Shop. https://shop.heraeus-soluva.com/de/Produkte/Luftdesinfektion/SoluvaAirWWeiss/p/5142229. Zugegriffen: 4. Juli 2021

Steffens, T., & Seipp, H.-M. (2021a). Lufthygiene in Unterrichtsräumen unter SARS-CoV-2-Bedingungen- Teil I: Auswirkungen der Schallbelastung beim Einsatz mobiler Luftreiniger (MLR). *Gefahrstoffe - Reinhaltung der Luft VDI Fachmedien GmbH & Co. KG*, *81*(3–4), 127–134.

Steffens, T., & Seipp, H.-M. (2021b). Lufthygiene in Unterrichtsräumen unter SARS-CoV-2-Bedingungen - Teil II: Aerosolkonzentrationsgradienten und Beeinflussung der thermischen Behaglichkeit durch mobile. *Gefahrstoffe - Reinhaltung der LuftVDI Fachmedien GmbH & Co. KG*, *81*(3–4), 135–146.

Tecalor GmbH. (2021). LTM dezent® 300/600/800 Hohe Luftqualität für große Ansprüche., 12.

Trotec GmbH. (2021). Hochleistungs-luftreiniger TAC V+ - TROTEC. https://de.trotec.com/produkte-services/maschinen-highperformance/luftreinigung/raumluftreiniger-tac-v/. Zugegriffen: 28. Juni 2021

Umweltbundesamt. (2008a). *Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitfaden-fuer-innenraumhygiene-in-schulgebaeuden. Zugegriffen: 17. Mai 2021

Umweltbundesamt. (2008b). Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft: Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten

Landesgesundheitsbehörden. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, *51*(11), 1358–1369. https://doi.org/10.1007/s00103-008-0707-2

Umweltbundesamt. (2020a, August 12). Stellungnahme Kommission Innenraumlufthygiene zu Lüften und SARS-CoV-2. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/dokument/stellungnahme-kommission-innenraumlufthygiene-zu. Zugegriffen: 17. Mai 2021

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

Umweltbundesamt. (2020c, Oktober 15). Lüften in Schulen.

Umweltbundesamt. (2021a). Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen. Zugegriffen: 5. Juli 2021

Umweltbundesamt. (2021b, Februar 11). Mobile Luftreiniger in Schulen: Nur im Ausnahmefall sinnvoll | Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/themen/mobile-luftreiniger-in-schulen-nur-im-ausnahmefall. Zugegriffen: 17. Mai 2021

Umweltbundesamt. (2021c, März 29). Infektiöse Aerosole in Innenräumen. *Umweltbundesamt*. Text, Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/innenraumluft/infektioese-aerosole-in-innenraeumen. Zugegriffen: 5. Juli 2021

van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., Williamson, B. N., et al. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, *382*(16), 1564–1567. https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973

Viessmann Climate Solutions SE. (2021, Juni 18). Vitovent 200-P für Kitas & Schulen. *Viessmann*. https://www.viessmann.de/de/aktionen/aufatmen.html. Zugegriffen: 28. Juni 2021

von Pettenkofer, M. (1858). *Über den Luftwechsel in Wohngebäuden*. Cotta.

WHO. (2021, Mai 17). Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions. Zugegriffen: 17. Mai 2021

WOLF GMBH. (2017, April). Wolf COMFORT-GROSSRAUMLÜFTUNGSGERÄT. https://www.wolf.eu/fileadmin/Wolf_Daten/Dokumente/Technische_Dokus/Ventilation/4800620_201704_Comfort_Grossraumlueftung_CGL_DE.pdf. Zugegriffen: 4. Juli 2021

WOLF GmbH. (2021). COVID-19: Studie. *WOLF – Ihr Systemprofi für bestes Raumklima*. https://www.wolf.eu/ueber-wolf/presse/pressemitteilungen/covid-19-studie/. Zugegriffen: 5. Juli 2021

www.philips.de. (2021). Produkt Philips 2000 Series Luftreiniger AC2887/10 Luftreiniger kaufen. *Philips*. https://www.philips.de/c-p/AC2887_10/2000-series-luftreiniger. Zugegriffen: 4. Juli 2021

Zeidler, O., Kriegel, K., & Fitzner, K. (1999). Unterschiede der Feuchtigkeitsübertragung einer Person in Quell- und Mischlüftung. *Luft- und Kältetechnik*, *AIVC 12,413*.

Anhang

A.1 Gleichungen und Rechenmethoden

Die Konzentration eines Schadstoffs (z.b. CO_2 oder Aerosolpartikel) wird neben der effektiven Luftwechselrate (LWR, λ_{eff}) durch dessen Emissionsrate (E) und das Raumvolumen (V) bestimmt, wobei in größeren Räumen die Gleichgewichtseinstellung insgesamt verlangsamt ist. Die Luftwechselrate wird bestimmt durch die Summe aller Effekte (Gleichung 1), die die Konzentration eines Schadstoffs mit der Zeit reduzieren (Peng et al. 2021).

$$\lambda_{eff} = \sum_i \eta_i \lambda_i \quad (1)$$

Jeder dieser Effekte kann als Wechselrate (λ_i) ausgedrückt werden und hat eine Effizienz ($\eta_i = \frac{c_{i,ab} - c_{bg}}{c_v - c_{bg}}$) die bestimmt ist durch das Verhältnis von Abluft-Konzentration ($c_{i,ab}$) zur mittleren Raumkonzentration (c_v) unter Berücksichtigung der Untergrundkonzentration (c_{bg}) (Albers et al. 2020). Die Effizienz perfekten Mischlüftens beträgt eins, Kurzschlussströme von Zu- nach Abluft verringern sie und Verdrängungslüftung (Quelllüftung) erhöht sie. Nominelle z.B. von Herstellern angegebene Volumenströme (Q_i) lassen sich über das Raumvolumen (V) in Wechselraten umrechnen ($\lambda_i = \frac{Q_i}{V}$).

In die Berechnung von λ_{eff} gehen ein

- die natürliche Infiltration ($\lambda_0 = 0.3/h$; $\eta_0 = 1$) (Gebäudeleckagen),
- der Gesamtvolumenstrom (Q_i) von frischer und gereinigter Luft, dessen Effizienz ($\eta_i = \eta_{aero/CO2} * (1 + \eta_{quell})$) sich aus dem Quellluftеffekt (η_{quell}) und der Effizienz für CO_2 (η_{CO2}) oder Aerosolpartikel (η_{aero}) ergibt,
- die Überlebensdauer der Viruspartikeln ($\lambda_{vp} = 0.6/h$; $\eta_{vp} = 1$),
- die zusätzliche Wechselrate des Stoßlüftens (λ_{vent}; $\eta_{vent} = 1$).

Für eine Periode mit gleichbleibenden Randbedingungen (Emissionsrate *E*, Raumvolumen *V*, effektiver Raumluftwechselrate λ_{eff}) kann die Konzentration $c_v(t)$ zum Zeitpunkt *t* ausgehend von der Startkonzentration $c_{v,0}$ mit Gleichung (2) berechnet werden:

$$c_v(t) = \frac{E}{V\lambda_{eff}}\left(1 - e^{-\lambda_{eff}t}\right) + c_{v,0}\, e^{-\lambda_{eff}t} \quad (2)$$

Die Anzahl $n_v(t)$ der bis zum Zeitpunkt *t* inhalierten Atemluftaerosolpartikel, lässt sich unter Annahme eines Atemzeitvolumens q_b wie folgt berechnen,

$$n_v(t) = n_0 + q_b \frac{E}{V\lambda_{eff}} t \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda_{eff}t}}{\lambda_{eff}t}\right) + c_{v,0} q_b \frac{1 - e^{-\lambda_{eff}t}}{\lambda_{eff}} \quad (3)$$

wobei n_0 der Summe bereits inhalierter Partikel in vorrangegangenen Perioden entspricht.

In Perioden, in denen die Schüler den Raum verlassen, wird *E* und q_b auf 0 gesetzt. Der Haubeneffekt (η_{haube}) des MPIC-FLS wird auf die Emissionsrate ($E_{mpic} = E*(1- \eta_{haube})$) multipliziert.

Die Rechnungen wurden in einer Tabellenkalkulationsprogramm durchgeführt, welches frei zugänglich ist ((Klimach 2021); https://bit.ly/3xfmz). So kann jeder die Rechnungen mit eigenen Parametern durchführen und auch Parameter wie Raumgröße und Belegung ändern.

A.2 Kenngrößen und betrachtete Randbedingungen

Die natürliche Infiltration nehmen wir mit 0,3/h und als ständig vorhanden an, der Wert ist stark von der Bausubstanz abhängig. In der Literatur findet man Werte von 0,06/h – 0,5/h (Erhart et al. 2015; Fitzner und Finke 2012; Helleis und Klimach 2021; Müller et al. 2020).

Als Luftwechselrate (LWR) des Stoßlüftens verwenden wir 30/h bei günstigen Bedingungen und 6/h bei ungünstigen Bedingungen. Laut Steffens und Seipp (Steffens und Seipp 2021b) erreicht Stoßlüften unter günstigen Bedingungen einen Austausch von 80-90% der Raumluft innerhalb von 3–5 min. Dies entspricht bei Mischlüftung momentanen Luftwechselraten von etwa 20/h bis 30/h. Müller et al.(Müller et al. 2020) veranschlagen basierend auf Messungen an halbgeöffneten Fenstern von Erhart et al. (Erhart et al. 2015) Luftwechselraten von ca. 6/h für das Stoßlüften schlecht lüftbarer Räume, für die entsprechend der Einsatz von Luftreinigungsgeräten empfohlen wird (Umweltbundesamt 2020a). Ähnliche Luftwechselraten lassen sich unter Annahmen zur Fensterfront und Temperaturdifferenzen mit in der Literatur genannten Parametrierungen errechnen (British Standards Institution und British Standards Institution 1991; Erhart et al. 2015). Querlüftung bei geöffneter Tür wird wegen möglicher Querkontamination zwischen Klassenräumen, Brandschutz und zusätzlichen Lärmaufkommens als für nicht zulässig gehalten (IBC Ingenieurbau-Consult GmbH 2020) und von uns daher nicht berücksichtigt.

Den Quellluftеffekt setzen wir im günstigen Fall moderat mit 50% und im ungünstigen Fall mit 25% an. Er wird für die Lüftungsvarianten angewandt, bei denen kontinuierlich Frischluft bodennah mit niedriger Geschwindigkeit zugeführt und die Fortluft deckennah abgesaugt wird. Die Zuluftführung zum Boden kann z. B. durch einen Vorhang oder einen Vorbau vor einem gekippten Fenster realisiert werden. Der so im Raum entstehende Stoffgradient erhöht die Lüftungseffizienz, er wird durch vertikale Temperaturgradienten stabilisiert. Aus der Literatur (z.B. Bild F3-1(Rietschel und Fitzner 2008), (Helleis und Klimach 2021; Melikov 2015)) sind hier unter optimalen Bedingungen auch Werte von 300-500% ablesbar. Entsprechende Gradienten sind auch bei Aufstellung, Nutzung und Auswertung von CO_2- und Aerosolmessgeräten zu berücksichtigen (Helleis und Klimach 2021).

Für Umluftgeräte und Lüftungsmethoden nur mit Stoßlüften wird kein Quellluftеffekt, sondern gute Mischung angenommen. Die Mischung wird insbesondere in Schulklassen durch die von den anwesende Personen und anderen Wärmequellen erzeugten konvektiven Luftströme angetrieben und durch die Volumenströme zusätzlicher Umluftgeräte weiter unterstützt.(Rietschel und Fitzner 2008).

Wird die Abluft mittels Hauben über den Köpfen der anwesenden Personen eingesammelt, gelingt es einen Anteil der Schadstoffe abzutransportieren bevor sie sich in die Raumluft einmischen (Anhang A.6, Abbildung A6 (Helleis und Klimach 2021; Klimach und Helleis 2021)) und so die effektive Emissionsrate zu verringern. Im günstigen Fall verringern wir die Emission um 60% und im ungünstigen Fall um 30%. Da dieser Effekt auf die wirksame Emissionsrate wirkt und nicht auf die LWR (vgl. Anhang A.1), muss er separat betrachtet werden

A.3 Lüftungsmethoden

1. Dauerlüftung mit einem Lüftungsgerät analog zu einem LTM dezent® 800 topline GIT (Tecalor GmbH 2021) mit 870 m³/h Durchsatz und Wärmerückgewinnung (Referenzgerät). Die Rechnungen wurden ohne Stoßlüften durchgeführt. Unter günstigen Bedingungen wird die Lüftungseffizienz auf 1 gesetzt im ungünstigen Fall mit 25% Kurzschlussstrom ($\eta_{CO2/aero}$ = 75%) gerechnet (Kähler et al. 2020). Gerätekosten ~12.000 EUR (MeinHausShop 2021).

2. Dauerlüften mit einem Lüftungsgerät ähnlich Viessmann Vitovent 200-P (Viessmann Climate Solutions SE 2021) mit maximal 800 m³/h bei 50% Umluft Anteil, Wärme- und Feuchterückgewinnung. Der Umluftanteil wird mit einem HEPA H14 Filter zu 99.99% von Partikeln gereinigt. Der Quellluftеffekt (η_{quell}) kommt zum Tragen, da die Zuluft unten aus dem Gerät kommt und oben die Abluft eingesammelt wird. Im günstigen Fall wird zusätzlich nach jeder Schulstunde mit 30/h stoßgelüftet im ungünstigen findet kein Stoßlüften statt. Gerätekosten ~ 10.000€.(Haustechnik Handrich GmbH 2021)

3. Dauerreinigen mit deckenseitig montierten UV-C Reinigungsgeräten ähnlich z.B. 2 Stück Soluva Air W (Heraeus Noblelight GmbH 2021) Gesamtfluss (Q_i) 800m³/h bei 99%iger Inaktivierung von Viren. Die Geräte laufen im günstigen Fall parallel zur Stoßlüftung nach UBA bei (λ_{vent} = 30/h) und haben eine Effizienz von η_{aero} = 94% (95%*99%). Im ungünstigen Fall wird nach den Schulstunden mit 6/h stoßgelüftet und die Effizienz beträgt η_{aero} = 74% (99%*75%). Gerätekosten 2 x 2.000 EUR (shop.heraeus-soluva.com 2021)

4. Dauerreinigen mit in den Raum gestellten Umluftfiltergeräten wie z.b. zu einem Hochleistungsluftreiniger TAC V+ (Trotec GmbH 2021) bzw. mehreren Philips 2887/10 (Philips GmbH Market DACH 2021). Der Gesamtfluss (Q_i) wird auf 1200m³/h eingestellt bei einer Filtereffizienz von 99,99%. Die Geräte laufen im günstigen Fall parallel zur Stoßlüftung nach UBA bei λ_{vent} = 30/h und haben eine Effizienz von η_{aero} = 95% (95%*99,99%). Im ungünstigen Fall wird nach den Schulstunden mit 6/h stoßgelüftet und die Effizienz beträgt η_{aero} = 74% (99,99%*75%). Gerätekosten ca. 4.000 EUR (de.trotec.com 2021) bzw. 4-5 x 270 EUR (www.philips.de 2021). Dabei ist zu beachten, dass auch für die Filter-Luftreiniger geringere Flussraten einstellbar sind und empfohlen werden, um die Geräuschbelastung und den Energieverbrauch zu reduzieren (Curtius et al. 2021; Kähler et al. 2020; Steffens und Seipp 2021a), z.B 1000 m³/h für TAC V+.

5. Stoßlüften in den Pausen (große und kleine) nach jeder Schulstunde mit effektiven Luftwechselraten (λ_{vent}) von 30/h (Steffens und Seipp 2021b) und 6/h (Müller et al. 2020; Umweltbundesamt 2020a).

6. Stoßlüften nach Empfehlung des Umweltbundesamts (Umweltbundesamt 2020b) für 15 min in den großen Pausen, für 5 min in den kleinen Pausen sowie während jeder Schulstunde nach 20 Minuten für 5 min mit effektiven Luftwechselraten (λ_{vent}) von 30 /h (Steffens und Seipp 2021b) und 6/h (Müller et al. 2020). Das UBA empfiehlt bei höheren Temperaturen (Sommer) die Lüftungsdauer zu erhöhen bzw. generell CO2-

Monitore zu verwenden (Umweltbundesamt 2020b), diese Maßnahmen liegen dann zwischen unseren Annahmen für günstige und ungünstige Bedingungen.

7. Stoßlüften bei 30/h und 6/h mit CO_2 Monitor. Es wird angenommen, dass die Fenster bei einer CO_2-Konzentration von ca. 950 ppm geöffnet und erst wieder geschlossen werden sobald die Konzentration unter 560 ppm sinkt oder maximal 5 min verstrichen sind.

8. Dauerlüften über je zwei Ober- und Unterlichter (vertikaler Abstand 2,4 m; 1,5 m breit x 0,6 m hoch; 20 cm öffenbar). Die kontinuierliche Wechselrate (λ_i) wird nach Messwerten (Helleis und Klimach 2021) und Berechnungen nach Erhart et al.(Erhart et al. 2015) auf 4,3/h gesetzt und entspricht 2 gekippter Fensterpaare bei einer Differenztemperatur von 15 K. Die Anzahl wurde so gewählt, dass der CO_2-Leitwert eingehalten wird. Im ungünstigen Fall wird die Wechselrate halbiert, was einer Differenztemperatur von ca. 4 K entspricht. Der Quellluftеffekt (η_{quell}) kommt zum Tragen.

9. Dauerlüftung mit einem Abluftventilator (Abb. A3, Anhang A.6), der im günstigen Fall ein Volumen (Q_i) von 1200m³/h und im ungünstigen ein Volumen von 800 m³/h aus dem Raum entfernt. Der Quellluftеffekt (η_{quell}) kommt zum Tragen.

10. Dauerlüftung mit einer MPIC-Fensterlüftungsanlage mit 800 m³/h bei verteilter und gezielter Absaugung über den Personen und Zufuhr von Frischluft in Bodennähe (Abb. A4, Anhang A.6). Der Quellluftеffekt (η_{quell}) kommt zum Tragen. Die Direktabsaugung (Haubeneffekt η_{haube}) wird im ungünstigen Fall mit 30% und im günstigen Fall mit 60% angenommen. Solche Anlagen wurden seit Sommer 2020 in mehr als 450 Klassenzimmern an Schulen der Stadt Mainz installiert und in Betrieb genommen.

Nach Erfahrungswerten aus der Ausstattung von mehr als 450 Klassenräumen in Schulen der Stadt Mainz (Gebäudewirtschaft Mainz) liegen die Ausgaben für die Installation eines MPIC-FLS unter 500 EUR Materialkosten (Ventilator plus verteilte Abluftabsaugung) und unter 1000 EUR Gesamtkosten inklusive professioneller Installation.

Die Kosten für den Kauf marktüblicher Lüftungs- und Luftreinigungsgeräte mit Kenngrößen entsprechend den in unserer Studie betrachteten Lüftungsmethoden liegen hingegen bei mehreren Tausend bis zu über Zehntausend Euro pro Klassenraum. Diesbezüglich erscheint der Einsatz verteilter Luftfiltergeräte am günstigsten (aktuell rund 1300 EUR für 4-5 Geräte mit einem Gesamtvolumenstrom von 1000-1200 m³/h (www.philips.de 2021)). Eine verteilte Aufstellung solcher Geräte (Curtius et al. 2021) erscheint auch bezüglich ihrer Wirksamkeit vorteilhaft (Minimierung von Kurzschlussströmen).

A.4 Wärmerückgewinnung

Zur Beurteilung der Notwendigkeit von Wärmerückgewinnung (WRG) wurden in einer getrennten Studie (Helleis 2021) die Wärmebilanz eines realen Klassenraums (Altbau IGS), eines Großraumbüros und einer Zwei-Zimmer-Wohnung mit anteiligen Verkehrswegen unter Berücksichtigung der Wetterdaten von 2021 in Frankfurt/Main detailliert mit Stundenwerten und gegebenen bzw. gemessenen Parametern berechnet. Es wurde Heiz- und Kühlenergiebedarf des Bestands und die Effekte von 4 Sanierungsmaßnahmen gerechnet,

WRG, energetische Fassadensanierung (EFS), EFS + Quelllüftung (QL), EFS + QL + WRG. (Abb. A1) zeigt die Ergebnisse für einen Klassenraum.

Durch Nachrüstung von RLT mit Wärmerückgewinnung (80%) lassen sich im Rechenmodell (Kompaktbau) ca. 13% Primärenergie gegenüber dem Bestand sparen. Die Hochrechnung auf eine reale Schule (kein Kompaktbau) ergibt ein Einsparungspotential von ca. 8%. Demgegenüber lassen sich durch die Fassadensanierung bis zu 70% Primärenergie einsparen, mit Quelllüftung sogar 80%. Der Betrieb von WRG im Neubau ist demnach selbst ökologisch nicht zielführend, da der Verbrauch an elektrischer Energie die Einsparungen an Heizenergie durch WRG überkompensiert.

Berücksichtigt man Investitions- und jährliche Wartungskosten, ist sowohl wirtschaftlicher Betrieb sowie Amortisation innerhalb der Lebensdauer ausgeschlossen. Um ökologisch, ökonomisch und hygienisch in die Gewinnzone zu kommen, muss vorzugsweise energetische Fassadensanierung mit lokaler CO2- und Temperaturgeführter Ablufttechnik und Quelllüftungseinlässen kombiniert werden.

Vereinfachte Abschätzung der Lüftungsverluste nach einfachen Rechenverfahren

Aus den Heizgradtagstabellen in (DWD 2021) erhält man für Wiesbaden bei einer Heizgrenze von 12°C im Mittel der Jahre zwischen 1980 – 1999 217 d und 3300 Kd. Die Heizperiode ist damit ca. 7 Monate lang, es fallen 2 Wochen Herbst, Weihnachts- und Osterferien und einige zusätzliche Feiertage (ca. 3) in diese Zeit. Die Anzahl der Heizschultage (HST) bzw. Heizgradschultage (HGST) betragen damit

$$Heizschultage = (217\,d - 45\,d) * 5/7 = 123\,sd$$
$$Heizschulgradtage = 123\,sd * 3300\,Kd/217\,d = 1870\,sKd$$

Daraus errechnet sich der Lüftungswärmeverlust der Integrierten Gesamtschule Mainz bei durchschnittlicher Anwesenheit von *7h/d* grob zu

$$Q_{vent} = 1870\,sKd * 7h/d * 0.34\,Wh/K * 30\,m^3/h/p * 1600\,p = 214\,MWh$$

Diese Berechnung aus 30 Jahre alten Tagesmitteln ergibt im Vergleich zur Berechnung aus aktuellen Stundenmitteln (113 *MWh*) einen knapp doppelt so hohen Wert. Als Ursachen kommen folgende Faktoren in Frage:

- Der Unterschied Lufttemperatur zu operativer Temperatur (gemittelter Wert zwischen Wand und Luft), kann bei den erforderlichen hohen Lüftungsraten von ca. 4/h bis zu 4 K betragen. Damit werden die aus Tagesmitteln berechneten Lüftungsverluste um bis zu ca. 15% überschätzt.
- Die Lüftungsverluste fallen tagsüber an, wenn die Außentemperaturen ca. 2 K höher als das Tagesmittel liegen. Damit werden die Lüftungsverluste um weitere ca. 15% überschätzt.
- In den letzten 30 Jahren ist es in Deutschland besonders im Winter tendenziell wärmer geworden (~1 K, DWD CDC). Dadurch ergäbe sich eine Überschätzung der Lüftungsverluste um ca. 7%.
- Die Lüftungsverluste korrelieren zeitlich mit Wärmegewinnen durch Personen, Beleuchtung und Solarerträge, dazu verringern Bodenbedeckungen, abgehängte

Decken, verstellte Wände u. ä. die Ankopplung der Wärmespeichermassen, so dass die Heizungsthermostate im Modell wie in der Realität bei Anwesenheit der Schüler schnell herunterregeln.

Vergleich mit realen Verlusten

Die eingefahrenen Transmissions- und Infiltrationsverluste betragen im Modell

$$Q_{trans,m} = 789\ MWh$$
$$Q_{infilt,m} = 117\ MWh$$
$$Q_{vent,m} = 177\ MWh * 64/100 = 113\ MWh$$

bei einem modellierten Heizenergieverbrauch (Nutzenergie) von

$$Q_{heiz,m} = 689\ MWh$$

Für den realen Heizenergieverbrauch (2100 MWh, Gas, Endenergie) wurden (abzüglich von Nebengebäuden, Warmwasser-, Verteilungs- und Bereitstellungsverlusten)

$$Q_{heiz} = 1200\ MWh$$

geschätzt.

Da solare, personen- und beleuchtungsbedingte Gewinne und die Lüftungsverluste gut quantifizierbar sind, kann es sich lediglich um eine Unterschätzung der nicht durch WRG erfassbaren Transmissions- und Infiltrationsverluste handeln, obwohl nur ein Teil des modellierten Gebäudes Altbestand ist. Zur Bestimmung des realen Anteils der Lüftungsverluste an den Gesamtverlusten wird der Fehlbetrag zur Summe der modellierten Verluste addiert, so dass

$$Q_{loss} = Q_{loss,m} + (Q_{heiz} - Q_{heiz,m)} = (1019 + 511)MWh = 1530\ MWh$$

Der Anteil der Lüftungsverluste an den Gesamtverlusten beträgt also lediglich ca. 113MWh/1530 MWh = 7%. Bezogen auf die Verluste lägen die durch Wärmerückgewinnung tatsächlich erreichbaren Einsparungen im realen Gebäude bei bestenfalls 0.8 * 7% = 5.6%, ohne Berücksichtigung der verbrauchten elektrischen Energie der hypothetischen raumlufttechnischen Anlage.

Die Diskrepanz zwischen modelliertem und tatsächlichem Heizenergieverbrauch war zu erwarten, da das Nutzeinheiten-basierte Modell von einer kompakten Bauweise mit innenliegenden Fluren und Treppenhäusern ausgeht, was für die reale Schule nicht zutrifft. Da aber der reale Primärenergieverbrauch gut bekannt ist, ergeben sich trotz der einfachen Rechnung valide Bilanzierungen und Kernaussagen für die betrachtete Nutzungseinheit.

A.5 Feuchterückgewinnung und aktive Befeuchtung,

Luftfeuchten gelten im Bereich zwischen ca. 30% und 70% als behaglich, und bis 20% wird als „noch behaglich“ eingestuft (DGUV 2016). Nach DIN EN 15251 sind raumlufttechnische Anlagen für Kat 2 Räume bei einer operativen Temperatur von 20°C auf eine Befeuchtungsschwelle von 25% relativer Luftfeuchte auszulegen.

Zur Beurteilung der Notwendigkeit von aktiver Raumluftbefeuchtung bzw. Feuchterückgewinnung wurden in einer getrennten Studie (Helleis 2021) die Feuchtebilanz eines realen Klassenraums - Altbau IGS unter Berücksichtigung der Wetterdaten von 2020 in Frankfurt/Main detailliert mit Tageswerten und gegebenen bzw. gemessenen Parametern

berechnet. In Abbildung A2 werden die anteiligen Beträge zur Gesamtbefeuchtung der Atemluft für Kat 1 Räume und beste Raumluftqualität gezeigt.

Durch die von den Schülern eingebrachte zusätzliche Feuchte bei ca. 30 m³/h/p Frischluftzufuhr kommt man in unserer Klimazone bereits beim Mitteln über wenige Tage in den Bereich von der von der DGUV, BAUA und REHVA als behaglich angesehenen Untergrenze von 30% rH.

In den Jahresmitteln sind lediglich Tage berücksichtigt, an denen die Raumluftfeuchte unterhalb der jeweiligen Auslegungsfeuchte lag. Der Beitrag von Raumlufttechnik läge demnach üblicherweise bei lediglich 1.7% der aufzubringenden Gesamtbefeuchtungsleistung, selbst in Komfortbereichen würde er 3.3% nicht überschreiten. Dieser Anteil kann ohne weiteres auch noch durch die Schleimhäute eines gesunden Menschen aufgebracht werden.

Durch passive Membrantauscher erreichbare Feuchterückgewinnung (z.B. Vitovent 200-P) können je nach zusätzlicher Stoßlüftungsaktivität 50-75% des 2.9% Personenanteils im Raum gehalten werden.

Damit sind die Effekte von aktiver Befeuchtung / Feuchterückgewinnung in Klassenräumen marginal. Größere Behaglichkeitseffekte können durch Investitionen in Entfeuchtung, Kühlung, Abschattung und Quelllüftung erzielt werden.

Abwägung Hygienerisiken – marginale Befindlichkeitsvorteile

Besonders bemerkenswert sind folgende Aussagen (Zitate Fachverbände):

energie-experten.org (energie-experten 2021):

- „Mit der Richtlinienreihe VDI 6022 "Raumlufttechnik, Raumluftqualität" will der VDI eine gesundheitlich zuträgliche Atemluft in Gebäuden schaffen, die mit raumlufttechnischen Anlagen und -Geräten ausgestattet sind. Die VDI 6022 definiert hierzu Anforderungen, mit dem Minimalziel, dass die in den Raum abgegebene Luft nicht schlechter ist als die, die vom Lüftungsgerät oder der -anlage angesaugt wird. Unter Berücksichtigung der VDI 6022 soll so sichergestellt werden, dass die Raumlufttechnik nicht selbst Quelle von Verunreinigungen ist.“

FGK (FGK e.V. 2003):

- „Die VDI Richtlinie 6022 schafft und regelt keine Grundlagen für die Erteilung von Zertifikaten oder Gütesiegeln. Die Anforderungen der Richtlinie werden von den Fachfirmen und Komponentenherstellern eigenverantwortlich durch deren nach VDI 6022 geschulte Mitarbeiter umgesetzt.“
- „Für Raumlufttechnische Anlagen, die vor dem Erscheinen der jeweils gültigen VDI 6022 erstellt wurden, gilt zunächst ein entsprechender Bestandsschutz, vergleichbar auch dem baulichen Brandschutz. Dies gilt insbesondere dann, wenn durch die RLT-Anlage keine Befindlichkeitsstörungen der Nutzer verursacht werden.“
- „Bei schweren Befindlichkeitsstörungen der Nutzer oder bei starken Hygienemängeln ist eine Sanierung in jedem Falle notwendig.“

Siegle & Epple (FGK e.V. 2003):

- „Das gravierendste Beispiel ist die Problematik der Feuchtigkeit in der Außenluft, und der Einfluss dieser Feuchtigkeit auf die Komponenten. In den Richtlinien werden für

alle Komponenten im Zuluftsystem maximale Feuchtigkeitswerte vom 90% angegeben. Dies ist sicherlich eine sinnvolle Begrenzung, um biologisches Wachstum zu verhindern. Die hiervon betroffenen Komponenten sind unter anderem Schalldämpfer und Filter."

- „Um diese Forderung einhalten zu können, müsste an allen RLT Anlagen die Außenluft vor jeder weiteren Behandlung zuerst erwärmt werden, um mit Sicherheit die Forderung mit 80% im Mittel über 3 Tage zu garantieren und das bei Außentemperaturen von weit unter 0 °C bis ca. + 20 °C, um sie danach unter Umständen wieder für die weitere Behandlungen in einer Klimaanlage abzukühlen. Ein Unsinn sondergleichen. Dies hätte auch zur Folge, dass Wärmerückgewinnungssysteme teilweise nicht mehr mit den erwünschten Rückgewinnungseffekten arbeiten können. Darunter fallen die Systeme mit Plattenwärmetauscher, Wärmerohre (Heat-Pipes) und Wärmepumpen."
- „Jede Anlage mit ordentlicher Wartung und Pflege wird hygienische Luft den Menschen zuführen, auch wenn nicht alle in den Richtlinien aufgeführte Bedingungen für die Außenluftansaugung eingehalten sind. Kritisch wird es nur dann, wenn diese wichtigste Forderung (Wartung und Pflege) nicht erfüllt wird. Dann können trotz Beachtung aller Bedingungen aus den VDI-Richtlinien die hygienischen Forderungen auf Dauer nicht gehalten werden."

A.6 Fensterlüftungssysteme

Fensterlüftungssysteme sind in verschiedenen Ausbaustufen realisierbar, die modular aufeinander aufbauen.

Im einfachsten Fall (Abb. A 3), wird die verbrauchte bzw. kontaminierte Abluft über einen möglichst hoch in einem Fenster oder in der Außenwand eingebauten Abluftventilator abgesaugt. Entscheidend für die Lüftungseffizienz und die Behaglichkeit der am Fenster sitzenden Personen ist hier das möglichst bodennahe Einbringen der meist kälteren Frischluft. Dies kann durch die Abdeckung des Fensters mit schweren Vorhängen oder vorgestellten transparenten Leitwerken erreicht werden. Sofern die Frischluft an Heizkörpern vorbeigeleitet werden muss, sollten diese z.B. mit davorgestellten Platten abgedeckt werden, um das Einmischen der Frischluft in die Heizungsluft zu vermeiden.

Die nächsthöhere Ausbaustufe würde ein Zentralrohr benutzen, das vom Ventilator aus quer durch den Raum geht und Luft durch mehrere Absaugöffnungen bzw. aus Raumbereichen gegenüber der Fensterfront entnimmt. Dadurch wird eine gleichmäßigere Absaugung im gesamten Raum erreicht und die Bildung von Bereichen höherer Schadstoffkonzentrationen vermieden, insbesondere bei Heizungsbetrieb.

Die höchste Ausbaustufe (MPC-FLS, Abb. A 4), verwendet Abzugshauben, um den maximalen Direktabsaugungseffekt zu erreichen. Dafür ist jeweils eine Haube pro Tisch und eine Zuleitung zum Zentralrohr erforderlich (ventilation-mainz.de). Die Hauben und Rohrleitungen können aus sehr preisgünstigen, leichten und transparenten Materialen gefertigt werden (Klimach und Helleis 2021), deren Unbedenklichkeit durch Brandschutzgutachten bestätigt wurde (IBC Ingenieurbau-Consult GmbH 2020).
Zum Nachweis der Quellluft- und Haubeneffekte wurden Experimente mit CO_2 und Aerosolquellen durchgeführt. Abbildung A5 zeigt die typischen Ergebnisse von CO_2-Messungen in einem lediglich durch Fensterlüftung belüfteten Klassenraum (äquivalent zu einfachem FLS bzw. Dauerlüften durch Kippfenster).

Es wurden die CO_2 Konzentration in Tischhöhe und nahe an der Decke des Raumes gemessen. Man erkennt, dass die Konzentrationen im Raum im Atembereich der Personen bis zu 5 mal geringer sind als in Höhe der Absaugung, und selbst bei nominellen Absaugraten von lediglich 4/h effektive Raumluftwechselraten von mehr als 12/h erzielt werden.

Abbildung A6 zeigt Ergebnisse von Aerosolmessungen bei in voller Ausbaustufe erreichten Direktabsaugungseffekten durch Hauben, mit Zigarillorauch (MPIC-FLS-Variante, Abb. A4).

Bei eingeschaltetem Ventilator (grüne Zeitreihe), werden trotz relativ niedriger nomineller Luftwechselraten von ca. 2.7/h effektive Luftwechselraten von über 8/h erreicht, das entspricht einem Anteil der direkt abgesaugten Partikel von ca. 70%. Die rote Zeitreihe wurde bei ausgeschaltetem Ventilator, die schwarze bei geschlossenen Fenstern zur Ermittlung der Verlustrate an Oberflächen und durch Verdunstung gemessen.

Abbildungen und Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der betrachteten Lüftungsmethoden und der zugehörigen Kenngrößen. *$Q_{kont.}$: kontinuierlicher Volumenstrom; η_{CO2} : wirksamer Anteil des Volumenstroms zur CO_2 Reduzierung; η_{aero} : wirksamer Anteil des Volumenstroms zur Aerosol Reduzierung; η_{haube}: Haubeneffekt des MPIC-Systems wirkt auf die Emmisionsstärke E; η_{quell} : Quellufteffekt erhöht den wirksamen Volumenstroms durch Ausnutzung von vertikalen Stoffgradienten; $\lambda_{eff,aero}$: effektive kontinuierliche Luftwechselrate bzgl. Aerosol inklusive Leckrate, etwaige Filtereffizienzen und Viruslebensdauer; $\lambda_{eff,CO2}$: effektive kontinuierliche Luftwechselrate bzgl. CO_2 inklusive Leckrate; λvent: Luftwechselrate durch Stoßlüften wird während der großen und der zusätzlichen kleinen Pausen (N_{vent}) zur effektiven kontinuierlichen Luftwechselrate hinzuaddiert; N_{vent}: Anzahl der Stoßlüftpausen pro Doppelstunde (jeweils für 5 Minuten) zusätzlich zur großen Pause.*

Bezeichnung	$Q_{i,kont.}$ (m³/h)	η_{CO2} (%)	η_{aero} (%)	η_{haube} (%)	η_{quell} (%)	$\lambda_{eff,aero}$ (1/h)	$\lambda_{eff,CO2}$ (1/h)	λ_{vent} (1/h)	N_{vent}
Mischlüftung[a]	870	79 .. 100	75 .. 100	0	0	4,2 .. 5,3	3,7 .. 4,7	0	0
Quellüftung + Filterung[c]	800	38 .. 48	75 .. 95	0	25 .. 50	4,6 .. 6,6	2,2 .. 3,2	0 .. 30	0 .. 1
UV-C Luftreiniger[b]	800	0	74 .. 94	0	0	3,9 .. 4,7	0,3	6 .. 30	1 .. 3
Filter Luftreiniger[d]	1200	0	75 .. 95	0	0	5,4 .. 6,6	0,3	6 .. 30	1 .. 3
Stoßlüften reguläre Pausen[e,i]	0	100	100	0	0	0,9	0,3	6 .. 30	1,00
Stoßlüften UBA-Empfehlung[e,i,j]	0	100	100	0	0	0,9	0,3	6 .. 30	3
Stoßlüften CO2-Monitor[e,h]	0	0	0	0	0	0,9	0,3	6 .. 30	(5 .. 12)
Dauerlüften Kippfenster[e,g]	430 .. 860	100	100	0	25 .. 50	3,6 .. 7,4	3 .. 6,8	0	0
FLS Abluft-Ventilator[f]	800 .. 1200	100	100	0	25 .. 50	5,9 .. 9,9	5,3 .. 9,3	0	0
FLS verteilte Absaugung[f]	800	100	100	30 .. 60	25 .. 50	8 .. 15,9	7,4 .. 15,3	0	0
Stoßlüften nur in großen Pausen[e]	0	100	100	0	0	0,9	0,3	6 .. 30	0

a) Mischlüftung: Analog zu einem LTM dezent® 800 topline GIT (Tecalor GmbH 2021).
b) UV-C Luftreiniger: Analog zu zwei Geräten der Art Soluva® Air W (Heraeus Noblelight GmbH 2021)
c) Filter Luftreiniger: Analog zu einem Hochleistungsluftreiniger TAC V+ (Kähler et al. 2020; Trotec GmbH 2021). Bzw. etwa 5 Stück Philips 2887/10 (Curtius et al. 2021; Philips GmbH Market DACH 2021)
d) Quelllüftung + Filterung: Analog zu einem Kompakt-Lüftungssystem Vitovent 200-P (Viessmann Climate Solutions SE 2021).
e) Luftwechselraten bei Stoß und Dauerlüftung nach (British Standards Institution und British Standards Institution 1991; Erhart et al. 2015; Müller et al. 2020; Steffens und Seipp 2021b). Günstiger Fall 30/h ungünstiger Fall 6/h.
f) Abluft-Ventilator für FLS: Analog zu einem Lüfter der Serie W3G300 oder W3G350 (ebm-papst GmbH 2021a, 2021b), bodennahe Zuluftführung.
g) Dauerlüften mit zwei Kippfensterpaare aus je einem niedrigen und einem hohen Kippfenster bei 15 K bzw 4 K Temperaturunterschied nach draußen.
h) Stoßlüftung sobald die mittlere CO_2-Konzentration im Raum 950 ppm überschreitet bis ein Wert von 560 ppm (80% Reduktion) erreicht wird oder 5min verstrichen sind
i) Stoßlüftung für die 15 min der großen Pausen und für die 5 min der kleinen Pausen
j) Zusätzlich Stoßlüftung in jeder Schulstunde für 5 min nach 20 min Unterrricht.

Tabelle 1: Ergebnisse der Modellrechnungen. *$n_V/n_{V,ref}$: relative inhalierte Dosis am Ende der simulierten Zeit, Referenz ist die Mischlüftung; max. $c_{CO2,max}$: maximale CO_2-Konzentration im Raum während der Simulation; F: Verbesserungsfaktor gegenüber Mischlüftung mit Effizienz = 1; R: Reduktion der Gesamtdosis gegenüber Stoßlüften bei ungünstigen Bedingungen nach jeder Schulstunde. Zuerst werden die Ergebnisse für günstige Bedingungen und per Semikolon getrennt für ungünstige Bedingungen genannt.*

					Zeitanteile (%)				
	$n_V/n_{V,ref}$ (%)	$c_{CO2,max}$ (ppm)	F	R (%)	unter 800	800 bis 1000	1000 bis 1400	1400 bis 2000	über 2000
Mischlüftung	100 ; 124	990 ; 1132	2,8 ; 2,3	64 ; 56	17 ; 10	83 ; 18	0 ; 72	0	0
Quelllüftung mit Filterung	71 ; 112	1195 ; 1634	3,9 ; 2,5	75 ; 60	31 ; 3	23 ; 2	46 ; 28	0 ; 67	0
UV-C-Luftreiniger	66 ; 118	1413 ; 3441	4,2 ; 2,4	76 ; 58	41 ; 3	21 ; 2	37 ; 12	2 ; 22	0 ; 61
Filter-Luftreiniger	55 ; 91	1413 ; 3441	5,1 ; 3,1	80 ; 67	41 ; 3	21 ; 2	37 ; 12	2 ; 22	0 ; 61
Stoßlüften nach jeder Schulstunde	188 ; 279	2372 ; 3441	1,5 ; 1	33 ; 0	20 ; 3	11 ; 2	21 ; 12	31 ; 22	18 ; 61
Stoßlüften nach UBA-Empfehlung	103 ; 216	1413 ; 2419	2,7 ; 1,3	63 ; 23	41 ; 3	21 ; 7	37 ; 17	2 ; 50	0 ; 24
Stoßlüften nach CO2-Monitor	63 ; 98	976 ; 992	4,5 ; 2,8	78 ; 65	76 ; 15	24 ; 86	0	0	0
Dauerlüften über Kippfenster	73 ; 142	810 ; 1310	3,8 ; 2	74 ; 49	39 ; 4	61 ; 13	0 ; 84	0	0
FLS Abluft-Ventilator	55 ; 90	700 ; 919	5 ; 3,1	80 ; 68	100 ; 21	0 ; 79	0	0	0
FLS verteilte Absaugung	31 ; 63	581 ; 767	9 ; 4,4	89 ; 77	100 ; 100	0	0	0	0
Stoßlüften nur in großen Pausen	302 ; 334	3814 ; 4307	0,9 ; 0,8	-8 ; -20	15 ; 3	5 ; 2	10 ; 9	15 ; 17	55 ; 70

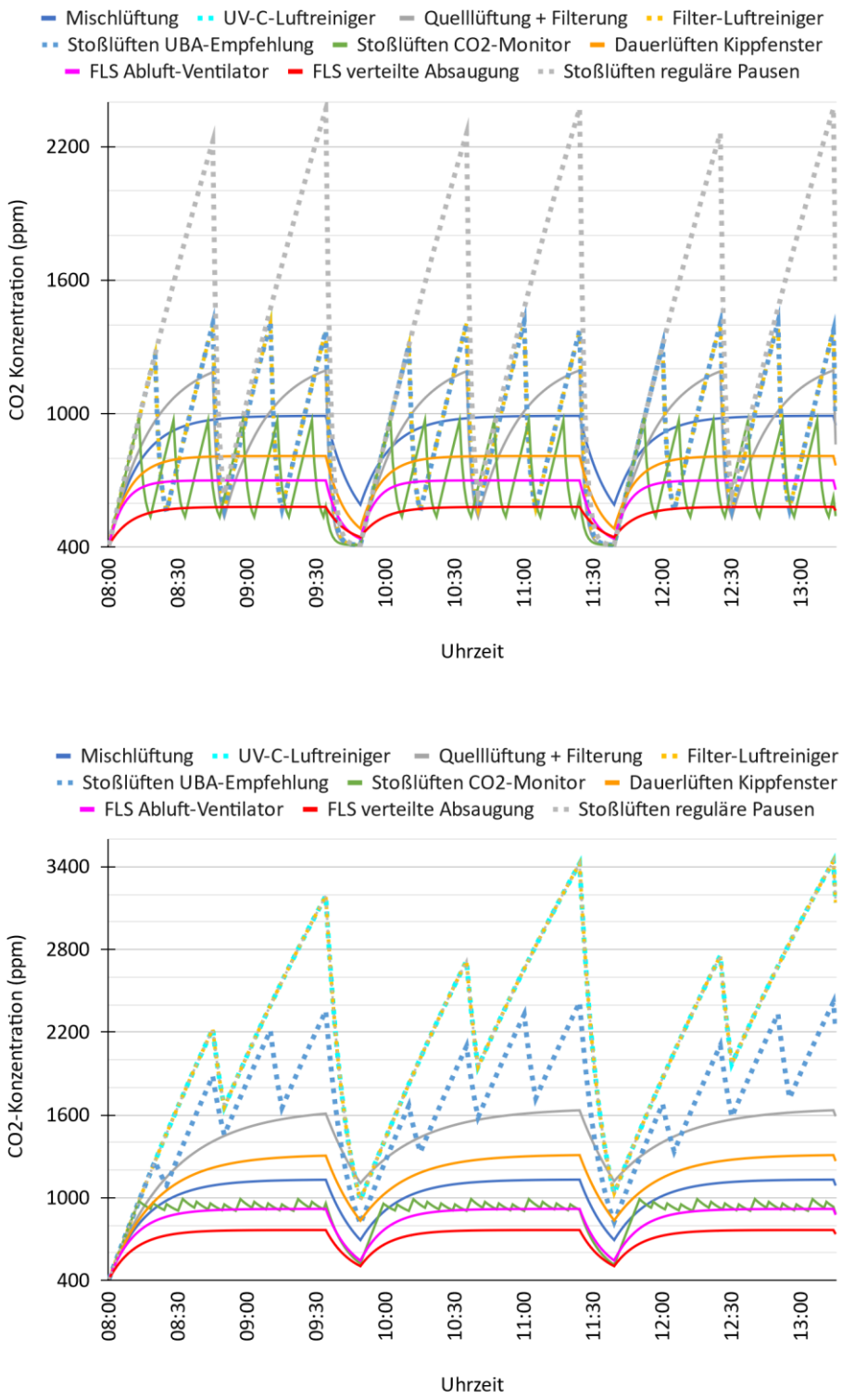


Abbildung 1: *Zeitlicher Verlauf der CO_2-Konzentration in dem betrachteten Klassenraum bei Anwendung verschiedener Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (a) oder unter ungünstigen Bedingungen (b) (Tabelle 1, Anhang A.2).*

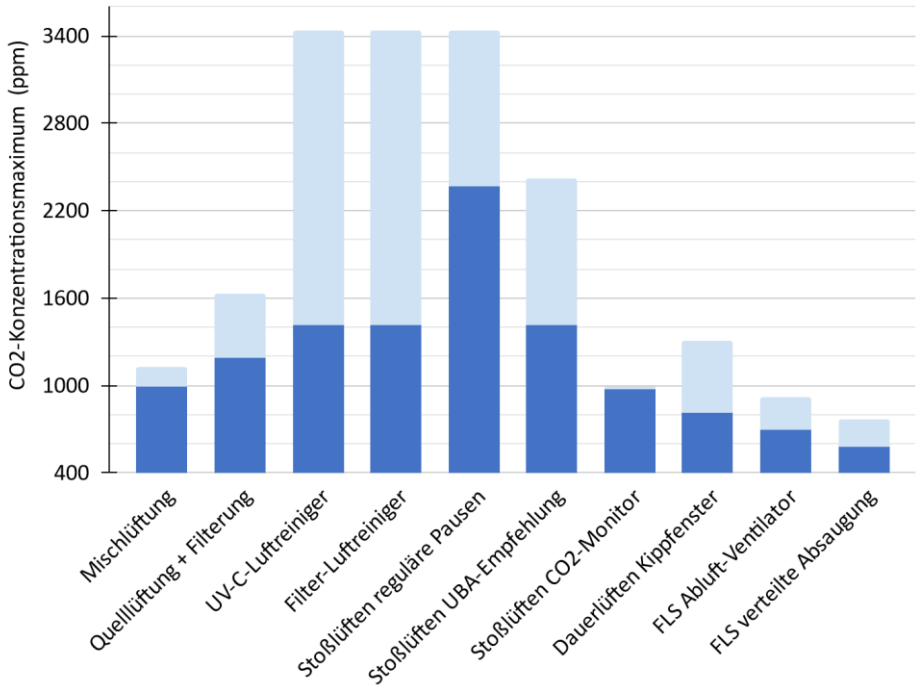


Abbildung 2: *Maximale CO_2-Konzentration in dem betrachteten Klassenraum bei Anwendung verschiedener Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (dunkelblau) oder unter ungünstigen Bedingungen (hellblau) (Tabelle 1, Anhang A.2).*

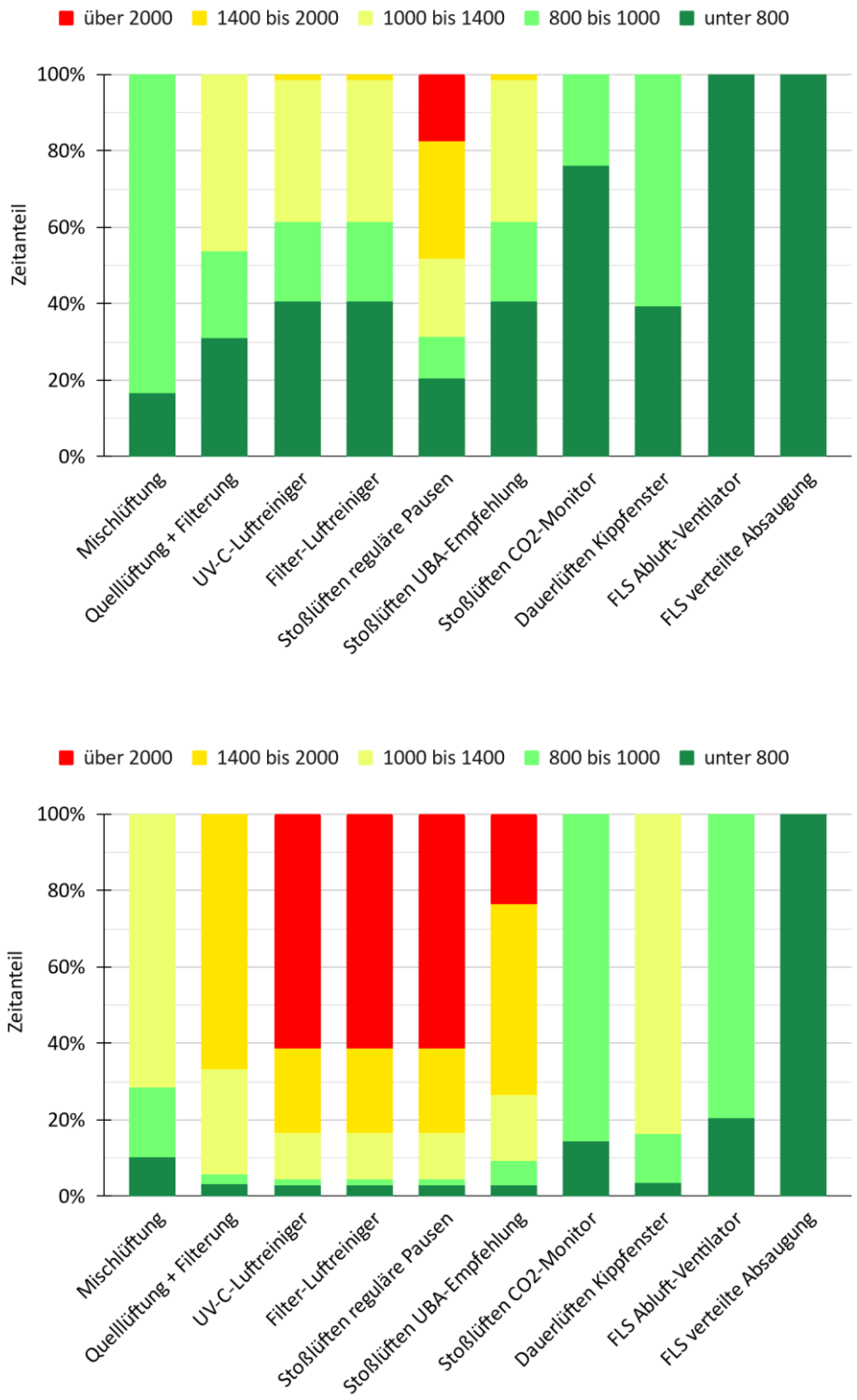
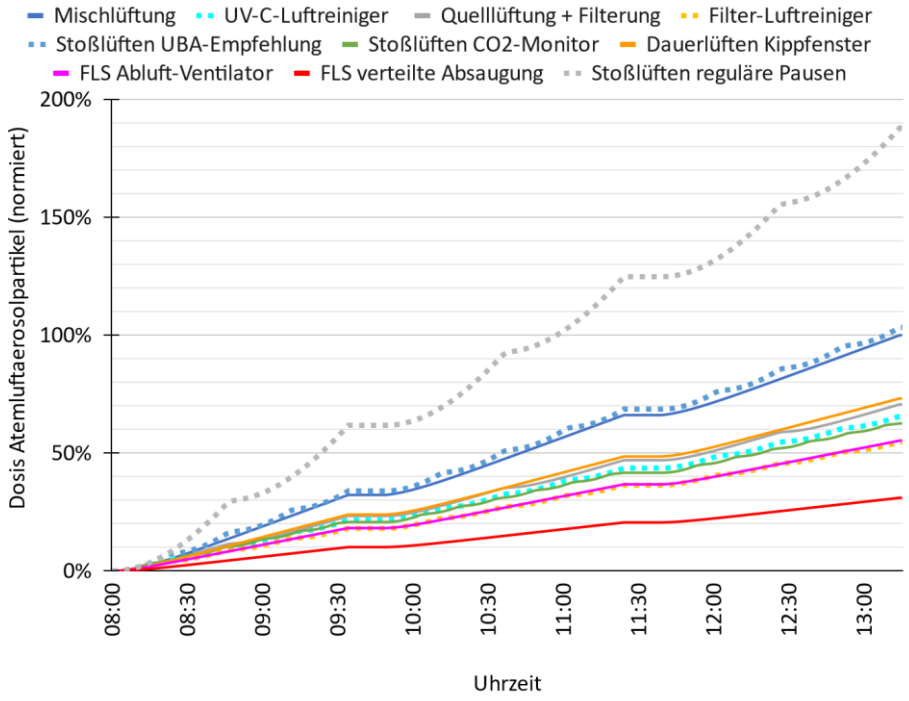


Abbildung 3: *Klassifizierung der Luftqualität nach Zeitanteilen (%) verschiedener CO_2-Konzentrationsbereiche in dem betrachteten Klassenraum unter günstigen Bedingungen (a) oder unter ungünstigen Bedingungen (b) (Tabelle 1, Anhang A.2): unbedenklich (<1000 ppm, grün), auffällig (1000-2000 ppm, gelb) und inakzeptabel (>2000 ppm rot) gemäß Einteilung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2008b). Die Schattierung (hell/dunkel) bezieht sich auf weitere gebräuchliche Kategorien für Raumluftqualität: hoch <800 ppm, mittel 800-1000 ppm, mäßig 1000-1400 ppm, niedrig >1400 (DIN EN 13779 2007).*



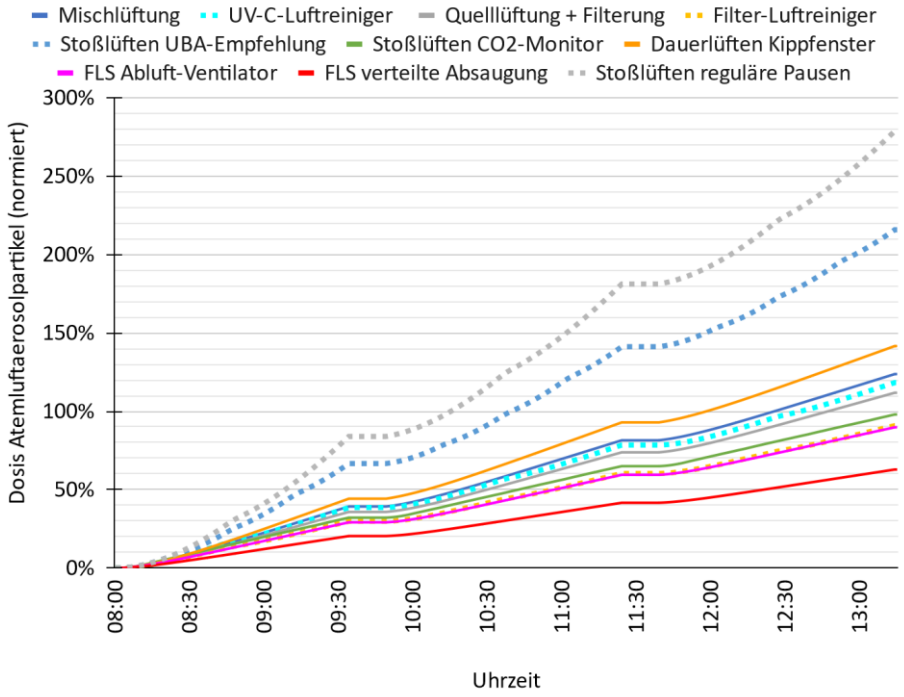


Abbildung 4: *Zeitliche Zunahme der Dosis an Atemluftaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedener Lüftungsmethoden jeweils unter günstigen Bedingungen (a) oder unter ungünstigen Bedingungen (b) eingesetzt werden (Tabelle A.1, Anhang A.3). Die Ergebnisse sind normiert auf einen Referenzwert von 100% für die maschinelle Mischlüftung nach Müller et al. (Müller u. a. 2020) unter günstigen Bedingungen.*

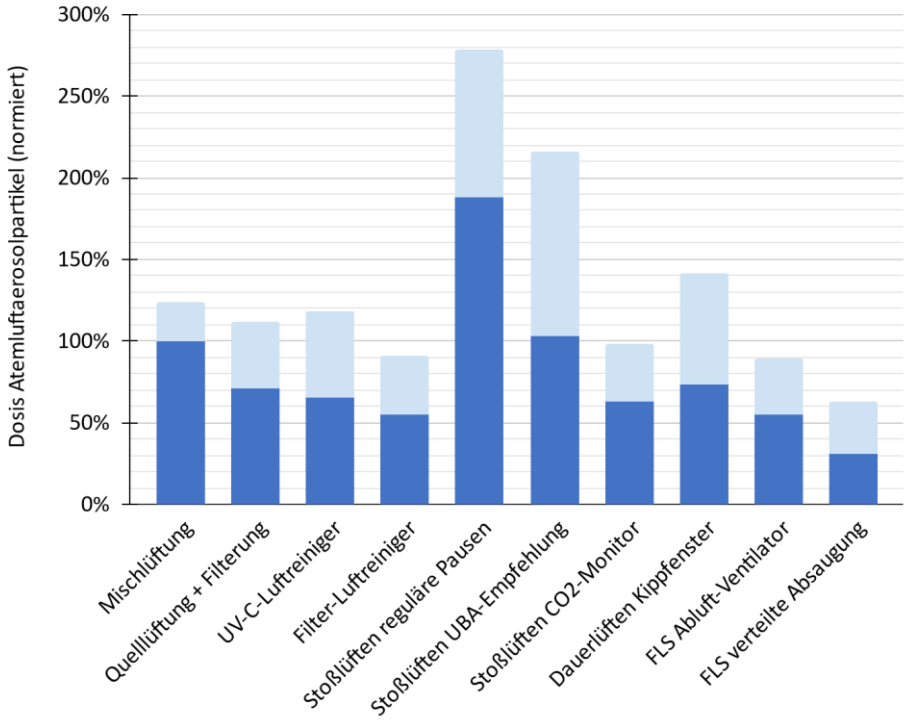


Abbildung 5: *Gesamtdosis an Atemluftaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedene Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (dunkelblau) oder unter ungünstigen Bedingungen (hellblau) eingesetzt werden (Tabelle 1, Anhang A.2). Die Ergebnisse sind normiert auf einen Referenzwert von 100% für die maschinelle Mischlüftung nach Müller et al. (Müller u. a. 2020) unter günstigen Bedingungen.*

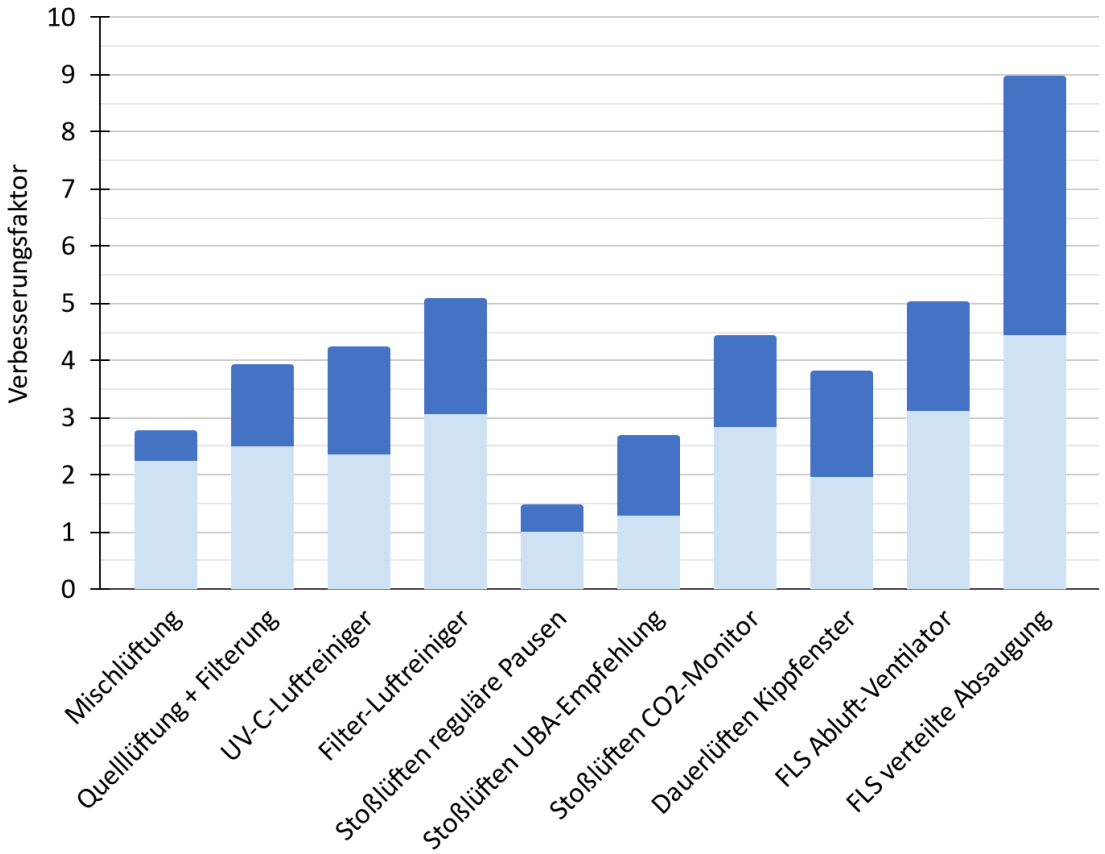


Abbildung 6: *Verbesserungsfaktoren bezüglich der Dosis an Atemluftaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedener Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (dunkelblau) oder unter ungünstigen Bedingungen (hellblau) eingesetzt werden (Tabelle 1, Anhang A.2). Die Ergebnisse sind normiert auf einen Referenzwert von 1 für Stoßlüften in den Pausen nach jeder Schulstunde unter ungünstigen Bedingungen.*

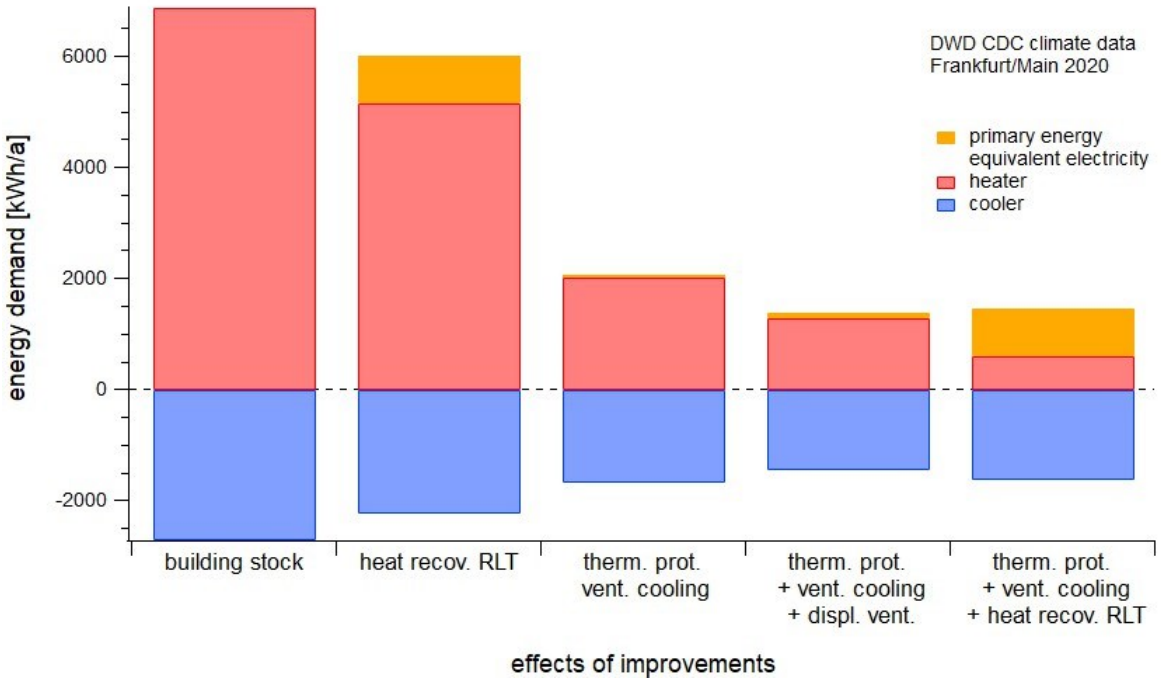


Abbildung A1: *Einfluss verschiedener Sanierungsmaßnahmen auf den Heiz- und Kühlenergiebilanz eines Klassenraumes (energy demand, kWh/a): Baubestand (building stock), Wärmerückgewinnung durch Raumlufttechnik (heat recov. RLT), thermische Isolierung, Lüftungskühlung, Verdrängungslüftung (therm. prot., vent. cooling, displ. vent.). Primärenergiebedarf gerechnet als elektrische Energie (primary energy equivalent electricity), Heizenergiebedarf (heater), Kühlenergiebedarf (cooler).*

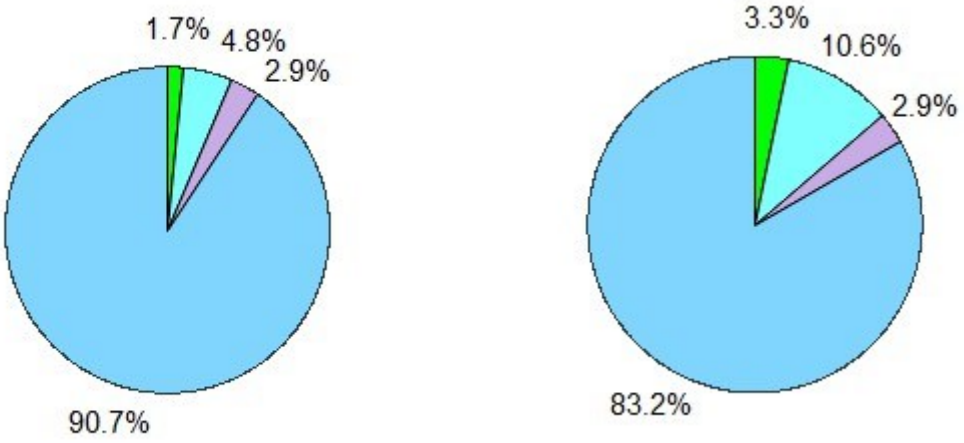


Abbildung A2: *Beiträge zur Befeuchtung der Atemluft von Personen in einem Klassenraum bei Betrieb von Raumlufttechnik mit aktiver Befeuchtung. Links: Kat 2 Raum, Auslegungsfeuchte 25% RH; rechts: „höchster Komfort", Auslegungsfeuchte 45% RH. grün: RLT, hellblau: Außenluft, violett: Atem & Transpiration, dunkelblau: Schleimhäute.*

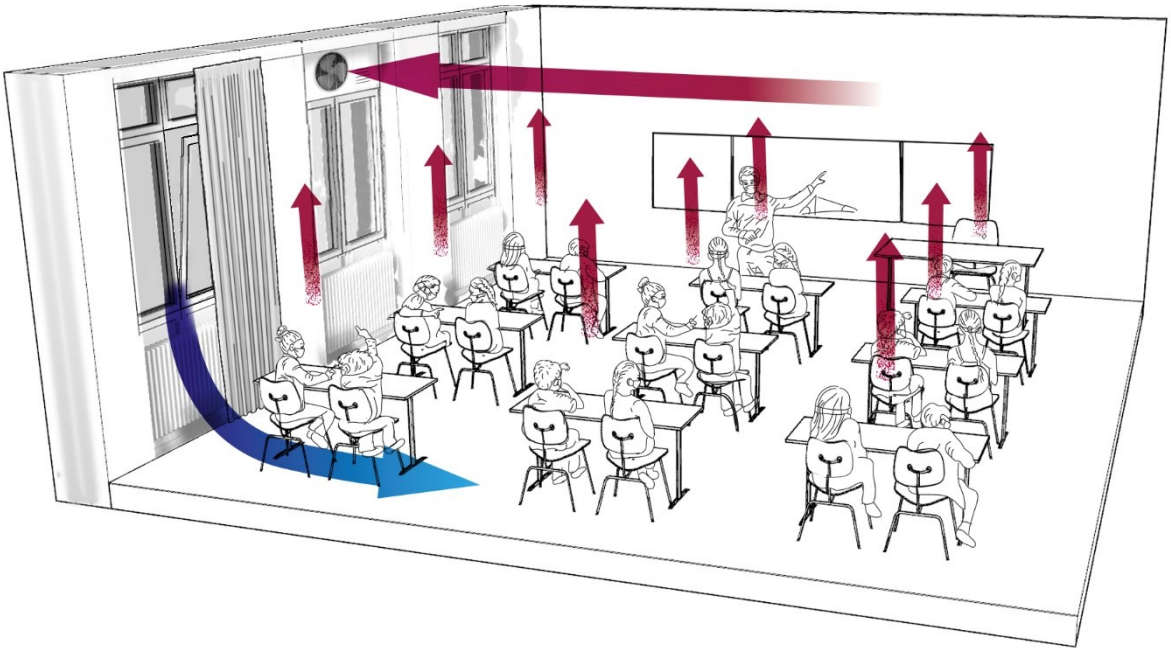


***Abbildung A3**: Schematische Darstellung eines Fensterlüftungssystems mit einfachem Abluftventilator und bodennaher Zuluft (ventilation-mainz.de).*

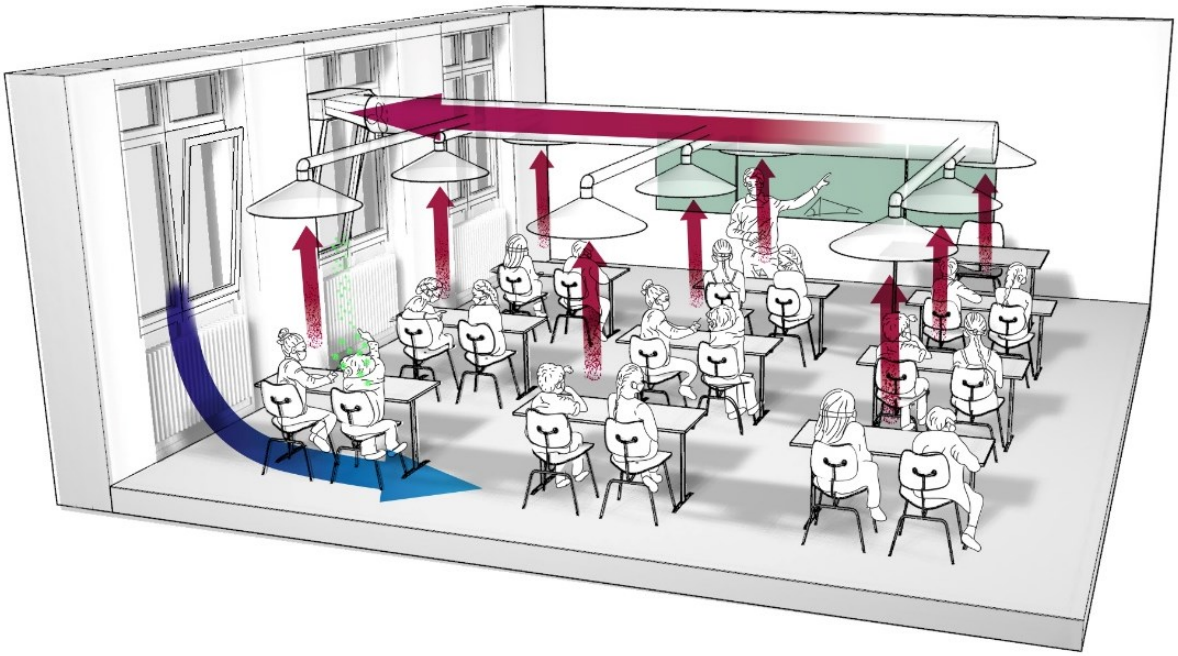


***Abbildung A4:** Schematische Darstellung eines Fensterlüftungssystems mit verteilter Abluftabsaugung und bodennaher Zuluft (MPIC-FLS, ventilation-mainz.de).*

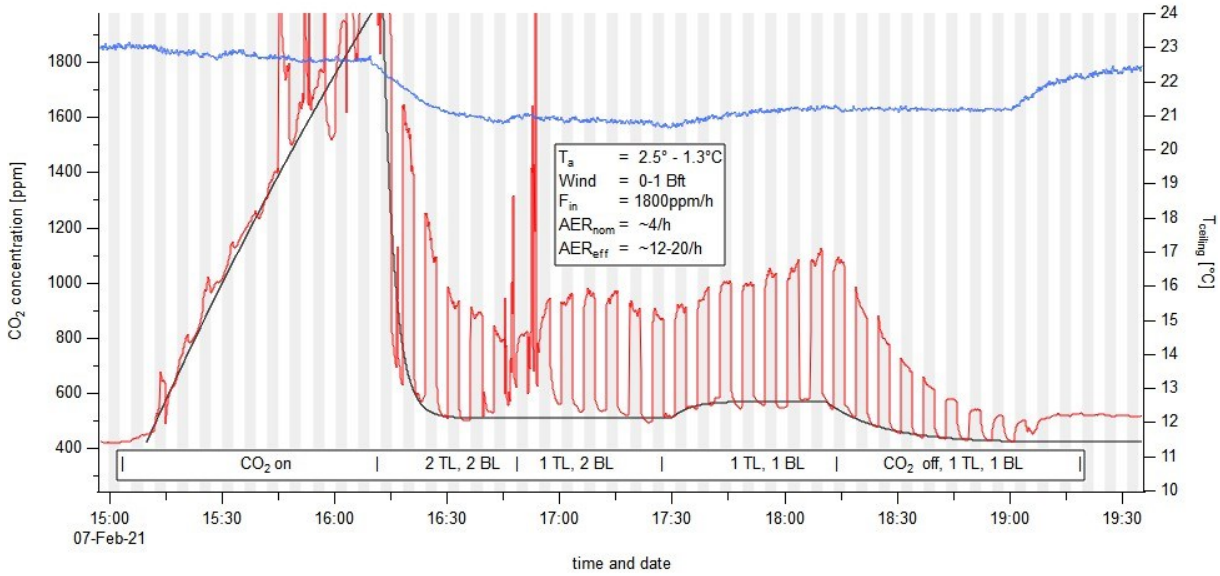


***Abbildung A5**: Fensterlüftung mit bodennahem Frischlufteinlass (Quellluft) ohne Hauben, äquivalent zu einfachem FLS bzw. Dauerlüften durch Kippfenster. Schattierte Bereiche zeigen Messwerte in Deckenhöhe, nicht schattierte Bereiche zeigen Messwerte auf Tischhöhe. Aufgrund der niedrigen Außentemperaturen wurden auch ohne Ventilator ausreichend hohe nominelle Luftwechselraten erzielt (Helleis und Klimach 2021)*

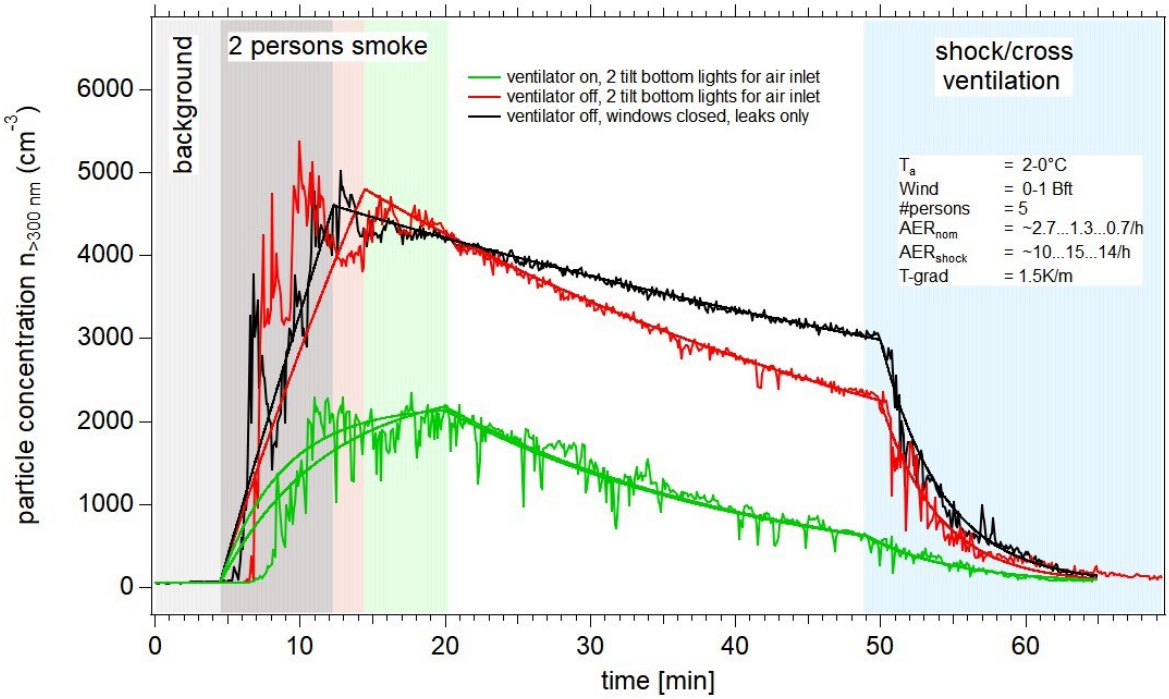


***Abbildung A6**: Fensterlüftungssystem mit verteilter Abluftabsaugung und Hauben bei geringem Quellluftteffekt (Helleis und Klimach 2021).*