

Untersuchungen zur Lüftungssituation in einem Kopfhörsaal des Geb. 033 an der Universität der Bundeswehr München

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

1. Einleitung

Die durch das SARS-CoV-2 begründete Pandemie breitet sich momentan weltweit zunehmend aus. Nach dem momentanen Forschungsstand wird davon ausgegangen, dass die Übertragung der Infektion durch Tröpfcheninfektion, durch Schmierinfektion und auch durch mit Viren belastete Aerosolpartikel geschieht. Das Risiko der Tröpfcheninfektion kann durch das Einhalten von Abständen zwischen Personen sowie das Tragen von Masken reduziert werden. Das Risiko der Schmierinfektion kann vor allem durch regelmäßige gründliche Handhygiene und das Vermeiden des Berührens von Schleimhäuten reduziert werden. Mit Viren belastete Aerosolpartikel breiten sich hingegen ungestört aus und können auch über größere Entfernungen eingeatmet werden. Eine Reduzierung der eingeatmeten und evtl. mit Viren belasteten Aerosolpartikel kann durch a) eine geeignete Atemschutzmaske oder b) eine Reduzierung der Virenkonzentration geschehen.

Eine unter Punkt a) erwähnte Atemschutzmaske muss in der Lage sein, Aerosolpartikel mit einer ausreichend hohen Effizienz zu filtern. Dies setzt einen FFP2 Standard oder besser voraus. Einfache Mund-Nasen-Bedeckungen und OP Masken weisen keine ausreichende Filterwirkung auf. Neben der mangelnden Filterwirkung dieser Bedeckungen und Masken ist ein wesentliches Problem der Spalt zwischen Maske und Gesicht, durch den die Aerosolpartikel ungefiltert eingeatmet werden.

Die unter Punkt b) beschriebene Reduzierung der Virenkonzentration 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 Raumluft herausgebracht wird. Dies kann über die Lüftung durch Fenster oder – wenn vorhanden – eine raumluftechnische Anlage (Lüftungsanlage, RLT) erfolgen. Schließlich lässt sich die stationäre Virenkonzentration mit mobilen Raumlufreinigern mit geeigneten Filtern wirksam vermindern.

Die Kopfhörsäle in Geb. 033 verfügen über moderne Lüftungsanlagen und im Rahmen der Durchführung der Präsenzlehre zu Zeiten der Coronapandemie stellt sich die Frage, wie effizient diese arbeiten. Zum Vergleich wurde auch die Effizienz der Stoß- und Querlüftung analysiert unter den Temperatur- und Windbedingungen, die an dem Messtag herrschten und ein mobiler Trotec TAC V+ Raumlufreiniger.

2. Messaufbau und Datenanalyse

Die Messungen wurden im Hörsaal 2431 in Geb. 033 der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Eine Panoramaansicht des Hörsaals ist in Abb. 1 dargestellt. Die Zuluft und Abluft strömt über insgesamt 12 Öffnungen in der Decke in den Raum ein und aus.



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

Eine Skizze des Hörsaalgrundrisses sowie des Messortes sind in Abb. 2 dargestellt. Die beiden Fenster weisen eine Öffnung von jeweils 695^B mm x 1145^H mm auf.

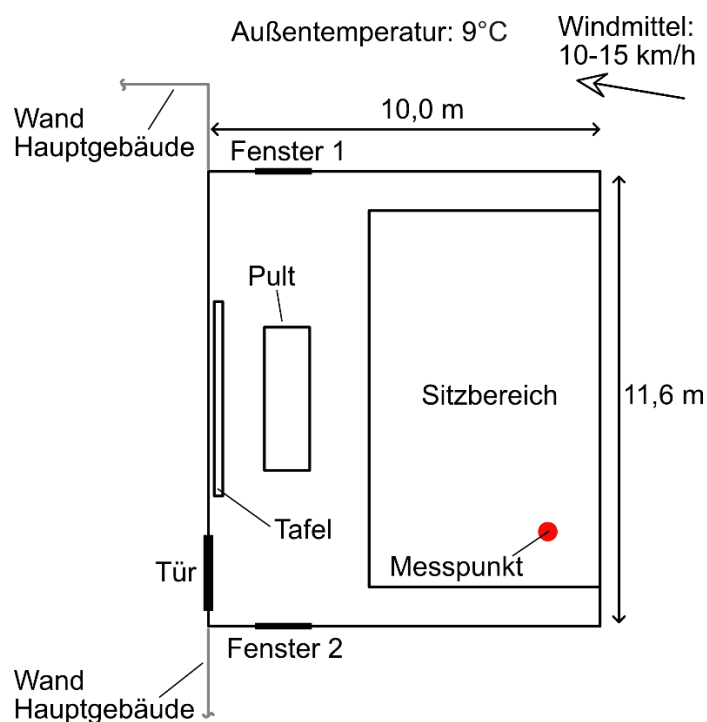


Abbildung 2: Skizze des Hörsaals 2431 in Geb. 033 mit der Übersicht der Hörsaalabmessungen und der Position des Messortes. Die Größe der Fensteröffnung bei vollständig geöffnetem Fenster beträgt jeweils 695^B mm x 1145^H mm.

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.

Die Lüftungsanlage wird, wie später noch detailliert beschrieben, betrieben und es wird währenddessen der zeitliche Verlauf der Partikelkonzentration mithilfe des Partikelzählers *Palas Promo 3000* mit dem Sensorkopf *Welas 2300* erfasst. Die gemessenen, normierten Partikelkonzentrationen über der Zeit sind in Abb. 3 und 4 dargestellt. Die verschieden starken Abnahmen der Aerosolpartikelkonzentrationen sind deutlich zu erkennen.

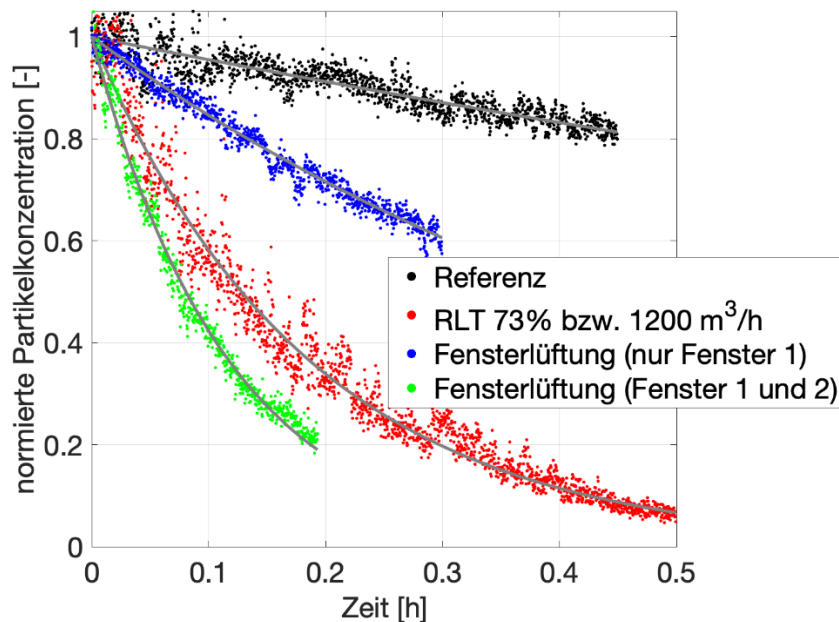


Abbildung 3: Normierte Partikelkonzentrationen über der Zeit für die Referenzmessung, die raumlufttechnische Anlage und Fensterlüftungen.

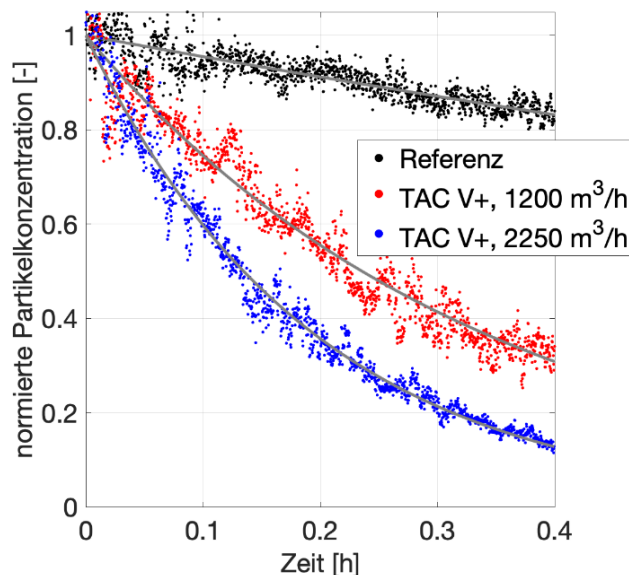


Abbildung 4: Normierte Partikelkonzentrationen über der Zeit für die Referenzmessung und den Raumluftreiniger bei zwei verschiedenen Volumenströmen.

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 [m³] und die Stärke S [Partikel/h] der Verunreinigungsquelle bekannt sind. Die sich nach längerer Zeit stationär einstellende Konzentration $c_{\text{stationär}}$ 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 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 Lüftungsanlage (RLT) 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 (Stoßlüftung), 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 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 zwar größer als mit der Stoßlüftung, allerdings ist die Leistungsfähigkeit der RLT Anlage bei gleichem Volumenstrom signifikant größer. Um eine vergleichbare Abklingrate zu erhalten, musste der Volumenstrom des Raumlufreinigers fast verdoppelt werden.

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 TAC V+, 1200 m ³ /h	2,9
Luftreiniger TAC V+, 2250 m ³ /h	5,4

4. Fazit

Die in Raum 2431 des Geb. 033 durchgeführten Messungen zeigen eine sehr gute Effizienz der Lüftungsanlage. Es wurde in den Versuchen eine Luftwechselrate von annähernd 6 erreicht. Damit dieser Wert immer im laufenden Betrieb erreicht wird, muss die Anlage mindestens auf der Leistungsstufe von 73% mit 100% Außenluft betrieben werden und es darf keine (z.B. auf dem CO₂ Gehalt basierende) Regelung eingesetzt werden, die evtl. zu einer Herabsetzung der Luftzufuhr führt. Teilweise verfügen die Fenster in Geb. 033 über Kontaktschalter. Beim Öffnen der Fenster wird dabei aus Gründen der Energieeinsparung die Lüftungsanlage im jeweiligen Raum automatisch ausgeschaltet. Somit addieren sich in diesem Fall die Lüftung durch die RLT und die Fensterlüftung NICHT, sondern es findet nur die Lüftung über Fenster statt (Diskussion im folgenden Abschnitt).

Die Querlüftung über beide Fenster weist in den hier durchgeführten Untersuchungen eine etwas höhere Luftwechselrate als die der RLT auf. Hierbei ist zu beachten, dass an dem Tag der Messungen eine windige Außenumgebung vorherrschte. 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.

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. 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 derart leistungsfähigen RLT Anlagen ausgestattet sind. 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.

Auf der Basis dieser Analyse lässt sich feststellen, dass eine Reduktion der Virenlast im Raum mit einer hoch modernen RLT Anlage sehr effizient realisiert werden kann. Daher sollten diese Anlagen verwendet werden, wenn sie verfügbar sind. Allerdings ist es wichtig, dass diese Anlagen aufgrund der Gefährlichkeit des Virus mit 100% Außenluftanteil arbeiten und mindestens das 6-fache des Raumvolumens pro Stunde dem Raum zuführen sollten. Es ist allerdings zu beachten, dass diese Luftwechselrate im Winter zu einem Austrocknen der Schleimhäute führen kann, was Infektionen wahrscheinlicher macht. RLT Anlagen sind zudem sehr leise und relativ energieeffizient, wenn sie mit Wärmerückgewinnung arbeiten.

Die Lüftung über Fenster kann im Falle einer Querlüftung ebenfalls zu einer effizienten Reduzierung der Virenlast führen. Allerdings ist dabei zu beachten, dass die Querlüftung häufig und über lange Zeiten erfolgen muss, um ein vergleichbares Ergebnis zu erzielen wie die RLT Anlage. Daher ist eine effiziente Querlüftung immer auch im einem gewissen Auskühlen des Raumes verbunden. Dadurch vermindert sich die Behaglichkeit und grippale Infekte nehmen aufgrund der abnehmenden Luftfeuchtigkeit zu. Ferner trocknen die Schleimhäute aus. Die Stoßlüftung hat sich in dem Experiment als ungenügend erwiesen. Die erzielte Luftwechselzahl ist selbst bei der einseitigen Dauerlüftung nicht ausreichend, um das Infektionsrisiko deutlich zu reduzieren. Wenn deutlich mehr Fenster geöffnet werden könnten, dann würde sich das Lüftungsergebnis zwar auch verbessern, allerdings ist dann die Temperaturabnahme im Raum stark und damit wird wiederum die Lüftungseffizienz reduziert. Aus diesem Grund ist die einseitige Fensterlüftung nur in seltenen Fällen praktisch geeignet um die Virenlast zu reduzieren wie es die RLT Anlage vermag. Ferner ist die Fensterlüftung oft mit einer erheblichen Lärmbelastung verbunden, da außerhalb Lärm von der Straße oder der Umgebung in die Zimmer eindringt.

Raumluftreiniger arbeiten im Umluftbetrieb und daher treten keine Temperatureffekte auf. Lediglich der CO₂ Anstieg und andere Ausdünstungen müssen mittels Fensterlüftung beseitigt werden. Allerdings sind diese Lüftungsintervalle sehr groß im Vergleich mit den Lüftungsintervallen, die bei der Fensterlüftung nötig ist, um das Infektionsrisiko wirksam zu verringern. Raumluftreiniger können grundsätzlich eine vergleichbare Filterleistung erzielen wie hocheffiziente RLT Anlagen, allerdings nicht so geräuschlos. Bei Nutzung mehrerer mobiler Luftreiniger lässt sich die Geräuschemission zwar verringern, allerdings zu Lasten der Anschaffungskosten.

Abschließend ist zu bemerken, dass Lüftungsanlage, Raumluftreiniger 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. Handhygiene sollte auch in den Hörsälen konsequent eingehalten werden, damit auch die Möglichkeit von Schmierinfektionen minimiert wird. Die verbindlichen Regeln zu dem Verhalten in den Räumlichkeiten der Universität sind den jeweils aktuellen Anweisungen der Universitätsleitung zu entnehmen.