

Vergleichende Bewertung zwischen mobilem Raumlufreiniger, RLT Anlage, freier Lüftung und Querlüftung

Christian J. Kähler, Rainer Hain
Universität der Bundeswehr München
Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik
Werner-Heisenberg-Weg 39, 85577 Neubiberg

1. Einleitung

Nach dem gegenwärtigen Stand der Forschung wird davon ausgegangen, dass die Übertragung von SARS-CoV-2 primär durch Aerosol- und Tröpfcheninfektion direkt (z.B. bei längeren Unterhaltungen über kurze Distanz) und indirekt (durch mit Viren belastete Aerosolpartikel in der Raumluf) geschieht. Das Risiko der direkten Infektion kann durch das Einhalten von Abständen zwischen Personen, das Tragen von Masken und Schutzwände reduziert werden. Mit Viren belastete Aerosolpartikel breiten sich hingegen im gesamten Raum aus und können auch über größere Entfernungen eingeatmet werden. Eine Reduzierung der eingeatmeten und evtl. mit Viren belasteten Aerosolpartikel kann durch a) eine partikelfiltrierende Atemschutzmaske (FFP2/3), b) eine Reduzierung der Virenkonzentration oder c) durch Verkürzung der Verweildauer in dem Raum realisiert werden.

Einfache Mund-Nasen-Bedeckungen und OP Masken weisen keine ausreichende Filterwirkung auf. Neben der mangelnden Filterwirkung dieser Bedeckungen und OP Masken ist ein wesentliches Problem der Spalt zwischen Maske und Gesicht, durch den die Aerosolpartikel ungefiltert eingeatmet werden.

Die Reduzierung der infektiösen Virenkonzentration in der Raumluf kann über verschiedene Mechanismen geschehen. So z.B. über die Inaktivierung der Viren mittels UV-Strahlung, elektrische Ladungen, chemische Prozesse oder das Abscheiden der Viren/Partikel durch Filter. Ebenso wird eine Reduzierung erwirkt, indem unbelastete Luft in einen Raum eingebracht und die belastete Raumluf herausgebracht wird. Dies kann über die Lüftung durch Fenster oder eine raumluftechnische Anlage (Lüftungsanlage, RLT Anlage) erfolgen, wenn diese vorhanden und ausreichend leistungsstark ist. Schließlich lässt sich die stationäre Virenkonzentration mit mobilen Raumlufreinigern mit geeigneten Filtern, z.B. der Klasse H13 oder H14 gemäß EN 1822, wirksam vermindern.

Im Rahmen dieser Studie soll experimentell analysiert werden, ob sich die Kontamination der Raumluf mit Aerosolpartikeln in einem Hörsaal der Universität der Bundeswehr München mit

einem Viomed Virosafe 2000/F800 Raumlufreiniger effizient vermindern lässt. Das Gerät verfügt laut Herstellerangaben über einen Filter der Klasse H14 und eine UV-C Entkeimungseinheit, die für die Inaktivierung der Viren im Filter sorgt. Das Gerät erreicht im Umluftbetrieb einen Volumenstrom von über 2.000 m³/h. Darüber hinaus zeichnet sich das Gerät dadurch aus, dass es in der Lage ist Außenluft durch einen Bypass anzusaugen und dem Raum zuzuführen. Auf diese Weise kann einem Anstieg der CO₂ Konzentration im Raum entgegengewirkt werden, ohne dass dazu die Fenster händisch geöffnet werden müssen. Ferner wird die eingebrachte Außenluft gefiltert, so dass weder Feinstaub noch Pollen in den Raum gelangen. Mit einem Ergänzungsmodul, das oben auf der Anlage einfach installiert werden kann, ist es laut Herstellerangaben möglich im kombinierten Umluft-/Außenluftbetrieb Volumenströme bis zu 3300 m³/h zu realisieren. Damit kann dieses Gerät als ein sehr leistungsstarker mobiler Raumlufreiniger mit H14 Filtertechnologie angesehen werden.

Zum Vergleich wurden Messungen mit einer modernen raumluftechnischen Anlage durchgeführt. Ferner wurde auch die Effizienz der Stoß- und Querlüftung analysiert.

2. Raum, Messaufbau und Datenanalyse

Die Messungen wurden im Hörsaal 2431 in Geb. 033 der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Der Raum ist mit 98 Sitzplätze ausgestattet, die leicht aufsteigend installiert sind. Eine Panoramaansicht des Hörsaals ist in Abb. 1 dargestellt. Der Raum ist mit zwei kleinen Fenstern auf gegenüberliegenden Seiten ausgestattet, so dass sowohl eine einseitige Stoß- als auch beidseitige Querlüftung realisiert werden kann. Die beiden Fenster weisen eine Öffnung von jeweils 695^B mm x 1145^H mm auf. Die kleinen Fensteröffnungen sind typisch für moderne, hoch isolierte Gebäude. Fenster werden bei modernen Gebäuden primär zu Beleuchtungszwecken installiert und nicht zum manuellen Lüften, da die Fensterlüftung aus energetischer Sicht nachteilig ist. Ferner sorgt die Fensterlüftung häufig für starke Windbewegungen im Raum, die oberhalb der zulässigen Grenzwerte liegen und im Winter fällt die Temperatur durch die freie Lüftung unterhalb der vorgeschriebenen Werte von 20°C, siehe ASR A3.5 Raumtemperatur und ArbStättV. Zu beachten ist aber auch, dass das regelmäßige Lüften über Fenster den Vorlesungsbetrieb stört und daher nicht sinnvoll ist. Um diese Nachteile der freien Lüftung zu vermeiden werden moderne Gebäude mit RLT Anlagen ausgerüstet. Der Hörsaal ist mit einer fest installierten raumluftechnischen (RLT) Anlage ausgestattet. Die Außenluft wird über 12 verteilte Öffnungen in der Decke zu- und abgeführt. Aufgrund der Gefährlichkeit einer SARS-CoV-2 Infektion wird die RLT Anlage derzeit mit 100% Außenluft und einer Luftwechselrate von 6 betrieben. Die installierte Anlage ist aber auch in der Lage höhere Luftwechselraten zu realisieren. Leider sind in Deutschland bis heute nur sehr wenige Gebäude mit ausreichend leistungsstarken RLT Anlagen ausgestattet. Um dieser Problematik zu begegnen bieten sich mobile Raumlufreiniger an, da diese ohne bautechnische Modifikationen oder umfangreiche Beantragungs- und Genehmigungsverfahren nachträglich aufgestellt und betrieben werden können. Die Leistungsaufnahme der Geräte ist sehr gering und Wechsel der H14 Filter fallen nur alle paar Jahre beim Filtertausch an. Lediglich die Vorfilter müssen hin und wieder gereinigt oder ausgetauscht werden, wenn die Staubbelastung im Raum sehr groß ist. Ferner wurde bereits in mehreren Studien gezeigt, dass der Aufstellungsort der Geräte kaum einen Effekt auf die Filterleistung hat und die Luftbewegungen im Raum unterhalb der Grenzwerte sind. Da die Geräte in der Regel im Umluftbetrieb arbeiten ändert sich die Raumtemperatur nicht, so dass die Behaglichkeit nicht beeinträchtigt wird. Es ist aber zu bemerken, dass die Geräuschemission durch die mobilen Raumlufreiniger in der Regel größer ist als bei modernen RLT Anlagen. Die Geräuschemission lässt sich zwar technisch durch Nutzung mehrerer Geräte im Parallelbetrieb quasi beliebig reduzieren, aber das ist aus Platzgründen und Mittelbedarf oft

nicht realisierbar, so dass nur sehr leise Geräte für Hörsäle verwendet werden sollten, um den Lehrbetrieb nicht zu beeinträchtigen.



Abbildung 1: Panoramaansicht (verzerrt) des Hörsaals 2431 in Geb. 033.

Eine Skizze des Hörsaalgrundrisses sowie des Messortes sind in Abb. 2 dargestellt. Der Abstand zwischen dem mobilen Raumlufreiniger und der Messposition wurde sehr groß gewählt, um möglichst ungünstigsten Bedingungen zu analysieren.

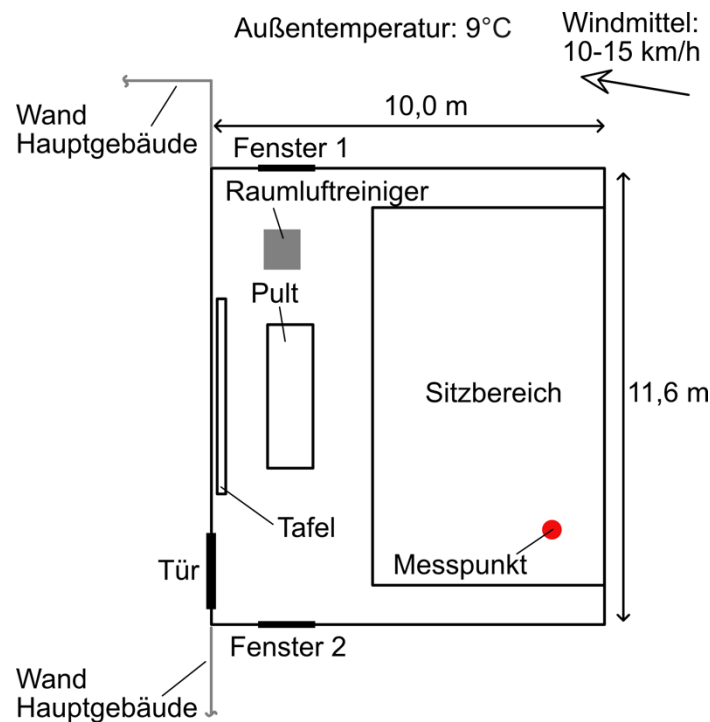


Abbildung 2: Skizze des Hörsaals 2431 in Geb. 033 mit der Übersicht der Hörsaalabmessungen und der Position des Messortes. Die Größe der Fensteröffnung bei vollständig geöffnetem Fenster beträgt jeweils $695^B \text{ mm} \times 1145^H \text{ mm}$.

Für die Bestimmung der Reinigungseffizienz wurden vor Beginn der Messung künstlich erzeugte Aerosolpartikel aus DEHS (mittlerer Durchmesser ca. $0,4 \mu\text{m}$) in den Raum eingebracht und homogen verteilt. Die Größe dieser Partikel liegt in dem Bereich der von infizierten Menschen emittierten und mit Viren belasteten Partikel. Die Partikel folgen der Strömung im Raum nahezu ideal und sie setzen sich kaum ab, so dass sie über Stunden in der Luft schweben.

Der zeitliche Verlauf der Partikelkonzentration wird mithilfe eines *Palas Promo 3000* Partikelzählers mit *Welas 2300* Sensorkopf erfasst. Die gemessenen, normierten Partikelkonzentrationen über der Zeit sind in Abb. 3 und 4 dargestellt. Die verschiedenen starken Abnahmen der Aerosolpartikelkonzentrationen sind deutlich zu erkennen. Der schwarz dargestellte Verlauf

verdeutlicht die sehr geringe Abnahme der Aerosolpartikelkonzentration, wenn alle Fenster und Türen geschlossen sind und sowohl RLT als auch Raumluftreiniger ausgeschaltet sind. Ist in dem Raum eine hohe Virenlast vorhanden, dann würde sie ohne weitere Maßnahmen nur sehr langsam abnehmen, bzw. beim Aufenthalt einer oder mehrerer infizierter Personen im Raum zunehmen, wodurch für nicht-infizierte Personen ein hohes Infektionsrisiko bestehen kann.

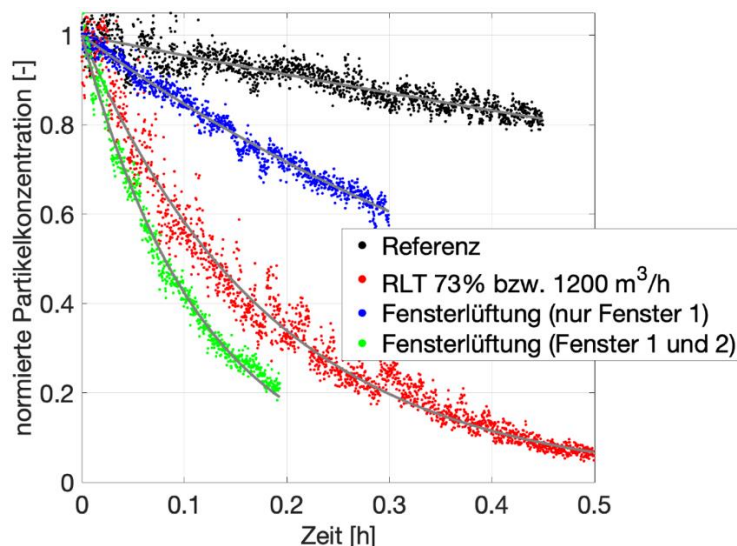


Abbildung 3: Normierte Partikelkonzentrationen über der Zeit für die Referenzmessung, die raumlufttechnische Anlage und die Fensterlüftungen.

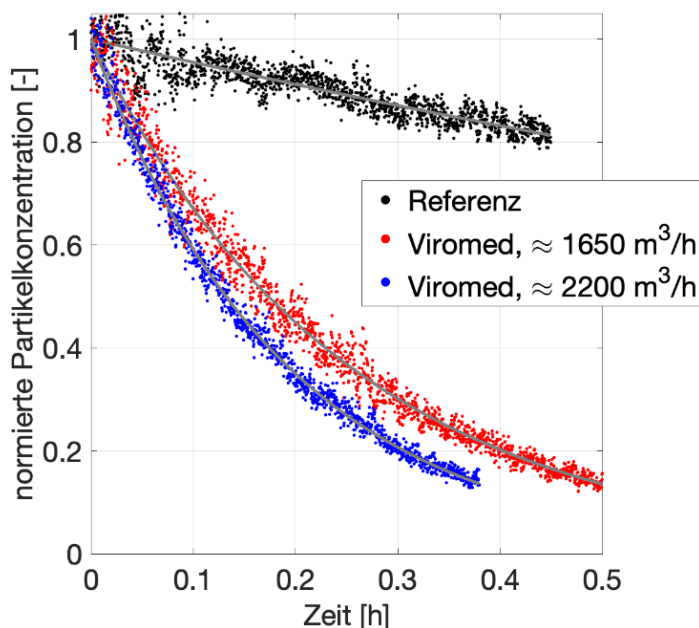


Abbildung 4: Normierte Partikelkonzentrationen über der Zeit für die Referenzmessung und den Raumluftreiniger bei zwei verschiedenen Volumenströmen.

Aus den gemessenen Partikelkonzentrationen über der Zeit wird die Abklingrate k mit der Einheit $[1/h]$ bestimmt. Diese ist in der Lüftungstechnik auch als Luftwechsel, Luftwechselzahl oder Luftwechselrate bekannt. Mithilfe von k kann die zeitliche Entwicklung der Partikelkonzentration c bestimmt werden, sofern das Raumvolumen V $[m^3]$ und die Stärke S $[Partikel/h]$ der Verunreinigungsquelle bekannt sind. Die sich nach längerer Zeit stationär einstellende Konzentration $c_{stationär}$ kann folgendermaßen berechnen werden:

$$c_{\text{stationär}} = \frac{s}{k \cdot V} \quad (1)$$

Je höher k ist, desto schneller werden potentiell gefährliche Aerosolpartikel entfernt, bzw. desto geringer wird die sich nach längerer Zeit einstellende Konzentration nach Gleichung (1) sein.

3. Messergebnisse

Die für verschiedene Konfigurationen ermittelten Abklingraten sind in Tabelle 1 dargestellt. „Referenz“ kennzeichnet den Zustand bei geschlossenen Fenstern und geschlossener Tür sowie ausgeschalteter Lüftungsanlage und ohne Betrieb des mobilen Raumlufreinigers. Aufgrund von Undichtigkeiten von Fenstern und Tür ist dieser Wert nicht 0, jedoch sehr gering, so wie dies bei modernen, gut isolierten Gebäuden völlig normal ist. Mit eingeschalteter RLT Anlage ergibt sich ein Wert von nahezu 6. Die Lüftungsanlage wurde dabei bei 73% Leistung (1200 m³/h) mit 100% Außenluft betrieben. Im Vergleich dazu sind Fensterlüftungen dargestellt. Dazu wurden 1 bzw. 2 Fenster vollständig geöffnet. Wird die RLT ausgeschaltet und nur Fenster 1 geöffnet, so ergibt sich ein Wert von 1,7 für k . Dieser Wert ist abhängig von der Größe der Fensteröffnung, den Windverhältnissen vor dem Fenster und dem Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen. Da letzteres stark variiert ist dieser Wert nicht konstant. Werden beide Fenster gleichzeitig geöffnet (Querlüftung), so ergibt sich ein Wert von 8,8. Am Tage des Versuchs herrschte eine windige Außenumgebung mit einer mittleren Windgeschwindigkeit von rund 10–15 km/h (deutliche Bewegungen der Bäume erkennbar). Wenn kein Wind weht, dann ist der k Wert deutlich kleiner und primär durch den Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen bestimmt. Mit einem mobilen Raumlufreiniger ist die Abklingkonstante deutlich größer als mit der einseitigen Fensterlüftung. Die Leistungsfähigkeit der RLT Anlage ist bei gleichem Volumenstrom signifikant größer als die des Raumlufreinigers. Um eine vergleichbare Abklingrate zu erhalten, musste der Volumenstrom des Raumlufreinigers fast verdoppelt werden. Dieses Ergebnis lässt sich damit erklären, dass die installierte RLT Anlage zu einem gewissen Anteil eine Verdrängungslüftung ermöglicht, während das mobile Gerät hingegen mit dem Prinzip der Mischlüftung arbeitet.

Tabelle 1: Für verschiedene Konfigurationen ermittelte Abklingraten.

Konfiguration	Abklingrate k [1/h]
Referenz	0,5
RLT (73% bzw. 1200 m ³ /h)	5,7
Fensterlüftung (nur Fenster 1 auf)	1,7
Fensterlüftung (Fenster 1 und 2 auf)	8,8
Luftreiniger Viomed Virosafe 2000/F800, ca. 1650 m ³ /h	4,0
Luftreiniger Viomed Virosafe 2000/F800, ca. 2200 m ³ /h	5,3

4. Fazit

Wenn moderne und leistungsfähige RLT Anlagen in Gebäuden verfügbar sind, die mit 100% Außenluft und einer Luftwechselrate von mindestens 6 betrieben werden, kann die Aerosolpartikelkonzentration – und damit die Konzentration von potentiell in den Aerosolpartikeln enthaltenen Viren – deutlich reduziert werden. Hiermit einhergehend kann von einer Reduzierung der Wahrscheinlichkeit für eine indirekte Infektion ausgegangen werden.

Die Querlüftung über beide Fenster weist in den hier durchgeführten Untersuchungen eine etwas höhere Luftwechselrate als die der RLT auf. Der gute Wert konnte erzielt werden, weil draußen der Wind recht stark wehte. Bei anderen Außenumgebungen können sich höhere, in den meisten Fällen aber tendenziell eher geringere Luftwechselraten ergeben. Zudem müssten bei der in diesem Versuch ermittelten Luftwechselrate beide Fenster zu etwa 2/3 der Zeit auch wirklich geöffnet sein, um eine ähnliche Effizienz wie die RLT zu erreichen. Das Öffnen und Schließen der Fenster muss in regelmäßigen kurzen Abständen erfolgen, um einen Anstieg der Virenlast im geschlossenen Raum zu vermeiden. Von 15 Minuten müssten sie 10 Minuten geöffnet und 5 Minuten geschlossen sein, um eine ähnliche Effizienz wie die RLT zu erreichen. In den kalten Monaten führt dies zu einer starken Temperaturabnahme im Raum, so dass gegenüber dem Konzept der Fensterlüftung klar die RLT Anlage zu bevorzugen ist. Durch ein kurzzeitiges Öffnen der Fenster von wenigen Minuten wird das Lüftungsergebnis sehr viel schlechter ausfallen und weit unter den Werten der kontinuierlich arbeitenden RLT Anlage sein. Schließlich ist zu bemerken, dass die freie Lüftung physikalisch nur funktioniert, wenn draußen der Wind weht oder ein großer Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen vorliegt. Durch das ständige Lüften wird aber dieser Temperaturunterschied über längere Zeiträume abgebaut und damit auch die Lüftungseffizienz. Es ist aber davon auszugehen, dass dieses Konzept schon vorher an der Bereitschaft der Menschen scheitert, denn wer sitzt schon gerne in einem kalten Raum.

Die einseitige Fensterlüftung hat sich in dem Experiment als sehr schlecht erwiesen. Selbst wenn das Fenster dauerhaft geöffnet ist, kann kein ausreichender Luftaustausch erzielt werden. Mit der kurzzeitigen Stoßlüftung wird daher nur eine vergleichsweise geringe Reduzierung der Aerosolpartikelkonzentration erreicht. Wenn deutlich mehr Fenster geöffnet werden könnten, dann würde sich das Lüftungsergebnis zwar verbessern, allerdings ist dann die Temperaturabnahme im Raum nach einigen Lüftungszyklen stark und damit wird wiederum die Lüftungseffizienz reduziert. Aus diesem Grund ist die einseitige Fensterlüftung nur in seltenen Fällen praktisch geeignet um die Virenlast ausreichend zu reduzieren. Ferner ist die Fensterlüftung oft mit einer erheblichen Lärmbelästigung verbunden, da außerhalb Lärm von der Straße oder der Umgebung in die Zimmer eindringt. Aber auch starke Zugerscheinungen sind als Nachteil der Fensterlüftung zu nennen, wenn sie denn effizient funktioniert.

Mobile Raumlufreiniger können eine vergleichbare Reinigungsleistung wie die RLT Anlage erzielen, allerdings muss dazu der Volumenstrom vergrößert werden, da die RLT Anlage aufgrund der verteilten Zu- und Abluftöffnungen effizienter arbeitet. Dies ist aber mit dem getesteten Gerät problemlos möglich. Aufgrund des erhöhten Volumenstroms kann die Lärmentwicklung signifikant sein. Um diesem Problem zu begegnen ist der Einsatz von zwei mobilen Luftreinigern zu empfehlen. Damit lassen sich dann bei relativ geringen Lärmemissionen vergleichbare Filterleistungen erzielen wie mit der RLT Anlage. Allerdings geht die Lärmreduzierung mit einer Erhöhung der Kosten einher. Es muss aber betont werden, dass in den seltensten Fällen Gebäude mit einer derart leistungsfähigen RLT Anlage ausgestattet sind, wie sie bei diesen Experimenten zum Vergleich verwendet wurde. Die Nachrüstung einer solchen RLT Anlage

würde ein Vielfaches der Anschaffungskosten von Raumlufreinigern bedeuten und eine langwierige Modernisierung des Gebäudes. Daher bieten sich mobile Raumlufreiniger als schnelle und kostengünstige Lösung an, die im Gegensatz zur freien Lüftung kontinuierlich für eine gleichbleibend hohe Raumluffilterung sorgen, unabhängig von der Größe der Fenster, den Wind- und Temperaturbedingungen und ohne Unterbrechung der Arbeit durch das regelmäßige Öffnen und Schließen der Fenster und ohne unangenehme Temperaturbedingungen im Raum.

Raumlufreiniger arbeiten im Umluftbetrieb und daher treten keine Temperatureffekte auf. Lediglich der CO₂ Anstieg und andere Ausdünstungen müssen mittels Fensterlüftung beseitigt werden. Mit dem hier getesteten Gerät lässt sich das automatisch über den Bypass realisieren. Der Außenluftanteil kann über einen weiten Bereich frei an die Raumgröße und die Personenzahl angepasst werden. Da die Außenluft gefiltert wird, ergibt sich bei dem getesteten Gerät gegenüber der Fensterlüftung auch der Vorteil, dass Feinstaub und Pollen nicht von außen in den Raum gelangen.

Abschließend ist zu bemerken, dass Lüftungsanlage, Raumlufreiniger und auch die Lüftung über Fenster nur die Konzentration der Aerosolpartikel im Raum reduzieren kann. Damit sind diese Maßnahmen geeignet, um das indirekte Infektionsrisiko aufgrund einer hohen Virenlast im Raum zu reduzieren. Zur Reduzierung der direkten Infektionen durch längere Gespräche über kurze Abstände müssen ausreichend große Abstände eingehalten oder eine Mund-Nasen-Bedeckung getragen werden oder transparente Schutzwände installiert werden.