

Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden für Klassenräume: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumluftechnik und Luftreiniger

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

27. September 2023, Version 3.1

Kurzfassung

Diese Studie vergleicht die Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz in Klassenräumen. Die Ergebnisse können analog auch auf andere Innenräume übertragen werden, deren Lüftungsbedarf im Wesentlichen durch die anwesenden Personen bestimmt wird (z.B. Aufenthalts- und Seminarräume, Büros und Warteräume in Bildungs- und Bürogebäuden, Seniorenheimen, Arztpraxen etc.).

In Übereinstimmung mit gültigen Arbeitsschutzregeln und naturwissenschaftlich-technischem Lehrbuchwissen zeigen wir, dass Fensterlüften ergänzt durch einfache technische Hilfsmittel sehr wirksam ist - auch im Vergleich zu konventionellen raumluftechnischen Anlagen sowie zu filter- oder UV-strahlungsbasierten Luftreinigern. Besonders effizient ist eine kontinuierliche Verdrängungslüftung (Quelllüftung) mit bodennaher Frischluftzufuhr und verteilter Abluftabsaugung über potentiell infektiösen Personen.

Natürliches bzw. freies Fensterlüften funktioniert gut bei Außentemperaturen unter 15°C, kann jedoch bei höheren Temperaturen unzureichende Luftwechselraten und bei niedrigen Temperaturen unnötig hohe Wärmeverluste verursachen, wenn der Zuluftvolumenstrom nicht aktiv kontrolliert wird. Hybride Lüftungsansätze aus kontinuierlichem Fensterlüften (Kipplüftung) kombiniert mit geregelten Ventilatoren (Ventilator-Fensterlüften) können einen konstanten bzw. angemessenen Luftaustausch ganzjährig und effizient sicherstellen, wodurch sowohl unzureichendes Stoßlüften bei hohen Außentemperaturen als auch übermäßig intensives Stoßlüften und unnötig hohe Energieverluste bei niedrigen Außentemperaturen vermeidbar sind.

Raumluftechnik (RLT) mit Wärmerückgewinnung (WRG) und Feuchterückgewinnung bringt unter mittleren deutschen Klimabedingungen kaum Vorteile für den Primärenergiebedarf und die Raumfeuchte in Schulklassen. Wärmetauscher und sonstige technische Komponenten für die Rückgewinnung erhöhen Stromverbrauch und Wartungsaufwand, und können zu hygienischen Problemen führen, was durch Monitoring-Studien im realen Schulbetrieb belegt ist. Eine umfassende Analyse der vorliegenden experimentellen und theoretischen Untersuchungen zeigt für Schulen unter den für Deutschland charakteristischen Betriebsbedingungen, dass der Primärenergieverbrauch und die Treibhausgasemissionen bei der Lüftung mit RLT-Anlagen trotz WRG höher sind als bei CO₂-geführter Fensterlüftung mit Unterstützung durch einfache technische Hilfsmittel wie Ventilatoren. Der Einsatz von RLT/WRG erscheint nur dort zweckmäßig, wo Frischluft in ausreichender Qualität und Menge nicht durch Fenster zugeführt und durch vorhandene Heizungsanlagen angemessen temperiert werden kann, beispielsweise bei starker Schadstoff- und Lärmbelastung der Umgebung oder in thermischen Extremlagen (z.B. an sehr verkehrsreichen Straßen oder in Bergregionen).

Kohlendioxid-Monitore können eingesetzt werden, um den Lüftungserfolg zu überwachen und ein dauerhaftes Überschreiten von CO₂-Leitwerten zu vermeiden. Im Vergleich zu Luftreinigern sind Lüftungsmethoden mit Frischluftzufuhr effizienter und nachhaltiger; zudem kann ihre Wirkung mittels CO₂-Monitor besser kontrolliert werden. Der Einsatz von Luftreinigern erscheint nur dort zweckmäßig, wo ausreichende Frischluftzufuhr nicht möglich ist. Wir erläutern auch, wie stark der Heizenergieverbrauch vom jeweiligen CO₂-Zielwert abhängt. Bei Energieknappheit kann eine leichte Erhöhung des CO₂-Zielwerts zu substantiellen Energieeinsparungen führen. Bei Erhöhung von 1000 ppm auf 1200 ppm verringert sich der zusätzliche Heizenergiebedarf zum Erwärmen der Zuluft beispielsweise um etwa einen Faktor Drei.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass kontinuierliches Fensterlüften mit einfachen technischen Hilfsmitteln wie Abluftventilatoren und CO₂-Monitoren 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. Nach der COVID-19-Pandemie können diese Hilfsmittel flexibel und modular weiter für CO₂-geführtes Fensterlüften genutzt werden, welches zuverlässig frische Luft in Schulen bringt – energiesparend, ressourcenschonend und klimafreundlich.

1. Einleitung

Wirksames Lüften kann eine wichtige Rolle zur Verringerung von Stofflasten und Infektionsrisiken in Innenräumen spielen (FGK 2021; Morawska et al. 2020, 2021; WHO 2021; Lelieveld et al. 2020a; Prather et al. 2020; Umweltbundesamt 2020a).

Damit stellt sich die Frage, wie effizient konventionelle Raumlufttechnik und raumlufttechnische Nachrüstlösungen wie mobile Luftfiltergeräte, UV-C-Desinfektionsgeräte, dezentrale Lüftungsgeräte im Vergleich zum einfachen Fensterlüften oder Ventilator-Fensterlüften wirken. Die aktuelle VDI-Richtlinie definiert normgerechte Geräte durch die Anforderung, „die Konzentration infektiösen Aerosols bei bestimmungsgemäßem Gebrauch innerhalb von 30 min um 90% zu reduzieren“ (VDI 4300-14 2021). Das VDI-Testverfahren berücksichtigt jedoch nicht, dass anwesende Personen kontinuierlich potentiell infektiöse Atemaerosole in die Raumluft abgeben. Daher ist die Verringerung von Infektionsrisiken durch VDI-normgerechte Luftreiniger in der realen Anwendung weitaus geringer als 90% (eher wenige Dutzend Prozent: Abb. A10). Realistische Kennzahlen zum Vergleich von Luftreinigern mit anderen Lüftungsmethoden und ihrer Auswirkung auf das Infektionsrisiko in Innenräumen sind in Abschnitt 3 zu finden.

Entscheidend für das Risiko einer indirekten Infektion durch Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen ist der zeitliche Verlauf der Konzentration potentiell infektiöser Atemaerosolpartikel in der Raumluft. Daraus lässt sich die Dosis potentiell infektiöser Atemaerosolpartikel, die von Personen im Raum inhaliert werden, und das damit verbundene Infektionsrisiko ermitteln (siehe Anhang A.1) (Peng et al. 2022; Cheng et al. 2021; Curtius et al. 2021; Kriegel and Hartmann 2021; Pöhlker et al. 2021; Su et al. 2021; Lelieveld et al. 2020a).

Geeignete Lüftungsmethoden können die durchschnittliche Belastung der Raumluft mit Atemaerosolpartikeln und damit verbundene indirekte Infektionsrisiken wirksam reduzieren. Im schulischen Umfeld sind jedoch auch direkte Infektionen in unmittelbarer Nähe zu einer infektiösen Person von Bedeutung (Lam-Hine 2021; Moriske et al. 2021). Diese werden durch Lüftungsmaßnahmen nicht wesentlich reduziert und in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Gegen direkte Infektionen hilft Abstand halten und das konsequente Tragen von Masken, welches

durch Lüftungsmaßnahmen ergänzt aber nicht ersetzt werden kann (Cheng et al. 2021; Klimach et al. 2021; Moriske et al. 2021; MPIC-Mainz 2021; Pöhlker et al. 2021; Pöschl and Witt 2021; Su et al. 2021; Lelieveld et al. 2020a).

Neben dem Infektionsschutz sind weitere Anforderungen an die Innenraumluftqualität zu beachten, insbesondere eine Begrenzung der CO₂-Konzentration nach den geltenden technischen Regeln für Arbeitsstätten (BAUA ASR A3.6 2012; Umweltbundesamt 2008a). Zudem kann die CO₂-Konzentration unter gewissen Annahmen und vergleichbaren Voraussetzungen als Indikator für indirekte Infektionsrisiken durch Aerosolübertragung dienen (Peng and Jimenez 2021). Daher vergleichen wir verschiedene Lüftungs- bzw. Luftreinigungsansätze hinsichtlich Infektionsschutz und CO₂-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 CO₂-Gehalt der Ausatemluft beträgt etwa 4,0% (40.000 ppm) (Klinke and Silbernagl 2001). Die Gleichungen und Methoden zur Berechnung der CO₂-Konzentration sowie der Dosis potentiell infektiöser Atemaerosolpartikel, 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 Lüftungsperioden 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 2020c, 2020b); (c) Stoßlüften nach CO₂-Monitor immer wenn die CO₂-Konzentration auf den Leitwert von 1000 ppm oder einen anderen Vorgabewert ansteigt; (d) Dauerlüften über Kippfenster mit Volumenströmen und Luftwechselraten basierend auf Literaturdaten und eigenen Messungen (Tab. 1; Anhang A.3, (Helleis and Klimach 2021a; Erhart et al. 2015; British Standards Institution 1991). Für ungünstige Bedingungen empfiehlt auch das UBA, die Anzahl bzw. Dauer der Lüftungsperioden zu erhöhen oder einen CO₂-Monitor zu nutzen

(Umweltbundesamt 2020c, 2020b). In diesem Fall würde die UBA-Empfehlung zu Ergebnissen ähnlich der Lüftung nach CO₂-Monitor führen.

Ventilator-Fensterlüften: (a) Fensterlüftungssysteme (FLS) mit einfachem Abluftventilator in Deckennähe; (b) FLS mit verteilten Abzugshauben entwickelt am Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC, (Helleis and Klimach 2021a; Klimach and Helleis 2021; Klimach et al. 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). Weitere FLS-Varianten bzw. modulare Zwischenausbaustufen wurden von Klimach et al. 2021 beschrieben und liegen bezüglich ihrer Wirksamkeit zwischen den zwei oben genannten FLS-Varianten liegen (Klimach et al. 2021; MPIC-Mainz 2021). Zur Sicherstellung des nötigen Luftvolumenstroms reicht üblicherweise ein Abluftventilator; bei Bedarf nach Schalldämpfung und Filterung der Außenluft könnte stattdessen ein Zuluftventilator eingesetzt werden.

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

Luftreiniger: (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 2021a), um empfohlene CO₂ Konzentrationen nicht zu überschreiten (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); die CO₂-Konzentrationsvorgabe (Obergrenze) beim Lüften nach CO₂-Monitor; den wirksamen Volumenstrom bei Lüftungs- und Luftreinigungsgeräten wegen der Einflüsse von Aufstellort, den Raumgegebenheiten und Geräteeigenheiten; den Quelllufteffekt 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 Raumlufte; 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.

Für diese Studie verwenden wir beispielhaft die Kenngrößen einiger Geräte, die von ihren Herstellern für Klassenräume empfohlen wurden (Tab. 1, Anhänge A.2 und A.3). Dabei verwenden wir jeweils die maximal angegebenen Volumenflüsse, um den bestmöglichen Infektionsschutz zu erreichen. Solch hohe Volumenflüsse führen üblicherweise zu einer erhöhten Lärmbelastung, die

gegebenenfalls durch den Einsatz zusätzlicher Geräte mit geringeren Flüssen verringert werden könnte, was allerdings wiederum mit erhöhtem Aufwand und Kosten verbunden wäre (Curtius et al. 2021; Steffens and Seipp 2021a; Kähler et al. 2020). Selbstverständlich gibt es auch Lüftungsgeräte mit anderen Kenngrößen, die in unterschiedlichsten Kombinationen und Betriebszuständen zum Einsatz kommen können. Um auch andere Geräte, Kombinationen und Kenngrößen zu überprüfen, stellen wir online das Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung, welches für die Vergleichsstudie entwickelt und genutzt wurde ((Klimach 2021a); <https://bit.ly/3xfmz>).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1. Kohlendioxid

Kohlendioxid (CO₂) wird oft als Marker für die Luftqualität in Innenräumen verwendet (BAUA ASR A3.6 2012; Umweltbundesamt 2008a), und kann unter gewissen Annahmen auch als Indikator für das COVID-19-Infektionsrisiko verwendet werden (Morawska et al. 2021; Peng and Jimenez 2021). Die CO₂-Konzentration zeigt näherungsweise an, wie stark die Raumluft bereits mit veratmeter Luft und darin enthaltenen Stoffen wie z.B. Atemaerosolpartikeln belastet ist. Kohlendioxid ist aber kein allgemeiner Marker für die Konzentration von Schadstoffen, die von der Bausubstanz oder vom Mobiliar emittiert werden (Anhang A.9).

In frischer Außenluft liegt die CO₂-Konzentration bei etwa 410 ppm (NOAA 2021; Umweltbundesamt 2021b), und die Zunahme in Klassenräumen ist normalerweise hauptsächlich auf die Atmung der darin befindlichen Personen zurückzuführen (BAUA ASR A3.6 2012; Umweltbundesamt 2008a).

Abbildung 1 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO₂-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 Mittelwerte und Maximalwerte der CO₂-Konzentration sind in Abbildung 2 zusammengefasst.

Abbildung 3 zeigt die hygienische Bewertung der CO₂ Konzentration in der Raumluft nach Zeitanteilen verschiedener CO₂-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 die normative Klassifizierung der Raumluftqualität nach der 2019 zurückgezogenen bei CO₂-Ampeln aber weiterhin gebräuchlichen Norm EN 13779: 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 (Schibuola et al. 2016; Steiger and Hellwig 2011; Fromme et al. 2008; Umweltbundesamt 2008b; Grams et al. 2003).

Ein CO₂-Leitwert von 1000 ppm (Pettenkofer-Zahl; (BAUA ASR A3.6 2012; Umweltbundesamt 2008b; von Pettenkofer 1858)) wird nur bei Lüftungsmethoden mit ausreichend starker kontinuierlicher Frischluftzufuhr durchgehend eingehalten sowie bei häufigem bzw. langem Stoßlüften mit CO₂-Monitor.

Ventilator-Fensterlüften: Das am MPIC entwickelte FLS mit verteilten Abzugshauben und bodennaher Frischluftzufuhr bleibt durch Ausnutzung von Quellluft- und Haubeneffekten

(Direktabsaugung) deutlich unter dem Leitwert von 1000 ppm, obwohl der Luftdurchsatz und damit auch der Energieverbrauch vergleichsweise gering ist (Tab. 1, Abschnitt 3, Abb. A11, (Helleis 2021; Helleis et al. 2021)). Je nach Stärke der Quellluft- und Haubeneffekte liegen die erwartbaren CO₂-Konzentrationen bei rund 600-800 ppm (Abb. 2). Auch das Fensterlüftungssystem mit einem einfachen Abluftventilator erzielt sehr gute Ergebnisse mit CO₂-Konzentrationen bei rund 700-900 ppm je nach Stärke des Quelllufteffekts (Abb. 2). Dementsprechend halten beide Methoden bereits ohne Stoßlüften auch unter ungünstigen Bedingungen die normative Luftqualität durchgehend im grünen Bereich (Abb. 3). Für FLS mit verteilten Abluftleitungen aber ohne Abzugshauben (Klimach et al. 2021; MPIC-Mainz 2021) sind Ergebnisse zu erwarten, die zwischen den beiden hier untersuchten Varianten liegen. Insgesamt können Ventilator-Fensterlüftungssysteme die CO₂-Konzentration zuverlässig unter dem Leitwert von 1000 ppm halten. Sie bieten auch Reserven für Klassen, die dichter besetzt oder stärker aktiv sind und mehr Atemluft verbrauchen.

Freies Fensterlüften: Stoßlüften nach Maßgabe eines CO₂-Messgerätes (CO₂-Monitor) kann die CO₂-Konzentration auch unter dem Leitwert halten, erfordert aber speziell bei geringen Temperaturdifferenzen und Windstärken ein häufiges Öffnen der Fenster bzw. lange Lüftungsperioden (Abb. 1b). Dauerlüften mit gekippten Fenstern kann die CO₂-Konzentration bei günstigen Bedingungen ebenfalls unter dem Leitwert halten (bei 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 CO₂-Konzentrationen hingegen deutlich über dem Leitwert (rund 1400-2400 ppm). Wenn nur in den Pausen nach jeder Schulstunde stoßgelüftet wird, liegen die maximalen CO₂-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 CO₂-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). Soll der CO₂-Leitwert von 1000 ppm nicht überschritten werden, wie auch in den Regeln der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin gefordert (BAUA ASR A3.6 2012), so kann dies über CO₂-geführte Stoßlüftung erreicht werden (Abb. 1). Im Gegensatz zu weit verbreiteten Missverständnissen führt Stoßlüften im Vergleich zu Dauerlüften nicht zwangsläufig zu einer Einsparung von Heizenergie. Bei Einhalten des CO₂-Leitwerts von 1000 ppm bzw. sonstiger Vorgabewerte als feste Obergrenze (Grenzwert) kann Stoßlüften sogar zu höheren Energieverbräuchen führen als Dauerlüften (Abb. A14). Die Eignung von Fenstern und anderen Fassadenöffnungen für die kontinuierliche freie Lüftung von Klassenräumen wurde bereits in früheren umfangreichen Untersuchungen nachgewiesen, die eine Automatisierung der Fensterlüftung in Schulen empfehlen und sowohl vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik als auch vom Fachverband Gebäude-Klima (FGK) unterstützt wurden (Steiger and Hellwig 2011).

Raumlufttechnik (RLT): Bei maschineller Mischlüftung bleibt die CO₂-Konzentration auch ohne Fensterlüften in der Nähe des Leitwerts (rund 1000-1100 ppm, Abb.2) (Müller et al. 2020). 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 normative 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).

Luftreiniger: Die Umluftgeräte können zwar Atemaerosolpartikel entfernen (Filter) bzw. desinfizieren (UV-C), bewirken aber keine Frischluftzufuhr. Daher hängt die normative Luftqualität in Bezug auf CO₂ von der damit kombinierten Fensterlüftung oder sonstigen Lüftungsvarianten ab. Unter günstigen Bedingungen bei Stoßlüften nach UBA-Empfehlung mit hohen Luftwechselraten (Anhang A.2) bleibt die CO₂-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 CO₂-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 Übereinstimmung mit experimentellen Untersuchungen (Schibuola et al. 2016; Steiger and Hellwig 2011; Fromme et al. 2008; Umweltbundesamt 2008b; Grams et al. 2003) verdeutlichen Abbildungen 1 bis 3, dass der seit über 150 Jahren empfohlene Leitwert von 1000 ppm CO₂ für Klassenräume nur mit kontinuierlicher Frischluftzufuhr oder mit häufigem Stoßlüften dauerhaft einzuhalten ist. Mit besonders geringem Aufwand und hoher Zuverlässigkeit wirkt ventilatorgestütztes Fensterlüften.

Die betrachteten marktüblichen Lüftungsgeräte sind weniger effizient, aber das konventionelle Mischlüftungsgerät kann die CO₂-Konzentration zumindest in der Nähe des Leitwertes halten (<1200 ppm). Bei Verwendung von Filter- und UV-C-Luftreiniger kann die CO₂-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.

Unsere Rechenergebnisse und Schlussfolgerungen sind konsistent mit den Messergebnissen einer aktuellen Studie im Großraum München und in Mainz, wo die Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden im realen Schulunterricht in 245 Klassenzimmern an 52 Schulen und insgesamt 37.000 Unterrichtstagen im Schuljahr 2021/22 untersucht und die CO₂-Konzentrationen in der Innenraumluft minutengenau aufgezeichnet wurde (Schwarzbauer 2022). Für alle Methoden lagen die Mittelwerte (Mediane) der CO₂-Konzentration unter dem CO₂-Leitwert von 1000 ppm. Sie waren bei freiem Fensterlüften mit oder ohne mobilen Raumluftreinigern (749 ppm bzw. 764 ppm) niedriger als bei zentraler RLT (776 ppm) und höher als bei Ventilator-Fensterlüften sowie dezentraler RLT (710 ppm bzw. 706 ppm) (Schwarzbauer 2022). Die gemessenen Mittelwerte zeigen, dass alle untersuchten Lüftungsmethoden grundsätzlich geeignet sind die geltenden Richtlinien und Leitwerte für die Innenraumluftthygiene einzuhalten.

Bei freier Fensterlüftung mit und ohne mobile Luftreiniger (Luftfiltergeräte) wurde der CO₂-Leitwert von 1000 ppm in etwa einem Viertel der Unterrichtszeit überschritten, wobei das Ausmaß der Überschreitungen durch eine 95-Perzentilwert von ca. 1500 ppm gekennzeichnet war. Das heißt, nur 5% der Messwerte lagen über 1500 ppm. Bei Klassenräumen mit zentraler RLT waren die Ergebnisse kaum besser als bei freiem Fensterlüften (21% Überschreitungen, 95-Perzentilwert 1353 ppm). Deutlich besser waren die Ergebnisse in Klassenräumen mit Ventilator-Fensterlüftung (16% Überschreitungen, 95-Perzentilwert 1260 ppm) und mit dezentraler RLT (11% Überschreitungen, 95-Perzentilwert 1091 ppm; Schwarzbauer 2022). Bei allen Lüftungsmethoden wurden in der warmen Jahreszeit bessere Ergebnisse bzw. niedrigere CO₂-Konzentrationen erzielt – sowohl bezüglich der Mittelwerte als auch bezüglich der Überschreitungen (Schwarzbauer 2022). Die deutlichste

Verbesserung war bei freier Fensterlüftung festzustellen, was vermutlich auf häufigeres und/oder längeres Lüften bis hin zu Dauerlüften zurückzuführen ist. Die ebenfalls stark ausgeprägte jahreszeitliche Verbesserung bei Klassenräumen mit RLT-Anlagen deutet darauf hin, dass auch in diesen Räumen zusätzliches oder alternatives Fensterlüften zumindest in der warmen Jahreszeit eine große Rolle spielt und von den Nutzern bevorzugt wird, was mit den Ergebnissen früherer experimenteller Studien übereinstimmt (Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Greml et al. 2008; Peper et al. 2007).

Die Überschreitungen des CO₂-Leitwerts im realen Schulunterricht lassen sich wie folgt plausibel erklären: bei freier Fensterlüftung mit oder ohne mobile Luftreiniger wenn die Fenster nicht ausreichend häufig bzw. nicht ausreichend weit geöffnet werden (Stoßlüften/Dauerlüften); bei Ventilator-Fensterlüftung wenn kein Zuluftfenster geöffnet, der Abluftventilator nicht eingeschaltet, oder diese nicht richtig dimensioniert sind; bei zentraler und dezentraler RLT wenn die Anlagen nicht richtig eingestellt bzw. konzipiert sind oder bei Betriebsstörungen (Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Peper et al. 2007). Die tatsächlichen Gründe und Verbesserungsmöglichkeiten wären jeweils im Einzelfall zu prüfen. Dazu zählen beispielsweise: (a) CO₂-Sensoren bzw. -Monitore mit deutlicher Anzeige im Klassenraum (Messwert, Ampelsignal, Handy-Apps) und ggf. zentraler Erfassung (Haustechnik, Schulleitung) zur Überprüfung des Lüftungserfolges unabhängig von der Lüftungsmethode; (b) verbesserte Richtlinien und Hilfsmittel zur natürlichen Belüftung von Klassenräumen, insbesondere für kontinuierliche Fensterlüftung (einstellbare Fensteröffnungen, Vorbauten/Vorhänge für die Einleitung der Außenluft in Bodennähe bzw. über Heizkörper zwecks Optimierung von Quelllufteffekten und Behaglichkeit); (c) Automatisierung der Fensteröffnung und des Ventilatorbetriebs bei Ventilator-Fensterlüftung (CO₂-Sensor, Zeitschaltuhr, Bewegungsmelder etc.); und (d) Optimierung der Konzeption, Einstellung und Wartung von RLT-Anlagen (Pollozhani et al. n.d.; Helleis et al. 2022; Schwarzbauer 2022; Klimach et al. 2021; McLeod et al. 2021; Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Steiger and Hellwig 2011; Peper et al. 2007).

3.2 Atemaerosolpartikel

Das Infektionsrisiko durch indirekte Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 in Innenräumen steigt mit der Konzentration bzw. mit der Dosis potentiell infektiöser Atemaerosolpartikel, die sich im Raum verteilen und von anwesenden Personen inhaliert werden (Peng et al. 2022; Cheng et al. 2021; Curtius et al. 2021; Kriegel and Hartmann 2021; Pöhlker et al. 2021; Umweltbundesamt 2021c; Lelieveld et al. 2020a).

Abbildung 4 zeigt die zeitliche Zunahme der Dosis an Atemaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedene Lüftungsmethoden zum Einsatz kommen. In Abb. 4a werden jeweils günstige Bedingungen angenommen und in Abb. 4b jeweils ungünstige Bedingungen (Tab. 1, Anhang A.2). Die Ergebnisse sind normiert auf ein Referenz-Gesamtdosis (Endwert) von 100% für die maschinelle Mischlüftung nach Müller et al. unter günstigen Bedingungen (Müller et al. 2020). In Abbildung 5 sind die Endpunkte der Kurven aus Abbildung 4 zusammengefasst. Diese entsprechen der relativen Dosis insgesamt inhalierter Atemaerosolpartikel bzw. dem relativen Risiko einer SARS-CoV-2-Infektion durch Aerosolübertragung unter viruslimitierten Bedingungen (Cheng et al. 2021; Lelieveld et al. 2020a). Je nach Lüftungsmethode und Bedingungen variiert die relative Gesamtdosis von rund 30% bis 290% (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 8 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 etwas größer (bis zu Faktor ~9; Tab. 1 und 2). Bei sehr geringen Luftwechselraten ($< 1/h$) wird die inhalierte Dosis potentiell infektiöser Atemaerosolpartikel durch Lüften weniger stark reduziert als durch die natürliche Inaktivierung der Viren und Sedimentation der Partikel ($\sim 1/h$ (van Doremalen et al. 2020)) (Tab.2).

Ventilator-Fensterlüften: Durch Nutzung von Quelllufteffekten und Haubeneffekten hält das MPIC-FLS mit verteilten Abzugshauben und bodennaher Frischluftzufuhr die inhalierte Dosis an Atemaerosolpartikeln 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 Quelllufteffekts (Abb. 5). Die Verbesserungsfaktoren der beiden Fensterlüftungssysteme gegenüber Stoßlüften nach jeder Schulstunde liegen zwischen 3 und 8 (Abb. 6). Selbst unter ungünstigen Bedingungen schneidet das MPIC-FLS mit verteilten Abzugshauben ähnlich gut ab wie die wirksamsten anderen Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (Abb. 5 und 6).

Freies Fensterlüften: Stoßlüften mit CO₂-Monitor kann die relative Dosis ähnlich aber nicht ganz so gering halten wie das FLS mit einem einfachen Ventilator (rund 65-120%, Abb. 5, Tab. 2), erfordert aber speziell bei geringen Temperaturdifferenzen und Windstärken ein häufiges Öffnen der Fenster oder lange Lüftungsperioden (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 200%, Abb. 5, Tab. 2). Die Verbesserungsfaktoren der genannten Fensterlüftungsvarianten gegenüber dem Stoßlüften nur nach jeder Schulstunde liegen je nach Umgebungsbedingungen zwischen etwa 1,2 und 3,9 (Abb. 6).

Raumlufttechnik (RLT): Bei maschineller Mischlüftung (Referenzwert 100%) kann die relative Dosis unter ungünstigen Bedingungen etwas ansteigen (auf etwa 120%), was durch Kurzschlussströme 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 CO₂-Monitor (rund 70%). 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 2,3 und 3,5 (Abb. 6).

Luftreiniger: Luftreinigungsgeräte kombiniert mit Stoßlüften können die relative Dosis ähnlich geringhalten wie das FLS mit einem einfachen Ventilator (rund 55-120%, Abb. 5, Tab. 2), wofür das FLS jedoch ohne Stoßlüften auskommt. Im Vergleich zu einfachem Stoßlüften nach jeder

Schulstunde liegen die Verbesserungsfaktoren bei Kombination von Luftreinigern mit Stoßlüften nach UBA-Empfehlung bei 2 bis 4,5 (Abb. 6). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Verbesserungsfaktoren nur etwa zur Hälfte auf die Luftreiniger zurückzuführen sind. Herstellerangaben über eine Reduktion der Aerosolkonzentration um mindestens 90% in 30 min gemäß VDI-Richtlinie (VDI 4300-14 2021) beziehen sich lediglich auf ein spezielles Testverfahren ohne kontinuierliche Aerosolemissionen (Abklingmessung), wohingegen die Personen in realen Klassenräumen kontinuierlich Atemaerosole emittieren. Daher werden die im Testverfahren erzielten Reduktionswerte in der Praxis nicht erreicht. Tatsächlich ergeben sich in der praktischen Anwendung sogar gegenläufige Effekte: Die Atemaerosolkonzentration im Raum steigt bei Anwesenheit von Personen trotz Luftreinigung an (Abbildung A9, Anhang A2). Dementsprechend würde ein Luftfiltergerät mit normgerechter Leistung nach (VDI 4300-14 2021), das zusätzlich zu Stoßlüften nach UBA-Empfehlung eingesetzt wird, die inhalierte Atemaerosoldosis in dem betrachteten Klassenraum nicht um 90% sondern nur um knapp 50% senken (Abbildung A10). Zur Einordnung und Überprüfung der Relevanz von Gerätekenngößen und Herstellerangaben kann die Wirksamkeit von Luftreinigungsgeräten bei realistischen Betriebsbedingungen mit Hilfe unseres Online-Rechners verglichen werden. Dabei können unterschiedliche Raumgrößen und -belegungen sowie beliebige Kombinationen von Luftreinigungs- und Lüftungsmethoden mit verschiedenen Kenngößen berücksichtigt werden ((Klimach 2021a); <https://bit.ly/3xfmz>).

In einer kürzlich veröffentlichten Studie wurde die Wirksamkeit verschiedener Lüftungsmethoden durch Experimente mit Testaerosol und Tracergas in mehreren Klassenräumen im Großraum Stuttgart untersucht (Siebler et al. 2021). Im Vergleich zu einer Periode von 90 Minuten bei geschlossenen Fenstern fanden (Siebler et al. 2021) für das Stoßlüften nach UBA-Empfehlungen einen durchschnittlichen Verbesserungsfaktor von etwa 2,2 bezogen auf die Verringerung der Aerosoldosis. Dieser Wert liegt inmitten der von uns für ungünstige und günstige Bedingungen ermittelten Verbesserungsfaktoren von 2 bis 3 (Tabelle 2, UBA-Stoßlüften vs. Stoßlüften nur in den großen Pausen). Für Luftreiniger fanden (Siebler et al. 2021) Verbesserungsfaktoren von etwa 4,1 bis 5,8, ebenfalls vergleichbar mit den von uns ermittelten Werten (Tabelle 2). Erwartungsgemäß bestätigen die Ergebnisse von (Siebler et al. 2021) auch die Grundlagen, Methodik und Resultate unserer Studie.

Der Vergleich von Dauerlüften mit Kippfenstern und Stoßlüften mit weit geöffneten Fenstern zeigt, dass beide Methoden die inhalierte Dosis an Atemaerosolpartikeln unter geeigneten Bedingungen deutlich reduzieren. Entsprechende vergleichende Messungen in (Siebler et al. 2021) zeigen zudem, dass die mittlere Temperaturänderung bei ähnlicher Dosisreduktion für Dauerlüften und für Stoßlüften etwa gleich groß, und dass das Dauerlüften die Dosis bei gleicher Temperaturänderung sogar deutlich besser reduzieren kann. Nimmt man die Temperaturänderung als Anhaltspunkt für die tatsächlich ausgetauschte Luftmenge erweist sich das Dauerlüften nicht als weniger energieeffizient als das Stoßlüften, sondern es führt durch Ausnutzen von Quelllufteffekten sogar zu einer Energieersparnis. Die von (Siebler et al. 2021) vermessenen RLT-Anlagen bzw. der Einsatz von Luftreinigern führten dagegen zu erhöhten Raumtemperaturen von meist über 25°C, wobei laut (ISO 7730 2006) die behagliche Raumtemperatur im Winter bei 19°C - 21°C und im Sommer bei 20°C-24°C (Zürcher and Frank 2018) liegen sollte.

Bei niedrigen Außentemperaturen erfolgt der Luftaustausch durch geöffnete Fenster sehr rasch, selbst in Räumen mit kleinen Fensteröffnungsflächen (UBA Kategorie 2(Umweltbundesamt 2021d)). Lang andauerndes Stoßlüften kann dann zu einer Auskühlung des Raumes ohne nennenswerten hygienischen Nutzen führen, insbesondere während der großen Pausen und in

Räumen mit großen Fensteröffnungsflächen (UBA Kategorie 1 (Umweltbundesamt 2021d)). CO₂-geführtes Dauerlüften mit Kippfenstern oder Stoßlüften mit verkürzten Öffnungszeiten bzw. verringerten Fensteröffnungsflächen führt bei mittleren winterlichen Außentemperaturen (ca. 4°C) zu erheblich geringerem Energieverbrauch (ca. 30%) und behaglicheren Zuständen als das Lüften mit weit geöffneten Fenstern. Näheres dazu findet sich in Abschnitt 3.3 und im Anhang (Abb. A14; (Helleis et al. 2021)).

Abbildungen 4 bis 6 zeigen, dass das MPIC-FLS mit verteilten Abzugshauben 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 and Klimach 2021a; Klimach and Helleis 2021)) kann das MPIC-FLS die inhalierte Dosis an Atemaerosolpartikeln und das damit verbundene Infektionsrisiko geringer halten als die anderen Lüftungsmethoden. Die geringere Wirksamkeit des FLS mit einfachem Abluftventilator beruht darauf, dass in diesem Fall nur der Quelllufteffekt ohne Direktabsaugungseffekt zum Tragen kommt. Ohne bodennahes Einströmen von kühler Frischluft und ohne Quelllufteffekt wirkt ein Abluftventilator wie ein Mischlüftungsgerät (vgl. Tab. 2 „Ventilator ohne Quellluft“).

Freies Fensterlüften kann unter günstigen Bedingungen auch sehr wirksam sein, insbesondere wenn es sich um Dauerlüften durch geeignete Kippfenster handelt oder mit Unterstützung eines CO₂-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 Atemaerosolpartikeln führen – um bis zu einem Faktor 8 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 (Cheng et al. 2021; Pöhlker et al. 2021).

Beim Vergleich verschiedener Raumgrößen wäre zu beachten, dass sich zumeist nicht mehr als eine infektiöse Person im Raum aufhält und das Infektionsrisiko bzw. die infektiöse Aerosolkonzentration im Raum neben der Aufenthaltsdauer nicht von der normierten Luftwechselrate (1/h) sondern von dem tatsächlich wirksamen Luftvolumenstrom (m³/h) abhängt. So baut sich bei Anwesenheit einer infektiösen Person in einem Büro mit 60 m³ Raumvolumen selbst bei einer Wechselrate von 8/h eine höhere Konzentration an infektiösem Aerosol auf als in einem 200 m³ großen Klassenraum bei einer Wechselrate von lediglich 3/h. Im ersten Fall wird das

infektiöse Aerosol bzw. die Atemluft der infektiösen Person nämlich nur mit 480 m³/h verdünnt, im zweiten Fall jedoch mit 600 m³/h.

Um den Lüftungserfolg auch unter wechselnden Umgebungsbedingungen sicherzustellen, teilen und unterstützen wir grundsätzlich die Empfehlungen des Umweltbundesamtes (UBA), der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) und verschiedener Expertengruppen, den Lüftungserfolg durchgehend mittels CO₂-Monitor zu überprüfen und zu steuern (DGUV e.V 2021; Moriske et al. 2021; Pöschl et al. 2021; Umweltbundesamt 2020b).

3.3 Wärme, Feuchte und Komfort

Oft werden Wärme, Feuchte und Komfort als Vorteile zentraler Raumlufttechnik bzw. dezentraler Lüftungsgeräte gegenüber freier Lüftung genannt (FGK 2021; Burgholz 2019; DGUV 2016; Rief and 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 (Tecalor GmbH 2021; Viessmann Climate Solutions SE 2021; WOLF GmbH 2021; WOLF GMBH 2017; FGK 2004). 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 and Kanduč 2021; FGK 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), zumindest für durchschnittliche Bedingungen in Deutschland, wie in den nachfolgenden Abschnitten und im Anhang erläutert. Beispielsweise wird durch Lüften mit einem CO₂-Zielwert von 1000 ppm (konstante Raumluftkonzentration) unter typischen Randbedingungen in Frankfurt am Main Heizenergie von rund 30 kWh pro Schüler und Jahr benötigt (Abb. A7), das entspricht Heizkosten von aktuell nur etwa 3 € pro Schüler und Jahr. In besonders kalten Regionen können diese Werte naturgemäß ansteigen und mit den in Anhang A.4 beschriebenen Methoden analysiert werden.

Aus Abb. A7 wird auch ersichtlich, dass ein CO₂-Zielwert von 800 ppm ungefähr zu einer Verdreifachung des Heizenergiebedarfs führt bzw. bei einem Zielwert von 1200 ppm nur ein Drittel benötigt wird, jeweils gegenüber einem Zielwert von 1000 ppm. Da der zusätzliche Energiebedarf nur anfällt, wenn die Außentemperatur niedrig ist, könnten Außentemperatur-abhängige CO₂-Zielwerte (z.B. bei kalten Temperaturen 1200 ppm, bei wärmeren Temperaturen 800 ppm) den Zielkonflikt von möglichst geringem Energieverbrauch und hohem Infektionsschutz lösen.

3.3.1. Wärmerückgewinnung und thermischer Komfort

Zur Beurteilung der Notwendigkeit und des energetischen 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), verringert sich der gesamte Primärenergieverbrauch in einem kompakten Schulgebäude durch Nachrüsten mit einer RLT-Anlage (80% WRG) im Idealfall um ca. 13% . Die Hochrechnung auf eine reale Schule (kein Kompaktbau) ergibt ein theoretisches

Einsparungspotential von ca. 8% (Anhang A.4). Im Vergleich dazu würde eine Fassadensanierung bis zu 70% Primärenergie einsparen, kombiniert mit Quelllüftung sogar 80%. Der Betrieb von WRG im Neubau bzw. zusätzlich zu energetischer Fassadensanierung ist demnach ökologisch nicht besonders effektiv.

Die Gründe dafür liegen am geringen Nutzungsgrad von Schulgebäuden (über 80% Leerstand), dominanten Transmissionsverlusten 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 (Anhang A.4).

Neben den energetischen Bilanzen gilt es den subjektiven Raumkomfort zu beachten. Seit ca. 1990 ist durch messtechnische Untersuchungen von TGA Experten bekannt, dass Komfort in mechanisch und natürlich belüfteten Räumen subjektiv unterschiedlich bewertet wird, was zu zahlreichen internationalen Diskussionsbeiträgen führte (de Dear et al. 2013; Nicol and Humphreys 2009, 2010; Humphreys et al. 2007; Brager and de Dear 1998) (>20 Papiere in Windsor Conference 2016). Der ASHRAE Standard 55 wurde daher bereits 2005 um eine Sektion zu Komfort bei natürlicher Ventilation erweitert, gewisse Teile davon wurden in die EN 16798-7 übernommen. Der PPD/PMV-Komfortindex für RLT ist nach diesen Standards nicht auf natürliche Lüftung anwendbar. Argumentation gegen Fensterlüftung auf der Basis des PPD/PMV-Komfortindex ist daher nicht gerechtfertigt und irreführend. Tatsächlich hängt der Anteil der Unzufriedenen (PPD) in kalter bis mittelwarmer Umgebungen nur schwach von der empfundenen Temperatur (PMV) ab und liegt bei etwa 20%-30%, wohingegen über 60% unzufrieden sind, wenn die Umgebung als sehr warm wahrgenommen wird (Abbildung A16, (Nicol and Humphreys 2009; Humphreys et al. 2007; Humphreys and Nicol, 2002). Dies entspricht alltäglicher Erfahrung, wonach sich niedrigere Temperaturen durch Anpassen der Bekleidung relativ einfach und komfortabel kompensieren lassen.

Kontrolliertes Dauerlüften erscheint hinsichtlich Energie und Komfort Stoßlüften überlegen (Abbildung A14). Bei niedrigen Außentemperaturen führt Stoßlüften insbesondere in gut lüftbaren Räumen (UBA Kategorie 1) zu einer erheblichen Erhöhung des Wärmebedarfs. Die nähere Analyse zeigt, dass der Hauptwärmeverlust in den großen Pausen ohne Wärme- und Stofflasten zu hygienisch unnötiger Überlüftung und damit zur Auskühlung des Raumes führt. Im Vergleich zu kurzem Stoßlüften mit weit geöffneten Fenstern führt längeres Lüften mit gekippten Fenstern (bzw. mit geringer Fensteröffnungsfläche) bei mittleren winterlichen Außentemperaturen (ca. 5°C) zu geringerem Energieverbrauch und behaglicheren Zuständen. Beim Fensterlüften mit Kaltluft führen Quelllufteffekte dazu, dass die Lüftungseffizienz mit der Lüftungsdauer zunimmt - hier bis zu +28% (Ostmann et al. 2022). Daher ergibt sich unter Berücksichtigung von Quelllufteffekten der geringste Heizbedarf und die höchste Minimaltemperatur (ca. 20°C) für Dauerlüften. Intensives Stoßlüften (Kat 1) ergibt hingegen die niedrigste Minimaltemperatur (ca. 12°C) bei drastisch höherem Heizenergiebedarf (bis zu 4-fach bei 800 ppm, bis zu 10-fach bei 1000 ppm Zeitmittelwert).

Gerade zentrale RLT mit einheitlicher Zuluft-Temperatur für alle Räume kann im realen Betrieb den Komfortansprüchen nicht gerecht werden. Systembedingt sind sonnenbeschienene Klassenräume deutlich wärmer als schattige Räume und es verwundert nicht, wenn z.B. Schüler einer Grundschule in Halle zur Kompensation der Temperaturunterschiede (Nordräume zu kalt, Südräume zu warm) die Klassenraumtüren offenhalten und den Flur als „Wärmetauscher“ nutzen (Jagnow and Gebhardt 2017). Entsprechende Umfragen in sanierten und neuen Schulen zeigen, dass die Erwartungen der Lehrkräfte an die Verbesserung der wahrgenommenen Luftqualität und

Temperaturregelung durch RLT lediglich für 11% bzw. 10% der Befragten voll erfüllt wurden (Reiß et al. 2017).

Es erscheint ratsam, um ökologische, ökonomische und hygienische Vorteile zu erzielen, vorzugsweise energetische Fassadensanierung mit preiswerter lokaler CO₂- und temperaturgeführter Ablufttechnik und Quelllüftungseinlässen zu kombinieren, anstatt aufwändige RLT zu verbauen (Helleis and Klimach 2021b; Helleis et al. 2021; Steiger and Hellwig 2011).

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 16798 2019; 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 and 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 benötigten Gesamtbefeuchtungsleistung, selbst in Komfortbereichen würde er 3,3% nicht überschreiten. Dieser geringe Anteil kann ebenfalls problemlos durch die Schleimhäute der 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, Nachtkühlung oder Entfeuchtung im Sommer 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 Atemaerosolpartikel 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 MPIC-FLS mit verteilten Abzugshauben. Durch wirksame Lüftung werden infektiöse Aerosolpartikel also rund zehnmals schneller aus der Raumluft entfernt als durch Inaktivierung

entsprechend ihrer Lebensdauer, die nur eine untergeordnete Rolle spielt. Darüber hinaus sind nach (DIN EN 16798 2019; DIN EN 15251 2007, p. 152) für Kat 2 Räume raumluftechnische 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 and Kanduč 2021; FGK 2020) soll eine optimale Raumluftheuchte von 40-50% die Verweilzeit von Aerosolpartikeln in der Schwebelage wesentlich verkürzen, weil die Partikel nicht ganz austrocknen, größer und schwerer bleiben, und dadurch schneller sedimentieren. Messungen des Deliqueszenzverhaltens und des hygrokopischen 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 (Pöhlker et al. 2021; Mikhailov and Vlasenko 2020). 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 Raumlufte entfernt als durch Sedimentation, die nur eine untergeordnete Rolle spielt. Da normgerecht parametrisierte raumluftechnische Anlagen erst weit unterhalb von 40% Luftfeuchte mit aktiver Befeuchtung beginnen (s.o., (DIN EN 16798 2019; DIN EN 15251 2007, p. 152)), sind durch den Betrieb solcher Anlagen keine nennenswerten Auswirkungen auf die Sedimentation infektiöser Atemaerosolpartikel zu erwarten.

Aktuelle und frühere Studien weisen darauf hin, dass die direkte Zufuhr frischer Außenluft durch Fenster die Inaktivierung infektiöser Aerosolpartikel und zum Infektionsschutz stärker fördern kann als die Zufuhr gefilterter Luft durch RLT-Anlagen (Luo et al. 2023; Cox et al. 2021). Wenn atmosphärische Oxidantien und Säuren in den Filtern und Rohrleitungen von RLT-Anlagen abgebaut bzw. zurückgehalten werden, tragen sie weniger zur Inaktivierung von Viren und anderen Pathogenen bei als wenn sie durch Fenster direkt in die Innenraumlufte eingebracht werden (Luo et al. 2023; Cox et al. 2021).

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 2003). Vor potentiellen Investitionsentscheidungen zugunsten zuluftbehandelnder Raumluftechnik 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 adäquater CO₂-Konzentrationen und für den Infektionsschutz gegen die Aerosolübertragung von SARS-CoV-2 und sonstigen Infektionskrankheiten in Klassenräumen und vergleichbaren Innenräumen geeignet.

Besonders wirksam sind Fensterlüftungssysteme mit bodennaher Frischluftzufuhr (Quelllüftung) und verteilter Abluftabsaugung über potentiell infektiösen Personen. Das MPIC-FLS mit verteilten Abzugshauben ist den anderen betrachteten Lüftungsmethoden sowohl im Infektionsschutz gegen Aerosolübertragung von COVID-19 als auch in der Abfuhr von verbrauchter Luft aus dem 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 Schadstoffverdünnung gleich gut oder besser ab als die anderen Lüftungsmethoden und ist um ein Vielfaches kostengünstiger als die aufwändigeren raumlufttechnischen Geräte, entsprechende Vorschläge sind bekannt und die Umrüstung bestehender Fenster ist machbar (Steiger and Hellwig 2011).

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 Atemaerosole darstellen, ist die tatsächliche Wirksamkeit bezogen auf den Klassenraum wesentlich geringer. Im Vergleich zum Stoßlüften, welches für die Frischluftzufuhr und Begrenzung der CO₂-Konzentration im Klassenraum ohnehin unerlässlich ist, verringert sich die inhalierte Dosis potentiell infektiöser Atemaerosolen und das damit verbundene Infektionsrisiko lediglich um etwa 30-60% (Abb. 5, Tab. 2, Abb. A10).

Bei allen Lösungsansätzen, die weiterhin der Unterstützung durch Stoßlüftung bedürfen (z.B. mobile Luftfilter- und UV-C-Desinfektionsgeräte ohne RLT-Anlage), ist davon auszugehen, dass die Behaglichkeit gegenüber Dauerlüftung (z.B. FLS, Kippfenster, RLT) nicht zunimmt, sondern eher abnimmt. Nachhaltige Nutzungsmöglichkeiten nach der Pandemie sind für die Umluftgeräte im Vergleich zu Lüftungssystemen mit Frischluftzufuhr begrenzt. Luftfiltergeräte können die Feinstaubbelastung der Raumluft und damit verbundene Gesundheitsbelastungen reduzieren (Lelieveld et al. 2020b; Shiraiwa et al. 2017; Pöschl and Shiraiwa 2015; Darquenne 2012; Pöschl 2005). Für UV-C-Geräte sind diesbezüglich keine positiven Effekte zu erwarten. Vielmehr bleibt zu klären welche Art von reaktiven Spurenstoffen in der Gasphase und an der Oberfläche von Aerosolpartikeln durch die UV-C-Strahlung gebildet und freigesetzt werden können (reaktive

Sauerstoff- oder Stickstoffverbindungen in der Gasphase oder Partikelphase), und ob sich daraus Konsequenzen für Luftqualität und Gesundheit ergeben (Harder 2021; Shiraiwa et al. 2011, 2017; West et al. 2016; Pöschl and Shiraiwa 2015). Nach derzeitigem Wissensstand würden wir den Einsatz von UV-C-Geräten aktuell nicht empfehlen (Exner et al. 2022).

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. Eine gründliche Analyse verfügbarer Studien über real existierende Schulen mit Lüftungsanlagen zeigt, dass RLT/WRG üblicherweise mehr Primärenergie verbraucht und größere Treibhausgas-Emissionen verursacht als für äquivalentes CO₂-geführtes Fensterlüften unterstützt durch einfache technische Hilfsmittel zu erwarten ist (Anhang A.8) (Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Peper et al. 2007).

Nach unseren Erkenntnissen verbessert die Nachrüstung von Raumlufttechnik mit Feuchterückgewinnung oder aktiver Befeuchtung (RLT parametrisiert nach EN 15251 Kat 2) kaum die Behaglichkeit und den Infektionsschutz. Aufgrund fundamentaler Eigenschaften von Atemwegs-aerosolen 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 (FGK 2003). Da nach diversen Analysen der Nutzen derartiger RLT in Schulen unverhältnismäßig gering ist, sollten die verbleibenden Hygienrisiken und die ökonomischen Faktoren zur Kontraindikation ausreichen. Am ehesten sinnvoll kann der Einsatz von Luftreinigern oder RLT mit Zuluftbehandlung in besonders schlecht belüftbaren Klassenräumen sein, insbesondere wenn die Außenluft bzw. die Fensterseite besonders stark mit Schadstoffen oder Lärm belastet ist - beispielsweise an sehr verkehrsreichen Straßen. Wenn die schlechte Belüftbarkeit lediglich auf einer geringen Anzahl oder Größe der Fenster beruht, kann auch ventilatorgestütztes Fensterlüften Abhilfe schaffen. Üblicherweise reicht ein Abluftventilator zur Gewährleistung des nötigen Luftvolumenstroms; bei Bedarf nach Schalldämpfung und Filterung der Außenluft könnte stattdessen ein Zuluftventilator eingesetzt werden.

Fensterlüftungssysteme wie das MPIC-FLS können unter Ausnutzung von Quellluft- und Direktabsaugungseffekten die Atemaerosolbelastung und das Infektionsrisiko in einem Ausmaß verringern (Abb. 6), das mit konventioneller Mischlüftung nur unter hohem Aufwand erreichbar wäre. Wie in Tab. 2 beschrieben, erreicht das MPIC-FLS mit verteilten Abzugshauben erreichte äquivalente Luftwechselraten von 8/h-18/h. Bei besonders hohem Infektionsdruck 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 Hygienrisiken.

Insgesamt zeigt der Vergleich, dass CO₂-geführtes Fensterlüften mit einfachen technischen Hilfsmitteln wie Ventilatoren und CO₂-Monitoren 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.

Nach Bedarf und Gelegenheit kann Ventilator-Fensterlüften auch mit anderen Methoden kombiniert werden, beispielsweise mit Stoßlüften oder Luftreinigern. Um zu prüfen, ob und unter welchen Bedingungen dadurch ein substantieller Mehrwert entsteht, stellen wir auch das Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung, welches für die Vergleichsstudie entwickelt und genutzt wurde (Online-Rechner, (Klimach 2021a); <https://bit.ly/3xfmz>). Damit können verschiedene Kombinationen der untersuchten Lüftungsmethoden und Variationen der Kenngrößen für verschiedene Gerätetypen untersucht und verglichen werden. Ausgehend von Klassenräumen können die Ergebnisse analog auch auf andere Innenräume übertragen werden, in welchen sich Personengruppen aufhalten (Aufenthalts- und Seminarräume, Büros, Warteräume etc.).

Wie in der vorliegenden Studie gezeigt, lassen sich indirekte Infektionsrisiken durch infektiöse Atemaerosole in der Raumluft mit einfachen Lüftungsmethoden sehr wirksam verringern. Gegen direkte Infektionen durch Übertragung von Atemaerosolen und größeren Tröpfchen auf kurze Entfernung sind Lüftungsmethoden jedoch kaum wirksam. Die beobachtete starke Abhängigkeit des Infektionsrisikos vom räumlichen Abstand zur infizierten Person deutet darauf hin, dass direkte Infektionen einen erheblichen Anteil am Infektionsgeschehen in Schulen haben (Lam-Hine 2021; Moriske et al. 2021). Daher empfehlen wir den Einsatz von Lüftungsmethoden nicht alternativ sondern nur ergänzend zum Abstandhalten, Tragen von Masken und weiteren Infektionsschutzmaßnahmen (Cheng et al. 2021; Drewnick et al. 2021; Klimach et al. 2021; Moriske et al. 2021; Pöschl and Witt 2021; Pöschl et al. 2021; Su et al. 2021).

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 verteilten Abzugshauben (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 600 Klassenzimmern an Schulen in der Stadt Mainz erfolgte mit Unterstützung der IGS Mainz-Bretzenheim und der Gebäudewirtschaft Mainz (O. Fuchs, A. Hoppe, P. Schickle, U. Hehl, 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), J. Curtius (Goethe-Universität Frankfurt), C. Hopfe, R. McLeod (TU Graz), C. Schwarzbauer (HS München), M. Linder (Energiemanagement Frankfurt), H.-J. Moriske, W. Birmili (UBA), 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

- AK Klimatechnik, e. V. (2022). Lüftung unter Pandemiebedingungen.
- Albers, K.-J., Recknagel, H., and Sprenger, E. (Eds.) (2020). Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte, 80. Auflage. ed. ITM InnoTech Medien GmbH, Kleinaitingen.
- Anlauff, E. and Schwede, D. (2018). Präsentation WABOLU CO2 Messungen in Schulen. *Forschungsbericht*.
- Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D., Barreda, S., Bouvier, N.M., and Ristenpart, W.D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci. Rep.* 9 (1):2348. doi:10.1038/s41598-019-38808-z.
- ASHRAE (2023). ANSI/ASHRAE Standard 241. 44.
- ASHRAE (2019). ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2019.
- BAUA ASR A3.6 (2012). Technische Regel für Arbeitsstätten.
- Blaxter, K. (1989). Energy metabolism in animals and man. CUP Archive.
- Bodenschatz, E. (2021). Wie wird ein Klassenraum mit wenig Kosten und Wartungssorgen Corona sicher?
- Božič, A. and Kanduč, M. (2021). Relative humidity in droplet and airborne transmission of disease. *J. Biol. Phys.* 47 (1):1–29. doi:10.1007/s10867-020-09562-5.
- Brager, G.S. and de Dear, R.J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy Build.* 27 (1):83–96. doi:10.1016/S0378-7788(97)00053-4.
- British Standards Institution (1991). Ventilation principles and designing for natural ventilation. British Standards Institution, London.
- Buonanno, G., Ricolfi, L., Morawska, L., and Stabile, L. (2022). Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Front. Public Health* 10:1087087. doi:10.3389/fpubh.2022.1087087.
- Burgholz, T. (2019). Wärme, Luft und Akustik in Unterrichtsräumen – Ergebnisse einer Feldstudie in Nordrhein-Westfalen.
- Bux, K. and von Hahn, N. (2020). "Trockene Luft" - Literaturstudie zu den Auswirkungen auf die Gesundheit. doi:10.21934/BAUA:BERICHT20200624.
- Carrer, P., Fernandes, E.D.O., Kephelopoulos, S., Allard, F., Asikainen, A., Asimakopoulos, D., Asimakopoulou, M.-N., Bischoff, W., Jena, U., Braubach, M., Brelik, N., Brennan, D., Fanetti, A., Hartmann, T., Jena, U., Héroux, M.-E., Jantunen, M., Leal, V., Mustakov, T., Palkonnen, S., Popov, T., Rolland, C., Salari, M., Santamouris, M., Santos, H., Savli, R., and Seppänen, O. (2020). Framework for health-based ventilation guidelines in Europe.
- CDC (2021). Guidance for COVID-19 Prevention in K-12 Schools and ECE Programs *Cent. Dis. Control Prev.* Available at <https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/community/schools-childcare/k-12-guidance.html> (Accessed 23 August 2021).
- Cheng, W. and Brown, R.D. (2020). An energy budget model for estimating the thermal comfort of children. *Int. J. Biometeorol.* 64 (8):1355–1366.
- Cheng, Y., Ma, N., Witt, C., Rapp, S., Wild, P.S., Andreae, M.O., Pöschl, U., and Su, H. (2021). Face masks effectively limit the probability of SARS-CoV-2 transmission. *Science* 372 (6549):1439–1443. doi:10.1126/science.abg6296.
- Clements, N., Arvelo, I., Arnold, P., Heredia, N.J., Hodges, U.W., Deresinski, S., Cook, P.W., and Hamilton, K.A. (2023). Informing Building Strategies to Reduce Infectious Aerosol Transmission Risk by Integrating DNA Aerosol Tracers with Quantitative Microbial Risk Assessment. *Environ. Sci. Technol.* 57 (14):5771–5781. doi:10.1021/acs.est.2c08131.
- Cox, R.A., Ammann, M., Crowley, J.N., Griffiths, P.T., Herrmann, H., Hoffmann, E.H., Jenkin, M.E., McNeill, V.F., Mellouki, A., Penkett, C.J., Tilgner, A., and Wallington, T.J. (2021). Opinion: The germicidal effect of ambient air (open-air factor) revisited. *Atmospheric Chem. Phys.* 21 (17):13011–13018. doi:10.5194/acp-21-13011-2021.
- Curtius, J., Granzin, M., and Schrod, J. (2021). Testing mobile air purifiers in a school classroom: Reducing the airborne transmission risk for SARS-CoV-2. *Aerosol Sci. Technol.* 55 (5):586–599.
- Darquenne, C. (2012). Aerosol Deposition in Health and Disease. *J. Aerosol Med. Pulm. Drug Deliv.* 25 (3):140–147. doi:10.1089/jamp.2011.0916.
- de Dear, R.J., Akimoto, T., Arens, E.A., Brager, G., Candido, C., Cheong, K.W.D., Li, B., Nishihara, N., Sekhar, S.C., Tanabe, S., Toftum, J., Zhang, H., and Zhu, Y. (2013). Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air* 23 (6):442–461. doi:10.1111/ina.12046.

- de.trotec.com (2021). Raumlufreiniger TAC V+ in basaltgrau/schwarz + Schallschutzhaube. Available at <https://de.trotec.com/shop/raumlufreiniger-tac-v-in-basaltgrau-schwarz-schallschutzhaube.html> (Accessed 4 July 2021).
- DFG (2022). MAK- und BAT-Werte-Liste 2022: Ständige Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe – Mitteilung 58. doi:10.34865/MBWL_2022_DEU.
- DGUV (2016). DGUV Information 215-510 „Beurteilung des Raumklimas – Handlungshilfe für kleine und mittlere Unternehmen“. 32.
- DGUV e.V., D.G.U. (2021). #LüftenHilft. Available at <https://www.dguv.de/lueftenhilft/index.jsp> (Accessed 4 November 2021).
- DIN EN 13779 (2007). DIN EN 13779. Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlsysteme. (Wurde mit Veröffentlichung der DIN EN 16798-3 im Nov. 2017 zurückgezogen.). Beuth Verlag.
- DIN EN 15251 (2007). DIN EN 15251: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik, 08/2007, Beuth-Verlag GmbH. Berlin. Beuth Verlag.
- DIN EN 16798 (2019). Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik.
- Drewnick, F., Pikmann, J., Fachinger, F., Moormann, L., Sprang, F., and Borrmann, S. (2021). Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks. *Aerosol Sci. Technol.* 55 (1):63–79. doi:10.1080/02786826.2020.1817846.
- DuBois, D. and DuBois, E.F. (1916). A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known *Arch Intern Med* 17: 863–871. *Find This Artic. Online.*
- DWD (2021). Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Kostenfreie Gradtagzahlen/Gradtage. Available at https://www.dwd.de/DE/leistungen/gtz_kostenfrei/gtz_kostenfrei.html (Accessed 4 July 2021).
- ebm-papst GmbH (2021a). W3G300CK1332. Available at <https://www.ebmpapst.com/de/de/products/axial-fans/p/W3G300CK1332.html> (Accessed 28 June 2021).
- ebm-papst GmbH (2021b). W3G350CG0332. Available at <https://www.ebmpapst.com/de/de/products/axial-fans/p/W3G350CG0332.html> (Accessed 28 June 2021).
- energie-experten (2021). Ratgeber*Energ.-Expert.* Available at <https://www.energie-experten.org/ratgeber> (Accessed 5 July 2021).
- Erhart, T., Guerlich, D., Schulze, T., and Eicker, U. (2015). Experimental Validation of Basic Natural Ventilation Air Flow Calculations for different Flow Path and Window Configurations. *Energy Procedia, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015* 78:2838–2843. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.644.
- EU 1253/2014 (2014). VERORDNUNG (EU) Nr. 1253/2014 DER KOMMISSION - vom 7. Juli 2014 - zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen -. 19.
- Exner, M., Walger, P., Tatzel, J., Hübner, N., Pöschl, U., Knobloch, J.K., Herr, C., and Popp, W. (2022). Stellungnahme der DGKH zu Lüftungskonzepten in Schulen als Teil eines Bündelkonzeptes unter Berücksichtigung von Wirksamkeit, Nachhaltigkeit und Kosten. 10.
- Fang, L., Clausen, G., and Fanger, P.O. (1998). Impact of Temperature and Humidity on Perception of Indoor Air Quality During Immediate and Longer Whole-Body Exposures. *Indoor Air* 8 (4):276–284. doi:10.1111/j.1600-0668.1998.00008.x.
- Fang, L., Wyon, D.P., Clausen, G., and Fanger, P.O. (2004). Impact of indoor air temperature and humidity in an office on perceived air quality, SBS symptoms and performance. *Indoor Air* 14 (s7):74–81. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00276.x.
- Fanger, P.O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Therm. Comf. Anal. Appl. Environ. Eng.*
- FGK, e. V. (2021). Anforderungen an Lüftung und Luftreinigung zur Reduktion des Infektionsrisikos über den Luftweg SR52.
- FGK, e. V. (2020). Betrieb von Lüftungs- und Klimaanlageanlagen während der Covid-19-Pandemie. Available at <https://www.fgk.de/index.php/114-betrieb-von-lueftungs-und-klimaanlagen-waehrend-der-covid-19-pandemie> (Accessed 5 July 2021).

- FGK, e. V. (2004). FGK Statusreport 22 - Lüftung von Schulen.
- FGK, e. V. (2003). Die Umsetzung der Richtlinie VDI 6022-Hinweise für Anwender der VDI Richtlinie 60. Available at https://downloads.fgk.de/84_Umsetzung_VDI6022_MGV2003.pdf (Accessed 4 July 2021).
- Fitzner, K. and Finke, U. (2012). Lüftungsregeln für freie Lüftung: Projekt F 2072, *Forschung*. BAuA, Dortmund.
- Fromme, H., Heitmann, D., Dietrich, S., Schierl, R., Körner, W., Kiranoglu, M., Zapf, A., and Twardella, D. (2008). Raumluftqualität in Schulen-Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. *Gesundheitswesen* 70 (02):88–97.
- Gagge, A.P., Fobelets, A.P., and Berglund, L.G. (1986). A STANDARD PREDICTIVE INDEX OF HUMAN RESPONSE TO THE THERMAL ENVIRONMENT. 24.
- GEG (2020). Gesetz zur Vereinheitlichung des Energieeinsparrechts für Gebäude und zur Änderung weiterer Gesetze (Gebäudeenergiegesetz).
- Giedraityte, L., Holmér, I., and Gavhed, D. (2001). Validation of Methods for Determination of Metabolic Rate in the Edholm Scale and ISO 8996. *Int. J. Occup. Saf. Ergon.* 7 (2):135–148. doi:10.1080/10803548.2001.11076482.
- Grams, H., Hehl, O., and Dreesman, J. (2003). „Aufatmen in Schulen“-Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. *Gesundheitswesen* 65 (07):447–456.
- Greml, A., Blüml, E., Gössler, A., Kapferer, R., Leitzinger, W., Suschek-Berger, J., and Tappler, P. (2008). Evaluierungen von Klassenzimmerlüftungen in Österreich und Erstellung eines Planungsleitfadens. *Berichte Aus Energ. Umweltforsch.* 14.
- Harder, H. (2021). Impact of the usage of an UV-C cleaning device on indoor air quality : Part I quantification of the UV-C dose. Zenodo.
- Haustechnik Handrich GmbH (2021). Viessmann Vitovent 200-P, Lüftungs-System mit Raumluftreinigung *Haustech. Handrich GmbH*. Available at <https://www.haustechnik-handrich.de/viessmann-systemtechnik/viessmann-vitovent-200-p-lueftungs-system-mit-raumluftreinigung> (Accessed 4 July 2021).
- Haverinen-Shaughnessy, U. and Shaughnessy, R.J. (2015). Effects of Classroom Ventilation Rate and Temperature on Students' Test Scores. *PLOS ONE* 10 (8):e0136165. doi:10.1371/journal.pone.0136165.
- Helleis, F. (2021). Vergleich verschiedener Sanierungsmaßnahmen zum Wärmeschutz von Klassenzimmern, Büroräumen und Privatwohnungen (in Vorbereitung).
- Helleis, F. and Klimach, T. (2022). Kommentar zu „Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden, Teil 1: Bildungseinrichtungen. Empfehlung des Arbeitskreis Lüftung am Umweltbundesamt (2017)“.
- Helleis, F. and Klimach, T. (2021a). Lüftung von Schulräumen -ein „frischer“ Blick von draußen.
- Helleis, F. and Klimach, T. (2021b). Kommentar zur “Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen” von M. Kremer, K. Rewitz und D. Müller (2021). doi:10.5281/zenodo.5638176.
- Helleis, F., Klimach, T., and Pöschl, U. (2022). LowTech vs. RLT/WRG, kontinuierliches Lüften und UBA-Empfehlungen 2017.
- Helleis, F., Klimach, T., and Pöschl, U. (2021). Lüftung von Schulräumen - ein frischer Blick von draußen.
- Heraeus Noblelight GmbH (2021). Soluva Air W, Heraeus.com. Available at https://www.heraeus.com/media/media/landingpages_1/soluva_1/documents_2/brochures_2/Soluv_a_Air_W_DE.pdf (Accessed 25 June 2021).
- Heudorf, U., Steul, E., Walcok, A., and Gottschalk, R. (2020). COVID-19 in Schulen: Keine Pandemie-Treiber. (study). *Dtsch Arztebl.* 2020.
- Humphreys, M.A. and Nicol, F. (2002). The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments. *Energy Build.* 34 (6):667–684. doi:10.1016/S0378-7788(02)00018-X.
- Humphreys, M.A., Nicol, J.F., and Raja, I.A. (2007). Field Studies of Indoor Thermal Comfort and the Progress of the Adaptive Approach. *Adv. Build. Energy Res.* 1 (1):55–88. doi:10.1080/17512549.2007.9687269.
- IBC Ingenieurbau-Consult GmbH, H.M. (2020). Brandschutztechnische Begutachtung einer dezentralen Abluftanlage für Klassenräume in Schulen. 13.
- Iddon, C., Jones, B., Sharpe, P., Cevik, M., and Fitzgerald, S. (2022). A population framework for predicting the proportion of people infected by the far-field airborne transmission of SARS-CoV-2 indoors. *Build. Environ.* 221:109309. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109309.
- ISO 7730 (2006). Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der

- lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005. Available at <https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/naerg/veroeffentlichungen/wdc-beuth:din21:89417255> (Accessed 25 August 2021).
- ISO 8996 (n.d.). DIN EN ISO 8996:2005-01, Ergonomie der thermischen Umgebung_ - Bestimmung des körpereigenen Energieumsatzes (ISO_8996:2004); Deutsche Fassung EN_ISO_8996:2004. Beuth Verlag GmbH.
- ISO 17772-1 (2017). ISO 17772-1:2017.
- ISO 17772-2 (2018). ISO 17772-2:2018.
- Jagnow, K. and Gebhardt, K. (2017). Energieoptimiertes Bauen – EnEff:Schule Neubau der St. Franziskus-Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise, Abschlussbericht. *Forschungsbericht*.
- Kähler, C.J., Fuchs, T., and Hain, R. (2020). Können mobile Raumluftreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren. *Hg V Univ. Bundeswehr Münch. Strömungsmechanik Aerodyn. Online Verfügbar Unter Httpswww Unibw Delrt7raumluftreiniger Pdf Zuletzt Geprüft Am 18:2020*.
- Kaup, C. (2022). Bewertung der Wärmerückgewinnung mit raumluftechnischen Geräten in Schulen und vergleichbaren Räumen versus Fensterlüftung. *HLH Vdi Fachmedien 73 (01–02)*.
- Kaup, C. (2019a). Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1). *GI - Gebäudetechn. Wiss. Prax.* 140 (2/2019).
- Kaup, C. (2019b). Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2). *GI - Gebäudetechn. Wiss. Prax.* 140 (3/2019).
- Kaup, C. (2010). Wärmerückgewinnung als Schlüssel- komponente der Lebenszykluskosten. *HLH Vdi Fachmedien* (Heft 5).
- Kaup, C. and Knissel, J. (2019). European Study on heat recovery in non-residential buildings. doi:10.17170/kobra-202102023104.
- Klimach, T. (2021a). Vergleichsmodellierung von Lüftungsmethoden für Klassenzimmer.
- Klimach, T. (2021b). Lüftungsbedarf und Wärmeabgabe von Personen und Vergleich mit dezentraler RLT mit WRG.
- Klimach, T. and Helleis, F. (2021). Vorläufige Dokumentation Abluftanlage für Klassenräume.
- Klimach, T., Helleis, F., McLeod, R.S., Hopfe, C.J., and Pöschl, U. (2021). The Max Planck Institute for Chemistry mechanical extract ventilation (MPIC-MEV) system against aerosol transmission of COVID-19. doi:10.5281/zenodo.5802049.
- Klinke, R. and Silbernagl, S. (Eds.) (2001). *Lehrbuch der Physiologie*, 3., vollst. bearb. Aufl. ed. Thieme, Stuttgart.
- Knaus, C., Hartmann, T., Mai, R., Döge, S., Krause, R., and Spitzner, M. (2019). Entwicklung von Handlungsempfehlungen für praxisgerechte Lüftungskonzepte und Entwicklung eines CO₂-Berechnungstools.
- Kremer, M.T., Rewitz, K., and Müller, D. (2022). Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen mittels dynamischer Simulationsmodelle, *Aachen : RWTH Aachen University 1-14 (2022)*. RWTH Aachen University.
- Kremer, M.T., Rewitz, K., and Müller, D. (2021). Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen, *Aachen : RWTH Aachen University*. RWTH Aachen University.
- Kriegel, M. and Hartmann, A. (2021). SARS-CoV-2-Aerosolpartikel: Inhalierbare Dosen im Vergleich zwischen gar nicht, mäßig, gut und sehr gut belüfteten Räumen. doi:10.25646/8394.
- Kundenservice WOLF GmbH (2021). Antwort: voi / WG: Neue WOLF Kontaktanfrage (Sonstig).
- Lam-Hine, T. (2021). Outbreak Associated with SARS-CoV-2 B.1.617.2 (Delta) Variant in an Elementary School — Marin County, California, May–June 2021. *MMWR Morb. Mortal. Wkly. Rep.* 70. doi:10.15585/mmwr.mm7035e2.
- Lelieveld, J., Helleis, F., Borrmann, S., Cheng, Y., Drewnick, F., Haug, G., Klimach, T., Sciare, J., Su, H., and Pöschl, U. (2020a). Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 17 (21):8114. doi:10.3390/ijerph17218114.
- Lelieveld, J., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Haines, A., and Münzel, T. (2020b). Loss of life expectancy from air pollution compared to other risk factors: a worldwide perspective. *Cardiovasc. Res.* 116 (11):1910–1917.

- Logue, J.M., Price, P.N., Sherman, M.H., and Singer, B.C. (2012). A Method to Estimate the Chronic Health Impact of Air Pollutants in U.S. Residences. *Environ. Health Perspect.* 120 (2):216–222. doi:10.1289/ehp.1104035.
- Luo, B., Schaub, A., Glas, I., Klein, L.K., David, S.C., Bluvshstein, N., Violaki, K., Motos, G., Pohl, M.O., Hugentobler, W., Nenes, A., Krieger, U.K., Stertz, S., Peter, T., and Kohn, T. (2023). Expiratory Aerosol pH: The Overlooked Driver of Airborne Virus Inactivation. *Environ. Sci. Technol.* 57 (1):486–497. doi:10.1021/acs.est.2c05777.
- McLeod, R.S., Mathew, M., Salman, D., and Thomas, P.C. (2021). An investigation of indoor air quality in a recently refurbished educational building. *Front. Built Environ.* 156.
- MeinHausShop (2021). tecalor Lüftungsgerät mit Zu-/Abluftgitter LTM dezent 800 topline KE GITMeinHausShop. Available at <https://www.meinhausshop.de/tecalor-Lueftungsgeraet-mit-Zu/Abluftgitter-LTM-dezent-800-topline-KE-GIT> (Accessed 4 July 2021).
- Melikov, A.K. (2015). Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction. *Build. Environ., Fifty Year Anniversary for Building and Environment* 91:70–77. doi:10.1016/j.buildenv.2015.04.010.
- Mikhailov, E.F. and 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 Meas. Tech.* 13 (4):2035–2056. doi:10.5194/amt-13-2035-2020.
- Miller, S.L., Nazaroff, W.W., Jimenez, J.L., Boerstra, A., Buonanno, G., Dancer, S.J., Kurnitski, J., Marr, L.C., Morawska, L., and Noakes, C. (2021). Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. *Indoor Air* 31 (2):314–323. doi:<https://doi.org/10.1111/ina.12751>.
- Morawska, L., Allen, J., Bahnfleth, W., Bluysen, P.M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S.J., Floto, A., Franchimon, F., Greenhalgh, T., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J.L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L.C., Mazzarella, L., Melikov, A.K., Miller, S., Milton, D.K., Nazaroff, W., Nielsen, P.V., Noakes, C., Peccia, J., Prather, K., Querol, X., Sekhar, C., Seppänen, O., Tanabe, S., Tang, J.W., Tellier, R., Tham, K.W., Wargocki, P., Wierzbicka, A., and Yao, M. (2021). A paradigm shift to combat indoor respiratory infection. *Science* 372 (6543):689–691. doi:10.1126/science.abg2025.
- Morawska, L., Tang, J.W., Bahnfleth, W., Bluysen, P.M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J.L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L.C., Mazzarella, L., Melikov, A.K., Miller, S., Milton, D.K., Nazaroff, W., Nielsen, P.V., Noakes, C., Peccia, J., Querol, X., Sekhar, C., Seppänen, O., Tanabe, S., Tellier, R., Tham, K.W., Wargocki, P., Wierzbicka, A., and Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environ. Int.* 142:105832. doi:10.1016/j.envint.2020.105832.
- Moriske, H.-J., Bodenschatz, E., Curtius, J., Exner, M., Herr, C., Hopfe, C.J., Müller, D., Niessner, J., Pöschl, U., Salthammer, T., Seipp, H.-M., Steffens, T., Witt, C., and Willich, S.N. (2021). Aktuelle Empfehlungen für die lufthygienische Infektionsprophylaxe in Schulen während der COVID-19-Pandemie.
- Moriyama, M., Hugentobler, W.J., and Iwasaki, A. (2020). Seasonality of Respiratory Viral Infections. *Annu. Rev. Virol.* 7 (1):83–101. doi:10.1146/annurev-virology-012420-022445.
- MPIC-Mainz (2021). Merkblatt zur Dimensionierung von Ventilator-Fensterlüftungssystemen für Klassenräume entwickelt am Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz.
- Müller, D., Burgholz, T.M., Rewitz, K., Bardey, J., Derwein, D., Tappler, P., and 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.
- Nicol, F. and Humphreys, M. (2010). Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Build. Environ.* 45 (1):11–17. doi:10.1016/j.buildenv.2008.12.013.
- Nicol, J.F. and Humphreys, M.A. (2009). New standards for comfort and energy use in buildings. *Build. Res. Inf.* 37 (1):68–73. doi:10.1080/09613210802611041.
- NOAA (2021). Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases. Available at <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html> (Accessed 5 July 2021).
- Ostmann, P., Derwein, D., Kremer, M.T., Rewitz, K., and Müller, D. (2022). Wirksamkeit der einseitigen Fensterlüftung in Klassenräumen : Stoßlüftung, 12 Seiten (2022). doi:10.18154/RWTH-2022-01310. RWTH Aachen University.

- Park, J. (2017). Temperature, Test Scores, and Human Capital Production.
- Peng, Z. and Jimenez, J.L. (2021). Exhaled CO₂ as a COVID-19 Infection Risk Proxy for Different Indoor Environments and Activities. *Environ. Sci. Technol. Lett.* 8 (5):392–397. doi:10.1021/acs.estlett.1c00183.
- Peng, Z., Rojas, A.L.P., Kropff, E., Bahnfleth, W., Buonanno, G., Dancer, S.J., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M.G.L.C., Marr, L.C., Morawska, L., Nazaroff, W., Noakes, C., Querol, X., Sekhar, C., Tellier, R., Greenhalgh, T., Bourouiba, L., Boerstra, A., Tang, J.W., Miller, S.L., and Jimenez, J.L. (2022). Practical Indicators for Risk of Airborne Transmission in Shared Indoor Environments and Their Application to COVID-19 Outbreaks. *Environ. Sci. Technol.* 56 (2):1125–1137. doi:10.1021/acs.est.1c06531.
- Peper, S., Kah, O., Pfluger, R., and Schnieders, J. (2007). Passivhausschule Frankfurt Riedberg.
- Persily, A.K., Bahnfleth, W., Kipen, H., Lau, J., Mandin, C., Sekhar, C., Wargocki, P., and Weekes, L. (2022). ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide.
- Philips GmbH Market DACH (2021). Produkt Philips 2000 Series Luftreiniger AC2887/10 Luftreiniger kaufen *Philips*. Available at https://www.philips.de/c-p/AC2887_10/2000-series-luftreiniger (Accessed 28 June 2021).
- Pöhlker, M.L., Krüger, O.O., Förster, J.-D., Berkemeier, T., Elbert, W., Fröhlich-Nowoisky, J., Pöschl, U., Pöhlker, C., Bagheri, G., Bodenschatz, E., Huffman, J.A., Scheithauer, S., and Mikhailov, E. (2021). Respiratory aerosols and droplets in the transmission of infectious diseases. *ArXiv210301188 Phys*.
- Pollozhani, F., McLeod, R.S., Klimach, T., Pöschl, U., and Hopfe, C.J. (n.d.). ENERGY PERFORMANCE AND INFECTION RISK EVALUATION OF RETROFITTED VENTILATION SYSTEMS IN TIMES OF COVID.
- Pöschl, U. (2005). Atmospheric aerosols: composition, transformation, climate and health effects. *Angew. Chem. Int. Ed.* 44 (46):7520–7540.
- Pöschl, U., Helleis, F., Klimach, T., Hopfe, C., McLeod, R., Hoffmann, B., and Witt, C. (2021). Wissenschaftliche Stellungnahme und Empfehlung für Ventilator-Fensterlüften zum Infektionsschutz gegen die Aerosolübertragung von COVID-19 und für erhöhte Luftqualität in Klassenräumen.
- Pöschl, U. and Shiraiwa, M. (2015). Multiphase chemistry at the atmosphere–biosphere interface influencing climate and public health in the anthropocene. *Chem. Rev.* 115 (10):4440–4475.
- Pöschl, U. and Witt, C. (2021). Stellungnahme zur Wirksamkeit und Nutzung von Gesichtsmasken gegen COVID-19.
- Prather, K.A., Wang, C.C., and Schooley, R.T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2. *Science* 368 (6498):1422–1424. doi:10.1126/science.abc6197.
- Reiß, J., Illner, M., Erhorn, H., Roser, A., Schakib-Ekbata, K., Gruber, E., Winkler, M., and Jensch, W. (2017). Wissenschaftliche Begleitforschung zum Forschungsvorhaben „Energieeffiziente Schulen“ Abschlussbericht Phase 2.
- Rief, S. and Jurecic, M. (2014). LUFTFEUCHTIGKEIT AM BÜROARBEITSPLATZ.
- Rietschel, H. and Fitzner, K. (Eds.) (2008). Raumklimatechnik: Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik, 16th ed, *VDI-Buch, Rietschel, H. (Hgs):Raumklimatechnik*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- RKI (2023). RKI - Coronavirus SARS-CoV-2 - COVID-19-Fälle, die einem Ausbruch zugeordnet werden, nach Meldewoche und Infektionsumfeld (Tabelle wird jeden Donnerstag aktualisiert). Available at https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Daten/Ausbruchsdaten.html.
- Schaub, M., Borger, K., Derwein, D., Rewitz, K., and Müller, D. (2021). Relatives aerogenes Infektionsrisiko Infektionsschutz durch Lüftungsgeräte und Luftreiniger (Teil 3). *HLH Vdi Fachmedien* 72 (07–08).
- Schibuola, L., Scarpa, M., and Tambani, C. (2016). Natural Ventilation Level Assessment in a School Building by CO₂ Concentration Measures. *Energy Procedia, ATI 2016 - 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association* 101:257–264. doi:10.1016/j.egypro.2016.11.033.
- Schoeps, A., Hoffmann, D., Tamm, C., Vollmer, B., Haag, S., Kaffenberger, T., Ferguson-Beiser, K., Kohlhas-Griebel, B., Basenach, S., Missal, A., Höfling, K., Michels, H., Schall, A., Kappes, H., Vogt, M., Jahn, K., Bärnighausen, T., and Zanger, P. (2021). Surveillance of SARS-CoV-2 transmission in educational institutions, August to December 2020, Germany. *Epidemiol. Infect.* 149. doi:10.1017/S0950268821002077.
- Schröter (2021). OFFENER BRIEF Klassenräume besser belüften - Ein Vorschlag. *DPG*.
- Schwarzbauer, C. (2022). Forschungsprojekt “Sicheres Klassenzimmer”: Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht. doi:10.5281/zenodo.7496827.
- Shimer, D.A., Jenkins, P.L., Hui, S.P., and Adams, W.C. (1995). 132 MEASUREMENT OF BREATHING RATE AND VOLUME IN ROUTINELY PERFORMED DAILY ACTIVITIES. *Epidemiology* 6 (2):S30.

- Shiraiwa, M., Sosedova, Y., Rouvière, A., Yang, H., Zhang, Y., Abbatt, J.P., Ammann, M., and Pöschl, U. (2011). The role of long-lived reactive oxygen intermediates in the reaction of ozone with aerosol particles. *Nat. Chem.* 3 (4):291–295.
- Shiraiwa, M., Ueda, K., Pozzer, A., Lammel, G., Kampf, C.J., Fushimi, A., Enami, S., Arangio, A.M., Fröhlich-Nowoisky, J., Fujitani, Y., Furuyama, A., Lakey, P.S.J., Lelieveld, J., Lucas, K., Morino, Y., Pöschl, U., Takahama, S., Takami, A., Tong, H., Weber, B., Yoshino, A., and Sato, K. (2017). Aerosol Health Effects from Molecular to Global Scales. *Environ. Sci. Technol.* 51 (23):13545–13567. doi:10.1021/acs.est.7b04417.
- shop.heraeus-soluva.com (2021). Soluva® Air W - Weiß | Luftdesinfektion | Produkte | Heraeus Noblelight Soluva Shop. Available at <https://shop.heraeus-soluva.com/de/Produkte/Luftdesinfektion/SoluvaAirWWeiss/p/5142229> (Accessed 4 July 2021).
- Siebler, L., Rathje, T., Calandri, M., and Eydner, M. (2021). Pilotprojekt: Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen. 201.
- Skistad, S., Mundt, E., Nielsen, P.V., Hagström, K., and Railio, J. (2004). Displacement Ventilation in Non-Industrial Premises, REHVA Guidebook Nr.1.
- Steffens, T. and Seipp, H.-M. (2021a). Lufthygiene in Unterrichtsräumen unter SARS-CoV-2-Bedingungen- Teil I: Auswirkungen der Schallbelastung beim Einsatz mobiler Luftreiniger (MLR). *Gefahrstoffe - Reinhalt. Luft VDI Fachmedien GmbH Co KG 81* (3–4):127–134.
- Steffens, T. and Seipp, H.-M. (2021b). Lufthygiene in Unterrichtsräumen unter SARS-CoV-2-Bedingungen - Teil II: Aerosolkonzentrationsgradienten und Beeinflussung der thermischen Behaglichkeit durch mobile. *Gefahrstoffe - Reinhalt. LuftVDI Fachmedien GmbH Co KG 81* (3–4):135–146.
- Steiger, S. and Hellwig, R.T. (2011). Hybride Lüftungssysteme für Schulen: Abschlussbericht zum Förderkennzeichen AZ 0327387 A, *Forschungsbericht / Fachverband Gebäude-Klima e.V.* Fachverband Gebäude-Klima, Bietigheim-Bissingen.
- Su, H., Cheng, Y., Witt, C., Ma, N., and Pöschl, U. (2021). Synergetic measures to contain highly transmissible variants of SARS-CoV-2.
- Tappler, P., Hutter, H.-P., and Moshhammer, H. (2020). Positionspapier zur Lüftung von Schul- und Unterrichtsräumen – SARS-CoV-2.
- Tecalor GmbH (2021). LTM dezent® 300/600/800 Hohe Luftqualität für große Ansprüche. 12.
- Thatcher, T.L., Lai, A.C.K., Moreno-Jackson, R., Sextro, R.G., and Nazaroff, W.W. (2002). Effects of room furnishings and air speed on particle deposition rates indoors. *Atmos. Environ.* 36 (11):1811–1819. doi:10.1016/S1352-2310(02)00157-7.
- Thiel, P. (2018). Raumluftqualität - Einflussfaktoren bei der Bemessung der Außenluftvolumenströme. 31.
- THM (2021). Lüften von Unterrichtsräumen optimiert. Available at <https://www.thm.de/site/hochschule/campus/aktuelles/aus-lehre-und-forschung/lueften-von-unterrichtsraeumen-optimiert.html> (Accessed 30 July 2021).
- Trotec GmbH (2021). Hochleistungs-luftreiniger TAC V+ - TROTEC. Available at <https://de.trotec.com/produkte-services/maschinen-highperformance/luftreinigung/raumluftreiniger-tac-v/> (Accessed 28 June 2021).
- Umweltbundesamt (2021a). Mobile Luftreiniger in Schulen: Nur im Ausnahmefall sinnvoll | Umweltbundesamt. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/themen/mobile-luftreiniger-in-schulen-nur-im-ausnahmefall> (Accessed 17 May 2021).
- Umweltbundesamt (2021b). Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen *Umweltbundesamt*. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen> (Accessed 5 July 2021).
- Umweltbundesamt (2021c). Infektiöse Aerosole in Innenräumen *Umweltbundesamt*. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinflusse-auf-den-menschen/innenraumluft/infektiuese-aerosole-in-innenraeumen> (Accessed 5 July 2021).
- Umweltbundesamt (2021d). Lüftung, Lüftungsanlagen und mobile Luftreiniger an Schulen *Umweltbundesamt*. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/themen/lueftung-lueftungsanlagen-mobile-luftreiniger-an> (Accessed 19 August 2021).
- Umweltbundesamt (2020a). Stellungnahme Kommission Innenraumlufthygiene zu Lüften und SARS-CoV-2. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/stellungnahme-kommission-innenraumlufthygiene-zu> (Accessed 17 May 2021).
- Umweltbundesamt (2020b). Richtig Lüften in Schulen *Umweltbundesamt*. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/richtig-lueften-in-schulen> (Accessed 4 July 2021).

- Umweltbundesamt (2020c). Lüften in Schulen.
- Umweltbundesamt (2020d). Stellungnahme Kommission Innenraumlufthygiene zu Lüften und SARS-CoV-2 *Umweltbundesamt*. Available at <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/stellungnahme-kommission-innenraumlufthygiene-zu> (Accessed 17 May 2021).
- Umweltbundesamt (2017). Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden, Teil 1: Bildungsgebäude.
- Umweltbundesamt (2008a). Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden. Umweltbundesamt.
- 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. doi:10.1007/s00103-008-0707-2.
- van Doremalen, N., Bushmaker, T., Morris, D.H., Holbrook, M.G., Gamble, A., Williamson, B.N., Tamin, A., Harcourt, J.L., Thornburg, N.J., Gerber, S.I., Lloyd-Smith, J.O., de Wit, E., and Munster, V.J. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *N. Engl. J. Med.* 382 (16):1564–1567. doi:10.1056/NEJMc2004973.
- VDI 4300-14 (2021). Prüfkriterien für mobile Luftreiniger.
- Viessmann Climate Solutions SE (2021). Vitovent 200-P für Kitas & Schulen *Viessmann*. Available at <https://www.viessmann.de/de/aktionen/aufatmen.html> (Accessed 28 June 2021).
- von Grabe, J., Svoboda, P., and Bäuml, A. (2014). Window ventilation efficiency in the case of buoyancy ventilation. *Energy Build.* 72:203–211. doi:10.1016/j.enbuild.2013.10.006.
- von Pettenkofer, M. (1858). Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. Cotta.
- Wang, N., Ernle, L., Bekö, G., Wargocki, P., and Williams, J. (2022). Emission Rates of Volatile Organic Compounds from Humans. *Environ. Sci. Technol.* 56 (8):4838–4848. doi:10.1021/acs.est.1c08764.
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J.A., and Contreras-Espinoza, S. (2019a). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Build. Environ.* 157:197–204. doi:10.1016/j.buildenv.2019.04.046.
- Wargocki, P., Porras-Salazar, J.A., and Contreras-Espinoza, S. (2019b). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Build. Environ.* 157:197–204. doi:10.1016/j.buildenv.2019.04.046.
- West, J.J., Cohen, A., Dentener, F., Brunekreef, B., Zhu, T., Armstrong, B., Bell, M.L., Brauer, M., Carmichael, G., and Costa, D.L. (2016). What we breathe impacts our health: improving understanding of the link between air pollution and health.
- WHO (2021). Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions.
- WOLF GmbH (2021). COVID-19: Studie *WOLF – Ihr Syst. Für Bestes Raumklima*. Available at <https://www.wolf.eu/ueber-wolf/presse/pressemitteilungen/covid-19-studie/> (Accessed 5 July 2021).
- WOLF GMBH (2017). Wolf COMFORT-GROSSRAUMLÜFTUNGSGERÄT tech. Dokumentation. Available at https://www.wolf.eu/fileadmin/Wolf_Daten/Dokumente/Technische_Dokus/Ventilation/4800620_201704_Comfort_Grossraumlueftung_CGL_DE.pdf (Accessed 4 July 2021).
- Wolf GmbH (2015). Bedienungsanleitung Regelung - CGL.
- World Health Organization (Ed.) (2010). Who guidelines for indoor air quality: selected pollutants. WHO, Copenhagen.
- Zeidler, O., Kriegel, K., and Fitzner, K. (1999). Unterschiede der Feuchtigkeitsübertragung einer Person in Quell- und Mischlüftung. *Luft- Kältetechn.* AIVC 12,413.
- Zürcher, C. and Frank, T. (2018). Bauphysik: Bau und Energie, 5., überarbeitete Auflage. ed, *Bau und Energie*. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich.

Anhang

A.1 Gleichungen und Rechenmethoden

A.1.1 Konzentration und Dosis luftgetragener Viren und Schadstoffe

Die Innenraum-Konzentration eines Luftschadstoffs (z.B. CO₂ 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 effektive Luftwechselrate ergibt sich durch die Summe aller Effekte, die die Konzentration eines Schadstoffs mit der Zeit reduzieren (Peng et al. 2022).

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

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)(Fitzner and Finke 2012),
- der Gesamtvolumenstrom (Q_i) von frischer und gereinigter Luft, dessen Effizienz ($\eta_i = \eta_{aero/CO_2} * (1 + \eta_{quell})$) sich aus dem Quelllufteffekt (η_{quell}) und der Effizienz für CO₂ (η_{CO_2}) oder Aerosolpartikel (η_{aero}) ergibt,
- die effektive Überlebensdauer der Viren ($\lambda_{vp} = 0.63/h$; $\eta_{vp} = 1$)(van Doremalen et al. 2020),
- die effektive Sedimentationrate der Viren bzw. virenhaltigen Atemaerosolpartikel ($\lambda_{sed} = 0.42/h$; $\eta_{sed} = 1$)(Thatcher et al. 2002)
- die zusätzliche Wechselrate des Stoßlüftens (λ_{vent} ; $\eta_{vent} = 1$).

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

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

Die Dosis bzw. die Anzahl der bis zum Zeitpunkt t inhalierten Atemaerosolpartikel, $n_v(t)$, 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 inhalierten Partikel in vorangegangenen 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 2021a); <https://bit.ly/3xfmz>). So kann jeder die Rechnungen mit eigenen Parametern durchführen und auch Parameter wie Raumgröße und Belegung ändern.

Beim Vergleich unterschiedlicher Methoden und Geräte ist die „Clean Air Delivery Rate“ (CADR) eine wesentliche Kenngröße. Die CADR ist das Produkt aus Volumenstrom (Q_i) und Filtrations- bzw. Deaktivierungs-Effizienz und Raumeffekten wie z.B. Kurschlussströmen (η_{aero}). Die benötigte CADR richtet sich üblicherweise nach der Personenzahl im Raum und kann nach Bedarf auf mehrere Geräte verteilt werden, was typischerweise zu höherem Komfort bzw. erhöhter Behaglichkeit führt (weniger Lärm/Zugluft).

A1.2 Reduktion von Infektionsrisiken

Ausgehend von $n_v(t)$ lässt sich das Risiko bzw. die Wahrscheinlichkeit für die Infektion einer Person, $R_i(t)$, mittels eines Binomialmodells berechnen (Lelieveld et al. 2020a):

$$R_i(t) = [1 - (1 - P_{RNA})^{n_v(t)}] \xrightarrow{n_v(t) \ll D_{50}} 1 - (P_{RNA} \times n_v(t)) \quad (4)$$

Dabei ist P_{RNA} die Wahrscheinlichkeit, dass ein einzelnes Viruspartikel eine Infektion auslöst und die mittlere infektiöse Dosis, D_{50} , ist die Anzahl von Viren, die ein Individuum inhalieren muss, um eine Infektionswahrscheinlichkeit von 50% zu haben.

$$P_{RNA} = 1 - e^{-\frac{\ln(0.5)}{D_{50}} n_v} \xrightarrow{D_{50} \gg 0} -\frac{\ln(0.5)}{D_{50}} n_v \quad (5)$$

Für SARS-CoV-2 ist davon auszugehen, dass D_{50} im Größenordnungsbereich von etwa 100 bis 1000 liegt. Solange die Gesamtzahl der eingeatmeten Viren deutlich unter D_{50} liegt, ist das Infektionsrisiko näherungsweise proportional zur eingeatmeten Anzahl der Viren (Abweichungen <10% für $n_v < D_{50}/3$). Beim Vergleich von Szenarien und Eindämmungsmaßnahmen entspricht also die Verringerung der eingeatmeten Anzahl der Viren in der Regel dem Effekt auf das persönliche Infektionsrisiko durch Aerosolübertragung (Cheng et al. 2021). Dieser Rechenansatz wurde in der vorliegenden Studie angewandt und beruht auf der Grundlage des Binomialmodells.

Zur Orientierung erläutern wir hier zusätzlich auch das in der Literatur ebenfalls weit verbreitete Quantamodell zur Berechnung von Infektionsrisiken (Peng et al. 2022; Miller et al. 2021), welches als Näherung für das Binomialmodell betrachtet werden kann und auf Annäherung der Binomialverteilung durch eine Poisson-Verteilung beruht. Es geht nicht von der Infektionswahrscheinlichkeit einzelner Viren aus, sondern von epidemiologisch ermittelten Infektionsrisiken (Sekundärinfektionsraten). Nach diesem Ansatz lässt sich das Infektionsrisiko durch folgende Gleichung als Funktion der Anzahl sogenannter infektiöser Quanten, n_q , berechnen:

$$R_i = 1 - e^{-n_q} \quad (6)$$

Für den Zusammenhang der Anzahl infektiöser Quanten und Viren folgt aus Gleichungen 4, 5 und 6:

$$n_q = -\frac{\ln(0.5)}{D_{50}} n_v \approx P_{RNA} n_v$$

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 (Helleis and Klimach 2021a; Müller et al. 2020; Erhart et al. 2015; Fitzner and Finke 2012).

Als Luftwechselrate (LWR) des Stoßlüftens verwenden wir 30/h bei günstigen Bedingungen und 6/h bei ungünstigen Bedingungen. Laut Steffens und Seipp (Steffens and 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. veranschlagen basierend auf Messungen an halbgeöffneten Fenstern von Erhart et al. Luftwechselraten von ca. 6/h für das Stoßlüften schlecht lüftbarer Räume, für die entsprechend der Einsatz von Luftreinigungsgeräten empfohlen wird (Müller et al. 2020; Umweltbundesamt 2020a; Erhart et al. 2015). Ähnliche Luftwechselraten lassen sich unter Annahmen zur Fensterfront und Temperaturdifferenzen mit in der Literatur genannten Parametrierungen errechnen (Erhart et al. 2015; British Standards Institution 1991). 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 Quelllufteffekt setzen wir im günstigen Fall moderat mit 50% an und im ungünstigen Fall mit 25% (Skistad et al. 2004). 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 aus Rietschel and Fitzner 2008) sind hier unter optimalen Bedingungen auch Werte von 300-500% ablesbar (Helleis and Klimach 2021a; Melikov 2015; Rietschel and Fitzner 2008). Entsprechende Gradienten sind auch bei Aufstellung, Nutzung und Auswertung von CO₂- und Aerosolmessgeräten zu berücksichtigen (Helleis and Klimach 2021a).

Für Umluftgeräte und Lüftungsmethoden nur mit Stoßlüften wird kein Quelllufteffekt, 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 and Fitzner 2008; Skistad et al. 2004).

Wird die Abluft mittels Hauben über den Köpfen der anwesenden Personen abgezogen, so gelingt es einen erheblichen Teil der Schadstoffe abzutransportieren bevor sie sich in die Raumluft einmischen (Anhang A.6, Abbildung A6 (Helleis and Klimach 2021a; Klimach and 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

Für den Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden verwenden wir in dieser Studie beispielhaft die Kenngrößen einiger Geräte, die von ihren Herstellern für Klassenräume empfohlen wurden (Tab. 1, Anhänge A.2 und A.3). Selbstverständlich gibt es auch Lüftungsgeräte mit anderen Kenngrößen, die in unterschiedlichsten Kombinationen und Betriebszuständen zum Einsatz kommen können. Um auch andere Geräte, Kombinationen und Kenngrößen zu überprüfen zu können, stellen wir online auch das Tabellenkalkulationsprogramm zur Verfügung, welches für die Vergleichsstudie entwickelt und genutzt wurde ((Klimach 2021a); <https://bit.ly/3xfmz>).

1. Dauerlüften mit einem **RLT-Lüftungsgerät** analog zu einem LTM dezent® 800 topline GIT (Tecalor GmbH 2021) mit $870 \text{ m}^3/\text{h}$ ($\sim 34 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person}$) 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 ($\eta_{\text{CO}_2/\text{aero}} = 75\%$) gerechnet (Kähler et al. 2020), der ungünstige Fall entspricht etwa $25 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Person}$. Gerätekosten $\sim 12.000 \text{ EUR}$ (MeinHausShop 2021).
2. Dauerlüften mit einem **RLT-Lüftungsgerät** ähnlich Viessmann Vitovent 200-P (Viessmann Climate Solutions SE 2021) mit maximal $800 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 50% Umluft Anteil, Wärme- und Feuchterückgewinnung. Der Umluftanteil wird mit einem HEPA H14 Filter zu 99.99% von Partikeln gereinigt. Der Quelllufteffekt (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 $\sim 10.000 \text{ €}$ (Haustechnik Handrich GmbH 2021).
3. Dauerreinigen mit deckenseitig montierten **UV-C-Luftreinigern** ähnlich z.B. drei Stück Soluva Air W, Gesamtfluss (Q_i) $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ bei 99%iger Inaktivierung von Viren (Heraeus Noblelight GmbH 2021). Die Geräte laufen im günstigen Fall parallel zur Stoßlüftung nach UBA bei ($\lambda_{\text{vent}} = 30/\text{h}$) und haben eine Effizienz von $\eta_{\text{aero}} = 94\%$ ($95\% \cdot 99\%$). Im ungünstigen Fall wird nach den Schulstunden mit 6/h stoßgelüftet und die Effizienz beträgt $\eta_{\text{aero}} = 74\%$ ($99\% \cdot 75\%$). Gerätekosten $3 \times 2.000 \text{ EUR}$ (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 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ eingestellt bei einer Filtereffizienz von 99,99%. Die Geräte laufen im günstigen Fall parallel zur Stoßlüftung nach UBA bei $\lambda_{\text{vent}} = 30/\text{h}$ und haben eine Effizienz von $\eta_{\text{aero}} = 95\%$ ($95\% \cdot 99,99\%$). Im ungünstigen Fall wird nach den Schulstunden mit 6/h stoßgelüftet und die Effizienz beträgt $\eta_{\text{aero}} = 74\%$ ($99,99\% \cdot 75\%$). Gerätekosten ca. 4.000 EUR (de.trotec.com 2021) bzw. $4\text{-}5 \times 270 \text{ EUR}$ (Philips GmbH Market DACH 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; Steffens and Seipp 2021a; Kähler et al. 2020), z.B. $1000 \text{ m}^3/\text{h}$ für TAC V+.
5. **Stoßlüften in den Pausen** (große und kleine) nach jeder Schulstunde mit effektiven Luftwechselraten (λ_{vent}) von 30/h (Steffens and Seipp 2021b) und 6/h (Müller et al. 2020; Umweltbundesamt 2020a). Mechanisch unterstütztes Stoßlüften mit einer Ventilatorleistung von $4000 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht einer Rate von etwa 20/h und liegt somit im betrachteten Bereich (Bodenschatz 2021; Schröter 2021; THM 2021)
6. **Stoßlüften nach Empfehlung des Umweltbundesamtes** (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 and 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 CO₂ Monitor**. Es wird angenommen, dass die Fenster bei einer CO₂-Konzentration von ca. 950 ppm bzw. 1200 ppm geöffnet und erst wieder geschlossen werden sobald die Konzentration unter 560 ppm bzw. 800 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 offenbar). Die kontinuierliche Wechselrate (λ_i) wird nach Messwerten (Helleis and Klimach 2021a) 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 CO₂-Leitwert eingehalten wird. Im ungünstigen Fall wird die Wechselrate halbiert, was einer Differenztemperatur von ca. 4 K entspricht. Der Quelllufteffekt (η_{quell}) kommt zum Tragen.

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

10. Dauerlüften mit einem **MPIC-Fensterlüftungssystem** (MPIC-FLS) mit 800 m³/h Volumenstrom, verteilter Absaugung über den Personen mittels Hauben und Zufuhr von Frischluft in Bodennähe (Abb. A4, Anhang A.6). Der Quelllufteffekt (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 600 Klassenzimmern an Schulen der Stadt Mainz installiert und in Betrieb genommen.

Nach Erfahrungswerten aus der Ausstattung von mehr als 600 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 (Philips GmbH Market DACH 2021)). Eine verteilte Aufstellung solcher Geräte (Curtius et al. 2021) erscheint auch bezüglich ihrer Wirksamkeit vorteilhaft (Minimierung von Kurzschlussströmen). Abbildung A10 zeigt wie ein Luftreiniger zusätzlich zu Stoßlüften nach UBA-Empfehlung wirkt. Dazu wurden die Reduktionswerte nach (VDI 4300-14 2021) in effektive Raumluftwechselraten umgerechnet und die daraus resultierende Atemaerosoldosis ermittelt. Daraus ergibt sich eine Reduktion der inhalierten Dosis um 40% bei Anwendung nach VDI 4300-14 (entsprechend einer CADR von 920 m³/h bei 200 m³ Raumvolumen). Eine weitere Verdoppelung der Luftwechselrate reduziert die inhalierte Dosis um weitere 20%, allerdings bei etwa vierfach höheren Stromkosten.

A.4 Wärmerückgewinnung

Zur Beurteilung der Notwendigkeit von Wärmerückgewinnung (WRG) in Schulen betrachten wir folgende Aspekte: (a) Lüftungsbedarf und Wärmeabgabe von Personen in Klassenräumen; (b) Lüftungsverluste nach einfachen Rechenverfahren; (c) Detaillierte Modellrechnungen für verschiedene Gebäudesanierungsmaßnahmen; (d) Vergleich mit dem Wärmebedarf einer realen Schule (IGS Mainz-Bretzenheim); (e) Dezentrale CO₂-geführte Lüftung mit und ohne WRG; (f) Zentrale RLT-Anlage mit WRG.

Lüftungsbedarf und Wärmeabgabe

Auf Schulen bezogen besteht der Nutzen der Lüftung im Wesentlichen in der Verdünnung von personengenerierter Atemluft, die immer auch mit personengenerierter Wärme einher geht. So sind die vom menschlichen Körper produzierten CO₂- und Wärmemengen direkt miteinander verknüpft. Bei der Verstoffwechslung von Sauerstoff zu Kohlendioxid werden etwa 448 kJ/mol O₂ Energie frei (Klinke and Silbernagl 2001). Je nach Stoffwechselfartner (Kohlehydrate, Fette, Eiweiße) entstehen pro verbrauchtem Sauerstoffmolekül (O₂) unterschiedliche Mengen an CO₂, das Verhältnis von erzeugtem CO₂ zu verbrauchtem O₂ nennt man respiratorischen Koeffizienten (RQ), er bewegt sich zwischen 0,7 bei Fettverbrennung und 1 für Kohlehydratabbau. Typische Mischkost hat einen RQ von 0,82 – 0,85 (ISO 8996 n.d.; Klinke and Silbernagl 2001). Damit kann die produzierte CO₂-Menge eines Menschen berechnet werden, wenn der Energieverbrauch bekannt ist. Der Energieverbrauch (M) schwankt stark mit der körperlichen Aktivität (Blaxter 1989) und wird typischerweise in Watt pro m² Körperoberfläche angegeben. Für leichte sitzende Tätigkeiten beträgt er um 60 W/m² (ISO 8996 n.d.; Giedraityte et al. 2001; Blaxter 1989). Der Verbrauch von Kindern liegt typischerweise etwas darüber (Cheng and Brown 2020), und wir rechnen mit 70 W/m² pro Person. In Ruhe werden ca. 20% der produzierten Wärme für die Verdunstung von Wasser aufgebracht (Perspiratio insensibilis) (Klinke and Silbernagl 2001), der Rest wird als Wärme (konvektiv oder als Strahlung) an den Raum abgegeben. Die Körperoberfläche lässt sich nach (DuBois and DuBois 1916) aus der Körpergröße und dem Körpergewicht abschätzen. Nach (ISO 8996 n.d.) kann die CO₂-Produktion (G) in lSTP/h wie folgt berechnet werden (Thiel 2018).

$$G = RQ \frac{A_{Du} M}{(0.23 RQ + 0.77) * 5.88}$$

Für einen Schüler mit 1,6 m Größe und 55 kg Gewicht beträgt die Oberfläche etwa 1,56 m², die trockene Wärmeabgabe 87 W und die entsprechende CO₂ Produktion etwa 17,5 l/h, bei einer Raumtemperatur von 20°C und einem Luftdruck von 1000 mbar. Die CO₂-Konzentration im Raum erreicht den Zielwert von 1000 ppm (Umweltbundesamt 2008b), wenn der Raum kontinuierlich mit etwa 29,6 m³/h pro Person gelüftet wird und der Raumvolumenanteil 8 m³ pro Person beträgt. Der nötige Wärmebedarf solch einer CO₂-geführten Lüftung liegt entsprechend der Wärmekapazität von ca. 1,2 kJ K⁻¹m⁻³ bei 10 W pro Kelvin Differenz der Raumtemperatur zur Außentemperatur. Zum Erwärmen der nötigen Frischluft wird somit ab einer Außentemperatur von ca. 11,2°C keine zusätzliche Heizenergie mehr benötigt bei weiteren Wärmequellen wie Beleuchtung/Sonneneinstrahlung entsprechend niedriger. Aus dem Vergleich dieser Temperaturschwelle mit den stündlichen Mittelwerten der Außentemperaturen in Frankfurt am Main im Jahr 2020 (DWD) während der Schulzeit (8-15 Uhr) ergibt sich ein Temperaturzeit Bedarf von 3109 K h (Kelvinstunden) entsprechend etwa 31 kWh die pro Person und Jahr geheizt werden müssen. Abbildung A7 zeigt den zusätzlichen Energiebedarf für Lüften ohne WRG in Abhängigkeit des gesetzten CO₂-Zielwerts, so sind bei einem Zielwert von etwa 1200 ppm gut 12 kWh pro Person

und Jahr nötig, bei 800 ppm sind es gut 77 kWh. Ein Quelllufteffekt von 50% würde den lüftungsbedingten Heizenergiebedarf auf etwa 2 kWh bzw. 45 kWh pro Person und Jahr sinken lassen. Eigene Berechnungen sind mit dem Tabellenkalkulationsprogramm unter <https://bit.ly/3xftmz> (Klimach 2021b) möglich.

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 7 Monate lang, es fallen 2 Wochen Herbst, Weihnachts- und Osterferien und einige Feiertage (ca. 3) in diese Zeit. Die Anzahl der Heizschultage (HST) bzw. Heizgradschultage (HGST) betragen damit

$$\text{Heizschultage} = (217 \text{ d} - 45 \text{ d}) * 5/7 = 123 \text{ sd}$$

$$\text{Heizschulgradtage} = 123 \text{ sd} * 3300 \text{ Kd}/217 \text{ d} = 1870 \text{ sKd}$$

Daraus errechnet sich der Lüftungswärmeverlust eines Klassenraums in der IGS Mainz-Bretzenheim bei durchschnittlicher Anwesenheit von 7 h/d grob zu

$$\begin{aligned} Q_{vent} &= 1870 \text{ sKd} * 7 \text{ h/d} * 0.34 \text{ Wh/K} * 30 \text{ m}^3/\text{h/p} * 25 \text{ p} \\ &= 3.34 \text{ MWh} \end{aligned}$$

Das detaillierte Modell aus aktuellen Stundenmitteln (2.13 MWh) ergibt im Vergleich zu Berechnungen aus 30 Jahre alten Tagesmitteln einen um 36% niedrigeren Wert. Als Ursachen kommen folgende Faktoren in Frage: (1) Der Unterschied Lufttemperatur zu operativer Temperatur (gemittelter Wert zwischen Wand und Luft), kann bei den erforderlichen hohen Lüftungsraten von ca. 4/h bis zu 3 K betragen. Damit werden die aus Tagesmitteln berechneten Lüftungsverluste um bis zu ca. 10% überschätzt. (2) Die Lüftungsverluste fallen tagsüber an, wenn die Außentemperaturen ca. 2 K höher als das Tagesmittel liegen. Damit werden die Lüftungsverluste um weitere bis ca. 13% überschätzt. (3) In den letzten 30 Jahren ist es in Deutschland besonders im Winter tendenziell wärmer geworden (~1 K, DWD CDC). Dadurch ergäbe sich eine weitere Überschätzung der Lüftungsverluste um ca. 7%.

Detaillierte Modellrechnungen für verschiedene Gebäudesanierungsmaßnahmen

In einer ergänzenden Studie (Helleis 2021) wurde die Wärmebilanz für Klassenräume und andere Räumlichkeiten (Großraumbüro, Zwei-Zimmer-Wohnung) mit anteiligen Verkehrswegen unter Berücksichtigung der Wetterdaten von 2020 für Frankfurt am Main detailliert mit Stundenwerten und gegebenen bzw. gemessenen Parametern berechnet. Es wurden Heiz- und Kühlenergiebedarf des Bestands und die Effekte von vier verschiedenen Gebäudesanierungsmaßnahmen berechnet: 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.

Abbildung A11 zeigt den Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden. Als Referenzwert wurde BAUA ASR A3.6 gewählt, da sie schon vor der Pandemie gültig war. Relativ zu den Vorgaben der BAUA ASR A3.6 bringen die untersuchten Lüftungsmethoden einschließlich Luftreinigern in UBA Kat 2 Räumen lediglich Verbesserungen bis zu ca. 20% beim Infektionsschutz. Nur das MPIC-FLS bringt Verbesserungen bis zu mehr als 60%. UBA Stoßlüften mit ca. 3,3 Luftwechseln pro Stunde und dezentrale RLT mit CO₂-Zielwerten zwischen 1000 und 1200 ppm erreichen den durch die ASR3.6 geforderten Luftaustausch und den damit verbundenen Infektionsschutz nicht.

Vergleich mit dem Wärmebedarf einer realen Schule (IGS Mainz-Bretzenheim)

Die eingefahrenen Transmissions-, Infiltrations- und Lüftungsverluste für 100 Räume in der IGS Mainz-Bretzenheim, von denen nur 64 belegt sind (Leerstand von Fachräumen, Teamräume usw.), betragen im detaillierten Modell

$$Q_{trans,m} = 789 \text{ MWh}$$

$$Q_{infiltr,m} = 117 \text{ MWh}$$

$$Q_{vent,m} = 213 \text{ MWh} * 64/100 = 136 \text{ MWh}$$

bei einem modellierten Heizenergieverbrauch (Nutzenergie) von

$$Q_{heiz,m} = 723 \text{ MWh}$$

Die IGS Mainz-Bretzenheim verbraucht jährlich ca. 2100 MWh Endenergie (Gas). Davon ausgehend lässt sich nach Abzug von Nebengebäuden (Turnhallen, Kantine, Kita), Warmwasser-, Verteilungs- und Bereitstellungsverlusten ein realer Heizenergieverbrauch von etwa

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

für die betrachteten Klassenräume abschätzen.

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 ($Q_{loss,m} = Q_{trans,m} + Q_{infiltr,m} + Q_{vent,m}$) hinzu addiert, so dass

$$Q_{loss} = Q_{loss,m} + (Q_{heiz} - Q_{heiz,m}) = (1042 + 477) \text{ MWh} = 1519 \text{ MWh}$$

Der Anteil der Lüftungsverluste an den Gesamtverlusten beträgt also lediglich ca. $(136 \text{ MWh}) / (1519 \text{ MWh}) \approx 9\%$. Bezogen auf die Verluste lägen die durch Wärmerückgewinnung tatsächlich erreichbaren Einsparungen im realen Gebäude bei bestenfalls $0.8 * 9\% \approx 7\%$.

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 Endenergieverbrauch gut bekannt ist, ergeben sich trotz der einfachen Rechnung valide Bilanzierungen und Kernaussagen für die betrachtete Nutzungseinheit.

Dezentrale CO₂-geführte Lüftung mit und ohne WRG

Das Tabellenkalkulationsprogramm (<https://bit.ly/3xftmz> (Klimach 2021b)) ermöglicht auch den Vergleich mit marktüblichen RLT-Geräten zur dezentralen Klassenraumbelüftung mit Wärmerückgewinnung.

Abbildung A8 gibt beispielhaft den personenbezogenen Energiebedarf in einem sanierten und einem unsanierten Klassenraum wieder. Für Klassenräume lässt sich, wenn überhaupt, nur ein marginaler Vorteil der WRG bezüglich des Primärenergiebedarfs feststellen, der ebenso gut oder besser durch leichte Quelläftung erreicht werden kann. Im sanierten Fall lohnt sich die WRG noch weniger, da es weniger Transmissionsverlust mit der Abwärme von Personen ausgleichen kann und daher länger im Bypass laufen muss.

Im gezeigten Beispiel wird das RLT-Gerät während der Nutzungszeit CO₂-geführt und ansonsten mit Minimallüftung oder im Standby-Modus betrieben. Die Minimallüftung erfolgt bei etwa 30% der Nenndrehzahl bzw. Nennluftmenge, um hygienische Probleme zu vermeiden (angelehnt an Wolf GmbH 2015). Im Standby-Betriebszustand mit abgeschalteten Ventilatoren beträgt die Leistungsaufnahme des betrachteten Geräts ca. 30 W (Kundenservice WOLF GmbH 2021). Verglichen wird neben dem Primärenergiebedarf auch die ökonomische Seite mit Betrachtung der Strom, Wartungs- und Heizkosten die durch die jeweilige Lüftung entstehen. Der Vergleich berücksichtigt neben dem Energieverlust durch den Luftaustausch auch Transmissionsverluste durch die Fassade und den Stromverbrauch anhand gegebener Ventilator- bzw. Gerätekenlinien der betrachteten Geräte (angelehnt an (ebm-papst GmbH 2021a; WOLF GMBH 2017)). Berücksichtigt werden mögliche Quelläufigeffekte, die Wärmerückgewinnungseffizienz und die Wärmeabgabe des Ventilators. Andere Wärmequellen wie solare Gewinne, Leuchtmittel oder andere elektrische Geräte werden nicht berücksichtigt. Die Verluste während der unterrichtsfreien Zeit werden angezeigt.

Betrachtung einer zentralen RLT-Anlage mit WRG

Manche ökonomische und ökologische Bewertungen von Wärmerückgewinnung (WRG) berücksichtigen keine Wärmegewinne durch anwesende Personen oder andere Wärmequellen (Kaup 2019b, 2019a; Kaup and Knissel 2019). Im Folgenden zeigen wir, wie sich die Bewertung der WRG für Schulen ändert, wenn man nur die Anwesenheit von Personen berücksichtigt.

(Kaup 2019a) geht von einem Volumenstrom von 14.400 m³/h aus und berechnet für Frankfurt am Main bei einem 16 stündigen Betrieb pro Tag einen jährlichen Wärmerückgewinn im Wert von 9817 € bei der angenommenen Effizienz von 68%. Der Wärmeverlust ohne Rückgewinnung läge demnach bei etwa 14.300 € pro Jahr. Zusätzlich werden Kapital, Wartungs- und Elektrokosten von 4182 € pro Jahr angegeben. Die Lüftung mit WRG kostet somit etwa 8700 € pro Jahr.

In Tabelle 2 gibt (Kaup 2019a) die nötigen Außentemperaturen und deren Häufigkeiten an, anhand derer die relevante Wärmeabgabe der Personen berechnet werden kann. Der Gesamtvolumenstrom (14.400 m³/h) des Geräts ist bei einem Zielwert von 1000 ppm für knapp 487 Schüler ausgelegt die eine Wärmeleistung von etwa 42,3 kW erbringen. Zusammen mit der WRG sind die Schüler damit in der Lage den gesamten Wärmebedarf der durch das Lüften entsteht zu decken, wobei die Schüler alleine bereits 9300 € erbringen und die Rückgewinne durch die WRG nur noch knapp 5000 € betragen. Die Kosten der WRG haben sich nicht geändert und liegen immer noch bei knapp 4200 €. Eine leichte Lockerung des Zielwerts auf 1100 ppm reicht im gleichen Szenario aus, um die Rückgewinne auf unter 4000 € fallen zu lassen, womit eine Amortisierung der WRG innerhalb einer Lebenszeit von 15 Jahren nicht mehr möglich ist.

Die bisher genannten Ergebnisse beziehen sich allerdings auf eine Betriebszeit von 16 Stunden an 6 Tagen die Woche. Rechnet man mit einer für Schulen realistischen Nutzungszeit von 7 Stunden an 5 Tagen pro Woche, sinken zwar die Elektrokosten entsprechend, aber die jährlichen Kosten der Anlage betragen immer noch gut 3600 €. Die jährlichen Rückgewinne der WRG sinken dann auf etwa 2000 € (Zielwert 1000 ppm), was einen finanziellen Verlust von etwa 1600 € pro Jahr ergibt. Daraus ist ersichtlich, dass selbst eine als sehr energieeffizient eingestufte WRG (spezifische Ventilatorleistung SFP = 588 W/(m³/s)) im Schulbetrieb unwirtschaftlich ist.

Darüber hinaus setzt Kaup bei seinen Betrachtungen voraus, dass die RLT-Anlage bereits existiert und nur die WRG nachgerüstet werden muss (Kaup 2010, 2019a). In diesem Fall, belaufen sich die spezifischen Anschaffungskosten für die WRG auf ca. 43 € pro Person. Für die Nachrüstung einer WRG im Bestand muss allerdings das gesamte RLT-Gerät (ca. 107 € pro Person; (Kaup 2010)) und die Gebäudeverteilung angeschafft und installiert werden (für Nachrüstung geschätzt zusätzlich ca. 5000 € pro Klassenraum bzw. 200 € pro Person). Die Kosten für die komplette RLT-Anlage belaufen sich also auf das ca. siebenfache des von Kaup für die WRG angenommenen Wertes. Für die Installation dezentraler RLT-Anlagen muss mit ca. 400 € pro Person gerechnet werden (Haustechnik Handrich GmbH 2021; WOLF GMBH 2017), was ungefähr dem 9-10fachen der Kalkulation Kaups entspricht. Eine Amortisation der Investition in Nachrüst-RLT mit WRG wäre also nach den Berechnungsmethoden von Kaup nicht möglich (Kaup 2010, 2019a).

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 für Frankfurt am Main detailliert mit Tageswerten und gegebenen bzw. gemessenen Parametern berechnet. In Abbildung A2 werden die anteiligen Beträge zur Gesamtbefeuchtung der Atemluft für EN 16798 Kat 1 Räume 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 Raumluftheuchte unterhalb der jeweiligen Auslegungfeuchte lag. Der Beitrag von Raumluftechnik 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, Nachtkühlung, Abschattung und Quelllüftung erzielt werden.

Abwägung Hygienerisiken – Befindlichkeitsvorteile

Besonders bemerkenswert sind folgende Aussagen (Zitate aus Fachverbänden und Fachinformationsquellen):

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 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 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 aufgeführten 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 flexibel und modular aufeinander aufbauen (Klimach et al. 2021; MPIC-Mainz 2021).

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)(Klimach et al. 2021). Die Hauben und Rohrleitungen können aus sehr preisgünstigen, leichten und transparenten Materialien gefertigt werden (Klimach and Helleis 2021), deren Unbedenklichkeit durch Brandschutzgutachten bestätigt wurde (IBC Ingenieurbau-Consult GmbH 2020).

Zum Nachweis der Quellluft- und Haubeneffekte wurden Experimente mit CO₂ und Aerosolquellen durchgeführt. Abbildung A5 zeigt die typischen Ergebnisse von CO₂-Messungen in einem lediglich durch Fensterlüftung belüfteten Klassenraum (äquivalent zu einfachem FLS bzw. Dauerlüften durch Kippfenster). Es wurden die CO₂ 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 Raumlüftungswechselraten von mehr als 12/h erzielt werden.

Abbildung A6 zeigt Ergebnisse von Aerosolmessungen bei in voller Ausbaustufe erreichten Direktabsaugungseffekten durch Hauben, mit Zigarillo-Rauch (MPIC-FLS, 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.

A.7 Stoßlüften, kontinuierliches Fensterlüften und hybride Lüftung

Ein vom Arbeitskreis Lüftung am Umweltbundesamt vorgelegtes Dokument empfiehlt maschinelle Grundlüftung mit ca. 25 m³/(h P) kombiniert mit Stoßlüften in den Unterrichtspausen und „Fensterlüften so oft wie möglich“ außerhalb der Heizperiode als hybrides Lüftungskonzept für Neubau- und Sanierungsprojekte (Umweltbundesamt 2017). Für Bestandsbauten wird Stoßlüften

auch während des Unterrichts gefordert, um „die Innenraumluftqualität in Unterrichtsgebäuden so gut wie gegenwärtig möglich zu halten“ (Umweltbundesamt 2017).

Detaillierte Monitoring-Studien an sanierten bzw. neugebauten Schulgebäuden sowie eine großangelegte Metastudie des Fraunhofer Instituts für Bauphysik zeigen jedoch in der Praxis, dass die Kombination von Raumlufttechnik (RLT) mit Stoßlüftung in den Pausen die Nachteile natürlicher Lüftung mit denen von unterdimensionierter RLT vereinigt, ohne die laut Arbeitsschutzregeln geforderten CO₂ Grenzwerte ganzjährig sicherzustellen (Müller et al. 2020; Knaus et al. 2019; Anlauff and Schwede 2018; Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Greml et al. 2008; Peper et al. 2007). Dies lässt sich auch mit einfachen Rechnungen nachvollziehen, und wir möchten darauf hinweisen, dass das vom UBA Arbeitskreis Lüftung vorgeschlagene Stoßlüftungskonzept für Bestandsgebäude die geforderten CO₂ Grenzwerte nicht wirklich „so gut wie gegenwärtig möglich“ einhält.

In Übereinstimmung mit gültigen Arbeitsschutzregeln und Lüftungstechnischem Lehrbuchwissen zeigen wir, dass zur Belüftung von Schulen und anderen Bildungseinrichtungen deutlich wirksamere, energetisch und wirtschaftlich sparsamere, und nachhaltige Alternativen zur Verfügung stehen – insbesondere kontinuierliches Lüften mit Kippfenstern unter Nutzung von Quelllufteffekten und nach Bedarf unterstützt durch Abluftventilatoren.

Dass das für Bestandsgebäude empfohlene Stoßlüften oder hybride Lüftung (Raumlufttechnik zur Grundlüftung ergänzt durch Stoßlüften in den Pausen) (Umweltbundesamt 2021d) in Neubauten keine Alternative zu Lüftungskonzepten darstellt, die die durch die BAUA geforderten CO₂ Grenzwerte ganzjährig sicherstellen, wird durch alle uns bekannten Studien der Branche nachgewiesen (Ostmann et al. 2022; Müller et al. 2020; Knaus et al. 2019; Anlauff and Schwede 2018; Reiß et al. 2017; Erhart et al. 2015; von Grabe et al. 2014; Fitzner and Finke 2012; Peper et al. 2007).

Nach den Angaben und Kenngrößen der BAUA Arbeitsschutzregeln A3.6 ist Dauerlüften die einzig praktikable Möglichkeit, den CO₂-Leitwert von 1000 ppm in voll besetzten Klassenräumen einzuhalten (BAUA ASR A3.6 2012).

Zahlreiche Studien zeigen, dass Stoßlüften die Anforderungen bei den typisch vorhandenen Öffnungsquerschnitten bei Temperaturen über ca. 10°C nur bei weit zu öffnenden Fenstern erfüllen kann, die nicht in allen Klassenräumen in ausreichender Anzahl vorhanden sind (Ostmann et al. 2022; Müller et al. 2020; Knaus et al. 2019). Dass Dauerlüften das Mittel der Wahl ist, um unter solchen Bedingungen ausreichende Luftwechselraten und Behaglichkeit zu erzielen, wurde von erfahrenen Lüftungsexperten schon vor langem nachgewiesen (Fitzner and Finke 2012). Beim Dauerlüften werden gegenüber Stoßlüften naturgemäß 3-5 mal kleinere Öffnungsquerschnitte benötigt, dazu kommen die größere Lüftungseffektivität, geringere Zuglufterscheinungen und Energieeinsparungen (Ostmann et al. 2022; Schaub et al. 2021; BAUA ASR A3.6 2012; Fitzner and Finke 2012). Abluftventilatoren können dafür sorgen, dass im Sommer bzw. bei hohen Temperaturen nicht zu wenig warme Außenluft durch geöffnete Fenster einströmt und im Winter bzw. bei niedrigen Temperaturen nicht zu viel kalte Außenluft (unnötiges „Überlüften“ und Abkühlen).

In Abbildung A14 sind der Heizenergiebedarf (rot) und die minimale Raumtemperatur (blau) beim Fensterlüften eines Klassenraums unter Einhaltung einer mittleren CO₂-Konzentration von 1000 ppm (a) bzw. 800 ppm (b) in Abhängigkeit der Lüftungsdauer pro Lüftungszyklus nach UBA Empfehlung (20/5 min) aufgetragen (Umweltbundesamt 2021c). In Anlehnung an (Ostmann et al. 2022) wurde

die Lüftungseffizienz für 1000 ppm auf 1.12 festgelegt (Minimalwert von Ostmann et al. 2022) und für 800 ppm auf 1.28 (Maximalwert von Ostmann et al. 2022). Die dargestellten Ergebnisse gelten für Tage mit einer mittleren winterlichen Außentemperatur von 5°C und einer mittleren Raumtemperatur von 20,5°C während des Schulunterrichts. Um den gleichen CO₂-Mittelwert einzuhalten, wird bei Verlängerung der Lüftungsdauer die Fensteröffnungsfläche reduziert. Eine Lüftungsdauer von 25 min entspricht Dauerlüften.

Stoßlüften bei niedrigen Außentemperaturen führt insbesondere in Kategorie 1 Räumen nach UBA Klassifikation zu erheblicher Erhöhung des Wärmebedarfs (Umweltbundesamt 2021d). Die nähere Analyse zeigt, dass der Hauptwärmeverlust in den großen Pausen ohne Wärme- und Stofflasten zu hygienisch unnötiger Überlüftung und damit zur Auskühlung des Raumes führt. Stoßlüften von Kategorie 2 Räumen oder reduziertes Lüften mit nur gekippten Fenstern in Kategorie 1 Räumen führt bei mittleren winterlichen Außentemperaturen (ca. 5°C) und Anpassung der Lüftungszeit zu weniger Energieverbrauch und behaglicheren Zuständen als kurzes Stoßlüften mit weit geöffneten Fenstern (Kat 1). Beim Fensterlüften mit Kaltluft führen Quelllufteffekte dazu, dass die Lüftungseffizienz mit der Lüftungsdauer zunimmt (hier bis zu +28%). Daher ergibt sich der geringste Heizbedarf und die höchste Minimaltemperatur (ca. 20°C) für Dauerlüften. Intensives Stoßlüften (Kat 1) ergibt hingegen die niedrigste Minimaltemperatur (ca. 12°C) bei drastisch höherem Heizenergiebedarf - bis zu 4-fach erhöht bei 800 ppm, bis zu 10-fach bei 1000 ppm Zeitmittelwert.

Angesichts der eindeutigen wissenschaftlichen Studien- und Faktenlage ist es schwer verständlich, warum der UBA Arbeitskreis Lüftung die Vorteile kontinuierlicher Fensterlüftung negiert und ein hybrides Lüftungskonzept empfiehlt, das die Nachteile von Stoßlüften und unterdimensionierter RLT/WRG vereint (Helleis and Klimach 2022; Umweltbundesamt 2017).

A.8 Bewertung von RLT/WRG und Fensterlüften im Rahmen von Schulsanierungsmaßnahmen

Auf Grundlage der in dieser Studie dargelegten Zusammenhänge sowie ausführlicher Diskussionen im Rahmen der Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes (Helleis et al. 2022) kommen wir zu folgender Bewertung von RLT/WRG vs. Fensterlüften im Rahmen von Schulsanierungsmaßnahmen.

Für real existierende Schulen mit Lüftungsanlagen zeigt eine gründliche Analyse verfügbarer Studien, dass RLT/WRG typischerweise mehr Primärenergie verbraucht und größere Treibhausgas-Emissionen verursacht als äquivalentes CO₂-geführtes Fensterlüften ggf. unterstützt durch einfache technische Hilfsmittel verbrauchen würde (Kaup 2019b, 2019a, 2022; Kremer et al. 2021, 2022; Helleis and Klimach 2021b; Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Peper et al. 2007). Hohe Energieeinsparungen wie oftmals angegeben sind wissenschaftlich nicht nachvollziehbar (Tappler et al. 2020; Umweltbundesamt 2017; EU 1253/2014 2014).

Die Ergebnisse dieser Studie sind im Einklang mit lüftungstechnischem Lehrbuchwissen (Rietschel and Fitzner 2008), mit gültigen Arbeitsschutzregeln (BAUA ASR A3.6 2012) und mit zahlreichen Monitoring-Studien, welche auf die Unzulänglichkeiten und Probleme real existierender RLT/WRG in Schulen hinweisen (Müller et al. 2020; Knaus et al. 2019; Anlauff and Schwede 2018; Jagnow and Gebhardt 2017; Reiß et al. 2017; Peper et al. 2007). Unterschiede zu diversen Studien von Lüftungsbranchenvertretern basieren auf realitätsfernen Eingangsparametern und Bewertungskontexten in den Branchenvertreterstudien (Helleis et al. 2022; Helleis and Klimach 2021b).

Bei realitätsnaher Betrachtung ergeben sich wissenschaftliche Erkenntnisse und Perspektiven, die sich schlagwortartig wie folgt zusammenfassen lassen:

- RLT ohne WRG: ökonomisch/ökologisch unsinnig; weitere Studien dazu unnötig.
- RLT/WRG in Schulen: erhebliche Differenzen zwischen Planung und Praxis; viel höhere Betriebskosten; zusätzlicher Energieverbrauch höher als rückgewonnene Wärme; mäßige/niedrige normative Luftqualität; Behaglichkeitsdefizite; Nutzerunzufriedenheit; Nutzen von Komfortfunktionen wie Filtration und Befeuchtung marginal.
- Nachrüstung/Sanierung von Schulgebäuden: RLT/WRG mit höchsten Kosten bei geringsten Energie & CO₂ Einsparungen; Fassadensanierung oder erneuerbare Energieträger mit Fensterlüftung deutlich wirksamer, da Leerstandsverluste in Schulen kaum durch Lüftung kompensierbar.
- Fensterlüftung/Quellluft und erneuerbare Wärmeträger: bis zu ~10 mal weniger Primärenergie/€, bis zu ~20 mal weniger CO₂ /€ (GEG 2020).
- Quellluft: 30 m³/(h p) äquivalent zu 60 m³/(h p) Mischluft RLT mit 50% WRG (Skistad et al. 2004).
- Behaglichkeit Fensterlüftung/Quellluftführung/Heizkörper: Standardheizkörper sind Wärmetauscher und können Zuluft erwärmen; zentrales Argument für komplexe, wartungsaufwendige, klimaschädliche Technik fällt weg (Helleis et al. 2022; Helleis and Klimach 2021b).

A.9 Einordnung der CO₂-Konzentration als Marker für die Innenraumluftqualität

Dass erhöhte CO₂-Konzentrationen (>1000 ppm) in Klassenräumen generell ein inakzeptables Problem für die Gesundheit von Schülern darstellen und insbesondere zu inakzeptablen Infektionsrisiken führen, ist eine weit verbreitete Auffassung (AK Klimatechnik 2022; CDC 2021; DGUV e.V 2021; FGK 2021; Umweltbundesamt 2020d, 2021d, 2021c). Ein Blick in internationale Studien und Normen zeigt die tatsächlichen Zusammenhänge und die begrenzte Aussagekraft und Bedeutung von CO₂-Konzentrationswerten:

- (1) Die gesundheitsrelevante Innenraum-Luftqualität (HIAQ) wird kaum von menschlichen, zu CO₂ korrelierten, Ausdünstungen bestimmt (Persily et al. 2022; WHO 2021; Carrer et al. 2020; Logue et al. 2012; World Health Organization 2010).
- (2) Die wahrgenommene Innenraum-Luftqualität (PIAQ) ist nur teilweise mit CO₂ korreliert; eine besonders wichtige Kovariable ist die Raumtemperatur (ASHRAE 2019; DIN EN 16798 2019; Wargocki et al. 2019a; ISO 17772-1 2017; Fang et al. 1998, 2004).
- (3) Das Infektionsrisiko wird zu über 95% durch die Quellen kontrolliert (Clements et al. 2023), lässt sich nicht durch CO₂ beschreiben und ist nicht der für Entscheider relevante Parameter.
- (4) Wir kennen keine epidemiologische Evidenz für ein exzessives Infektionsrisiko in Schulen während der Covid-19 Pandemie in Deutschland. (RKI 2023; Buonanno et al. 2022; Schwarzbauer 2022; Schoeps et al. 2021).
- (5) Es ist nicht möglich, Ventilationsraten zu definieren, die einen „ausreichenden Infektionsschutz“ unabhängig von Infektionsdruck und Schadensrisiken darstellen würden (ASHRAE 2023; Clements et al. 2023; Persily et al. 2022; ISO 17772-1 2017). Eine Definition

geeigneter Ventilationsraten würde die Definition akzeptabler Infektionsrisiken voraussetzen (Iddon et al. 2022; Persily et al. 2022).

- (6) Eine Vorgabe von belegungsunabhängigen CO₂-Werten führt einerseits in dicht belegten Räumen zu enormen Lüftungsvolumina mit entsprechendem Mehraufwand für Energie und Kosten bei überschaubarem Mehrwert, und andererseits kann es in gering besetzten Räume schlechte Luftqualität nicht ausschließen.

„Gute Innenraumluftqualität“ ist zunächst ein normativ und wissenschaftlich nicht definierter Begriff (ASHRAE 2019, 2023; DIN EN 16798 2019; ISO 17772-1 2017; DIN EN 13779 2007). Während in internationalen und europäischen Normen eine Definition fehlt, gibt es in der ASHRAE 62.1 eine Definition für „akzeptable Luftqualität“, Zitat: „acceptable indoor air quality (IAQ): air in which there are no known contaminants at harmful concentrations, as determined by cognizant authorities, and with which a substantial majority (80% or more) of the people exposed do not express dissatisfaction.“ (ASHRAE 2019). Beim Luftqualitätsbegriff geht es also einerseits um die Einhaltung von Grenzwerten, die von anerkannten Autoritäten (typisch die WHO) festgelegt werden, und andererseits um die wahrgenommene Luftqualität, die von der WHO aus gutem Grund nicht adressiert wird (World Health Organization 2010). Nach dieser Definition dürfte man streng genommen erst dann von akzeptabler Raumluftqualität sprechen, nachdem man die Konzentrationen aller bekannten Schadstoffe gemessen hat und diese Prozedur regelmäßig wiederholt.

Die Metrik „wahrgenommene“ Luftqualität hat darüber hinaus ein veritables Problem mit Querempfindlichkeiten zu anderen Parametern. Es wurde bereits vor Jahrzehnten und seitdem immer wieder in Feld- und Laborstudien nachgewiesen, dass die Raum(luft)-Temperatur eine erhebliche, wenn nicht dominante Rolle spielt (Wargocki et al. 2019b; Park 2017; Haverinen-Shaughnessy and Shaughnessy 2015; Fang et al. 1998).

Die Einhaltung (Compliance) der jeweiligen Norm kann durch verschiedene „Design Methods oder Procedures“ erreicht werden, typisch sind z.B. „vorgegebene Luftvolumenströme („prescriptive“) oder konzentrationsbasierte („IAQ“) (ASHRAE 2019, 2023; DIN EN 16798 2019; ISO 17772-1 2017; DIN EN 13779 2007). Typischerweise werden die luftvolumenstrombasierten Methoden genutzt, weil es einen beträchtlichen zusätzlichen Aufwand bedeuten würde, an jedem Standort in jedem Neubau die tatsächlichen a-priori nicht bekannten Belastungen zu messen und in die Lüftungsplanungen einzubeziehen, abgesehen von dem Aufwand, dass alle Bestandsgebäude auf alle möglichen Luftschadstoffe überprüft werden müssten.

Da sich die IAQ basierten Methoden auf Konzentrationen, Dosen oder Expositionen von Schadstoffen beziehen, sind sie natürlich nicht nur von der Senke Lüftung, sondern in üblicherweise wesentlich entscheidenderem Maße von Schadstoffquellen und Aufenthaltszeiten abhängig z.B. (ISO 17772-2 2018). Hier liegt das erste Problem: eine Definition der tatsächlichen Luftqualität durch vorgegeben Luftströme ist nicht nur nach physikalischen Grundprinzipien nicht möglich, sondern wird auch von allen uns bekannten Normen nicht vorgesehen. Das zweite Problem liegt darin, dass „Response Functions“ nicht notwendigerweise linear, sondern tatsächlich in vielen Fällen erwiesenermaßen nichtlinear sind (World Health Organization 2010); daher auch Einzelgrenzwerte für Konzentrationen und nicht für Dosen oder Expositionen der Gesamtheit. Obwohl die Normen die Ergebnisse der wissenschaftlichen IAQ Ansätze der Autoritäten (zumeist WHO) übernehmen, setzen sie sie konzeptionell nicht konsequent um – z.B. (ASHRAE 2019).

Bei gesundheitlichen Fragestellungen muss schließlich zwischen menschlichen Emissionen und Emissionen des Raumes / des Mobiliars und des Eintrags von Schadstoffen mit der Außenluft, und in

einem zweiten Schritt zwischen endemischen und epi- bzw. pandemischen Randbedingungen in der Gesamtpopulation unterschieden werden.

Gehen wir zunächst auf den endemischen Fall ein. Zunächst einmal kann festgestellt werden, dass keine der von der WHO indizierten und limitierten Substanzen vom Menschen in relevanten Mengen emittiert werden (World Health Organization 2010). Des Weiteren kann festgestellt werden, dass CO₂ selbst nicht von der WHO indiziert wird. Schließlich ist festzustellen, dass die durch Menschen emittierten „Schadstoffe“ (außer CO₂) und deren Sekundärprodukte mit Ozon zwischen 2-5 Größenordnungen unter den gesetzlichen MAK-Werten, also täglichen Expositionslimits bei 8-stündiger Schicht liegen, direkt anwendbar auf Schulen mit als besonders vulnerabel wahrgenommenen Kindern (DFG 2022; Wang et al. 2022).

Was menschliche Ausdünstungen angeht, wurde in einem großen europäischen Verbundprojekt („HealthVent“) im Konsens mit europäischen Lüftungsexperten anhand extensiver Literaturstudien eine Basislüftungsrate abgeleitet, bei deren Anwendung sich nach der bis dahin vorliegenden Datenbasis keine gesundheitlich negativen Auswirkungen nachweisen lassen, weder durch CO₂ noch dazu korrelierte Substanzen. Diese Luftwechselrate beträgt 4 l/(s p) (Carrer et al. 2020). Die extensiven Modellierungsergebnisse zeigten, dass damit auch die Vermeidung von kondensationsbedingtem Schimmel und Hausstaubmilben abgesichert ist. Diese Luftwechselrate entspräche einer CO₂-Konzentration von ca. 1500 ppm.

Dieses Ergebnis ist wenig überraschend, denn zu CO₂ korrelierte exhalierete „Schadstoffe“ werden durch 4 l/(s p) Ventilationsrate bereits um mehr als 20-fach gegenüber der Konzentration im Körper verdünnt.

Weiterhin ist festzuhalten, dass Emissionen von Gebäuden und Mobiliar offensichtlich nicht zu human emittiertem CO₂ korreliert sind. Daraus folgt rechnerisch direkt, dass bei Einhaltung normgerechter Luftwechselraten die gebäudebezogene tatsächliche Luftqualität umso besser wird, je größer der Raum ist und je höher die Belegungsdichte ist, weil das Verhältnis Senke zu Quelle größer wird – Rechnung analog zu (Iddon et al. 2022). Daraus folgt ebenso direkt, dass die gebäudebezogene tatsächliche Luftqualität in Schulen mindestens ca. 4-mal besser ist als im 2-er Büro, und mindestens 10-mal besser als in der Privatwohnung.

Wenn also menschliche Emissionen nach Stand der Wissenschaft offensichtlich nur eine sekundäre Rolle bei tatsächlicher Luftqualität spielen, sind 20 l/(s p) im Büro für EN 16798 Kat I (FGK 2021; DIN EN 16798 2019; ISO 17772-1 2017), äquivalent zu 5 l/(s p) in Klassenräumen.

Im Falle von Epidemien und Pandemien mit luftgetragenen Erregern („infektiöses Aerosol“) geht es nicht um „Luftqualität“ nach WHO, sondern um die Verdünnung der Konzentration infektiösen Aerosols durch Verdünnung mit pathogenfreier Luft (z.B. auch durch Luftreiniger und Desinfektoren) (ASHRAE 2023). Legte man zunächst dieselben Maßstäbe wie für tatsächliche IAQ nach WHO an, ergäben sich die gleichen Schlussfolgerungen: größere Räume mit höherer Belegung führen bei normgerechten Luftwechselraten und dem Vorhandensein eines infizierten Emittenten im Mittel zu geringeren Pathogenkonzentrationen und damit „besserer Luftqualität“ (Iddon et al. 2022). Der übliche Konzentrations-Grenzwert-basierte „Luftqualitäts“-Begriff ist also im Pandemieumfeld aus gesellschaftlicher Sicht wenig hilfreich.

Viele Veröffentlichungen beschäftigt sich daher mit der Modellierung von Infektionsrisiken und geben Handlungsempfehlungen für Entscheider. Für die Mitigation von Infektionsrisiken reichen die Vorschläge von Institutionen und Verbänden von leichter Deeskalation gegenüber dem

Arbeitsschutz (Umweltbundesamt 2020d) über Luftwechselraten nach Norm (FGK 2021) zu z.B. ca. 3-facher Eskalation in Schulen (ASHRAE 2023).

Angesichts der Dynamik der Anforderungen - mehrere Größenordnungen durch Aktivitäts-, Viruslast-Inzidenzdynamik von Infektionswellen in einer Pandemie – kann z.B. das Verfolgen des althergebrachten per-Person Mischlüftungskonzepts mit festen Lüftungsraten nur gesamtheitlich betrachtet nur einen kleinen Beitrag leisten.

Außerdem passen die von Normen und Institutionen angebotenen Lösungen nicht zur Problemstellung der Gesamtheit der gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Risiken. Für politisch verantwortliche Entscheider sind nämlich weniger die Infektionsrisiken an sich, sondern eher die Risiken von bleibenden Personen- und gesellschaftlichen bzw. volkswirtschaftlichen Schäden entscheidend. Parameter wie diese werden durch die meisten Analysen insbesondere aus dem Branchenumfeld ignoriert.

Am Beispiel des neue ASHRAE Standard 241 („Control of Infectious Aerosol“) kann man die Problematik zeigen:

- Es geht nicht um „ausreichende Luftqualität“, Zitat ASHRAE 241: „Scope: this standard does not address requirements for acceptable indoor air quality“.
- Die angegebenen Luftwechselraten sind nicht öffentlich zugänglich oder nachvollziehbar, die zitierten wissenschaftlichen Referenzen werden höchstens teilweise berücksichtigt (ASHRAE 2019, 2023; Clements et al. 2023; Iddon et al. 2022).
- Relevante Parameter des Infektionsgeschehens werden von den Analysen von ASHRAE und seiner Referenzen ignoriert, die angeblichen Lösungen adressieren nicht das eigentliche Problem.
- Entscheidungskriterien für die Anwendung der IRMM (Infection Risk Mitigation Mode) werden nicht gegeben, Betreiber und Autoritäten bekommen keinerlei Leitwerte (ASHRAE 2023).
- Unter nicht-Pandemie-Bedingungen sind normale Standards anzuwenden.
- ASHRAE übernimmt keinerlei Verantwortung für die Wirksamkeit seiner Empfehlungen.
- ASHRAE betont, dass der Standard nur das langreichweitige Infektionsrisiko von „weit“ entfernten suszeptiblen Personen adressiert, das gesamte Innenraum-Infektionsrisiko wird weder erwähnt noch der Versuch einer Quantifizierung oder Einordnung in den Gesamtkontext gemacht.
- ASHRAE war nicht in der Lage, passende Luftvolumenströme zur Infektionsprävention für unterschiedliche Settings in der gleichen Raumkategorie anzugeben – Stichwort Quellendynamik, siehe oben.
- ASHRAE definiert ebenso wenig wie alle anderen Autoritäten dieser Welt das „akzeptable Risiko“, was zur Definition einer „ausreichenden Luftqualität zum Infektionsschutz“ unabdingbar ist.
- ASHRAE schlägt als Alternative zur Anpassung der Luftvolumenströme vor, die Belegung zu reduzieren.

Die einfachste Methode festzustellen, ob Schulen ein Problem in der Pandemie darstellten, sind epidemiologische Daten. Nach den uns vorliegenden Studien und Daten gibt es keine epidemiologische Evidenz für ein exzessives Infektionsrisiko in Schulen während der Covid-19 Pandemie. Tatsächlich kann man anhand veröffentlichter Daten zeigen, dass das Infektionsrisiko selbst in angeblich mangelhaft belüfteten Schulen um ca. eine Größenordnung niedriger war als über alle anderen Infektionsumfelder gemittelt (RKI 2023; Buonanno et al. 2022; Schoeps et al. 2021; Heudorf et al. 2020). Daten aus einer Vergleichsstudie von mechanischen Lüftungsanlagen und natürlicher Lüftung zeigen sogar, dass die Lüftungsdisziplin während der Pandemie auch in natürlich belüfteten Schulen im Pandemieschuljahr 2021/2022 so gut war, dass CO₂ Mittelwerte von weit unter 1000 ppm auch mit natürlicher Lüftung erreicht wurden (Schwarzbauer 2022).

Anhand der Daten von Buonanno et al. lassen sich auch die „Infektionsvermeidungskosten“ abschätzen, die durch die Installation von raumluftechnischen Anlagen im Marche Distrikt in Italien in 2021/2022 (Delta und Omikron Wellen) entstanden. Pro kurzfristig vermiedenem, Umfeldzugeordneten Infektionsfall binnen 5 Monaten wurden ca. 140.000 € investiert. Rechnet man auf die nachgewiesene Gesamtinzidenz hoch, ergäben sich ca. 20.000 € pro kurzfristig vermiedenem Infektionsfall (Buonanno et al. 2022).

Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der betrachteten Lüftungsmethoden und der zugehörigen Kenngrößen. $Q_{i,kont.}$: kontinuierlicher Volumenstrom; η_{CO_2} : wirksamer Anteil des Volumenstroms zur CO_2 -Reduzierung; η_{aero} : wirksamer Anteil des Volumenstroms zur Aerosol-Reduzierung; η_{haube} : Wirkungsgrad Haubeneffekt (verringert Emissionsstärke E); η_{quell} : Wirkungsgrad Quelllufteffekt (erhöht wirksamen Volumenstrom); $\lambda_{eff,aero}$: effektive kontinuierliche Luftwechselrate bzgl. Aerosol (inklusive Leckrate, etwaige Filtereffizienzen und Viruslebensdauer); λ_{eff,CO_2} : effektive kontinuierliche Luftwechselrate bzgl. CO_2 (inklusive Leckrate); λ_{vent} : zusätzliche Luftwechselrate während des Stoßlüftens; N_{vent} : Anzahl der Stoßlüftperioden pro Doppelstunde (jeweils für 5 Minuten) zusätzlich zur großen Pause.

	$Q_{i,kont.}$ (m^3/h)	η_{CO_2} (%)	η_{aero} (%)	η_{haube} (%)	η_{quell} (%)	$\lambda_{eff,aero}$ (1/h)	λ_{eff,CO_2} (1/h)	λ_{vent} (1/h)	N_{vent}
Mischlüftung ^a	870	79..100	75..100	0	0	4,6..5,7	3,7..4,7	0	0
Quelllüftung + Filterung ^d	800	38..48	75..95	0	25..50	5,1..7	2,2..3,2	0..30	0..1
UV-C-Luftreiniger ^b	800..1200	0	74..94	0	0	4,3..7	0,3	6..30	1..3
Filter-Luftreiniger ^c	800..1200	0	75..95	0	0	4,3..7	0,3	6..30	1..3
Stoßlüften reguläre Pausen ^{e,i,k}	0	100	100	0	0	1,4	0,3	6..30	1
Stoßlüften UBA-Empfehlung ^{e,i,j,k}	0	100	100	0	0	1,4	0,3	6..30	3
Stoßlüften CO_2 -Monitor ^{e,h}	0	0	0	0	0	1,4	0,3	6..30	(5..7)
Dauerlüften Kippfenster ^{e,g}	430..860	100	100	0	25..50	4..7,8	3..6,8	0	0
FLS Abluftventilator ^f	800..1200	100	100	0	25..50	6,4..10,4	5,3..9,3	0	0
FLS verteilte Abzugshauben ^f	800	100	100	30..60	25..50	8,5..16,4	7,4..15,3	0	0
Stoßlüften nur in großen Pausen ^e	0	100	100	0	0	1,4	0,3	6..30	0
Ventilator ohne Quellluft, Dauerbetrieb ^k	1000..200 0	100	100	0	0	6,4..11,4	5,3..10,3	0	0
Ventilator ohne Quellluft, Intervallbetrieb ^k	400..800	100	100	0	0	3,4..5,4	2,3..4,3	20	1

- Mischlüftung: Analog zu einem LTM dezent® 800 topline GIT (Tecalor GmbH 2021).
- UV-C-Luftreiniger: Analog zu drei Geräten der Art Soluva® Air W (Heraeus Noblelight GmbH 2021)
- Filter-Luftreiniger: Analog zu einem Hochleistungsluftreiniger TAC V+ (Trotec GmbH 2021; Kähler et al. 2020). Bzw. etwa 5 Stück Philips 2887/10 (Curtius et al. 2021; Philips GmbH Market DACH 2021)
- Quelllüftung + Filterung: Analog zu einem Kompakt-Lüftungssystem Vitovent 200-P (Viessmann Climate Solutions SE 2021).
- Luftwechselraten bei Stoß und Dauerlüftung nach (Steffens and Seipp 2021b; Müller et al. 2020; Erhart et al. 2015; British Standards Institution 1991). Günstiger Fall 30/h, ungünstiger Fall 6/h.
- Abluft-Ventilator für FLS: Analog zu einem Lüfter der Serie W3G300 oder W3G350 (ebm-papst GmbH 2021b, 2021a), bodennahe Zuluftführung.
- Dauerlüften mit zwei Kippfensterpaare aus je einem niedrigen und einem hohen Kippfenster bei 15 K bzw 4 K Temperaturunterschied nach draußen.
- Stoßlüftung sobald die mittlere CO_2 -Konzentration im Raum 950 ppm überschreitet bis ein Wert von 560 ppm (80% Reduktion) erreicht wird oder 5 min verstrichen sind.
- Stoßlüftung für die 15 min der großen Pausen und für die 5 min der kleinen Pausen
- Zusätzlich Stoßlüftung in jeder Schulstunde für 5 min nach 20 min Unterricht.
- Lüftung mit einem starken Ventilator ohne Vorkehrungen für eine bodennahe Einströmung (Bodenschatz 2021)). Bei dauerhaft höheren Luftdurchsätzen (>2000 m^3/h) wären speziell im Winter deutliche Verluste an Behaglichkeit zu erwarten (Kälte, Zugluft). Bei Intervallbetrieb ist der Volumenstrom während des Unterrichts gering und in den Pausen hoch.

Tabelle 2: Ergebnisse der Modellrechnungen. $n_V/n_{V,ref}$: relative inhaled Dosis am Ende der simulierten Zeit, Referenz ist die Mischlüftung; $c_{CO_2,max} / avg$: maximale / mittlere CO_2 -Konzentration im Raum während der Simulation; F: Verbesserungsfaktor gegenüber Mischlüftung mit Effizienz = 1; $\lambda_{eff,aero}$: Kontinuierliche Äquivalent-Luftwechselrate (inklusive Auswirkung von Leckrate, Viruslebensdauer etc.), welche der Aerosoldosis zu Simulationsende entsprechen würde (Abb. A14); 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.

	$n_V/n_{V,ref}$ (%)	$c_{CO_2,max}$ (ppm)	$c_{CO_2,avg}$ (ppm)	F	$\lambda_{eff,aero}$ (1/h)	R (%)	Zeitanteile (%)				
							unter 800	800 - 1000	1000 - 1400	1400 - 2000	über 2000
Mischlüftung	100	990	911	2,5	4,6	60	17	83	0	0	0
	122	1132	1026	2,1	3,4	51	10	18	72	0	0
Quelllüftung mit Filterung	72	1195	907	3,5	7	71	31	23	46	0	0
	111	1634	1424	2,3	4	56	3	2	28	67	0
UV-C-Luftreiniger	57	1413	898	4,4	9,2	77	41	21	37	2	0
	117	3441	2144	2,1	3,6	53	3	2	12	22	61
Filter-Luftreiniger	57	1413	898	4,4	9,4	77	41	21	37	2	0
	117	3441	2144	2,1	3,6	53	3	2	12	22	61
Stoßlüften nach jeder Schulstunde	182	2372	1361	1,4	1,8	27	20	11	21	31	18
	250	3441	2144	1	1	0	3	2	12	22	61
Stoßlüften nach UBA- Empfehlung	105	1413	898	2,4	4,4	58	41	21	37	2	0
	201	2419	1657	1,2	1,6	20	3	7	17	50	24
Stoßlüften nach CO_2 - Monitor	65	976	690	3,9	8	74	76	24	0	0	0
	119	1226	1016	2,1	3,6	53	13	17	71	0	0
Dauerlüften über Kippfenster	75	810	760	3,4	6,6	70	39	61	0	0	0
	137	1310	1169	1,8	3	45	4	13	84	0	0
FLS Abluft-Ventilator	57	700	666	4,4	9,2	77	100	0	0	0	0
	90	919	852	2,8	5,2	64	21	79	0	0	0
FLS verteilte Abzugshauben	32	581	560	7,9	18,2	87	100	0	0	0	0
	63	767	719	4	8,2	75	100	0	0	0	0
Stoßlüften nur in großen Pausen	273	3814	2111	0,9	0,8	-9	15	5	10	15	55
	291	4307	2602	0,9	0,7	-16	3	2	9	17	70
Ventilator ohne Quellluft, Dauerbetrieb	52	672	642	4,8	10,2	79	100	0	0	0	0
	90	919	852	2,8	5,2	64	21	79	0	0	0
Ventilator ohne Quellluft, Intervallbetrieb	91	1019	835	2,7	5,2	63	33	51	16	0	0
	126	1414	1029	2	3,4	50	24	17	57	2	0

Abbildungen

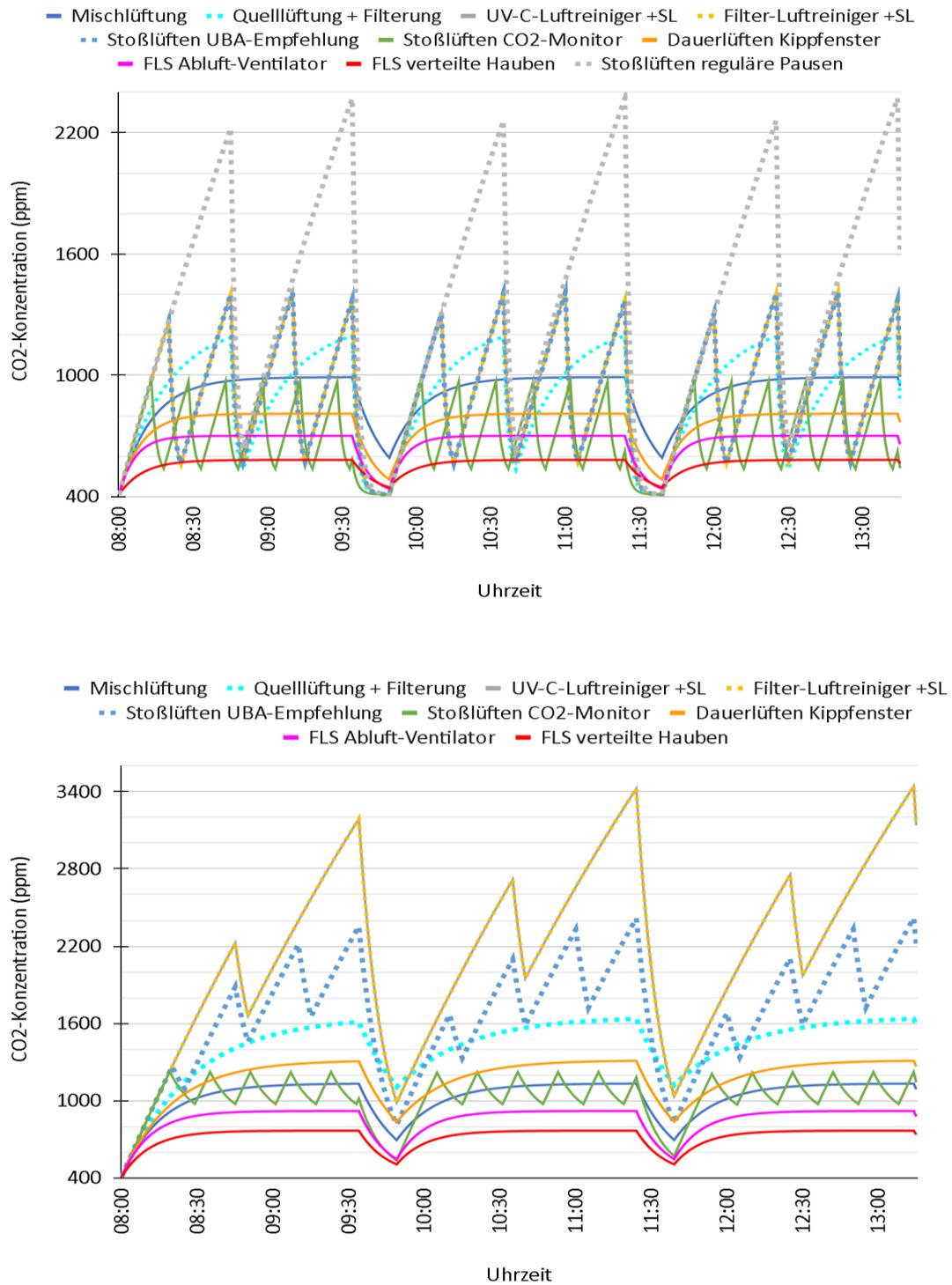


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration in dem betrachteten Klassenraum bei Anwendung verschiedener Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (a, oben) oder unter ungünstigen Bedingungen (b, unten) (Tabelle 1, Anhang A.2).

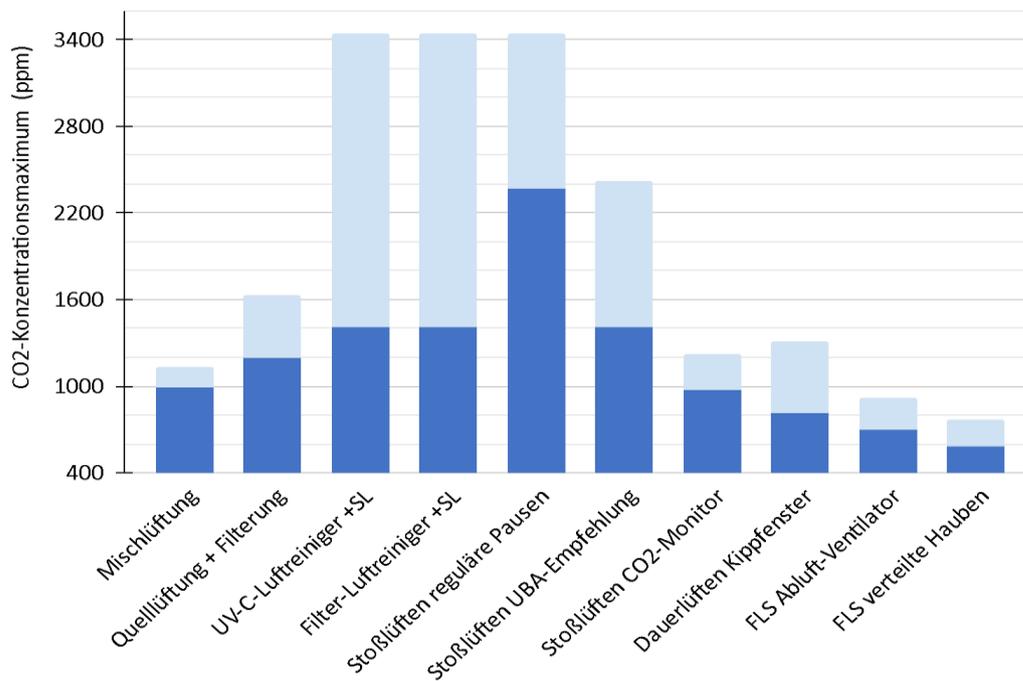
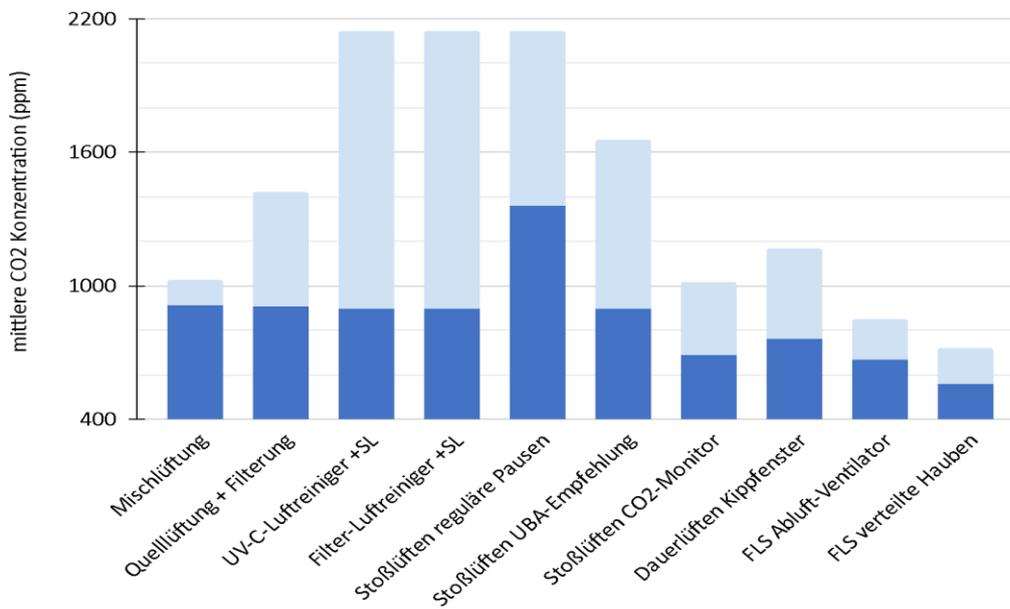


Abbildung 2: Mittelwerte (a, oben) und Maximalwerte (b, unten) der CO₂-Konzentration in dem betrachteten Klassenraum bei Anwendung verschiedener Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (dunkelblau) oder unter ungünstigen Bedingungen (hellblau) (Tabelle 1, Anhang A.2).

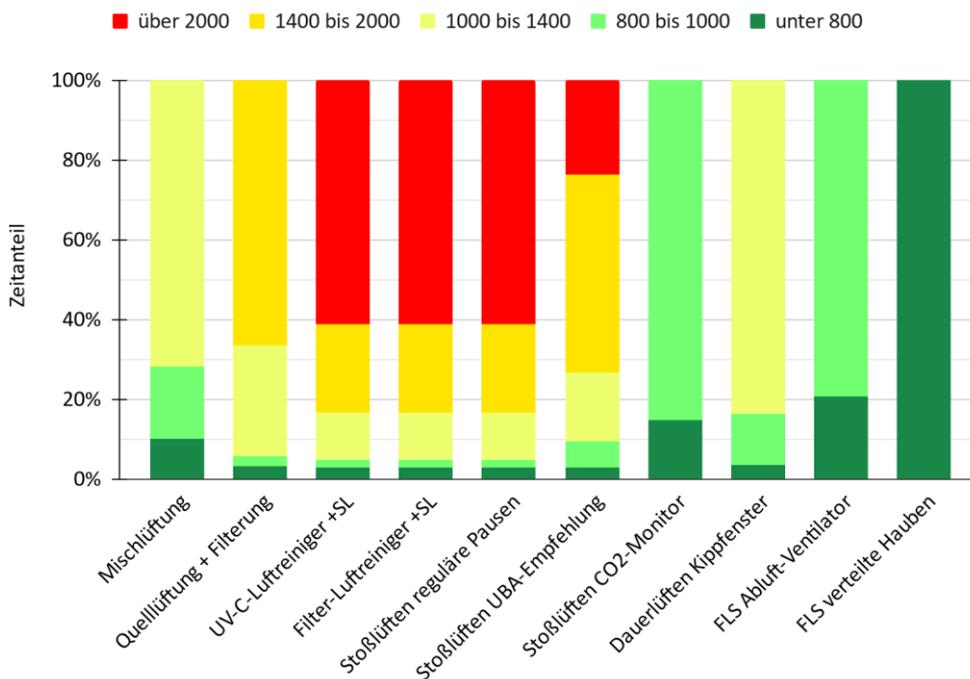
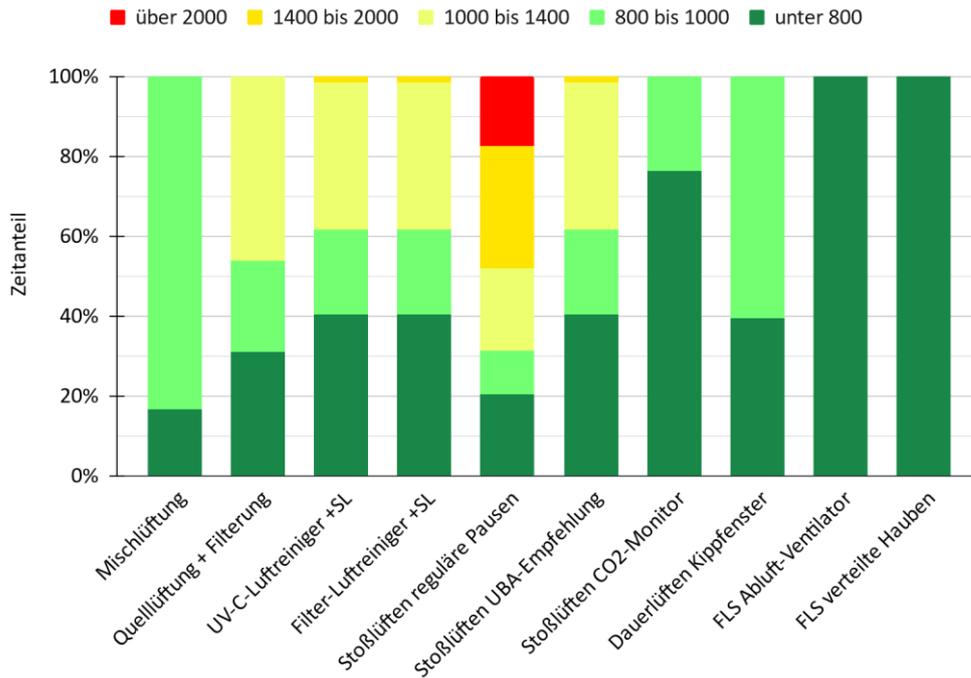


Abbildung 3: Klassifizierung nach Zeitanteilen (%) verschiedener CO₂-Konzentrationsbereiche in dem betrachteten Klassenraum unter günstigen Bedingungen (a, oben) oder unter ungünstigen Bedingungen (b, unten) (Tabelle 1, Anhang A.2): unbedenklich (<1000 ppm, grün), auffällig (1000-2000 ppm, gelb) und inakzeptabel (>2000 ppm rot) gemäß Einteilung des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt 2008b). Die Schattierung (hell/dunkel) bezieht sich auf normative Kategorien für Raumluftqualität: hoch <800 ppm, mittel 800-1000 ppm, mäßig 1000-1400 ppm, niedrig >1400 (DIN EN 13779 2007), zurückgezogen 2019 aber für CO₂-Monitore weiterhin in Gebrauch.

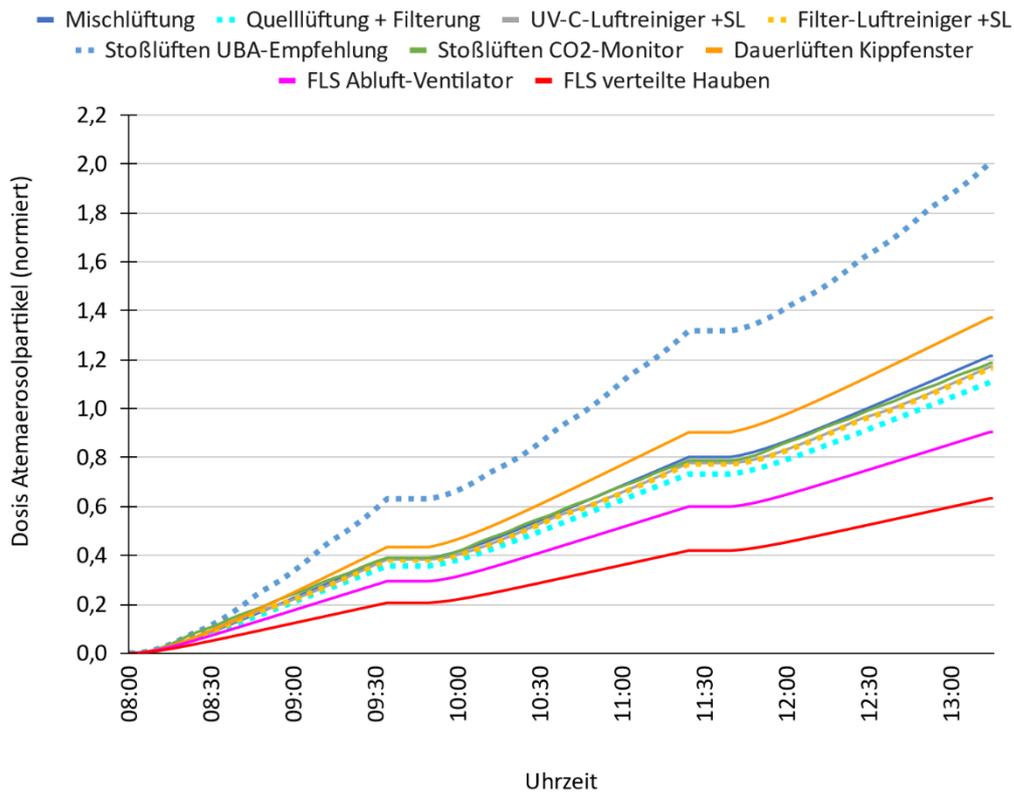
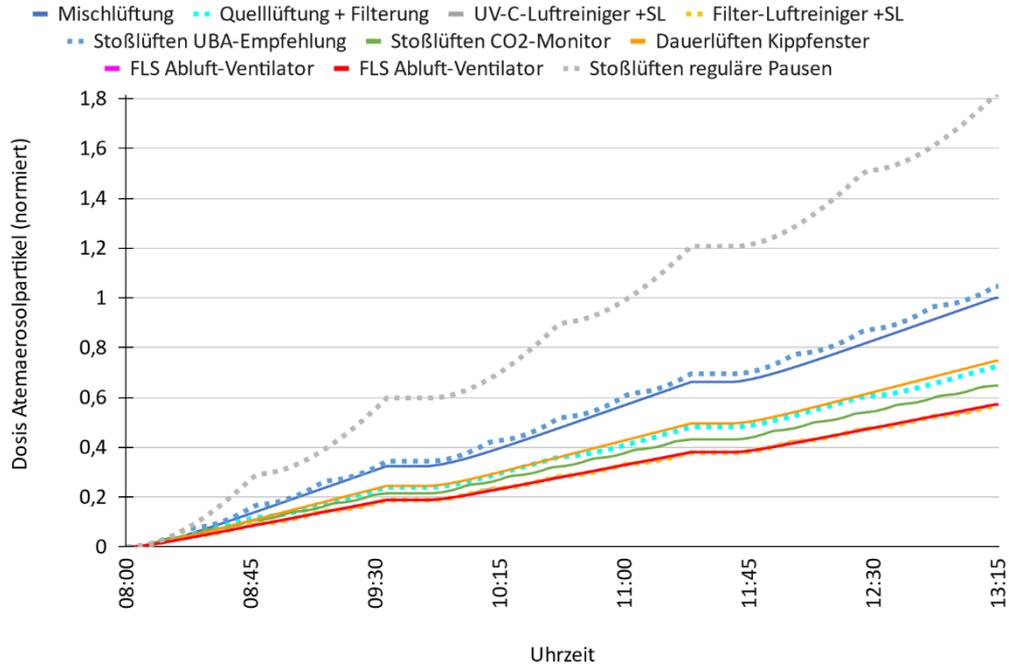


Abbildung 4: Zeitliche Zunahme der Dosis an Atemaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedener Lüftungsmethoden jeweils unter günstigen Bedingungen (a, oben) oder unter ungünstigen Bedingungen (b, unten) eingesetzt werden (Tabelle A.1, Anhang A.3). Die Ergebnisse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

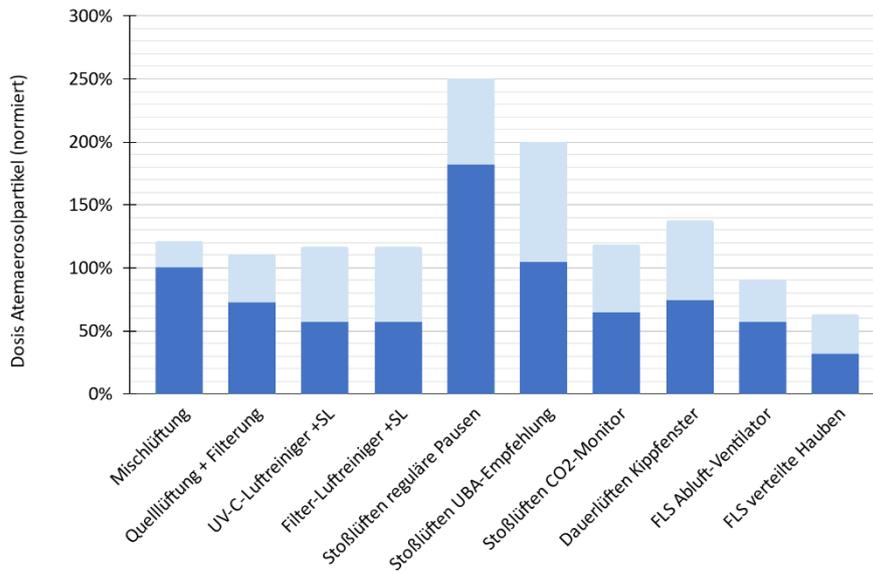


Abbildung 5: Gesamtdosis an Atemaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedene Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (dunkelblau) oder unter ungünstigen Bedingungen (hellblau) eingesetzt werden (Tabelle 1, Anhang A.2). Die Ergebnisse sind normiert auf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

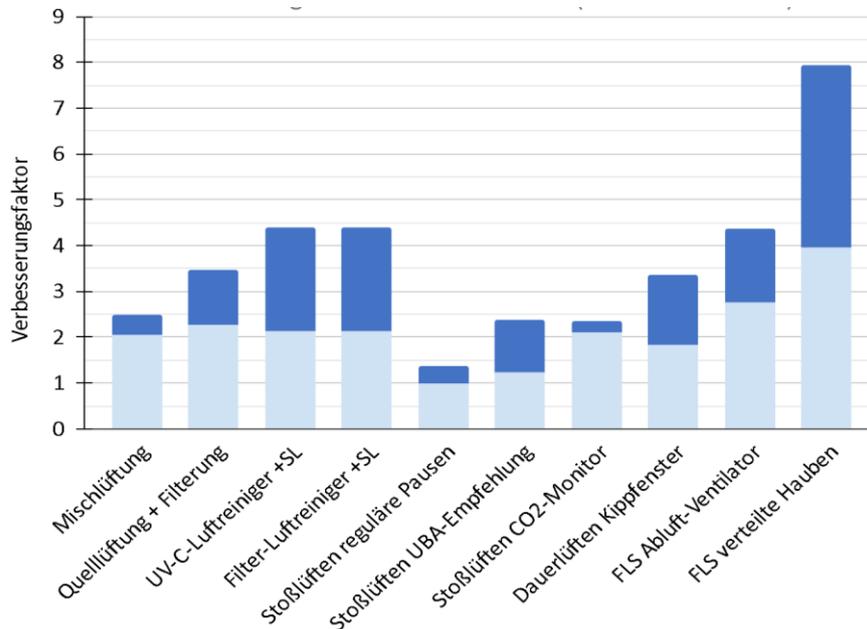


Abbildung 6: Verbesserungsfaktoren bezüglich der Dosis an Atemaerosolpartikeln, die Personen im betrachteten Klassenraum inhalieren, wenn verschiedene Lüftungsmethoden unter günstigen Bedingungen (dunkelblau) oder unter ungünstigen Bedingungen (hellblau) eingesetzt werden (Tabelle 1, Anhang A.2). Die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

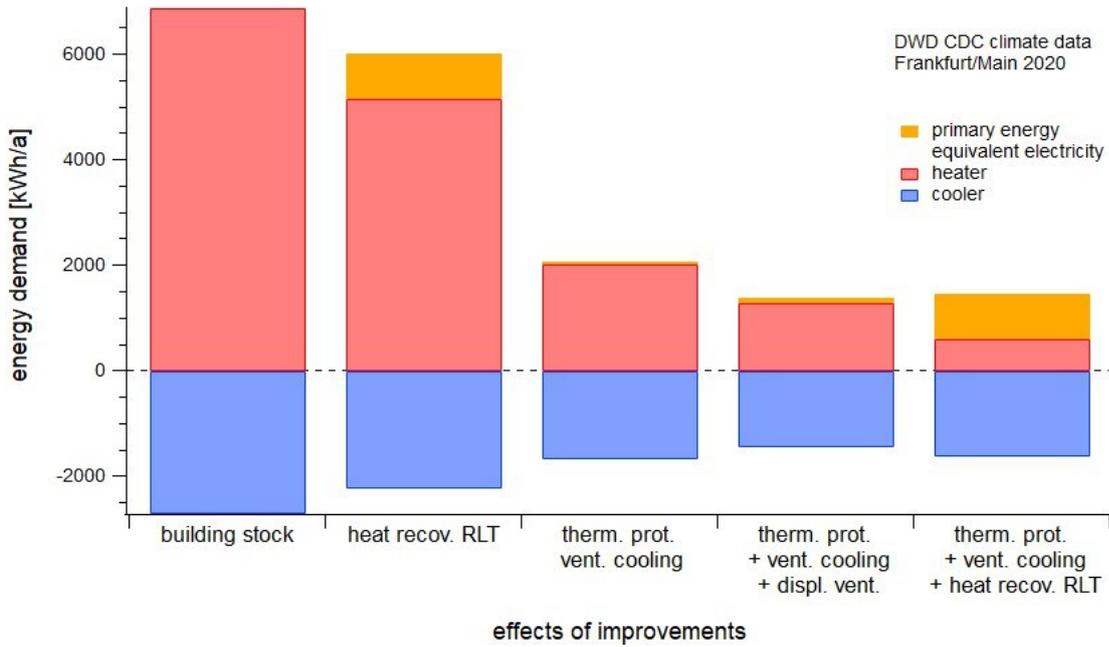


Abbildung A1: Einfluss verschiedener Sanierungsmaßnahmen auf den Heiz- und Kühlenergiebilanz eines Klassenraumes (energy demand, kWh/a): Baubestand (building stock), Wärmerückgewinnung durch Raumlufttechnik (heat recov. RLT), thermische Isolierung, Lüftungskühlung, Verdrängungslüftung (therm. prot.,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

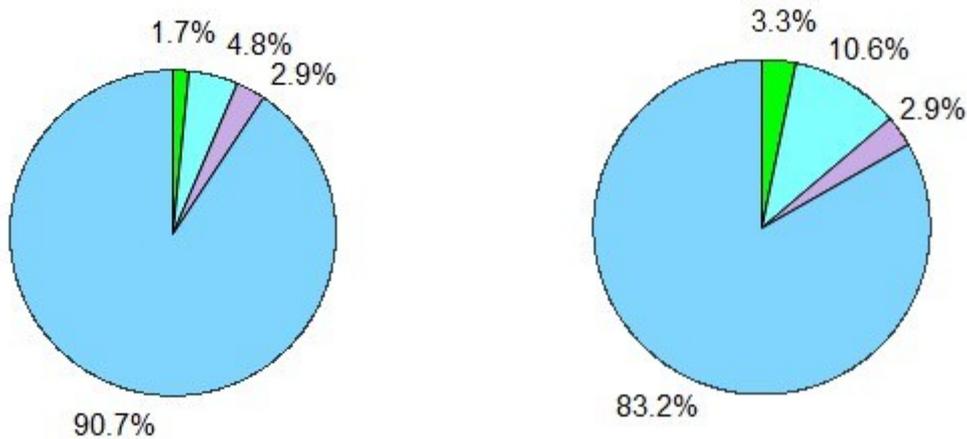


Abbildung A2: Beiträge zur Befeuchtung der Atemluft von Personen in einem Klassenraum bei Betrieb von Raumlufttechnik mit aktiver Befeuchtung. Links: Kat 2 Raum, Auslegungsfeuchte 25% RH; rechts: „höchster Komfort“, Auslegungsfeuchte 45% RH. grün: RLT, hellblau: Außenluft, violett: Atem & Transpiration,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

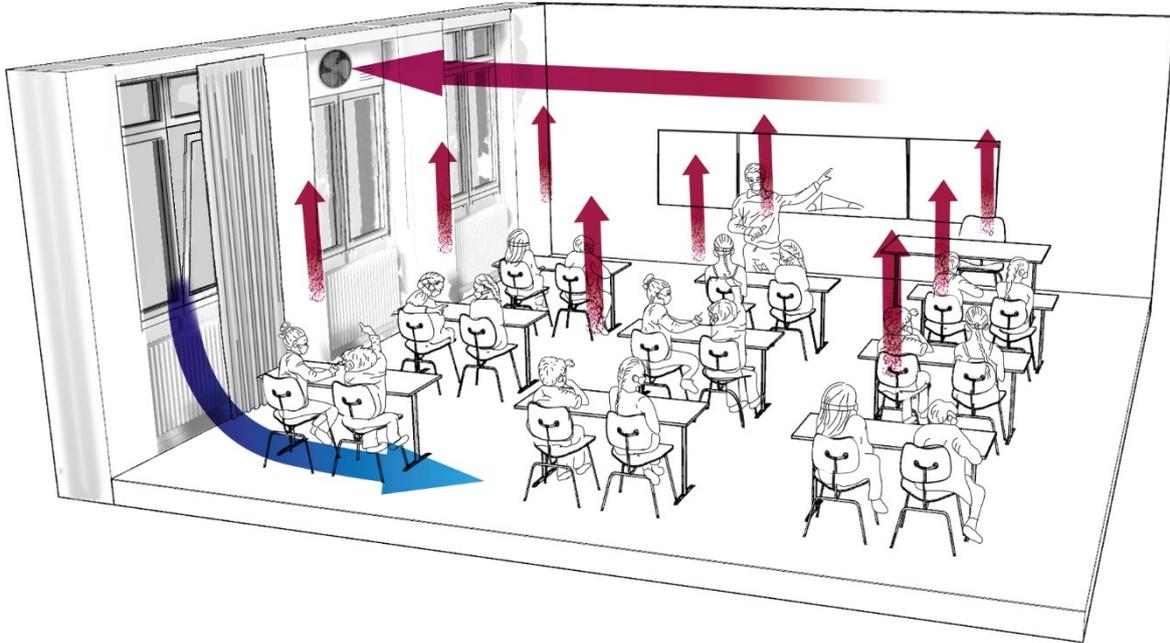


Abbildung A3: Schematische Darstellung eines Fensterlüftungssystems mit einfachem Abluftventilator und bodennahe Zuluft (ventilation-mainz.de).

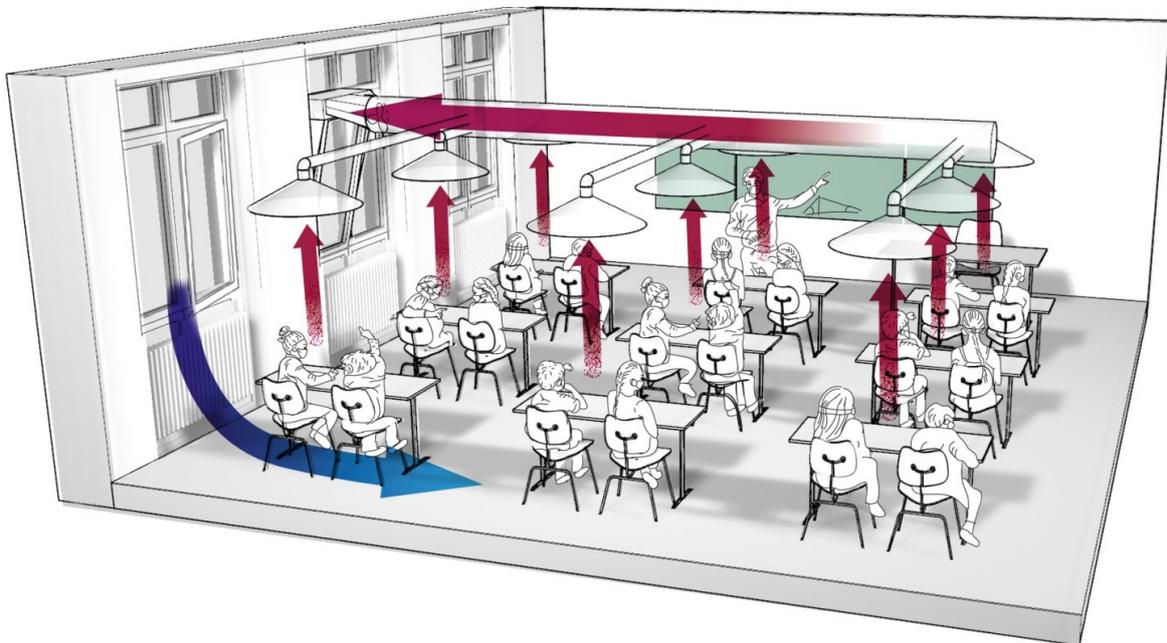


Abbildung A4: Schematische Darstellung eines Fensterlüftungssystems mit verteilten Abzugshauben und bodennahe Zuluft (MPIC-FLS, ventilation-mainz.de).

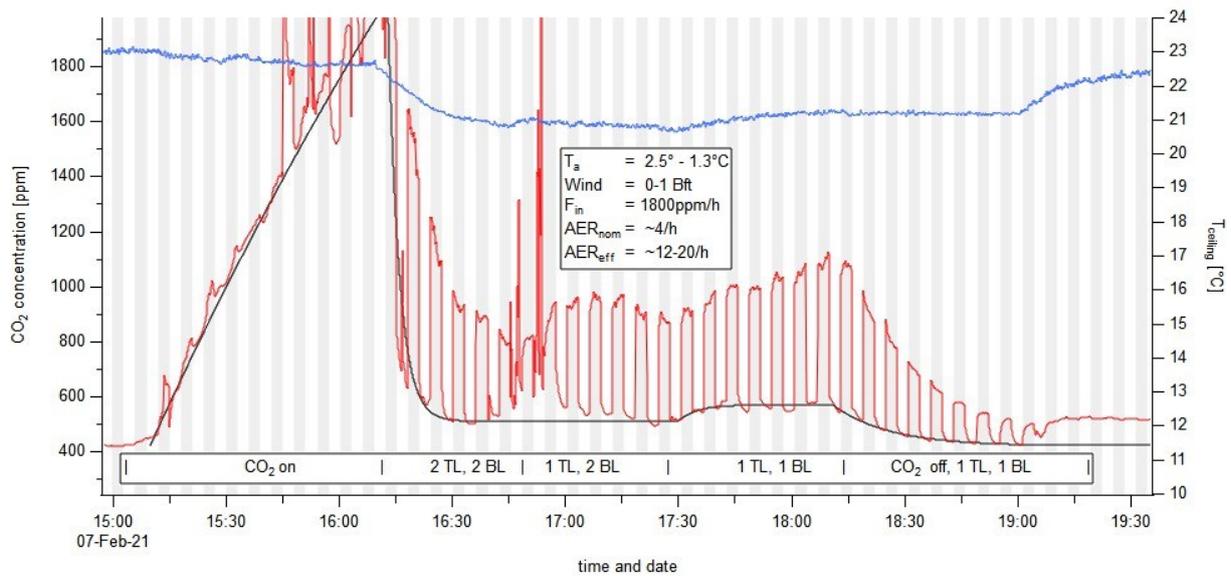


Abbildung A5: Gemessener CO₂-Konzentrationsverlauf bei Fensterlüftung mit bodenahem Frischlufteinlass (Quellluft) ohne Hauben, äquivalent zu einfachem FLS Abluftventilator bzw. Dauerlüften durch Kippfenster. Rot: CO₂ gemessen, schwarz: CO₂ modelliert, blau: Temperatur in 2.5m Höhe. Schattierte Bereiche 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 and Klimach 2021a).

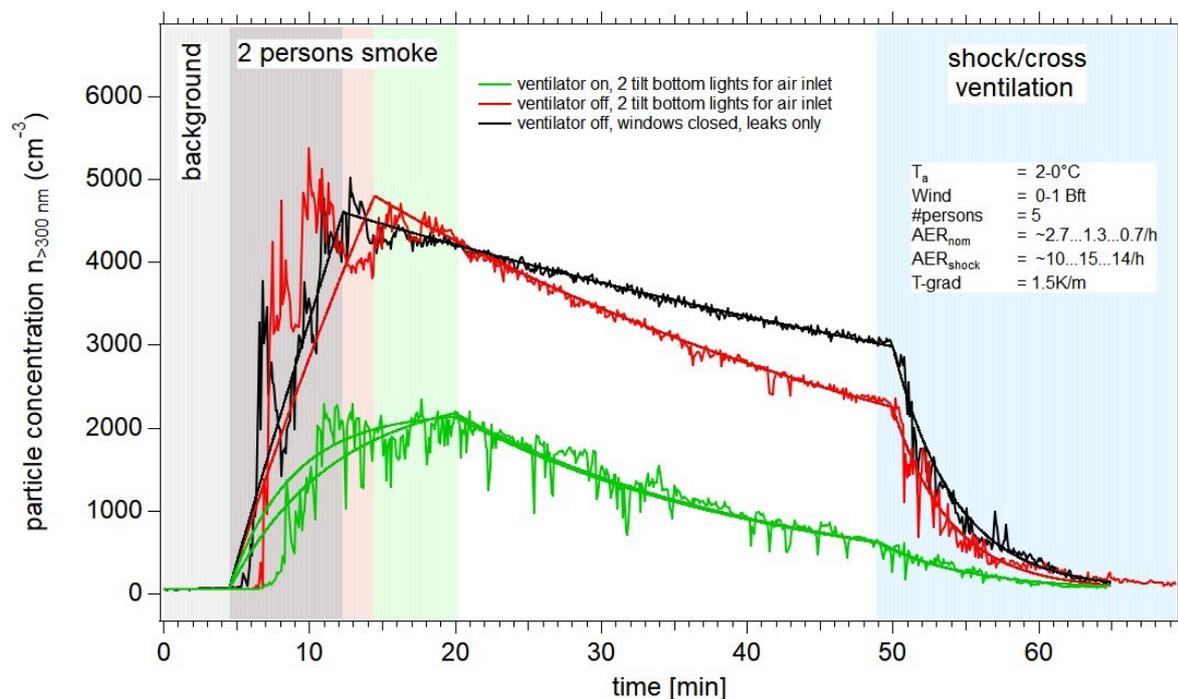


Abbildung A6: Gemessener Aerosolpartikel-Konzentrationsverlauf während Raucherexperiment in Klassenraum (IGS Mainz-Bretzenheim): Vergleich von Ventilator-Fensterlüften mit verteilten Abzugshauben (MPIC-FLS) mit geringem Quelllufteffekt (grün), Fensterlüften ohne Ventilator (rot) und ohne Lüften (schwarz) (Helleis and Klimach 2021a).

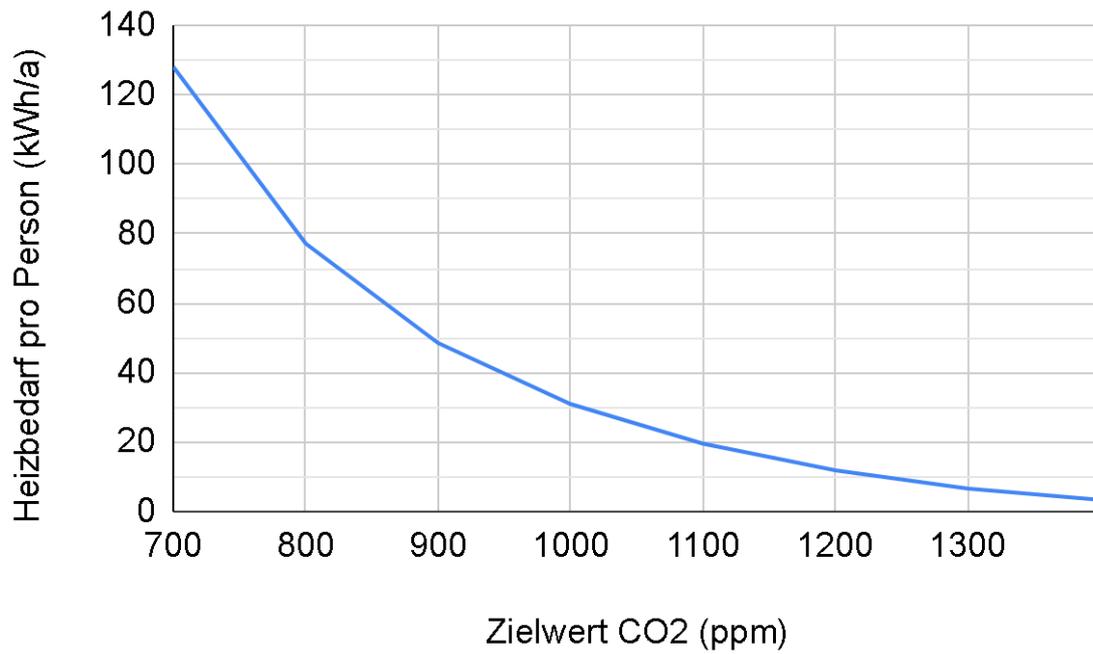


Abbildung A7: Lüftungsbedingter Jahresheizbedarf zum Erwärmen der pro Person zugeführten Außenluft auf 20°C abzüglich der durchschnittlich von Personen freigesetzten Wärme für verschiedene CO₂-Zielwerte (Raumluftkonzentrationen). Die Berechnung erfolgte für Außenlufttemperaturen entsprechend den stündlichen Messwerten des DWD für 2020 in Frankfurt am Main.

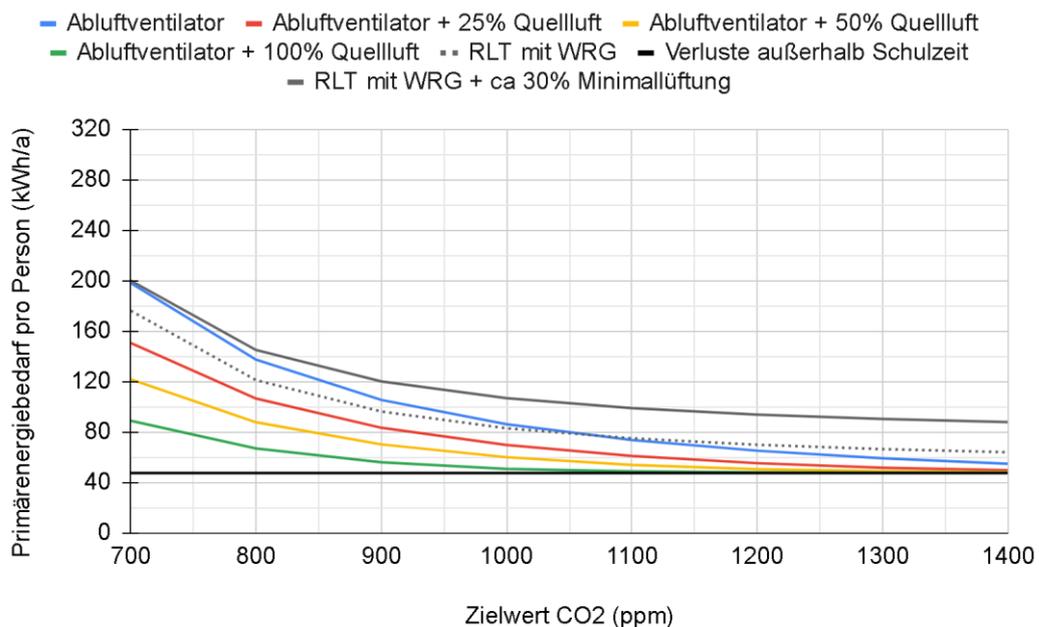
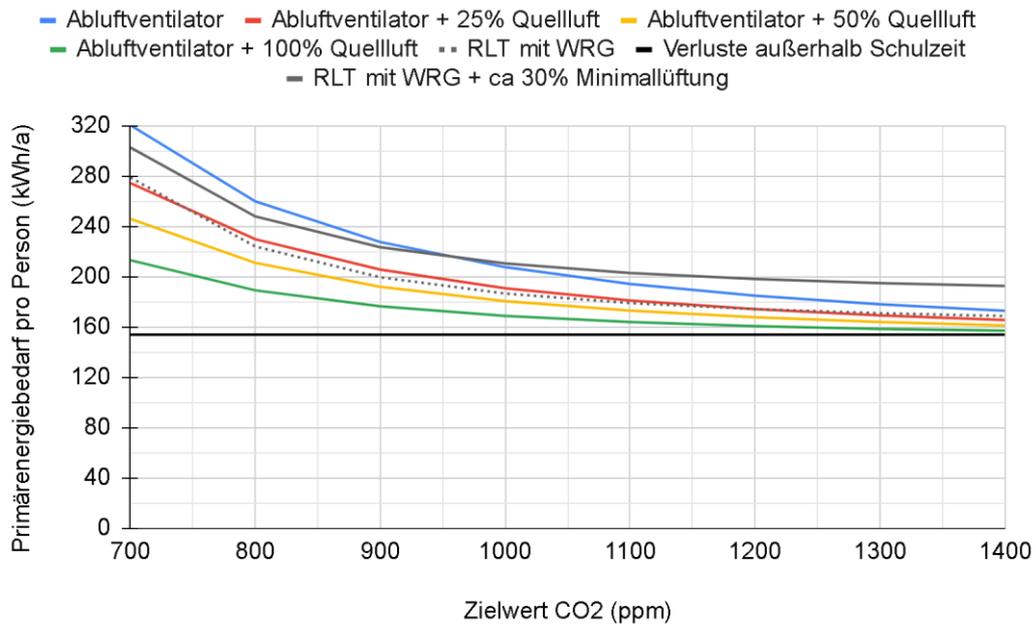


Abbildung A8: Personenbezogener Primärenergiebedarf für Lüftung und Heizung bei unterschiedlichen CO₂-Zielwerten (Raumluftkonzentrationen) in einem unsanierten Klassenraum (a, oben) und in einem sanierten Klassenraum (b, unten) mit entsprechend unterschiedlichen Leckraten und Transmissionsverlusten. Beispielhafter Vergleich für Frankfurt am Main im Jahr 2020 (DWD-Wetterdaten).

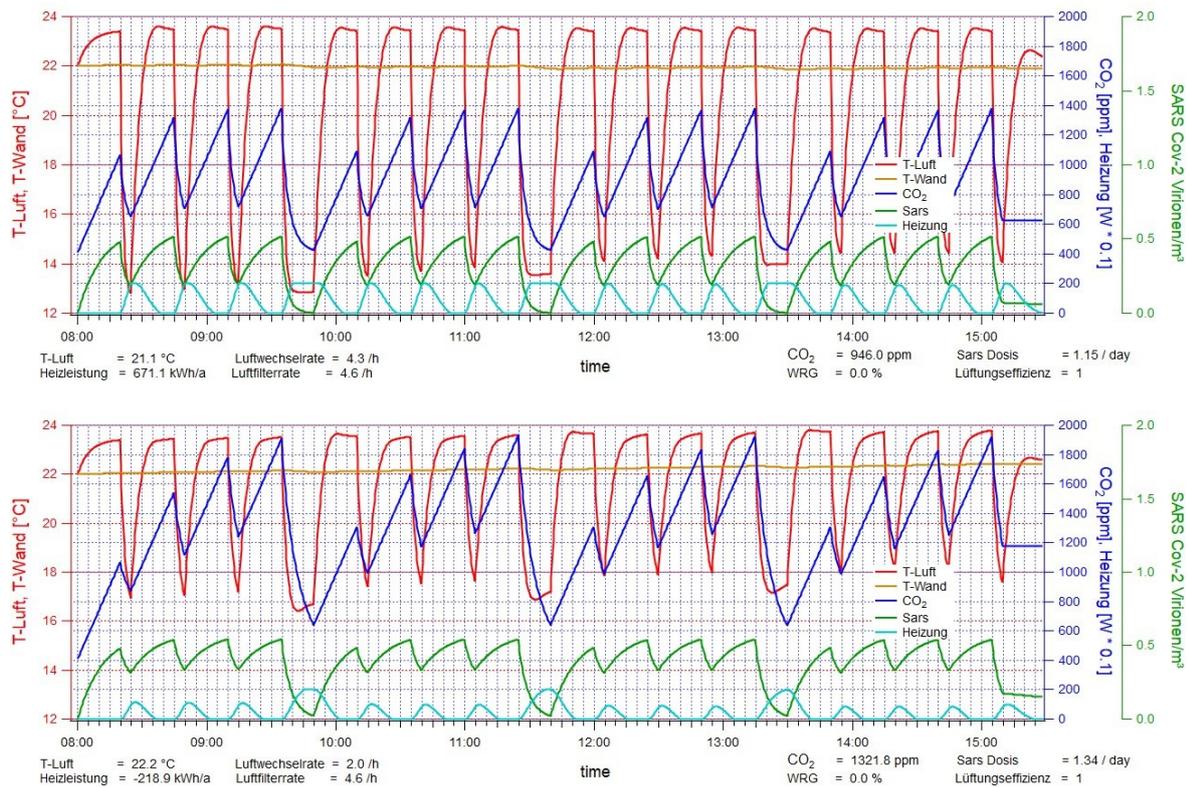


Abbildung A9: Auswirkung von Luftreinigern auf die Konzentration von Atemaerosolen in der Raumluft. Zeitlicher Verlauf charakteristischer Kenngrößen bei Verwendung eines Luftreinigers in Kombination mit Stoßlüften nach UBA-Empfehlung in einem Raum der Kategorie 1 (a, oben) bzw. Kategorie 2 (b, unten). Aufgrund der Anwesenheit von Personen zeigt die Konzentration von Atemaerosolen bzw. SARS-CoV-2-Virionen (Norm-Emissionsrate 600/h) eine sägezahnförmigen Zunahme und keine stetige Abnahme wie im VDI-Testverfahren ohne Aerosolquellen (VDI 4300-14 2021).

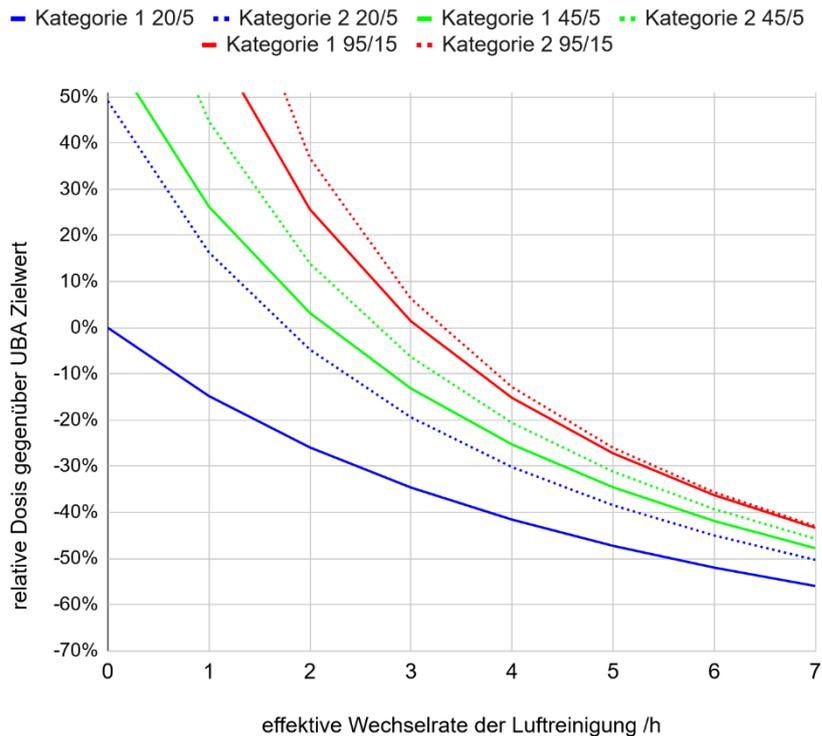


Abbildung A10: Veränderung der Dosis inhalierter Atemaerosolpartikel bzw. Virionen in Abhängigkeit der Luftreiniger-Leistung (effektive Wechselrate) für gut lüftbare Räume (UBA Kategorie 1, durchgezogene Linien) und für schlecht lüftbare Räume (UBA Kategorie 2, gestrichelte Linien). Als Referenz (Nulllinie) dient jene Dosis, welche bei Einhalten der UBA-Empfehlung für Stoßlüften (20/5 min) in einem Raum der Kategorie 1 erreicht würde. Die unterschiedlich gefärbten Linien stehen für unterschiedliche Stoßlüftungsintervalle: UBA-Empfehlung (20/5 min), in allen Pausen (45/5 min), oder nur in den großen Pausen (95/5 min). Je nach Ausgangslage kann ein VDI-normgerechter Luftreiniger mit entsprechender effektiven Wechselrate von etwa 4.5/h die Dosis um einige Dutzend Prozent verringern (ca. 20% -45%). Der Nutzen ist jedoch um ein Vielfaches geringer als die im VDI-Testverfahren ohne Aerosolquellen benannte Reduktion um 90%.

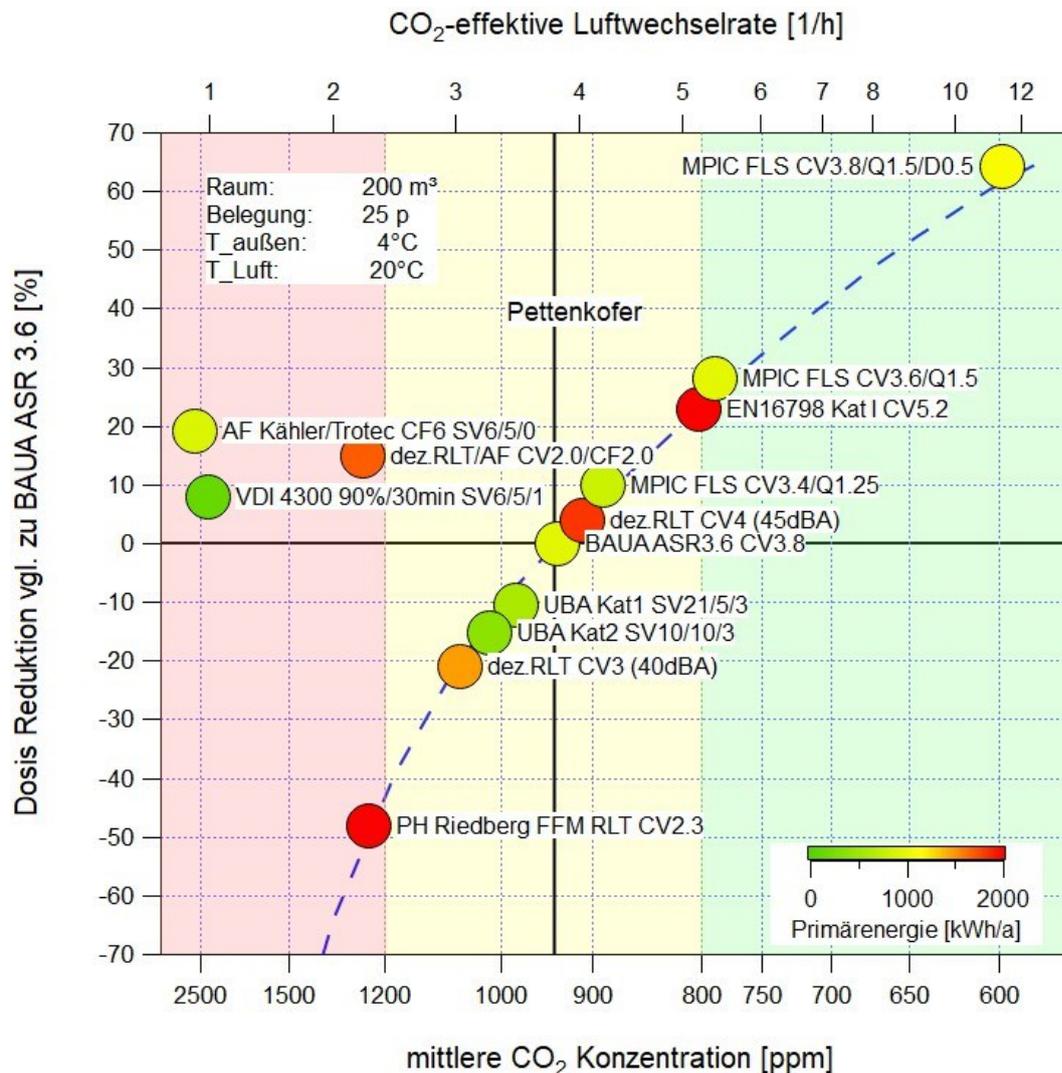


Abbildung A11: Zusammenfassung der Eigenschaften und Wirksamkeit von Lüftungstechnischen Maßnahmen nach verschiedenen Vorschriften hinsichtlich Infektionsschutz (Dosis-Reduktion), allgemeiner Raumlufthygiene (CO₂-Konzentration) und jährlichem Primärenergieaufwand. Die Hintergrundfarben entsprechen Din 13779 IDA Kategorien (grün IDA1, gelb IDA2+3, rot IDA 4). Die Punkte entsprechen verschiedenen Lüftungsmethoden, wobei die Farbe der Punkte den jährlichen Primärenergiebedarf anzeigt, inklusive grauer Energie (1 kWh/Euro für Herstellung und Wartung). Die effektive Luftwechselrate entspricht der Frischluftzufuhr, die bei reiner Mischlüftung erforderlich wäre, um eine vergleichbare CO₂-Reduktion zu erzielen. Als Referenzwert wurde der vom BAUA in den ASR3.6 festgelegte Wert gewählt, da dieser schon vor der Pandemie gültig war. Die Datenpunkte und Beschriftungen/Parameter haben folgende Bedeutung: UBA Kat1: Stoßlüften nach UBA Empfehlung in Kategorie 1 Räumen; UBA Kat2: Stoßlüften nach UBA Empfehlung in Kategorie 2 Räumen; PH Riedberg FFM: Passivhausschule Riedberg Frankfurt/Main (Reiß et al. 2017; Peper et al. 2007); dez RLT: typisches dezentrales Lüftungsgerät; MPIC-FLS: Fensterlüftungssystem nach Vorschlag des Max-Planck-Instituts für Chemie; VDI 4300, EN 16798: Normempfehlungen des VDI (VDI 4300-14) bzw. der Europäischen Union. CV: Dauerlüften, SV: Stoßlüften, AF: Luftfiltern, Q: Quellluft, D: Direktabsaugung.

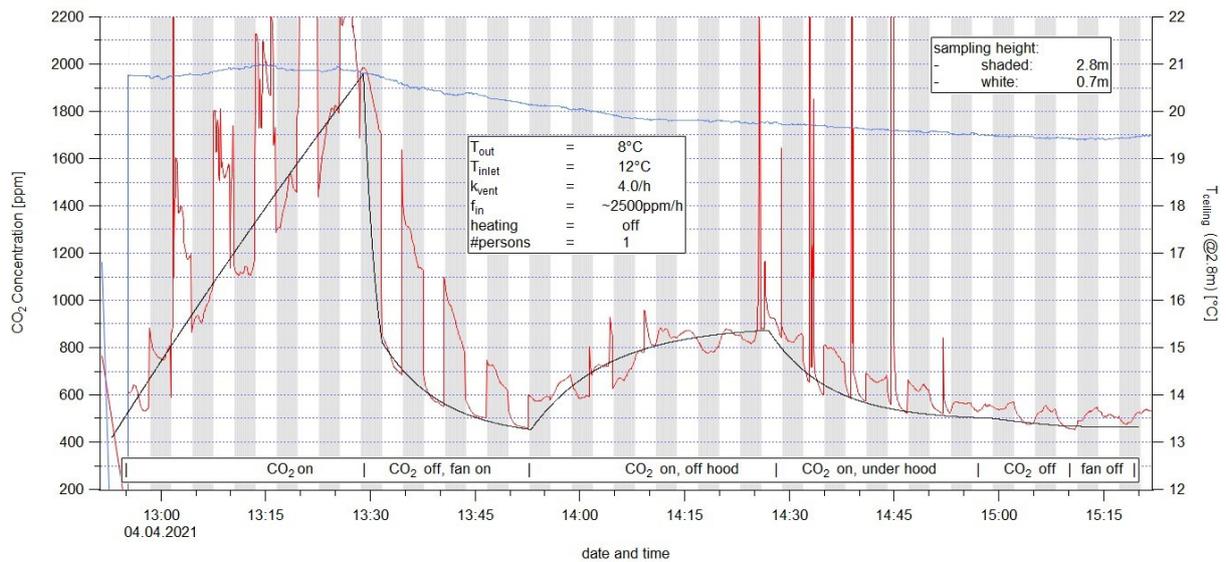


Abbildung A12: Gemessener CO₂-Konzentrationsverlauf bei Ventilator-Fensterlüften mit MPIC-FLS in Tracergas-Experimenten mit CO₂ analog zu (VDI 4300-14 2021). Die laut VDI 4300-14 geforderte Reduktion um 90% wird bereits nach etwa 10 min erreicht, was einer effektiven Luftwechselrate von etwa 13,8/h entspricht. Nach 30 min wäre die Konzentration mit dem MPIC-FLS um 99% reduziert, nicht nur um 90% wie laut VDI-Richtlinie für Luftreiniger gefordert (VDI 4300-14 2021).

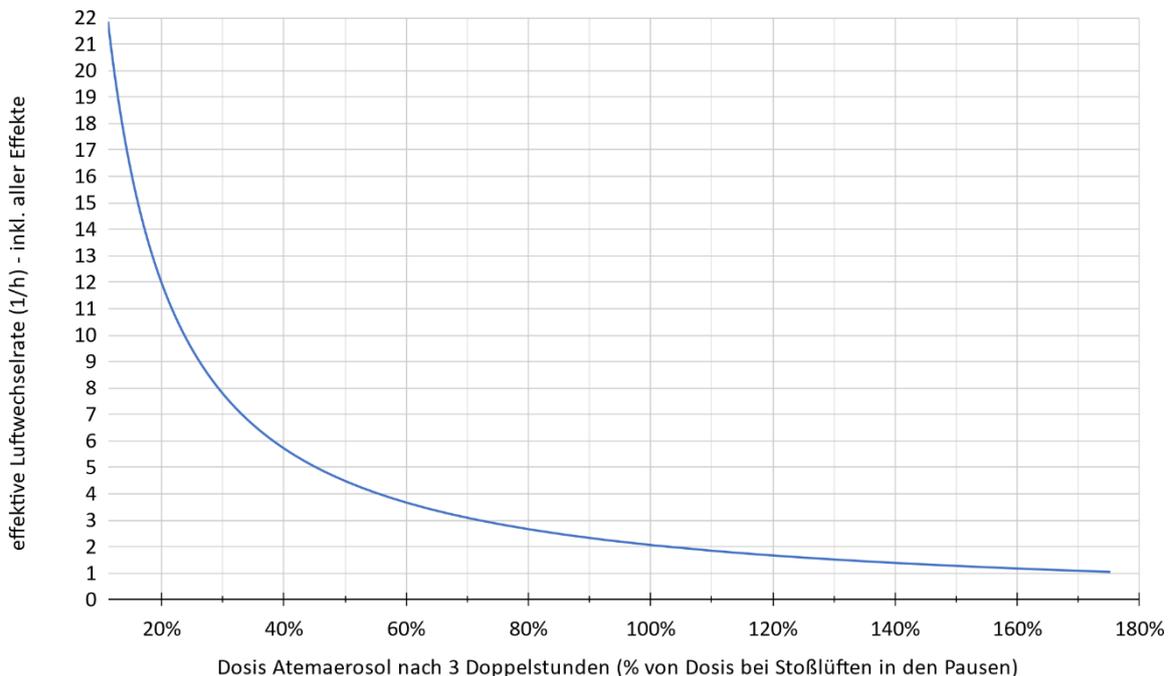


Abbildung A13: Zusammenhang zwischen der effektiven Luftwechselrate und der inhalierten Atemaerosoldosis nach drei Schul-Doppelstunden relativ zur Dosis bei Stoßlüften durchgehend in allen Pausen unter ungünstigen Bedingungen (Gleichung 3, Anhang A1). Der Zusammenhang wurde genutzt, um effektive Luftwechselraten zum Vergleich verschiedener Lüftungsmethoden zu bestimmen (siehe Tabelle 2).

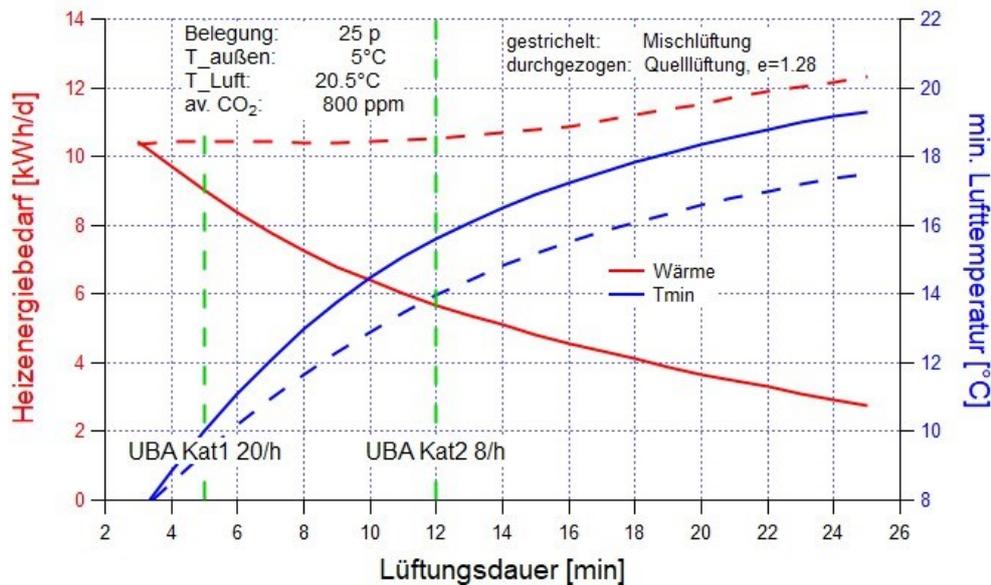
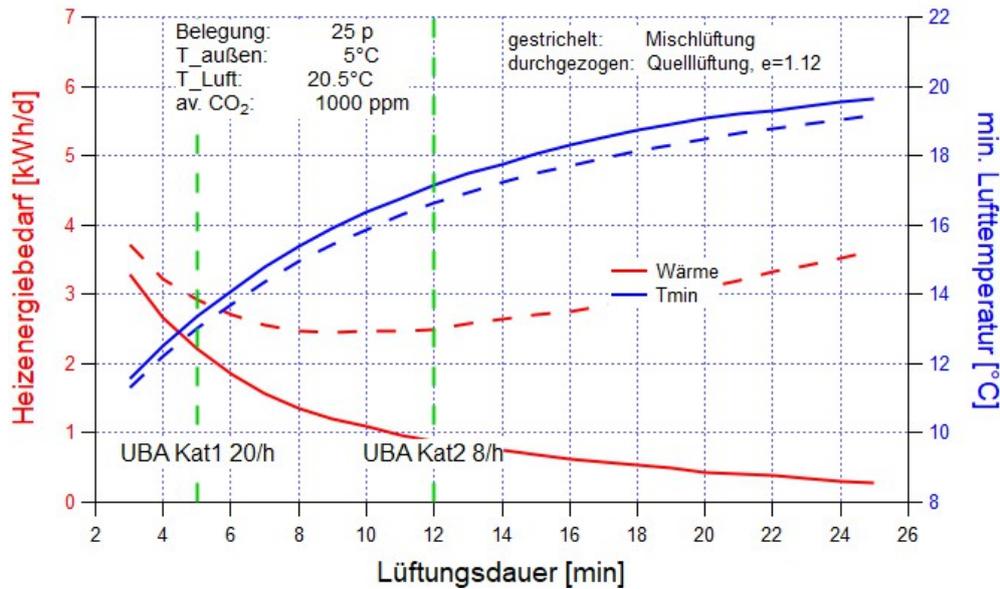


Abbildung A14: Heizenergiebedarf (rot) und minimale Raumtemperatur (blau) beim Fensterlüften eines Klassenraums unter Einhaltung einer mittleren CO₂-Konzentration von 1000 ppm (a, oben) und 800 ppm (b, unten) in Abhängigkeit der Lüftungsdauer pro Lüftungszyklus nach UBA Empfehlung (20/5 min). Für die Lüftungseffizienz wurden Werte von 1.12 (a) und 1.28 (b) angesetzt (Ostmann et al. 2022). Die dargestellten Ergebnisse gelten für Tage mit einer mittleren winterlichen Außentemperatur von 5°C und einer mittleren Raumtemperatur von 20,5°C während des Schulunterrichts. Um den gleichen CO₂-Mittelwert einzuhalten, wird bei Verlängerung der Lüftungsdauer die Fensteröffnungsfläche reduziert. Eine Lüftungsdauer von 25 min entspricht Dauerlüften. Die gestrichelten vertikalen Linien zeigen jene Lüftungsdauern an, welche bei charakteristischen Luftwechselraten für Räume der Kategorien 1 und 2 nach UBA Einordnung 9/2021 (Umweltbundesamt 2021d) zu einem CO₂-Konzentrationsmittelwert von 1000 ppm bzw. 800 ppm führen würden. Stoßlüften bei niedrigen Außentemperaturen führt insbesondere in Kategorie 1 Räumen zu erheblicher Erhöhung des Wärmebedarfs. Die nähere Analyse zeigt, dass der Hauptwärmeverlust in den großen Pausen ohne Wärme- und Stofflasten zu hygienisch unnötiger Überlüftung und damit zur Auskühlung des Raumes führt. Stoßlüften von Kategorie 2 Räumen oder reduziertes Lüften mit nur gekippten Fenstern in

Kategorie 1 Räumen führt bei mittleren winterlichen Außentemperaturen (ca. 5°C) und Anpassung der Lüftungszeit zu weniger Energieverbrauch und behaglicheren Zuständen als kurzes Stoßlüften mit weit geöffneten Fenstern (Kat 1). Beim Fensterlüften mit Kaltluft führen Quelllufteffekte dazu, dass die Lüftungseffizienz mit der Lüftungsdauer zunimmt - hier bis zu +28% (Ostmann et al. 2022). Daher ergibt sich unter Berücksichtigung von Quelllufteffekten der geringste Heizbedarf und die höchste Minimaltemperatur (ca. 20°C) für Dauerlüften. Intensives Stoßlüften (Kat 1) ergibt hingegen die niedrigste Minimaltemperatur (ca. 12°C) bei drastisch höherem Heizenergiebedarf (bis zu 4-fach bei 800 ppm, bis zu 10-fach bei 1000 ppm Zeitmittelwert).

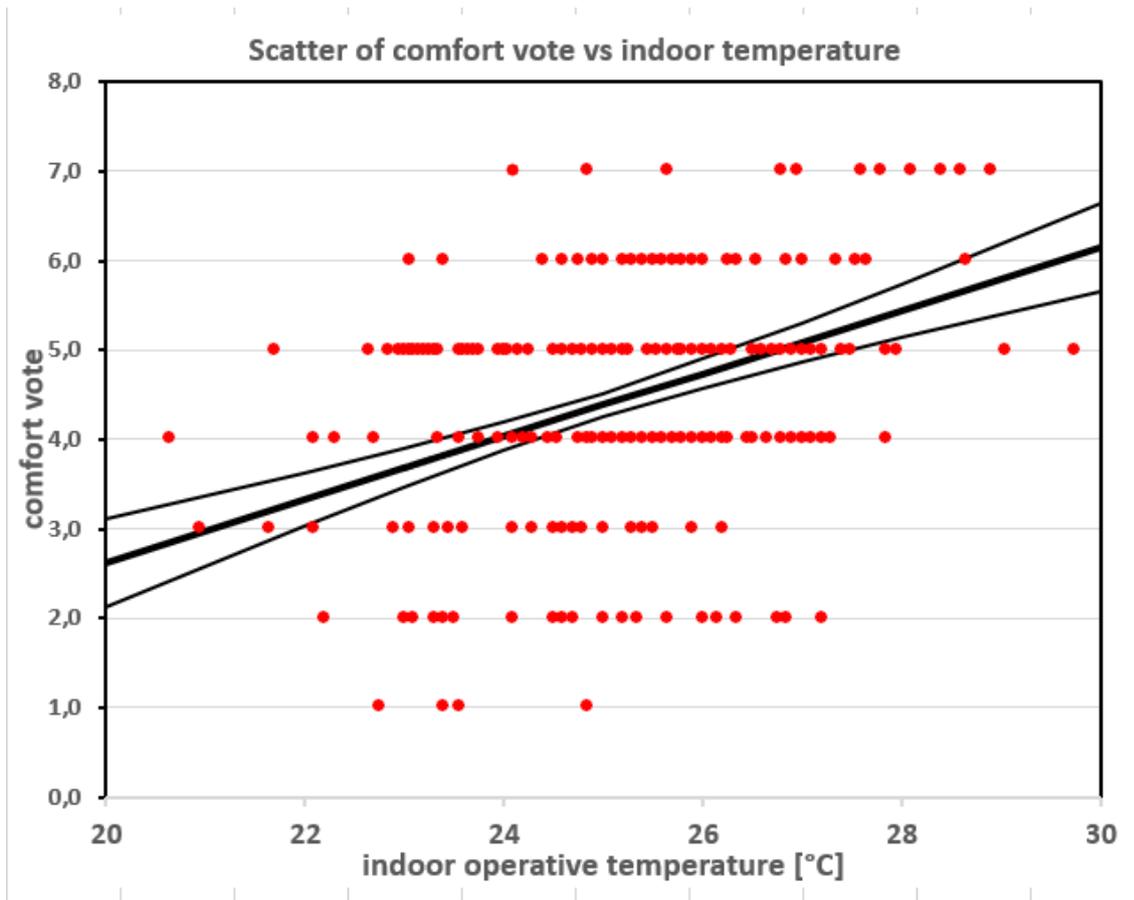


Abbildung A15: Streuung von Komfort-Bewertungen mit der linearen Regression für natürlich belüftete britische Büros (Nicol and Humphreys 2010). Etwa 85% der Variabilität der Bewertungen (comfort vote) werden durch die Fanger/Gagge-Komfort-Modelle (Gagge et al. 1986; Fanger 1970) nicht erfasst. Daher wurden 2005 andere Komfortkriterien in den ASHRAE Standard 55 eingebracht. Damit wird in der seit 30 Jahren laufenden internationalen wissenschaftlichen Diskussion auch in der Normenwelt akzeptiert, dass Komfortbegriffe in mechanisch und natürlich belüfteten Räumen anderen Kriterien genügen.

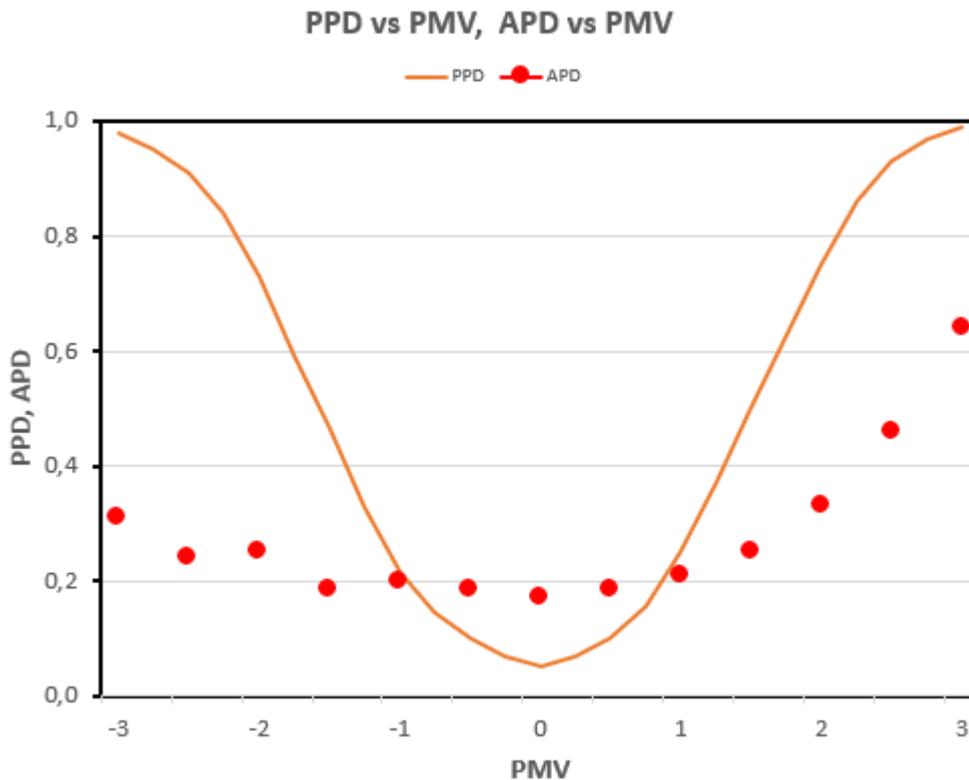


Abbildung A16: Effekte von systematischen Abweichungen in der thermischen Komfortgleichung, die nach geltenden Standards ISO 7730 und ASHRAE 55 für die Bewertung von maschinell gelüfteten Umgebungen genutzt werden (Humphreys and Nicol, 2002). Vertikale Skala ist der Anteil der Unzufriedenen (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD; Actual Percentage of Dissatisfied), horizontale Skala sind die thermischen Komfort Bewertungen (Predicted Mean Vote, PMV). Die durchgezogene Linie ist der nach dem Fanger-Modell vorhergesagte Anteil der Unzufriedenen, die Kreise der tatsächliche Anteil der Unzufriedenen bei natürlicher Lüftung (Fanger 1970). Es ist klar erkennbar, dass bei kalter bis mittelwarmer Bewertung der thermischen Umgebung ($PMV < 2$) der Anteil der Unzufriedenen nur schwach von der Raumtemperatur abhängt, wohingegen der Anteil der Unzufriedenen bei hohen Raumtemperaturen auf über 60% ansteigt.