HOCHSCHULE TRIER | Campusallee | 55768 Neubrücke

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup
Honorarprofessur für Raumlufttechnik
FB Umweltplanung/Umwelttechnik

ANSPRECHPARTNER	TELEFON	MAIL	DATUM
Prof. Dr. Christoph Kaup	+49 6782 9999-0	c.kaup@umwelt-campus.de	25.11.2020

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].

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

Umwelt-Campus
Birkenfeld

Campusallee
55768 Neubrücke (Nahe)
Tel.: +49 6782/17-0
info@umwelt-campus.de
www.umwelt-campus.de

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[2].
Die Anlage des MPI basiert auf dem beschriebenen Wirkprinzip, wobei die Zuluft durch Nachströmung deutlich unterhalb der Abluftöffnung in den Raum gelangen soll.

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

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 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.

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[3].
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).
Zudem wird der Auftriebsvolumenstrom deutlich größer abgeschätzt, als das MPI dies tut.
„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

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

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[4]"
Mit Temperaturschichtung ergeben sich demnach ergeben sich 72 m³/h/Person ein Gesamtvolumenstrom von 1.870 m³/h[5]. Der Volumenstrom von rund 400 m³/h ist damit deutlich zu niedrig angesetzt, um eine stabile Quellluftströmung aufrechtzuhalten.
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. 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 Messungen der Aerosolkonzentrationen erfolgten verteilt über einen Tag unter verschiedenen experimentellen Bedingungen. Es wurde abwechselnd 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. 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.

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 (ε_V) nach der DIN EN 16798-36 aus:

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

[4] 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.
[5] 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.
[6] DIN EN 16798-3:2017: Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme.

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 ε_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 mittleren 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[7] mit folgender Beziehung:

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

mit:

G_h	die Stofflast einer Verunreinigung [mg/s]
$C_{h,i}$	der Richtwert für eine Verunreinigung [mg/m³]
$C_{h,o}$	Konzentration in der Zuluft [mg/m³]
ε_V	Lüftungseffektivität

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

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 Be-

[7] 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.

trieb mit sich bewegenden Personen und anderen Störeinflüssen nicht zwingend einstellen würden. Durch Querströmungen kann es im Raum auch zu einer Umlegung der Auftriebsgebiete kommen.
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.
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.

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[8]. Mit der mehr als doppelten Wärmeleistung müsste der Volumenstrom der Anlage entsprechend angehoben werden, um eine Umkehrströmung (Rückströmung in den Aufenthaltsbereich) zu vermeiden.

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.
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.

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.

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

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.

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.

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. 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.

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.

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.

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.

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.

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.
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.
Die proklamierte Energieeinsparung der Anlage ist nicht vorhanden, da die Anlage über keine Wärmerückgewinnung verfügt.
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.
Mit solch professionellen Anlagen ist die gezeigte „Bastellösung" keinesfalls zu vergleichen. Diese „Lösung" ist nicht nachhaltig, da die gezeigte Installation nur wenige Wochen oder Monate halten wird und keine Energierückgewinnung verwendet wird.
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.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup