**Kommentare zur Stellungnahme von Herrn Prof. Dr.-Ing. Kaup vom 25.11.2020, verlinkt als Langfassung auf der Webseite des Fachverbandes Gebäude-Klima e.V.**

Zitate aus dem Originaldokument *kursiv,* unsere Kommentare in Blau.

## *Kritische Auseinandersetzung mit dem Konzept einer „Abluftanlage für Klassenräume" des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPI)*

### *Anlagenbeschreibung laut Errichter*

*Die vom MPI entwickelte Abluftanlage soll ausgeatmete Luft, die möglicherweise Viren oder Bakterien enthält, gezielt mit Hilfe von Abzugshauben aus der direkten Umgebung von Personen, die an Tischen sitzen, aufnehmen.*
*Die Abluft gelangt über Verbindungsrohre in ein Zentralrohr und wird mit Hilfe eines Ventilators durch ein gekipptes Fenster nach draußen geführt.*
*Die an einem warmen Körper aufsteigende Luft unterstützt die Aufnahme und soll diese zusammen mit der ausgeatmeten Luft innerhalb von etwa zehn Sekunden direkt in die Abzugshaube bringen.*
*Die Zuluft kann wie beim normalen manuellen Lüften durch ein gekipptes Fenster oder eine geöffnete Tür erfolgen. Alternativ kann sie über Filter von draußen zugeführt werden. Der Querschnitt der Zuluftöffnung sollte mindestens dem halben Rohrquerschnitt des Zentralrohres entsprechen.*
*Die Zuluftöffnung sollte sich nicht vertikal über der Abluftöffnung befinden, sondern vorzugsweise erheblich darunter.*
*Gegenüber dreimaligem Stoßlüften pro Stunde soll die Anlage die Anreicherung von SARS-CoV 2 um bis zu einer Größenordnung (?) und $CO_2$ um bis zu einem Faktor drei senken können. Gleichzeitig kann sie die Energieverluste durch das Lüften deutlich reduzieren[1].*

### *Einordnung der Anlage aus technischer Sicht*

*Die vom MPI entwickelte Abluftanlage basiert im Wesentlichen auf dem physikalischen Prinzip der Quelllüftung.*
*Die Quelllüftung kann als eine Sonderform der Verdrängungslüftung betrachtet werden. Sie basiert jedoch nicht auf dem Prinzip der erzwungenen Verdrängung, sondern auf der freien Konvektion der im Raum befindlichen Wärmequellen (Personen). Die Zuluft wird mit einer Untertemperatur zur Umgebung und niedrigen Geschwindigkeiten in den Raum eingebracht. Eine stabile Schichtung im Raum wird durch vertikale Temperatur- und Dichteunterschiede erreicht. Die Luftgeschwindigkeiten im Raum sind bei einer Quelllüftung üblicherweise kleiner als 0,2 m/s.*
*Sind die Wärmequellen gleichzeitig die Schadstoffquellen im Raum, wird die belastete Luft aufgrund der Konvektionsströme nach oben abgeführt.*
*Die Struktur der Raumluftströmung wird von den Konvektionsströmen an den im Raum befindlichen Wärmequellen bestimmt.*

*Der Auftriebsvolumenstrom an einer Wärmequelle nimmt von unten nach oben zu. Wenn die Wärmequelle dadurch in irgendeiner Höhe mehr Luft nach oben fördert, als Zuluft in den Raum gelangt ($V_{Abluft} > V_{Zuluft}$), entsteht die Quellluftströmung.*
*In Bodennähe stellt sich noch „annähernd" eine Verdrängungsströmung bis zu einer bestimmten Schichthöhe ein, weil genau genommen diese Verdrängungsströmung eine Senkenströmung zur Wärmequelle hin ist. Oberhalb dieser Bodenschicht bildet sich eine Mischströmung aus, weil die Auftriebsströmung definitionsgemäß mehr Luft nach oben fördert, als in den*
*Raum eintritt. So ergibt sich aus Kontinuitätsgründen an anderer Stelle, im Allgemeinen in Wandnähe, eine Abwärtsströmung. In größeren Räumen werden sich Abwärtsströmungen auch innerhalb des Raumes ergeben. Es werden sich Raumströmungen ergeben, die vergleichbar sind mit den Zellenstrukturen, wie sie bei freien Konvektionsströmungen (Bénard-Zellen) entstehen. In Deckennähe wird die Aufwärtsbewegung durch Stau verzögert, und es stellt sich im Prinzip wieder eine Schicht einer Verdrängungsströmung (Senkenströmung) zum Luftauslass ein.*
*Die Abluft muss immer oberhalb der Wärmequellen aus dem Raum austreten, wenn sich die beschriebene Raumströmung einstellen soll, während die Zuluft in Bodennähe eingebracht wird[1].*
*Die Anlage des MPI basiert auf dem beschriebenen Wirkprinzip, wobei die Zuluft durch Nachströmung deutlich unterhalb der Abluftöffnung in den Raum gelangen soll.*

Hier wird das Wirkprinzip der Quelllüftung beschrieben. Obwohl sie lange bekannt ist und ihr hohe Lüftungseffizienz zugeschrieben wird, wird sie in Klassenräumen offensichtlich in fachlicher Planung und Ausführung selten umgesetzt, in unserer Modellschule z.B. gar nicht. Die Zuluftfenster sind zu hoch angebracht und öffnen nach oben. Ohne aufwendigere Modifikationen konnte zunächst nur die Direktabsaugung, also die Sammlung der Abluft direkt über den Quellen, implementiert werden. In der beschriebenen Modellvorstellung sind die höchsten Schadstoffkonzentrationen in oder nahe bei den Auftriebsströmen oberhalb der Wärmequellen (Personen) zu finden. Dementsprechend sollte die Sammlung von Abluft in diesen Strömen die effektivste Methode sein, Schadstoffe aus der Raumluft zu entfernen, insbesondere, wenn sowieso eine bestimmte Abluftmenge, z.B. durch die Vorgabe einer gering zu haltenden $CO_2$-Konzentration, vorgesehen ist.

***Bewertung der Energieeffizienz der Anlage***

*Gemäß der Autoren soll die Anlage Energieverluste durch das Lüften deutlich reduzieren.*
*Da die Anlage „nur" Abluft fördert und Zuluft über eine Nachströmung dem Raum zuströmt, kann eine Energieeinsparung nicht proklamiert werden.*
*Die*

[1] K. Fitzner, Luftströmung in belüfteten Räumen, 2008

*Anlage verfügt über keine Wärmerückgewinnungseinrichtung, sodass die Wärme denknotwendig mit der geförderten Abluft dem Raum entzogen wird.*
*Gegenüber einer Fensterlüftung erfolgt keine Energieeinsparung. Energieverluste könnten über eine professionelle Raumlufttechnische Anlage mit integrierter Wärmerückgewinnung um bis zu 80 % reduziert werden, aber nicht mit der beschriebenen Anlage.*

Offensichtlich kann man Energie einsparen, indem man bevorzugt den kontaminierten Teil der Raumluft entfernt und so insgesamt weniger Luft entfernen muss, um den gleichen Schadstoff-Reduktionseffekt zu erzielen. Da unser Aufbau nachgewiesenermaßen einen erheblichen Teil des Ausatemvolumens direkt abfängt, sind mit geringeren nominellen Raumluftwechselraten entweder ein höherer Verdünnungseffekt oder eben geringere Lüftungsverluste und damit Energieeinsparung erreichbar.
Selbstverständlich kann durch kontrollierte Fensterlüftung im Gegensatz zum freien Fensterlüften Energie eingespart werden, da die Austauschraten unabhängig von Umwelt- und Nutzereinflüssen nahe bei den Normwerten gehalten werden können. Zuviel Lüften kann nicht passieren, zum Stoßlüften im Winter weit geöffnete und vergessene Fenster sollte es nicht mehr geben.
Wir haben nach eigenen Rechnungen und beim Literaturstudium festgestellt, dass das Energieeinsparpotential durch Nachrüstung von (de)zentraler Raumlufttechnik mit Wärmerückgewinnung in Schulen marginal, wenn nicht negativ ist (Helleis/Klimach 2021, El Fouih 2012, Kaup 2019). Das liegt am hohen Leerstand der Gebäude (> 80%), der hohen Personendichte im Raum (~ 0.5p/m²) und damit hohen Wärmegewinnen, dem Tagesbetrieb, fehlenden Feuchtelasten, so dass die Infiltration zum Feuchteschutz ausreicht, und den Empfehlungen der Hersteller, die Anlagen aus hygienischen Gründen durchlaufen zu lassen, so dass auch außerhalb der Nutzungszeiten Energiebedarfe generiert bzw. Verluste „erwirtschaftet" werden.

***Bewertung der Raumströmung durch die Anlage***

*Laut der Autoren wurde zur Ermittlung der notwendigen „Luft" das Volumen der vom Körper erwärmten Luft in der Grenzschicht zwischen einer Person und der Luft wie folgt „abgeschätzt": ca. 5 cm (Dicke der Grenzschicht) x 80 cm (Umfang der Person). Mit einer Vertikalgeschwindigkeit von ca. 10 cm/s (gemessen) soll daraus ein Fluss von 4 l/s pro Person resultieren. Bei zwei an einem Tisch sitzenden Personen ergibt sich ein Fluss von ca. 8 l/s (entspricht 29 m³/h) Durchsatz durch die Abzugshaube.*
*Für einen Schulraum mit 26 Schülern und einem Lehrer ergeben sich in der Summe: 14 (Tische) x 29m³/h = 406m³/h.*
*Dies entspricht beim Volumen eines typischen Schulraumes von 200 m³ einer Raumluftwechselrate von ca. 406m³/h / 200m³ = 2/h, äquivalent zu einer optimalen stündlichen Stoßlüftung[2].*

[2] T. Klimach, F. Helleis, Vorläufige Dokumentation Abluftanlage für Klassenräume, Max-Planck-Institut, 10. November 2020

*Eine Volumenstrombestimmung durch eine „Abschätzung" der Rahmenparameter kann mit großen Fehlern behaftet sein. Des Weiteren stellt sich eine Auftriebsströmung bei entsprechenden Temperatur- und Dichteunterschieden ein, die sich bei veränderten Temperaturbedingungen naturgemäß und zwingend ebenfalls verändert. Der Auftriebsvolumenstrom muss nicht zwingend dem Volumenstrom der beschriebenen Anlage entsprechen. Bei zu geringem Volumenstrom bilden sich Rückströmungen, vorzugsweise an den Außenseiten (Wandbereichen).*

Rückströmungen wiedersprechen nicht der Wirksamkeit unserer Anlage, im Gegenteil können lokale Rückströmungen den personennahen Teil des Auftriebsvolumenstroms, der potenziell die größte Menge an Atemluftaerosolpartikeln enthält, mantelförmig umschließen und ihn so auf dem initialen Weg in Richtung der Hauben einschließen. Speziell bei hoher Personendichte werden die Rückströmungen in der Nähe der Wand reduziert, da ihnen die strahleninduzierte Erwärmung der Wand und die Kühlung der Raumluft durch Lüftung entgegenwirkt.

*Zudem wird der Auftriebsvolumenstrom deutlich größer abgeschätzt, als das*
*MPI dies tut.*

Wir haben den Auftriebsvolumenstrom direkt über einer Person abgeschätzt, dieser stimmt mit den in Rietschel und Fitzner gegebenen Werten von ca. 30m³/h/p für Temperaturgradienten >1.5K/m überein (Raumlufttechnik Band 2).

*„There is a similar effect of stratification on volumetric flow rate. The flow rate of the human thermal plume in the present uniform environment is in the 70–80 L/s range, compared to only 20–30 L/s with stratification. This effect accounts for some of the considerable scatter in plume flow rates reported in previous studies, none of which address stratification[3]"*
*Mit Temperaturschichtung ergeben sich demnach ergeben sich 72 m³/h/Person ein Gesamtvolumenstrom von 1.870 m³/h[4][5]. Der Volumenstrom von rund 400 m³/h ist damit deutlich zu niedrig angesetzt, um eine stabile Quellluftströmung aufrechtzuhalten.*

Eine stabile Quellluftströmung stellt sich bei Anwesenheit von Wärmequellen immer ein, die Frage ist, wieviel davon durch die Hauben direkt abgesaugt werden kann. Nach unseren neueren Messungen an realen sitzenden Personen

---

[3] https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.456.5299&rep=rep1&type=pdf#:~:text=The%20flow%20rate%20of%20the%20human%20thermal%20plume%20in%20the,30%20L%2Fs%20with%20stratification.

[4] M. Kriegel, A. Hartmann, Ausbreitungsdistanz und -dynamikvon Aerosolen in Innenräumen durch Konvektionsströme, Hermann-Rietschel-Institut der TU Berlin, DOI: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10391.

[5] DIN EN 16798-3:2017: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme.

erreichen wir bei ca. 11l/s (~ 480m³/h bei 12 Hauben, schwacher Ventilator) eine Direktabsaugungseffekt des Testaerosols von ca. 50%.

*Die Autoren vernachlässigen in ihren Überlegungen, dass der Volumenstrom in einer Auftriebsströmung auf dem Weg zur Abzugshaube deutlich zunimmt. Dieser Effekt basiert auf der nicht zu verhindernden Einmischung von Raumluft in den Auftriebsstrahl.*

Unsere Ergebnisse beruhen auf Messdaten, die abgeschätzten Werte für die Auftriebsvolumenstrom sind für die Berechnungen der Effizienzen irrelevant.

> *Für eine effektive Absaugung müsste der Volumenstrom signifikant erhöht werden, da sich ansonsten eine turbulente Vermischung im gesamten Raum einstellt, die eigentlich durch die vorgestellte Anlage verhindert werden soll.*

Die von uns experimentell ermittelten Direktabsaugungseffizienzen liegen in der Praxis bei 30-60%, damit lässt sich die Konzentration infektiösen Atemwegsaerosols um bis zu einen Faktor 2.5 senken, bzw. man bräuchte mit Mischlüftung eine 2.5fach höhere Luftwechselrate, also z.B. 10 statt 4. Aus unserer Sicht reicht diese Effizienz, um Standard RLT weit übertreffen zu können. Die Anlage soll nicht turbulente Mischung im Raum verhindern, das kann physikalisch nicht funktionieren, sondern sie soll Schadstoffe quellennah absaugen, bevor sie turbulent in den Raum eingemischt werden.
Schadstoffmessungen in unterschiedlichen Höhen belegen Konzentrationsunterschiede von bis zu einem Faktor 5. Damit ist experimentell eindeutig nachgewiesen, dass bei konstantem Zustrom von kühler Frischluft die Durchmischung eben nicht im gesamten Raum stattfindet. Daraus folgt auch direkt, dass kontaminierte Raumluft oberhalb der sitzenden Person eingemischt wird.
Die zu klärende Frage ist eher, welcher Anteil des Ausatemvolumens und der darin enthaltenen potenziell infektiösen Aerosole in Abhängigkeit von Haubenposition und -größe in den Auftriebsvolumenstrom eingemischt wird.
Aufgrund der bisherigen Messergebnisse können wir bei den Anlagen mit der derzeitigen Ventilatorempfehlung (800m³/h) von einem Quellluftteffekt von ca. 25-50% ausgehen.

*Die Messungen der Aerosolkonzentrationen erfolgten verteilt über einen Tag unter verschiedenen experimentellen Bedingungen. Es wurde <u>abwechselnd</u> die Aerosolkonzentration in der abgesaugten Luft (im Absaugrohr) und in der Raumluft (zwischen zwei Absaugrohren) bestimmt. Die Sammeleffizienz der Absaugung wurde durch den Vergleich der beiden Messungen bestimmt. Je weiter die Messwerte auseinander lagen, desto gezielter wurde die Absaugung bewertet.*

Das ist nicht korrekt. Vielmehr wurde aus der experimentell bestimmten Quellstärke des Generators unter Berücksichtigung der gemessenen Raumluftwechselrate und der gemessenen Verdunstungslebensdauer der Partikel die zu erwartende Hintergrundkonzentration im Fließgleichgewicht berechnet und mit der tatsächlich gemessenen verglichen.

*Wenn sich die Konzentration in der Raumluft (Hintergrund) nicht mehr ändert, ist laut der Autoren ein stabiler Zustand erreicht. Aus dem Verhältnis der Konzentration lässt sich, so die Autoren, die „Effizienz der Anlage" bestimmen.*

Das ist nicht korrekt. Aus der gemessenen Abbaurate (2.5/h) des Aerosols (Lüftung und Verdampfung) wurde die Lebensdauer zu 0.4h ermittelt. Die 2-fache Zeit (48min) entspricht einer Annäherung an den Gleichgewichtswert auf ca. 86%, was zur experimentellen Bestimmung der Hintergrundkonzentration im Rahmen unserer Ansprüche völlig ausreichend war.

*Die Autoren nutzen bei ihrer Bewertung offensichtlich die Lüftungseffektivität gemäß DIN EN 16798-3, bzw. den Wert Eins minus Kehrwert der Lüftungseffektivität, den sie als „Sammeleffizienz" bezeichnen.*

*Normativ berechnet sich die Lüftungseffektivität ($\varepsilon_V$) nach der DIN EN 16798-36 aus:*

$$\varepsilon_V = (c_E - c_S) / (c_I - c_S)$$

*wobei:*

| | |
|---|---|
| $c_E$ | *Verunreinigungskonzentration Abluft [mg/m³]* |
| $c_S$ | *Verunreinigungskonzentration Zuluft [mg/m³]* |
| $c_I$ | *Verunreinigungskonzentration Raumluft [mg/m³]* |

*Bei idealer Mischlüftung ist $\varepsilon_V = 1$. Bei einer Verdrängungsströmung kann $\varepsilon_V$ auch Werte über 1 annehmen.*

*Die Lüftungseffektivität ist eine Größe in der Raumlufttechnik, die herangezogen werden kann, um Lüftungssysteme zu beurteilen. Nach Mundt wird sie in die Beurteilung des Luftaustausches und der Schadstoffbeseitigung unterteilt.*
*Der Luftaustauschwirkungsgrad beschreibt das Verhältnis zwischen der kleinstmöglichen Verweilzeit eines Partikels im Raum und der tatsächlichen Verweilzeit. Die Lüftungseffektivität liefert eine Aussage über die Beseitigung von Schadstoffen aus dem Raum und ist definiert als das Verhältnis der Konzentration der Abluft zur <u>mittleren</u> Konzentration im Raum.*

*Die Lüftungseffektivität wird normativ genutzt um die notwendige Lüftungsrate ($Q_h$) zu bestimmen, um eine Verunreinigung abführen zu können. Diese ergibt sich aus der DIN EN 16798-1[6] mit folgender Beziehung:*

[6] DIN EN 16798-1:2019: Energetische Bewertung von Gebäuden – Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik.

$$Q = G_h / (C_{h,i} - C_{h,o}) / \varepsilon_V$$

*mit:*

$G_h$ *die Stofflast einer Verunreinigung [mg/s] der*

$C_{h,i}$ *Richtwert für eine Verunreinigung [mg/m³]*

$C_{h,o}$ *Konzentration in der Zuluft [mg/m³]*

$\varepsilon_V$ *Lüftungseffektivität*

Wir interessierten uns zunächst nur für den direkt abgesaugten Anteil, haben den Rechenweg dokumentiert und können deshalb normenunabhängig argumentieren. Die hier beschriebene Lüftungseffektivität wird nach unseren Messungen aber deutlich > 1 sein.

*Unabhängig von der Beurteilung der Messdurchführung, bei der nicht parallel, sondern nur <u>sequentiell</u>, also zeitlich versetzt die Aerosolkonzentrationen an verschiedenen Messpositionen ermittelt wurden, ist die realitätsferne Durchführung der Messung und deren Bewertung zu kritisieren.*

Da wir bei den angesprochenen Messungen nur Gleichgewichtszustände und zeitliche Mittelwerte benötigten, lediglich die sehr schnellen Signaländerungen bei Messpositionswechsel benötigten und die Auswertung durch Modellierung gemacht wurde, waren parallele Messungen nicht nur unnötig, sondern wegen der Interkalibrationsprobleme verschiedener Instrumente auch nicht sinnvoll.

*Da im Raum offensichtlich ein quasi stationärer Zustand eingestellt wurde, der durch keine für einen Klassenraum üblichen Aktivitäten im Raum gestört wurde, ergaben sich feste Raumströmungszustände, die sich im realen Betrieb mit sich bewegenden Personen und anderen Störeinflüssen nicht zwingend einstellen würden. Durch Querströmungen kann es im Raum auch zu einer Umlegung der Auftriebsgebiete kommen.*

Wie man an der hohen Variabilität der Aerosolmessung sieht, waren auch während der Labormessungen ein sich bewegender Experimentator und Querströmungen relevant. Deswegen haben wir weder erwartet noch behauptet, dass wir für den realen Schulbetrieb mit vergleichbar hohen Sammeleffizienzen wie im semirealen Laborexperiment (95-99%) rechnen können.

*Die Thermik über dem Dummy oder den Dummys konnte sich während der Messung damit ideal ausbilden und wurde in keiner Weise gestört. Demnach hat die Messung der unterschiedlichen Aerosolkonzentrationen lediglich nachgewiesen, dass sich über den Personen eine stabile Auftriebsströmung eingestellt hat, was auch zu erwarten war.*

Die hohen Fluktuationen im Aerosolsignal beweisen das Gegenteil. Darüber hinaus hätte nach den obigen Ausführungen (zu geringer Fluss) und Herrn Kriegels Aussagen die Erfassung des Auftriebsvolumenstroms selbst im

Laborexperiment unter keinen Umständen besser als 30% werden können. Die gemessen Sammeleffizienzen von über 90% sind damit durch die stark vereinfachten Annahmen dieser Abhandlung nicht erklärbar.

*Störungen, wie Aktivität der Personen, Husten, Niesen etc. beeinflussen die Auftriebsströmung allerdings erheblich (siehe auch: https://www.youtube.com/watch?v=Ma7TXSHSxa8).*
*Von diesem Ergebnis kann jedoch nicht darauf geschlossen werden, dass eine Vermischung dieser Auftriebsströmung mit der umgebenden Raumluft unter allen Bedingungen ausgeschlossen werden kann.*

Wir haben weder erwartet noch behauptet, dass wir im realen Schulbetrieb mit zum semirealen Laborexperiment vergleichbar hohen Sammeleffizienzen rechnen. Wir haben nicht behauptet, dass wir eine Vermischung der Auftriebsströmung mit der umgebenden Raumluft ausschließen können. Wir haben die Raumluftströmung nicht direkt gemessen. Wir haben lediglich gemessen, welcher Anteil des Atemwegsaerosols in der Haube abgesaugt wurde.

*Laut Autoren wurden zwei Schüler mit einem 100 W Infrarot-Strahler simuliert. Die Wärmestrahlung pro Person muss jedoch mindestens mit 125 W pro Person (Sitzende Tätigkeit [Büro, Schule]) angenommen werden[7]. Mit der mehr als doppelten Wärmeleistung müsste der Volumenstrom der Anlage entsprechend angehoben werden, um eine Umkehrströmung (Rückströmung in den Aufenthaltsbereich) zu vermeiden.*

Der Infrarotstrahler wurde nicht freistrahlend, sondern abgedeckt benutzt, um eine konvektive Quelle zu simulieren. Nach Rietschel und Fitzner ist für den Auftriebsvolumenstrom lediglich der konvektive Anteil einer Quelle relevant und geht nur mit der dritten Wurzel in den Auftriebsvolumenstrom ein. Laut VDI 2078 sollte der Konvektionsanteil mit ca. 50% der trockenen Wärmeabgabe, also ca. 50W angenommen werden. Die „125W Wärmestrahlung pro Person" sind weder real vorhanden noch für den Auftriebsvolumenstrom relevant.

*Es stellt sich auch die Frage, wie die Anlage bei voll belegtem Klassenraum bzw. im Teillastbetrieb arbeitet, wenn sich in einem Klassenraum zwischen wenigen Schülern und maximal 26 Schüler mit einer Wärmeleistung bis zu 3,3 KW befinden?*
*In diesem Fall muss die sich dann einstellende, veränderte Auftriebsströmung ebenfalls durch die Anlage abgeführt werden. Ansonsten können sich Thermikwalzen im Raum ausbilden, welche die ausgeatmeten Partikel wieder in die Aufenthaltsschicht transportieren.*

Die Anlage im Modellklassenraum ist für volle Belegung konzipiert. Durch Reduktion der Anzahl der Personen bzw. der Wärmelast reduziert sich der Frischluftbedarf, d.h. der Frischluftbereich weitet sich in der Umgebung der Anwesenden nach oben aus, die Schadstoffkonzentration in der

[7] Tabelle A.13 - Wärmeerzeugung durch Personen bei unterschiedlichen Aktivitäten, DIN EN 13779, 2007.

Aufenthaltsschicht nimmt ab. Die Stabilität der Schichtung wird zunehmend durch die Frischluftzufuhr beeinflusst. Da die Leistung der Anlage unabhängig von der Personenzahl ist, reduzieren sich die Schadstoffkonzentrationen in der Aufenthaltsschicht, was man sehr leicht mithilfe eines $CO_2$ Geräts in jedem Klassenraum nachweisen kann.

*Wie dargestellt, bedarf eine Quelllüftung einer stabilen Schichtung im Raum, die durch vertikale Temperatur- und Dichteunterschiede erreicht wird. Die Zuluft muss daher mit einer Untertemperatur zur Umgebung und niedrigen Geschwindigkeiten in den Raum eingebracht werden.*

Die vorgestellten Labormessungen fanden im Sommer statt, als aufgrund der geringen oder sogar negativen Temperaturunterschiede kaum mit einer stabilen Schichtung zu rechnen war. Trotzdem waren die Ergebnisse herausragend.
Dies zeigt eindeutig, dass sich wegen der typischerweise hohen Abwärme durch anwesende Personen fast unabhängig von der Außentemperatur ein vertikaler Temperaturgradient einstellt. Selbst bei mangelhafter Führung der Zuluft (Unterlicht öffnet oben) konnten wir Temperaturgradienten bis 1.5K/m messen.

*Da die beschriebene Anlage keine Luftaufbereitungsfunktionen besitzt, kann eine kontrollierte Temperierung der Zuluft nicht erfolgen. Somit ergeben sich die notwendigen Temperatur- und Dichteunterschiede nur bei günstigen Bedingungen, die sich zufällig ergeben können, oder auch nicht.*

Nach Rietschel und Fitzner ist nicht die kontrollierte Temperierung, sondern lediglich ein genügend hoher Temperaturgradient im Raum (>1.5K/m) wichtig für die Ausbildung der thermischen Schichtung und der Reduktion der Auftriebsvolumenströme. Dieser Gradient kann allein durch die Abwärme der anwesenden Personen erzeugt werden.

*Bei der Quelllüftung „quillt" von unten kältere Luft in den Raum ein und ein „Raumluftsee" entsteht. Dieser wird durch Wärmequellen (z. B. Personen) erwärmt und mittels Thermik nach oben transportiert. Gleichzeitig strömt kalte Luft von unten nach.*
*Demzufolge können weitere thermische Lasten (z. B. Anzahl der Personen, Heizung, Maschinenabwärme etc.) die sich einstellende Thermik empfindlich stören. Des Weiteren können Windeinflüsse (geöffnetes Fenster) ebenfalls die gerichtete Strömung im Raum erheblich beeinflussen.*

Je mehr Menschen oder Wärmequellen im Raum sind, desto höher ist die (willkommene) Wärmelast, desto höher wird der Temperaturgradient bei gleicher Zulufttemperatur, desto stabiler wird die vertikale Schichtung, desto geringer werden die individuellen Auftriebsvolumenströme. Damit wird bei gleichbleibendem Absaugvolumenstrom der direkt erfasste Anteil an Schadstoffen höher werden. Windeinflüsse werden in erster Näherung nur Transienten hervorrufen, weil Zu- und Abluftöffnungen in demselben Fassadenbereich sind und die Zuluftöffnungen sowieso abgedeckt werden müssen, um eine vernünftige Quellluftzufuhr zu erzielen.

*Da in Deckennähe die Aufwärtsbewegung durch Stau verzögert wird und sich wieder eine Schicht einer Verdrängungsströmung (Senkenströmung) zum Luftauslass einstellt, ist es auch nicht verwunderlich, dass die Absaugung auch ohne „Sammelschirme" etwa gleichgut funktioniert.*

Die Messungen ohne und mit Hauben zeigten Direkteffekte von 54% bzw. 97%. Daraus ergeben sich Unterschiede in den Aerosolkonzentrationen von über einer Größenordnung. Ein neutraler Gutachter würde also die Hauben eher als ca. „10mal besser" bezeichnen, sicherlich nicht als „gleichgut".

*Laut Autoren kann die Zuluft wie beim normalen manuellen Lüften durch ein gekipptes Fenster oder eine geöffnete Tür erfolgen.*

*Da es sich um eine reine Abluftanlage handelt, erfolgt die Nachströmung der Zuluft unkontrolliert.*

Der Hauptdruckabfall entsteht in den Rohrleitungen und durch die Leistungsbegrenzung des Ventilators (20Pa @ 800m³/h). Dadurch stellt sich im Zeitmittel ein definierter und praktisch vom Außendruck unabhängiger Abluftstrom ein. Die gemessenen Druckabfälle an 10cm weit geöffneten Unterlichtern betrugen ca. 1-2 Pa. Daher wird der Zuluftstrom genauso definiert sein und bis auf Lecks dem Abluftstrom entsprechen.

*Insbesondere bei geöffneter Tür kann die Zuluft z. B. durch den Flur angesaugt werden. So kann es zu Querkontaminationen mit anderen Räumen kommen. Diese ist unbedingt zu vermeiden, da sonst Infektionen zwischen den Räumen verschleppt werden können. Damit muss von einer Nachströmlösung über Flure dringend abgeraten werden.*

Auch wir sehen die Zuluft durch die Tür wegen Brandschutz, Lärmbelastung, Querkontamination, Winddruckabhängigkeit und vor allen Dingen der Störung der Auftriebsströmung kritisch und haben sie der Vollständigkeit halber nur für Räume erwähnt, in denen kein zweites Fenster im Raum zu öffnen ist. Die Empfehlung wurde den Internetseiten des Umweltbundesamtes entnommen, das unter gewissen Umständen (gute Querlüftungsmöglichkeiten) Vorteile gegeben sieht.

*Bei der Zuluftnachströmung müssen demnach Fenster durchgehend geöffnet sein. Dadurch ist es insbesondere bei tiefen Temperaturen unbehaglicher als bei einer Stoßlüftung und Geräusche aus der Umgebung können immer in den Raum eindringen.*

Die Lärmbelastung ist bei abgedeckten spaltoffenen Fenstern in unserem Mess-Klassenraum wesentlich geringer als bei weit offenen Fenstern (Stoßlüftung), insbesondere wenn man diese bei geringeren Temperaturunterschieden in Herbst Frühjahr und Sommer wesentlich länger als 5 min offenstehen lassen muss, um die geforderten Luftwechselraten zu erreichen.
Im Selbstversuch konnten wir bei Außentemperaturen bis 0°C kein Behaglichkeitsproblem feststellen. Die Vergleichsmessungen zu Stoß und

Dauerlüften haben klare Vorteile für die Dauerlüftung gezeigt. Die Raumtemperatur sinkt nicht mehr unter 20°C, die Schüler an der Fensterfront sitzen nicht mehr an weit geöffneten Fenstern in direkt einströmender Kaltluft.

*Aus den Messungen geht auch nicht hervor, welche „Leistung" der Ventilator erbringt. Eine thermisch induzierte Strömung kann sich auch durch freie Konvektion einstellen. Die Abluft strömt dabei auch ohne erzwungene Strömung nach außen, wenn von unten Zuluft nachströmen kann. Diese freie Konvektion bedarf allerdings zwingend der Temperatur- und Dichteunterschiede, wie bereits ausgeführt.*

Die Ventilatorleistung liegt bei 27W/(0.22/m³/s) = 122W/(m³s). Wir haben den passiven Anteil durch Ausschalten des Ventilators direkt gemessen (ca.50% bei 0°C außen / 20°C innen). Mit dem mittlerweile installierten Quelllufteinlass benötigen wir unterhalb von ca. 5°C keinen Ventilator und nur wenige Fenster, um Luftwechselraten von ca. 6/h zu erreichen.

*Der eingesetzte Ventilator kann mit nur 20 W Leistung nur einen sehr kleinen Differenzdruck aufbauen. Daher wird jeder Winddruck auf der Fassade die Strömungsverhältnisse im Klassenraum verändern. Es ist darüber hinaus höchst wahrscheinlich, dass im Einbauzustand der von dem Ventilator geförderte Volumenstrom deutlich geringer ist. Ein sicherer Systembetrieb ist damit nicht gewährleistet.*

Offensichtlich reicht die Leistung des Ventilators im Einbauzustand nach den vorliegenden Messungen aus, um die projektierten Raumluftwechselraten von > 3/h zu erzielen. Da der Winddruck bei geschlossener Tür gleichermaßen auf Zuluft und Abluft wirkt, beides offene Fenster in der gleichen Fassadenfläche, können nur kurze Transienten zum Druckausgleich entstehen. Für eine Änderung des Winddrucks um 100Pa (sehr unwahrscheinlich ~45km/h), würde sich ein ausgetauschtes Volumen von ca. 100l in Zu- und Abluftbereich ergeben, was dem Umsatz der Anlage innerhalb ca. 0.5s entspricht.

*Eine RLT-Anlage muss jedoch auch bei ungünstigen Bedingungen durch erzwungene Strömung Abluft aus dem Raum abtransportieren können. Somit sind entsprechende Leistungen erforderlich, die eine in allen Betriebsfällen ausreichende Luftmenge sicherstellen können.*

Offensichtlich kann in einer dezentralen Anlage die Herstellung ausreichender Luftmengen wegen fehlender persistenter Druckgradienten bei entsprechenden Rohrquerschnitten mit wesentlichen geringeren Leistungen erbracht werden.

***Zusammenfassende Bewertung***

*Beim Studium der Dokumentation der Autoren ergeben sich viele Fragen zur*
*Messdurchführung, aber auch zum Betrieb der Anlage bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen und der sich ergebenden Störeinflüsse.*

*Insbesondere basiert die Anlage auf dem Grundgedanken, dass sich die Quellen (Schüler) exakt unter der Abluftöffnung befinden müssen und sich nicht wesentlich bewegen dürfen. Solche Störeinflüsse führen zwangsläufig zur Querkontamination zwischen den Personen. Auch Störimpulse wie Niesen oder Husten erzeugen Strömungsimpulse, die meterweit in den Raum getragen werden können.*
*Die gewonnenen Erkenntnisse hätten sich aufgrund der vorhandenen Dichteunterschiede wahrscheinlich ähnlich auch ohne die beschriebene „Anlage" eingestellt.*

Die Unterschiede in den Messungen mit laufendem / stehendem Ventilator beweisen eindeutig das Gegenteil.

*Da die Anlage keine Luftaufbereitungsfunktionen und insbesondere keine Komponenten zur Lufttemperierung besitzt, ist die Funktion einer Quelllüftung von den sich zufällig ergebenden Temperatur- und Dichteunterschieden abhängig.*

Nach VDI 2078 bringen 26 anwesende Schüler wenig zufällige 1kW konvektive Wärmeleistung in den Raum ein. Dazu kommt die ebenso wenig zufällige Ventilator getriebene, meist kühlere Zuluft mit ca. 0.5-1kW Kälteleistung. Beides reicht aus, um die nötigen Dichteunterschiede reproduzierbar herzustellen. Sind die Schüler nicht im Raum oder eine entsprechend geringere Zahl anwesend, verringert sich das Ansteckungsrisiko sowieso wie zuvor beschrieben aufgrund der entsprechend höheren spezifischen Luftwechselrate.

*Die proklamierte Energieeinsparung der Anlage ist nicht vorhanden, da die Anlage über keine Wärmerückgewinnung verfügt.*

Die Energieeinsparung gegenüber Fensterlüftung ergibt sich rechnerisch durch definierte Luftwechselraten und den nachgewiesenen Anteil der Direktabsaugung. Aus den oben bereits angeführten Gründen könnte Wärmerückgewinnung, wenn überhaupt, nur marginale ökologische Gewinne erzielen. Ökonomisch ergeben sich nur Nachteile, was sicherlich der Hauptgrund dafür ist, dass Schulen nur zu ca. 10% mit RLT/WRG ausgestattet sind.
Da Wärmerückgewinnung immer eine Behandlung der Zuluft voraussetzt, sind mit ihrem Einsatz grundsätzlich hygienische Risiken im Betrieb verbunden. Der Schulträger muss sich daher überlegen, warum er zusätzlich zu den Mehrkosten auch noch hygienische Risiken tragen sollte.

*Grundsätzlich handelt es sich bei der beschriebenen Anlage um eine Abluftanlage, die auf dem lange bekannten Prinzip der Quelllüftung aufbaut. Allerdings besitzen professionelle RLT-Anlagen Luftbehandlungsfunktionen, welche die Verdrängungsströmung auch unter veränderten Rahmenbedingungen aufrecht halten können.*

Unseres Wissens nach werden die meisten Raumlufttechnischen Anlagen in Schulen in Mischlüftung betrieben. Eine Verdrängungsströmung wird durch solche im Allgemeinen also weder erzeugt noch aufrechterhalten.

Wir haben bisher experimentell nicht feststellen können, dass Ventilatoren, Rohre und Fenster nur unter nicht veränderlichen Rahmenbedingungen funktionieren. Die abgedeckten Bereiche der Umweltbedingungen während unserer Messungen sind -3°C bis +27°C und Windstille bis ca. 7m/s.

*Mit solch professionellen Anlagen ist die gezeigte „Bastellösung" keinesfalls zu vergleichen.*

Das sehen wir genauso. Besonders was die Schadstoffreduktion angeht, liegt die von uns vorgeschlagene Lösung mit der Kombination aus normgerechter Luftwechselrate, Quelllüftungseffekt und Direktabsaugungseffekt klar vorne. Ob die Anlagen gebastelt oder gebaut werden, ist zweitrangig, entscheidend sind Dimensionierung und Qualität der Komponenten und die Einhaltung der Vorschriften wie Brandschutz und allgemeine Sicherheit.

*Diese „Lösung" ist nicht nachhaltig, da die gezeigte Installation nur wenige Wochen oder Monate halten wird und keine Energierückgewinnung verwendet wird.*

Das Thema Wärmerückgewinnung wurde bereits erledigt. Wir sehen in der Kombination mit dem Tragen von Masken die einfachste und wirksamste Möglichkeit, das Infektionsrisiko im Präsenzunterricht substantiell zu verringern.
Die eingesetzten Materialen (PE/PP) sind langlebig und können in der Natur (Wälder, Weltmeere) mehrere Jahre überdauern. Filterwechsel entfallen. Die direkten Betriebskosten liegen unter der eines einzigen Leuchtmittels. Die Komponenten sind sortenrein zu 100% recycelbar, da keine Verbundmaterialien oder Duroplaste verwendet werden. Die Anlage macht aufgrund ihrer Lüftungsfunktion im Gegensatz zu Raumluftreinigern auch nach der Pandemie Sinn.
Bis zur Nachrüstung der Schulen mit RLT wäre die Nachhaltigkeit somit nachgewiesen.
Der Anteil der Schulen mit Raumlufttechnik liegt nach unseren Recherchen bei ca. 10%. Wären kommerzielle Lüftungssysteme in Schulen wirtschaftlich zu betreiben, wären sie längst flächendeckend umgesetzt worden.

*Es stellt sich die Frage, ob Steuergelder für derartige „Lösungen" aufgewendet werden sollten. Vielmehr sollten Steuergelder auch in der jetzigen Zeit für nachhaltige Lösungen verwendet werden.*

Als Steuerzahler wünschen wir uns für alle unsere Schulen einfache, wirksame, ökonomische, ökologische und wartungsarme Raumlufttechnik. Niemand hindert die Lüftungsbranche daran, einen passenden Vorschlag zu machen.
Der volkswirtschaftliche Nutzen geöffneter Schulen dürfte erkennbar sein. Als öffentlich finanzierte Forschungseinrichtung haben wir dazu einen effektiven und leicht umsetzbaren Vorschlag gemacht.

Mainz 22.07.2021,
Dr. Frank Helleis und Dr. Thomas Klimach, MPI für Chemie Mainz

(Version 1.0: 07.12.2020; aktualisierte Version 1.1: 22.07.2021)