

## Studie zu Lüftungsmodellen für eine Hygienelüftung und der Aerosolbelastung in Schulen vorgestellt

*Die Stadt Jena und die Kommunale Immobilien Jena legten 24.02.2021 einen Prüfbericht vor, den der Stadtrat in seiner Dezember-Sitzung in Auftrag gegeben hatte. Er enthält Ergebnisse über einen Pilotversuch verschiedener Lüftungsanlagen und -methoden, die an vier Jenaer Schulen/Kitas Anfang Februar getestet wurden.*

### *Zusammenfassung*

Neben den dezentral eingesetzten Lüftungsgeräten, die in Bezug auf Wirksamkeit und Nachhaltigkeit die besten Noten im Test bekommen haben, ist die Kombination aus Stoßlüften und einer kontinuierlichen Beobachtung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in den Räumen durch ein CO<sub>2</sub>-Messgerät ein ebenso wirksames Modell. Die Anschaffung dieser Geräte könnte mit deutlich geringeren Kosten umgesetzt werden. Luftwäscher erzeugten eine deutliche Senkung des Aerosolgehaltes, wären aber lediglich in Kombination mit maschineller oder freier Lüftung einsetzbar, da sie nicht das CO<sub>2</sub>-Problem lösen. Die schlechteste Bewertung im Testvergleich erhielten provisorische Abluftanlagen nach dem Vorbild der vom Max-Planck-Institut bereitgestellten Konstruktionspläne.

### *Messmethoden*

Die Messmethoden wurden so gewählt, dass eindeutige Erkenntnisse sowohl zur Hygienelüftung als auch zur Aerosolbelastung

gewonnen werden konnten. Hierzu wurde ein CO<sub>2</sub>-Datenlogger eingesetzt, der die Temperatur und die relative Luftfeuchte gleichermaßen aufzeichnet.

Zur Aerosolmessung kam ein 6-Kanal-Messgerät zur Anwendung, das dem Nachweis von Partikeln und Aerosolen in DIN EN ISO 14464-zertifizierten Räumen dient. Dieses Messgerät wird beispielsweise in der Pharmaindustrie eingesetzt, um mechanische und biologische Partikel zu messen. Da es sich bei Aerosolen um eine Mischung aus festen und flüssigen Partikeln handelt und das Messgerät nicht zwischen einzelnen Partikeln unterscheidet, wurde diese Messmethode als geeignet für die Prüfung erachtet. Bei der einzelnen Messung konnte nur der Bereich von 0,3 µm Aerosolkonzentration betrachtet werden. Eine direkte Erfassung der COVID 19-Erreger konnte damit nicht durchgeführt werden, da diese eine Größe von 0,08-0,16 µm besitzen (Aussage RKI). Dennoch lässt dieses Messverfahren Rückschlüsse auf die Aufreinigung der Raumluft von Aerosolen zu.

Zur Messung der tatsächlichen Virenlast in der Umgebungsluft wurden mehrere Labore mit entsprechender Expertise angefragt. Diese konnten allerdings aus Kapazitätsgründen eine Probenauswertung im angestrebten Zeitraum nicht durchführen. Die in beiden Messreihen erhobenen

Daten wurden im Anschluss zusammengeführt und durch einen unabhängigen externen Sachverständigen begutachtet und ausgewertet. Sie werden in diesem Bericht detailliert dargestellt und sind Grundlage für die angeführte Handlungsempfehlung.

Der in der Beschlussvorlage des Stadtrates ausgesprochenen Empfehlung, UV-C Geräte zur Luftdesinfektion einzusetzen, konnte nicht entsprochen werden, da das Gesundheitsamt der Stadt Jena aus Gründen der Gesundheit und der Sicherheit den Einsatz dieser Geräte untersagt hat.

### *Parameter zu den Messungen*

- Der Messzeitraum betrug 45 min = 1 Unterrichtseinheit.
- Gebäude, Raum-Nr. und Raumgröße wurden dokumentiert (Fläche in m<sup>2</sup> und Volumen in m<sup>3</sup>).
- Anzahl der Personen (Kinder und Erwachsene) wurden erfasst.
- Die Messung von CO<sub>2</sub>, der Temperatur sowie der Luftfeuchte erfolgte in festgelegten Intervallen mit einem CO<sub>2</sub>-Datenlogger, der auch die Temperatur und Luftfeuchte speichert.
- Die Aerosol-Messung erfolgte durch ein 6 Kanal-Partikelmessgerät (Leihgerät).
- Die Schalldruckpegelmessung erfolgte jeweils vor Testbeginn



Abb. 1: Südschule (Raum 00\_18) Provisorium nach Modell Max-Planck-Lüftungsanlage (Quelle: Stadt Jena KIJ)

der Messreihe mit einem Messgerät, das durch den Sachverständigen gestellt wurde.

*Messaufbau 1 einer provisorischen Abluftanlage in Anlehnung an die vom Max-Planck-Institut propagierten Lüftungsanlage*

Bei der Max-Planck-Lüftungsanlage handelt es sich um eine reine Abluftanlage, wobei die Raumluft keine direkte Verbindung zur Außenluft besitzt. Die benötigte Zuluft wird dabei aus angrenzenden Räumen über Undichtigkeiten von Türen bzw. Fenstern bezogen.

Die dadurch generierte Luftwechselrate soll in Abhängigkeit von Raumgröße und Ventilator-Leistung nach Angaben des Max-Planck-Instituts für Chemie Mainz die Virenlast signifikant verringern und somit das Infektionsrisiko senken. Die nachströmende Zuluft wird hierbei allerdings nicht separat erwärmt. Beim Testaufbau in den o.g. Gebäuden wurden die Provisorien von einer Fachfirma mit zertifizierten Komponenten nachgebaut und an die jeweiligen Gegebenheiten angepasst.



Abb. 2: Kinderheim Friedensberg (Sportraum) kontrollierte Wohnraumlüftung (KWL-Gerät) mit  $300\text{m}^3/\text{h}$  Volumenstrom (Quelle: Stadt Jena)

*Messaufbau 2 mit vorhandener Lüftungsanlage*

Bei einer im Gebäude vorhandenen Lüftungsanlage erfolgt der Luftwechsel durch eine vordefi-

nierte Menge Zuluft und Abluft im  $m^3/h$ . In Abhängigkeit des jeweiligen Raumvolumens ergibt sich die sogenannte Luftwechselrate (pro Stunde), durch die letztlich der Hygieneluftwechsel erreicht wird.

Die nachströmende Zuluft wird dabei vorkonfektioniert, d.h. mit einer vordefinierten Raumtemperatur bzw. nacherhitzt (Winter) oder gekühlt (Sommer) in den Raum eingebracht. Bei den in den ausgewählten Objekten vorhandenen Anlagen handelt es sich um im Bestand nachgerüstete Lüftungsanlagen. Diese befinden sich bereits mehrere Jahre in Nutzung, arbeiten sehr zuverlässig und halten die  $CO_2$ -Konzentration im Raum konstant niedrig.



Abb. 3: Kita Kindervilla (Raum Landgrafenbergblick) Messaufbau Fensterlüftung Partikelmessgerät und  $CO_2$ -Datenlogger

*Messaufbau 3 mit Fensterlüftung gemäß genehmigtem Lüftungskonzept*

Bei diesem Messaufbau wurden alle Messungen entsprechend des abgestimmten Lüftungskonzepts im jeweiligen Referenzobjekt durchgeführt.

*Messaufbau 4 mit Raumluftreiniger (Luftwäscher mit HEPA 14-Filter) in Verbindung mit Fensterlüftung nach  $CO_2$ -Ampel*



Abb. 4: Südschule (Raum 00\_18) Raumluftreiniger mit HEPA-14-Filter; Volumenstrom ca.  $650 m^3/h$  (Quelle: Stadt Jena KIJ)

Als weitere Testanlage erfolgte ein Messaufbau mittels Raumluftreiniger, sogenannter Luftwäscher. Diese reinigen die im Raum befindliche und von außen nachströmende Luft mittels HEPA 14-Filter, die einen sehr hohen Abscheidegrad von 99,995 % besitzen. Die so gefilterte Luft soll nach Aussage des Herstellers die Virenlast in der Luft senken und so das Infektionsrisiko minimieren. Die Geräte verfügen über eine integrierte  $CO_2$ -Ampel, d.h. das Gerät signalisiert den Zeitpunkt einer notwendigen Lüftung durch die Farben Rot, Gelb und Grün. Die Signalisierung und Messung der  $CO_2$ -Konzentration wurde zusätzlich über einen externen  $CO_2$ -Datenlogger vorgenommen. Die Messreihe ist analog zu den anderen Messungen aufgebaut und dient der Vergleichbarkeit der Messungen.

#### *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung*

In der nachfolgenden Wirtschaftlichkeitsuntersuchung sollen die Varianten Provisorium nach Max-Planck Lüftung, Lüftungsgerät und Raumluftreiniger für die

eine Investition getätigt werden müsste, miteinander verglichen werden, wobei bei einer der Varianten zusätzlich eine Vergleichsrechnung Leasing/Kauf durchgeführt wird. Wie jede Investitionsrechnung fußt die Berechnung auf einigen Annahmen (Parametern), die vorab durch die technischen und kaufmännischen Verantwortlichen bei KIJ abgestimmt wurden.

#### *Fazit*

Das in Variante 1 betrachtete Provisorium nach Max-Planck Lüftung ist durch die hohen Investitionskosten, für Schulen von 15,2 Millionen € und für Kindertagesstätten von 18,2 Millionen €, nicht wirtschaftlich attraktiv. Fördermittel werden für diesen provisorischen Lüftungsaufbau nicht bereitgestellt.

Die Variante 2, die Installation von dezentralen Lüftungsanlagen mit einer hohen Fördermöglichkeit und einer Investitionssumme für Schulen von 11,7 Millionen € bzw. Kindertagesstätten von 6,1 Millionen €, ist gegenüber Varian-

te 1 deutlich attraktiver.

Der Raumlufthereiniger, Variante 3, ist die wirtschaftlichste Investition. Bei Schulen beläuft sich das Investitionsvolumen auf 9,8 Millionen €, bei den Kindertagesstätten auf 6,5 Millionen €. Eine Fördermöglichkeit ist für diese Geräte nicht bekannt.

#### *Schlussfolgerung:*

Aus wirtschaftlicher Sicht ist bei Schulgebäuden die Variante 3, Raumlufthereiniger, am wirtschaftlichsten. Bei Kindertagesstätten hingegen ist die Variante 2 am wirtschaftlichsten. Die Funktionalität durch die Wirkungsweise der Geräte wurde in dieser Auswertung nicht betrachtet.

#### *Aktueller Wissensstand zur Schullüftung*

Der aktuelle Wissensstand zur Schullüftung unter Corona-Bedingungen kann wie folgt zusammengefasst werden: Mit Corona infizierte Personen können Viren durch Husten, Niesen, Atmen und beim Sprechen absondern. So werden z.B. beim Husten nach Angaben der TU Berlin bis zu 287.700 Partikel freigesetzt. In Innenräumen mit Menschenansammlungen kann die Übertragung der Corona-Viren durch Tröpfcheninfektion, direkten oder indirekten Kontakt, insbesondere aber durch die Luftübertragung von Aerosolen, die aus kleinsten Tröpfchen und Partikeln bestehen, erfolgen. Aerosole als Träger der Viren können je nach Größe kleine, aber auch größere Distanzen überwinden. Für die Verteilung

und Ausbreitung der luftgetragenen Aerosole spielt die Raumluftströmung eine entscheidende Rolle.

Bei der üblicherweise vorhandenen Mischlüftung in Klassenräumen wird die Zuluft mit hohem Impuls in den Raum eingebracht. Durch Induktion erfolgt eine nahezu ideale Durchmischung mit der Raumluft, was zu einer Verdünnung der Schadstoffkonzentration und gleichmäßigen Verteilung von Temperatur und Schadstoffen im Raum führt. Im Ergebnis ist das Infektionsrisiko an jeder Stelle des Raumes gleich. Die Verringerung des Infektionsrisikos im gesamten Raum erfordert, neben der Anordnung der Schulbänke in möglichst größerem Abstand zueinander, hohe Außenluftvolumenströme, da dadurch die Aufenthaltsdauer virenbelasteter Luft im Raum reduziert wird.

Der BTGA hält einen Außenluftstrom von 50 m<sup>3</sup>/h Person für einen in Corona-Zeiten ausreichenden Frischluftvolumenstrom, der einer Klimaqualität der Kategorie 1 nach DIN EN 16798-1 entspricht. Nach VDI 6040 beträgt hingegen die erforderliche Frischluftfrate 32 m<sup>3</sup>/h Person für einen typischen Schultag mit Pausen und 26 Schülern mit Abwesenheit in den Pausen. 38 Andere Quellen halten eine auf das Klassenraumvolumen bezogene Luftwechselrate von 2 - 3 1/h für ausreichend. Welche Außenluftmenge kontinuierlich oder in Abständen zuzuführen ist, hängt von der Art und Effizienz des gewählten Lüftungsverfahrens ab.

Gradmesser für die Wirksamkeit der Lüftung ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft, der nach Möglichkeit 800 ppm nicht überschreiten sollte und mit Hilfe sog. CO<sub>2</sub>-Ampeln auf einfache Weise sichtbar gemacht werden kann. Niedrige CO<sub>2</sub>-Werte als Maßstab für eine gute Raumdurchlüftung führen auch zu einer nachhaltigen Verbesserung der Aerosolkonzentration und damit zur Verringerung der Mensch-zu-Mensch-Übertragung in Innenräumen. CO<sub>2</sub> ist also eine korrelierende Größe zur Aerosolemission.

Corona-Viren kommen gehäuft in den Wintermonaten vor, in denen durch die geringe Raumluftfeuchtigkeit die Übertragungsraten steigen und die Abwehrreaktion der Atemwege abnimmt. Raumluftfeuchten von 40 - 60 % wären zur Verringerung der Anfälligkeit der Kinder wünschenswert. Auf die Lebensfähigkeit der Viren hat die Befeuchtung indessen keinen Einfluss. Untersuchungen ergaben auch, dass Corona-Viren bis zu 3 Stunden in der Luft und 2 - 3 Tage auf Raumbooberflächen bei üblichen Raumbedingungen aktiv bleiben können. Durch die Lüftung des Klassenraumes kann nur die Aerosolübertragung, nicht aber die Ausbreitung durch direkten oder indirekten Kontakt beeinflusst werden. Aufgabe der Lüftung ist hierbei ein möglichst effizienter Austausch von belasteter gegen virenfreie Luft bzw. die Abscheidung oder Inaktivierung.

Sieht man von der theoretisch möglichen, jedoch risikobehafteten Vireninaktivierung durch UV-C-Bestrahlung ab, verbleiben als

grundlegende lüftungstechnische Verfahren

- der Austausch der Raumluft gegen praktisch virenfreie Außenluft durch freie oder erzwungene Strömung sowie
- die Luftreinigung mittels hochwirksamer Filter.

Beide Verfahren werden zur Eindämmung der Corona-Infektionsgefahr in Schulen und Kindergärten seit einiger Zeit einzeln oder auch kombiniert mehr oder weniger erfolgversprechend angewendet. Es gilt als nachgewiesen, dass richtig dimensionierte und betriebene Lüftungsanlagen mit ausreichenden Frischluftstraten den beschriebenen Luftaustausch in den Klassenräumen am wirkungsvollsten sicherstellen und damit die Infektionsgefahr am besten reduzieren können.

Der Vorteil dieser Anlagen besteht in ihrer üblicherweise an den CO<sub>2</sub>-Gehalt und die Partikelkonzentration anpassbare Luftleistung. Ihr Nachteil sind die hohen Anschaffungskosten. Deshalb sind nur ca. 10 % der Schulen und Kindergärten in Deutschland mit derartig hochwertigen Anlagen ausgestattet. Durch das Umweltbundesamt und andere wird die natürliche oder freie Lüftung der Schul- und Kindergartenräume über die Fenster präferiert, die im Winterhalbjahr naturgemäß nur als zeitlich befristete Pausenlüftung Anwendung findet. Die allgemeingültigen Vorgaben für die Kindereinrichtungen beinhalten das Stoßlüften aller 20 Minuten mit weit geöffneten Fenstern über

eine Dauer von 3 - 5 Minuten im Winter sowie eine Pausenlüftung nach jeder Unterrichtsstunde von 45 Minuten; nach Möglichkeit in Abwesenheit der Rauminsassen. In Anlehnung an die Arbeitsstätten-Richtlinien werden bei einseitiger Lüftung offene Fensterflächen von 0,35 m<sup>2</sup>/Person für kontinuierliche Lüftung und 1,05 m<sup>2</sup>/10 m<sup>2</sup> Grundfläche bei Stoßlüftung empfohlen. Beim Vergleich der freien (natürlichen) mit maschinellen Lüftungssystemen schneiden letztere naturgemäß deutlich besser ab.

Untersuchungen der RWTH Aachen zufolge ergibt die Stoßlüftung als freies Lüftungssystem ein 2,5-fach erhöhtes Infektionsrisiko gegenüber einer typisch maschinellen Lüftung eines Referenzklassenraumes. Das Infektionsrisiko bei natürlicher Querlüftung liegt nach der gleichen Quelle zwischen dem für Stoßlüftung und maschinelle Lüftung.

Die Wirksamkeit der freien Lüftung (Stoßlüftung oder kontinuierliche Lüftung) hängt von den gerade herrschenden äußeren klimatischen Bedingungen (Wind, Temperatur, Feuchtigkeit, Luftbelastung usw.) ab. Daher kann mit ihr keine gleichmäßige Versorgung zuverlässig zu jeder Tageszeit garantiert werden, wie dies bei einer mechanischen Lüftungsanlage möglich wäre. Darüber hinaus funktioniert die natürliche Lüftung nur bei Vorhandensein einer ausreichend großen Druckdifferenz. Auch muss bei Veränderungen im Klassenraum wie Raumteiler, Änderung der Bestuhlung u.ä. ihr Einfluss auf die

Raumlüftung geprüft werden.

Für die Dimensionierung einer freien Lüftung sollten die Wärmelast, der Temperaturanstieg über die Raumhöhe als Produkt aus wirksamer Raumhöhe und Temperaturgradienten sowie die Außentemperatur bekannt sein. Damit kann die thermische Auftriebsgeschwindigkeit und mit ihr die wirksame Abluftfläche ermittelt werden. Zuluftöffnungen sind möglichst tief, Abluftflächen möglichst hoch anzuordnen. Die Luftgeschwindigkeit in den Zuluftöffnungen sollte unter 0,5 bis 1,0 m/s, bei fensternahen Sitzplätzen noch deutlich darunter liegen, um Zugerscheinungen zu mindern. Die Orientierungswerte der ASR A 3.6-Lüftung – für eine vereinfachte Dimensionierung einer natürlichen Lüftung mit Zu- und Abluftflächen von 2 % der Raumgrundfläche und einem Luftdurchsatz von ca. 10 m<sup>3</sup>/h je m<sup>2</sup> Grundfläche liegen offenbar unter den o.a. Anforderungen an eine Raumlüftung zur wirksamen Senkung der Infektionsgefahr in Klassenräumen.

Weitere Anforderungen an freie und auch hybride Lüftungssysteme sind:

- Möglichkeit zur Verringerung der Lüftungsquerschnitte (Öffnen, Schließen des Zu- / Abluftstromes),
- Zeitsteuerung zur bedarfsweisen Anpassung der Be- und Entlüftung über die normale Nutzungszeit hinaus,
- separate Luftzufuhr für Raum-

bereiche mit großen Entfernungen zu Außenwänden,

- Zuluftöffnungen dort anordnen, wo unbelastete Außenluft vorhanden ist.

Wird die Abluft mit Ventilatoren abgesaugt, ist im Besonderen zu berücksichtigen, dass die sog. Erfassungsgeschwindigkeit mit dem Abstand vom Abluftelement (Gitter, Schlitze, Hauben usw.) exponentiell abnimmt. Andererseits wird die Absaugwirkung der Abluftelemente, soweit sie an der Decke oder im oberen Wandbereich angeordnet sind, durch thermischen Auftrieb unterstützt.

Dieser ist vom Temperaturgradienten über die Raumhöhe und somit vom Wärmeaufkommen in der Aufenthaltszone abhängig. Der Temperaturgradient beträgt beim sog. „Kaltbetrieb“, auch gültig für Klassenräume, lediglich 0,5-1,0 K. Bei der Erfassung der Abluft mittels Ablufthauben wird der aufsteigende Luftstrom durch Querströmungen gestört, wenn die Zuluft nicht impulsarm in Bodennähe zugeführt wird. Kommt bei kombinierten Zu- und Abluftanlagen eine Wärmerückgewinnung (WRG) mittels sog. Enthalpie- Wärmetauscher in der Abluft zum Einsatz, muss beachtet werden, dass bei diesen Komponenten bauartbedingt Leckagen auftreten können. Zur Vermeidung einer Virenverschleppung in benachbarte Räume und aus Brandschutzgründen ist bei der hier vorliegenden Nutzungsart besonderer Wert auf eine ausgeglichene Luftbilanz zwischen Zu- und Abluftvolumenströmen

zu legen. Geschlossene Schulkraumtüren sollten, soweit nicht ohnehin rauchdicht, in beiderlei Richtung möglichst keine Leckagen zum Druckausgleich besitzen. Schließlich wird vielfach der Einsatz von Raumlufthereinigern für die Verminderung der Virenkonzentration empfohlen. Sie können effizient Partikel aus der Luft entfernen, vorausgesetzt sie sind mit hochwirksamen HEPA-Filtern ausgestattet.

Ihre Wirksamkeit ist insofern begrenzt, als sie

- wegen der üblicherweise nicht sehr hohen Luftleistung nur eine begrenzte Grundfläche des Klassenraumes effektiv bedienen können (nur zonale Beeinflussung der Virenkonzentration);
- Luftfeuchte und CO<sub>2</sub> durch den reinen Umluftbetrieb nicht reduzieren können,
- die häufig von den Herstellern gepriesenen Vorzüge wie gute Raumdurchspülung, seriöse technische Daten, nachgewiesene Wirkung usw. sich im Praxisbetrieb nicht oder nicht im zugesicherten Umfang einstellen oder nachgewiesen werden können;
- teuer in der Anschaffung sind.

Daher sollten sie ggf. nur als Ergänzung zur Lüftung mit Austausch der Raumluft gegen Außenluft eingesetzt werden, wobei dann eine exakte Anpassung an die Einsatzbedingungen notwendig ist.

### *Schlussfolgerungen*

1. Die vielfach vertretene Auffassung, wonach CO<sub>2</sub> eine korrelierende Größe zur Aerosolemission ist, konnte in den Versuchen nicht eindeutig nachgewiesen werden.
2. Wiederholt war eine Senkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration bei Fensterlüftung mit einer Zunahme der Partikel in der Raumluft verbunden (störender Einfluss des Partikeleintrages von außen).
3. Die Partikelzunahme nach der Stoßlüftung muss insofern nicht mit einer Erhöhung der Virenanzahl bzw. des Infektionsrisikos verbunden sein, da Außenluft als praktisch virenfrei gilt.
4. Die vom Max-Planck-Institut für seine Abluftanlage propagierte 90%ige Entfernung der Aerosole konnte in den Versuchen nicht nachgewiesen werden.
5. Versuche in der Südschule und Kindervilla ergaben über den Messzeitraum eine nur leicht sinkende Aerosolkonzentration.
6. Mit dem Luftwäscher war in allen Fällen eine deutliche Senkung der Aerosolkonzentration mit Hilfe des Partikelmessgerätes feststellbar, wobei die gemessene Partikelkonzentration keinen sicheren Aufschluss über die Virenbelastung der Raumluft liefert

### *Mehr Informationen*

[https://rathaus.jena.de/sites/default/files/2021-02/21\\_0772\\_BE\\_Pruefbericht\\_Lueftungsanlagen.pdf](https://rathaus.jena.de/sites/default/files/2021-02/21_0772_BE_Pruefbericht_Lueftungsanlagen.pdf)