



Zusammenfassung der Ergebnisse des Pilotprojekts „Experimentelle Untersuchung zum Infektionsrisiko in Klassenräumen in Stuttgarter Schulen“

Auftraggeber: Schulverwaltungsamt der Landeshauptstadt Stuttgart

Auftragnehmer: Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung, Universität Stuttgart

Ziel des Pilotprojekts

Aufgrund der anhaltenden SARS-CoV-2-Pandemie wurden von Januar bis Juni 2021 jeweils ein oder zwei Klassenräume in zehn exemplarisch ausgewählten Schulen der Landeshauptstadt Stuttgart hinsichtlich des Infektionsrisikos vermessen. Hintergrund ist die als überwiegend luftgetragen eingestufte Infektionsausbreitung über von infizierten Personen respiratorisch abgegebenen Aerosolpartikel, an denen ein Virus anhaftet. Ziel hierbei ist die Identifikation der Infektionswahrscheinlichkeiten in Klassenräumen bei verschiedenen Lüftungstechnischen Maßnahmen. Neben der Fensterlüftung sollen die Wirkweisen von Luftreinigungsgeräten und raumlufttechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) analysiert werden. Dabei werden sowohl die Abfuhr der Aerosole als auch der Aspekt der Behaglichkeit dieser Maßnahmen beleuchtet. Hierzu werden u.a. luftgetragene Stoffkonzentrationen, die Raumlufttemperatur, die Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzgrade sowie der Schalldruckpegel in den Klassenräumen gemessen und bewertet. Basierend auf den erlangten Erkenntnissen soll am Ende ein Leitfaden entwickelt werden, welcher es erlaubt, Klassenräume hinsichtlich der Infektionswahrscheinlichkeit zu bewerten und geeignete Maßnahmen abhängig von der jeweiligen Raumsituation zu identifizieren. Mit einer Umfrage soll zudem das Empfinden der SchülerInnen und LehrerInnen bezüglich verschiedener Maßnahmen erfasst werden.

Vorgehen

In den untersuchten Klassenräumen wird die luftgetragene Ausbreitung ausgeatmeter Aerosole anhand der stichprobenartigen Freisetzung von Spurengas und Testpartikeln an thermischen Personendummies nachgestellt. Diese Dummies bilden die Wärmeabgabe der SchülerInnen und LehrerInnen nach, wodurch die Auftriebsströmungen an Menschen und deren Einfluss auf die Raumluftströmung berücksichtigt werden. Die Messung der zeitlichen Verläufe der Konzentrationen der oben genannten Stoffe ermöglicht eine Abschätzung der Infektionswahrscheinlichkeiten an den Sitzplätzen der SchülerInnen. Anhand der Betrachtung dieser Messstellen kann so die jeweilige Maßnahme bewertet werden. Neben der Abschätzung des Infektionsrisikos wird gemessen, ob die Maßnahmen die Behaglichkeitskriterien (Lufttemperatur, Zugluftisiko und Schalldruckpegel) erfüllen. Aufgrund fehlender belastbarer Daten zu Infektionsausbrüchen bei Virus-Mutationen, werden bei der Bewertung des Infektionsrisikos die Daten zur Basisvariante des Virus herangezogen.

Dazu werden verschiedene Strategien der Fensterlüftung wie abwechselnd 20 Minuten geschlossene Fenster dann 5 Minuten Stoßlüftung (20/5/20), analog dazu die Stoßlüftungs-Strategie 10/2,5/10 sowie eine Dauerkipplüftung betrachtet. Der Fensterlüftung werden die Wirkweisen von Luftreinigungsgeräten bzw. in zwei Klassenräumen von RLT-Anlagen gegenübergestellt.

Da während der Studie keine belastbaren Wirksamkeitsnachweise zur Inaktivierung von SARS-CoV-2-Viren durch UV-C-Technologie verfügbar sind und ferner unklar ist, ob dabei schädliche Sekundärprodukte entstehen, wird im Pilotprojekt nur die Wirksamkeit von Hochleistungsschwebstofffiltern in Luftreinigungsgeräten untersucht.

Ergebnisse

Zur Bestimmung des Infektionsrisikos ist die sogenannte Menge an Quanta, die eine Person über einen bestimmten Zeitraum inhaliert, ausschlaggebend. Ein Quantum beschreibt hierbei die Menge an Viren, die mit einer Wahrscheinlichkeit von 63% zu einer Infektion führen. Bei einer angenommenen Basisreproduktionszahl (R-Wert) von 3,35 resultiert eine Quanta-Emissionsrate von 139 1/h. Dieser Wert entspricht einer Bewertung der Infektiosität der Basis-Variante des SARS-CoV-2-Virus. Das Infektionsrisiko wird PIRA (Predicted infection risk via aerosols) bezeichnet. PIRA steigt in Abhängigkeit der inhalierten Quanta an.

a) Infektionswahrscheinlichkeiten

Um die verschiedenen Maßnahmen zur Verringerung der Infektionswahrscheinlichkeit vergleichen zu können, werden alle Ergebnisse jeder Maßnahme (V0-V6) zusammengefasst und in einem vereinfachten Boxplot-Diagramm (siehe Bild 1) dargestellt. Für jeden Klassenraum werden hierzu die Infektionswahrscheinlichkeiten der einzelnen Messstellen gemittelt. Das Diagramm zeigt für jede Maßnahme die durchschnittliche sowie die minimale und maximale Infektionswahrscheinlichkeit der je Klassenraum gemittelten Werte (Betrachtungszeitraum: 90 Minuten). Außerdem werden der Einfluss des Tragens einer FFP2-Maske sowie der Betrieb von Luftreinigungsgeräten und RLT-Anlagen bei verschiedenen Stufen bzw. Volumenströmen berücksichtigt.

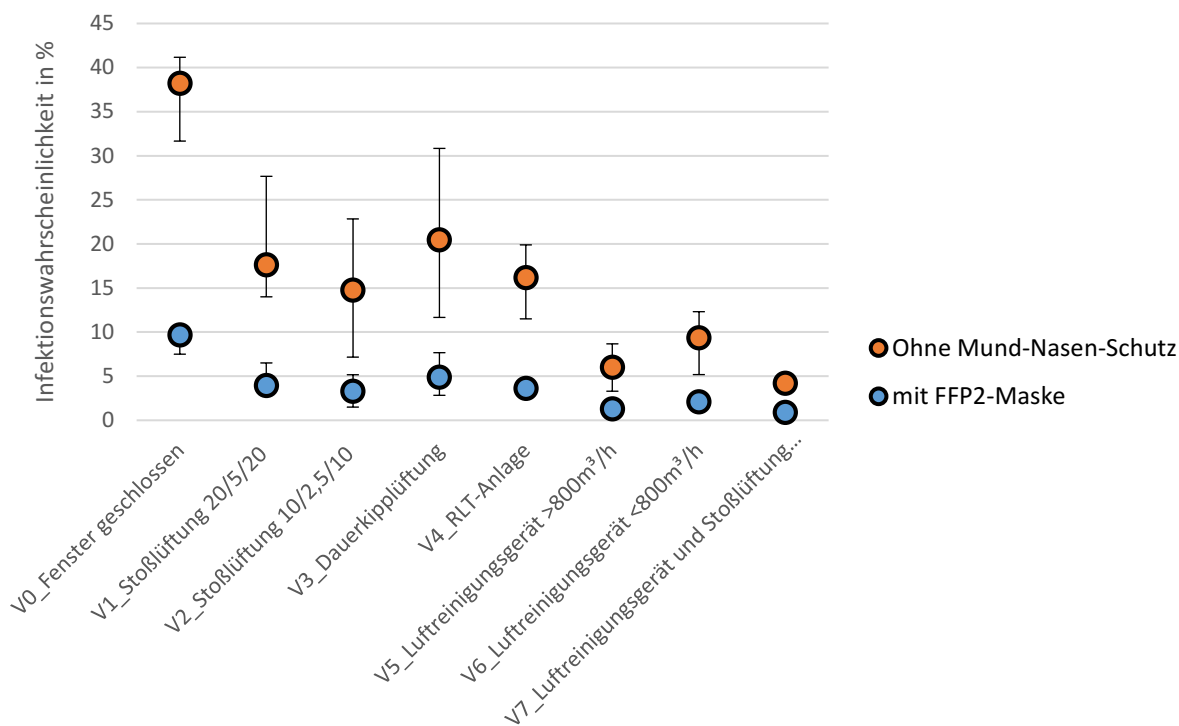


Bild 1: Infektionswahrscheinlichkeit bei verschiedenen Maßnahmen mit und ohne FFP2-Maske (V0-V6)

- Grundsätzlich zeigt sich, dass jede Maßnahme prinzipiell die Infektionswahrscheinlichkeit gegenüber der Referenz („Fenster geschlossen“) senkt.
- Bei der Fensterlüftung ist die Strategie 10/2,5/10 bzgl. des Infektionsschutzes geringfügig wirksamer als 20/5/20 oder dauerhaft gekippte Fenster.
- Luftreinigungsgeräte schneiden im Pilotprojekt im Hinblick auf den Infektionsschutz zwar besser ab, verfügen im Mittel aber auch über wesentlich höhere Volumenströme als die untersuchten RLT-Anlagen.
- Das Tragen einer FFP 2-Maske trägt **wesentlich** zur **Verringerung der Infektionswahrscheinlichkeit** bei, da Aerosole sowohl beim Ausatmen infizierter Personen als auch beim Einatmen gesunder Personen gefiltert und dabei Viren abgeschieden werden.
- Bei der Stoßlüftungsstrategie 20/5/20 und parallelem Betrieb der Luftreinigungsgeräte zeigt sich anhand zweier Schulen, dass eine zusätzliche Reduzierung des Infektionsrisikos erreicht wird.

Sowohl bei Fensterlüftung als auch bei maschineller Lüftung gilt, dass der Volumenstrom der Lüftungsmaßnahme mit der Infektionswahrscheinlichkeit korreliert. Der genaue Zusammenhang für die Fensterlüftung wird in Bild 2 verdeutlicht. Es ist zu erkennen, dass die Messwerte der Stoßlüftungen 20/5/20 und 10/2,5/10 nahe am theoretischen Verlauf liegen. Die Volumenströme stellen die bei geöffneten Fenstern auftretenden Volumenströme dar. Je höher der Volumenstrom bzw. Außenluftwechsel, desto geringer fällt die Infektionswahrscheinlichkeit aus.

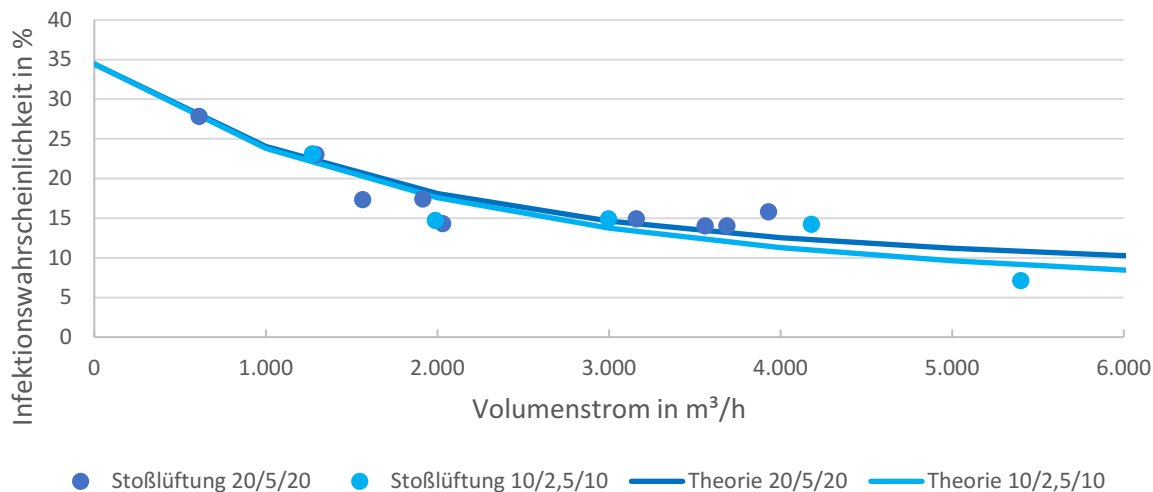


Bild 2: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Volumenstroms bei Stoßlüftung, **ohne** FFP2-Maske

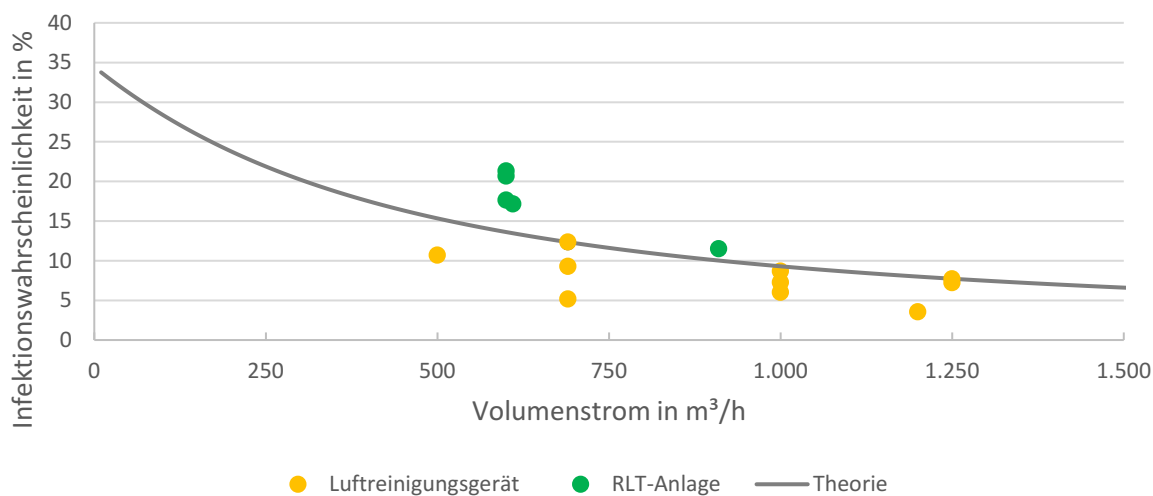


Bild 3: Infektionswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des maschinell geförderten Volumenstroms bei RLT-Anlagen und Luftreinigungsgeräten, **ohne** FFP2-Maske

Auch bei Maßnahmen maschinell geförderter Luft (Luftreinigungsgerät und RLT-Anlage) ist zu beobachten, dass mit steigendem Volumenstrom das Infektionsrisiko sinkt (siehe Bild 3). Die aus der Messung resultierenden Infektionswahrscheinlichkeiten der RLT-Anlagen liegen im Gegensatz zu den Werten der Luftreinigungsgeräte oberhalb der theoretisch ermittelten. Dadurch wird nicht das gesamte Potential des Infektionsschutzes durch die im Projekt untersuchten RLT-Anlage ausgeschöpft. Eine mögliche Ursache könnte in einem zusätzlichen Fort-/Außenluftübertrag aufgrund der Einbausituation (geringer Abstand zwischen Fort- und Außenluft) der gemessenen RLT-Anlagen liegen.

b) Behaglichkeit (Raumtemperaturen)

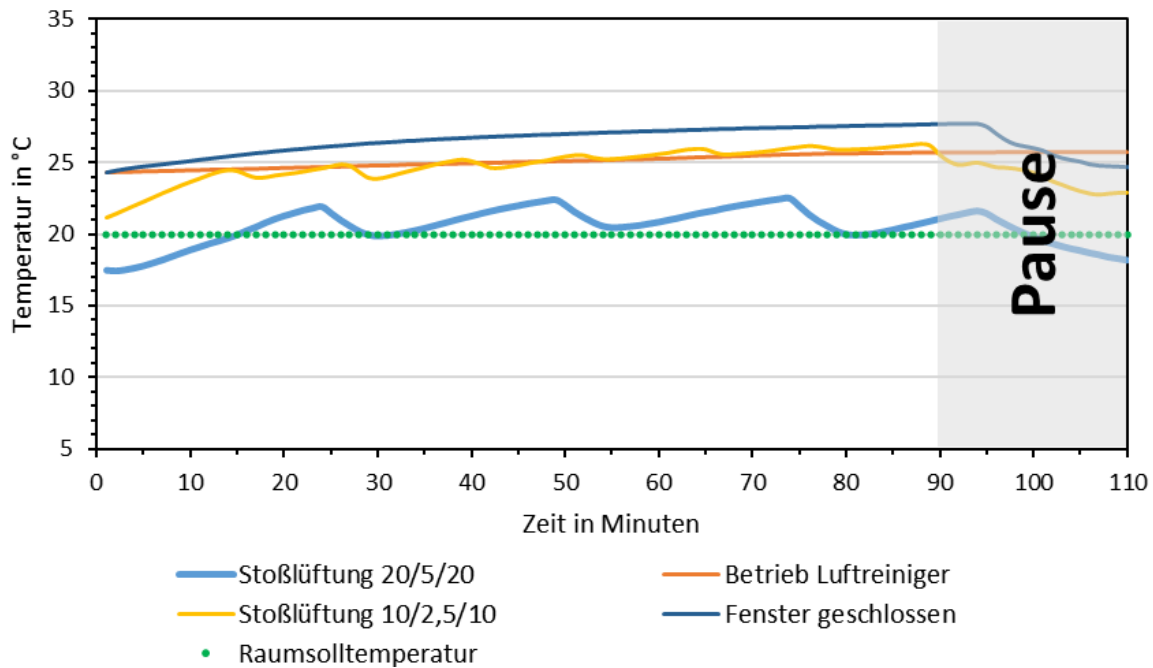


Bild 4: Örtlich gemittelter Raumlufttemperaturverlauf über eine Doppelstunde in der Steigschule Bau 1

Die Raumsolltemperaturen können bei den verschiedenen Fensterlüftungsstrategien über den gesamten Betrachtungszeitraum überwiegend eingehalten werden. Die Wärmefreisetzung der Personendummies bzw. der SchülerInnen in Kombination mit dem Regelverhalten der Heizkörper-Thermostatventile sorgt dabei für die Deckung der erhöhten Heizlast aufgrund der Lüftungswärmeverluste. Anhand der nachfolgenden exemplarischen zeitlichen Auftragung der gemittelten Raumlufttemperaturen des Klassenraums in der Steigschule bei einer Außentemperatur von ca. 8°C wird dies verdeutlicht (siehe Bild 4). Lediglich nach der längeren Lüftungspause zwischen den Doppelstunden liegt die gemittelte Raumlufttemperatur zu Beginn der darauffolgenden Stunde für einige Minuten unterhalb des Sollwertes von 20°C.

c) Behaglichkeit (Zugluftrisiko)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Luftreinigungsgeräte sowohl bei **hohen als auch bei geringeren Volumenströmen Zugluftrisikoen** an den jeweiligen Messpositionen hervorrufen. Es liegt nahe, dass diese Betriebsweise im normalen Unterricht von SchülerInnen und LehrerInnen nicht akzeptiert wird. Die Messungen bei Betrieb der RLT-Anlagen weisen ein ähnliches Zugluftrisiko auf wie bei den Luftreinigungsgeräten. Dies ist jedoch wesentlich darauf zurückzuführen, dass der Zuluftquerschnitt der RLT-Anlagen in diesen Räumen sehr klein ist. Bei der zukünftigen Planung von RLT-Anlagen sollte darauf geachtet werden, dass der durchströmte Querschnitt der Zuluftdurchlässe groß genug ist, um die Luftgeschwindigkeiten im Aufenthaltsbereich auf Werte unter 0,2 m/s zu begrenzen.

d) Behaglichkeit (Schalldruckpegel)

Die untersuchten Luftreinigungsgeräte führen bei hohen Luftvolumenströmen (siehe Bild 5: gelbe Balken) zu wesentlich **zu hohen Schalldruckpegeln im Raum**. Vereinzelt können die Geräte in der Wilhelmschule, Steigschule und Steinbeisschule zumindest bei geringem Volumenstrom (blaue Balken), die akzeptable Grenze von 35 dB(A) (rote Linie) unterschreiten. Bei diesen reduzierten Volumenströmen steigt allerdings das Infektionsrisiko an. Die RLT-Geräte (im Solitude-Gymnasium und in der Filderschule) sind deutlich „leiser“ und liegen nahe des genannten Grenzwertes (nach VDI 2081-1). Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Schalldruckpegelmessung in allen Schulen.

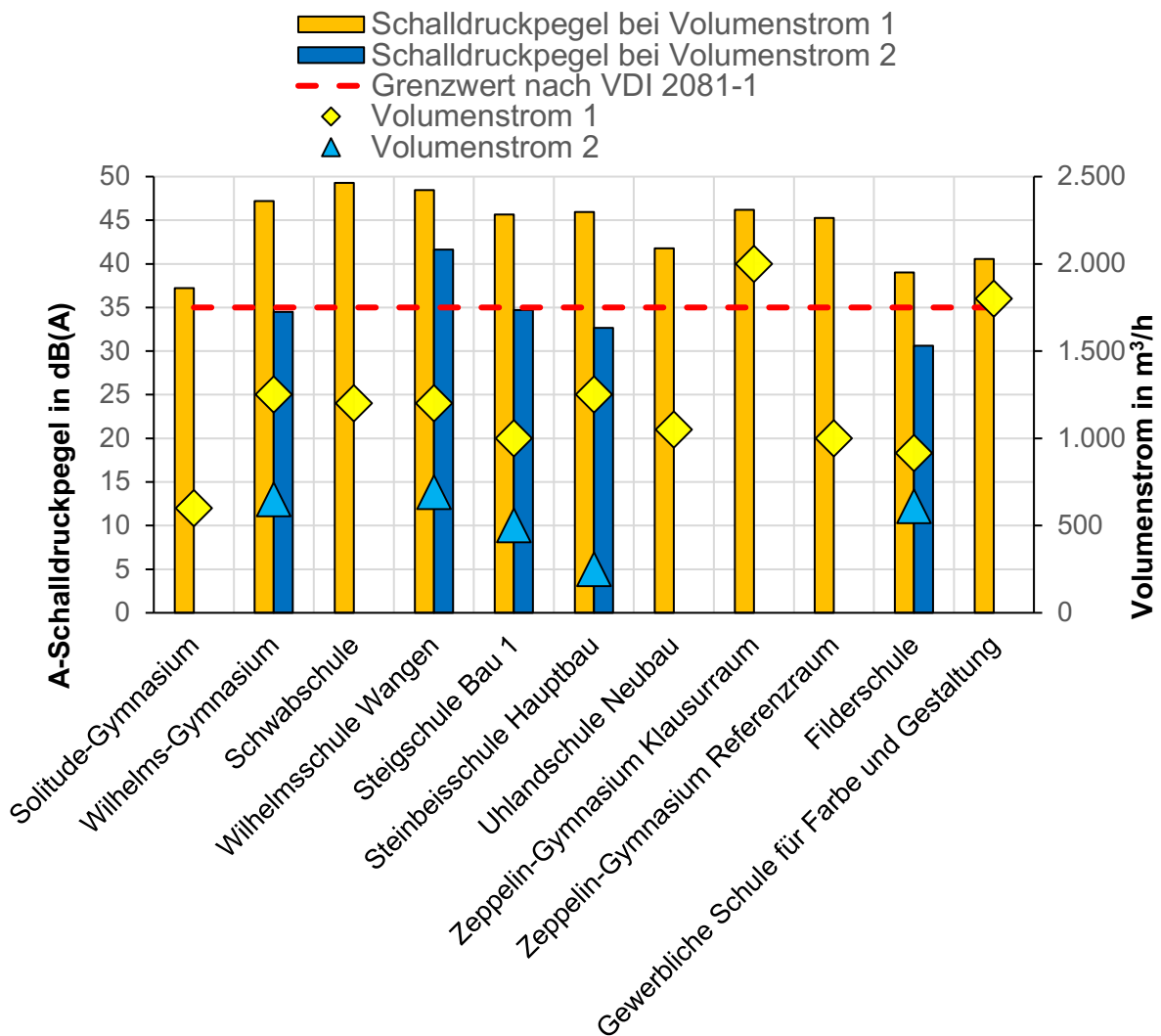


Bild 5: Schalldruckpegel in den Klassenräumen aufgrund der Schallemission der Luftreinigungsgeräte und RLT-Anlagen.

e) Zusammenfassung relevanter Erkenntnisse

- Die Ergebnisse zeigen, dass die Aerosolkonzentration und letztlich die Infektionswahrscheinlichkeit mit der Höhe des Luftstroms, der entweder als Außenluft in den Raum über Fenster oder RLT-Anlagen geführt wird oder über ein Luftreinigungsgerät als Umluft im Raum gefiltert wird, korreliert.
- Eine **Reduzierung der Personenanzahl** in einem Klassenraum ermöglicht selbst bei gleichbleibender mittlerer Infektionswahrscheinlichkeit einen proportionalen **verringerten Erwartungswert an Neuinfektionen**. Der **Einsatz von FFP2-Masken** im Unterricht **reduziert deutlich das Infektionsrisiko** und ist eine sehr wirksame Maßnahme zum präventiven Schutz.
- **Das Lüften in den Pausen ist zwingend erforderlich**, um die Aerosolkonzentration für den darauffolgenden Unterricht weitestgehend gegen null zu senken.
- Das Stoßlüften hat einen großen Einfluss auf die Infektionswahrscheinlichkeit. Hierbei ist die **Stoßlüftungsstrategie 10/2,5/10 am wirksamsten**, auch wenn die Abweichungen gegenüber 20/5/20 nur geringfügig sind. Die Dauerkipplüftung trägt zwar zur Verringerung der Wahrscheinlichkeit einer Infektion bei, jedoch im geringeren Maße als die Stoßlüftungsvarianten und ist daher (sowie aus energetischer Sicht) nicht empfehlenswert. Die Raumsolltemperatur kann bei verschiedenen Fensterlüftungsstrategien über den gesamten Betrachtungszeitraum überwiegend eingehalten werden.
- In Klassenräumen mit unzureichender Gesamtöffnungsfläche der Fenster ist entweder eine Vergrößerung dieser (Reaktivierung von Fenstern) erforderlich oder eine raumluftechnische Maßnahme (Lüftungsanlage oder mobiles Luftreinigungsgerät) in Betracht zu ziehen.

- Beim Einsatz von Luftreinigungsgeräten sollte generell beachtet werden, dass diese **keine Alternative zu einem Außenluftwechsel** darstellen, sondern **lediglich als Unterstützung** zur Partikel- und potentiellen Virenreduktion im Raum eingesetzt werden sollten.
- In der Studie erzielten die Luftreinigungsgeräte beim Betrieb mit den **höchsten Volumenströmen** die niedrigsten Aerosolkonzentrationen. Wie bereits erläutert, sind dabei die Luftreinigungsgeräte jedoch **zu laut** und die Luftgeschwindigkeiten der Raumluftrömung sind zu hoch und werden somit aller Voraussicht nach nicht langfristig von den NutzerInnen akzeptiert werden.
- Die Infektionswahrscheinlichkeit in den Klassenräumen mit RLT-Anlagen ist aufgrund der gegenüber den eingesetzten Luftreinigungsgeräten geringeren Luftvolumenströme etwas höher. Für die zukünftige Planung von **RLT-Anlagen sollten die Luftströme höher dimensioniert** werden, um die Kategorie höchster Raumlufthqualität (nach DIN EN 16798-1: Kategorie 1) in Klassenräumen zu erreichen.
- Die Behaglichkeitsmessungen beim Betrieb der RLT-Anlagen weisen ein ähnliches Zugluftrisiko auf wie die Luftreinigungsgeräte. Dies ist jedoch wesentlich darauf zurückzuführen, dass der durchströmte **Querschnitt der Zuluftdurchlässe** in den untersuchten Räumen **sehr klein gewählt** ist. Hier könnte eine **nachträgliche Querschnittsvergrößerung** Abhilfe schaffen.
- Mithilfe eines Leitfadens können erforderliche und sinnvolle Maßnahmen individueller Klassenräume zum Infektionsschutz identifiziert werden.

f) Leitfaden

Um die Infektionswahrscheinlichkeit durch das Stoßlüften weiter zu senken, sollte eine **Vergrößerung der maximal möglichen Fensteröffnungsfläche** angestrebt werden. Bei schlecht belüftbaren Räumen bieten sich **Luftreinigungsgeräte** als **kurzfristige unterstützende Maßnahme** an. Die Geräte sind aber nicht in der Lage, CO₂ und Feuchte aus dem Raum abzuführen, weswegen sie keine Lüftung ersetzen können. Als **mittelfristiges Ideal** werden **RLT-Anlagen** aufgrund der Sicherstellung der Raumlufthqualität (auch hinsichtlich der CO₂- und Feuchte-Belastung) sowie der Reduzierung der Lüftungswärmeverluste (aufgrund der Wärmerückgewinnung) gesehen.

Neben dieser mittel- bis langfristigen Empfehlung werden Klassenräume kurzfristig hinsichtlich des jeweiligen Infektionsrisikos bewertet und individuell geeignete Maßnahmen abgeleitet.

Auf Grundlage der relevanten physikalischen Gleichungen der Stoffbilanzierung kann ermittelt werden, welche Fensteröffnungsfläche für ein spezifisches Infektionsrisiko erforderlich wäre und mit dem Ist-Zustand und der potentiell zur Verfügung stehenden Flächen (bspw. durch demontierte Fenstergriffe) abzugleichen. Bei ungenügender Fensteröffnungsfläche ist daraufhin der erforderliche Volumenstrom eines Luftreinigungsgeräts zu berechnen.

g) Empfehlung

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Pilotprojekt ist der flächendeckende Einsatz von Luftreinigungsgeräten nicht indiziert. Bei ungenügender Fensteröffnungsfläche in einzelnen Klassenräumen sollte der Einbau von Luftreinigungsgeräten oder RLT-Anlagen geplant werden. Der Einsatz von Luftreinigungsgeräten kann nicht andere Maßnahmen (AHA+L, Maske, Testen, Impfen) zur Eindämmung der Infektionsausbreitung ersetzen oder gar negieren. Die resultierende Infektionswahrscheinlichkeit beim Tragen einer FFP2-Maske bewegt sich unabhängig von den untersuchten Lüftungskonzepten (Luftreinigungsgerät, Fensterstoßlüftung und RLT-Anlage) im selben Größenbereich. Es wird vielmehr empfohlen, den Eintritt des Falls, dass sich eine infektiöse Person im Klassenraum befindet, auf ein rechnerisches Mindestmaß zu reduzieren. Dies wird durch bereits praktizierte und etablierte, organisatorische Maßnahmen wie regelmäßige Tests sowie ggf. bei hohen Inzidenzen die Belegung der Klassenräume zu halbieren, erreicht. Als mittelfristiges Ideal werden RLT-Anlagen aufgrund der Sicherstellung der Raumlufthqualität (auch hinsichtlich der CO₂- und Feuchte-Belastung) sowie der Reduzierung der Lüftungswärmeverluste (aufgrund der Wärmerückgewinnung) gesehen. Deren Einsatz wird auch durch die Bundesregierung gefördert.