

Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren?

Christian J. Kähler, Thomas Fuchs, Rainer Hain

Universität der Bundeswehr München
Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik
Werner-Heisenberg-Weg 39
85577 Neubiberg

Übersicht

Die weltweite Entwicklung der SARS-CoV-2 Infektion verdeutlicht, dass die Pandemie erst am Anfang steht und nicht aufzuhalten ist. Selbst wenn ein wirksamer und gut verträglicher Impfstoff zur Verfügung stände, wäre eine umfangreiche Impfung der Weltbevölkerung zur Bekämpfung der Virusausbreitung nicht realisierbar. Es ist daher notwendig, technische Lösungen zur Eindämmung der Pandemie zu etablieren. Mund-Nasen-Bedeckungen sind inzwischen allgemein anerkannte technische Hilfsmittel, um die direkte Infektionsgefahr beim Atmen, Sprechen, Singen, Husten und Niesen zu verringern. Die indirekte Infektion über infektiöse Aerosolpartikel, die sich mit der Zeit im Raum anreichern, lässt sich mit Mund-Nasen-Bedeckungen nicht verhindern [5]. Dafür sind festsitzende partikelfiltrierende Atemschutzmasken erforderlich. Alternativ besteht die Möglichkeit die Aerosolpartikel im Raum mittels Filterung abzuscheiden oder über die Fensterlüftung abzuführen. Raumluftechnische Anlagen, die Aerosolpartikel mit einem Durchmesser kleiner $1\ \mu\text{m}$ verlässlich abscheiden, sind selten. Das freie Lüften mittels Fenster ist oft nicht effizient und spätestens im Winter nicht mehr möglich ohne Energie zu verschwenden und die Gesundheit sowie das Wohlbefinden der Menschen zu gefährden. Die Frage ist daher, ob mobile Raumlufreiniger grundsätzlich geeignet sind, einen sinnvollen Beitrag zur Reduzierung der Infektionsgefahr zu leisten? Um die Frage zu beantworten, wurde ein TROTEC TAC V+ Raumlufreiniger mit einem Volumenstrom von bis zu $1500\ \text{m}^3/\text{h}$ systematisch analysiert. Das Gerät verfügt über eine Filterkombination, die gewährleistet, dass Aerosolpartikel mit einem Durchmesser von $0,1$ bis $0,3\ \mu\text{m}$ zu $99,995\%$ aus der Raumluft abgeschieden werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Aerosolkonzentration in einem Raum mit einer Größe von $80\ \text{m}^2$ innerhalb kurzer Zeit überall auf ein geringes Maß reduziert werden kann. Damit stellen Raumlufreiniger mit großem Volumenstrom und hochwertigen Filtern der Klasse H14 aus unserer Sicht eine sehr sinnvolle technische Lösung dar, um in Schulen, Büros, Geschäften, Wartezimmern, Gemeinde- und Vereinshäusern, Aufenthalts- und Essensräumen etc. die indirekte Infektionsgefahr durch Aerosole stark zu verringern. Sie können aber auch in Gebäuden mit raumluftechnischen Anlagen unterstützend eingesetzt werden, in denen Menschen zusammenstehen (Wartebereich) und gemeinsam arbeiten oder in denen aufgrund der Arbeitslast viel Aerosol ausgestoßen wird (Fitnessstudio).

1. Einleitung

Nach gegenwärtigem Stand der Forschung wird SARS-CoV-2 hauptsächlich über Tröpfchen übertragen, die beim Atmen, Sprechen, Singen, Husten oder Niesen entstehen und über die Atemluft aus- und eingeatmet werden [1, 2, 3, 4]. Eine *direkte* Infizierung, bei der viele emittierte Tröpfchen über kurze Distanz (kleiner 1,5 m) von einer nicht infizierten Person eingeatmet werden, kann mit Hilfe von partikelfiltrierenden Atemschutzmasken (FFP2/3 oder besser) wirksam verhindert werden, da diese Atemschutzmasken Tröpfchen beim Ein- und Ausatmen bis zu einer festgelegten Größenklasse zuverlässig abscheiden [5]. Diese Atemschutzmasken bieten daher auch ohne Sicherheitsabstand einen sehr guten Selbst- oder Eigenschutz. Sie bewirken aber auch, dass die von infizierten Personen emittierten Viren kaum in die Raumluft gelangen. Daher bieten sie neben dem Eigenschutz auch einen Fremdschutz bzgl. einer direkten und indirekten Infizierung, sofern kein Auslassventil integriert ist.

Größere Tröpfchen werden auch durch einfache Mund-Nasen-Bedeckungen wirksam abgeschieden. Da größere Tröpfchen statistisch mehr Viren transportieren können als kleine Tröpfchen, ist dieser Effekt bei Vorgängen, die primär große Tröpfchen produzieren (Husten, Niesen) bedeutsam. Die kleinen Tröpfchen gelangen jedoch durch Spalte am Rand der Mund-Nasen-Bedeckungen in die Außenluft, weil diese Bedeckungen einerseits nicht fest genug mit dem Gesicht abschließen und andererseits die Strömung zum großen Teil dem Weg des geringsten Strömungswiderstands folgt [5]. Aufgrund des Strömungswiderstands der Mund-Nasen-Bedeckung und der Umlenkungsverluste verbleiben die kleinen Tröpfchen aber zunächst in der Umgebung des Kopfes. Dadurch wird die kurzfristige Ausbreitung der Tröpfchen beim Sprechen, Singen, Husten oder Niesen stark begrenzt und damit wird das direkte Infektionsrisiko enorm reduziert [5, 6, 7, 8, 9]. Diese Bedeckungen schützen aber nur dann wirkungsvoll, wenn zusätzlich ein Sicherheitsabstand (mindestens 1,5 m) eingehalten werden kann. Da bei diesen Mund-Nasen-Bedeckungen die kleinen Tröpfchen freigesetzt werden, können sie sich mit der Zeit im Raum anreichern und selbst dann zu einer *indirekten* Infektion führen, wenn die infizierte Person nicht mehr im Raum ist [8, 10].

Kleine Tröpfchen, die in der Luft über Stunden schweben und mit der Luftströmung über große Entfernungen transportiert werden können, werden Aerosolpartikel oder Schwebeteilchen genannt und das Gemisch aus Luft und Aerosolpartikel wird als Aerosol bezeichnet. Es ist wissenschaftlich erwiesen, dass ein mit infektiösen Viren beladenes Aerosol zu einer COVID-19 Infektion führen kann, solange die flüssige Phase der Aerosolpartikel nicht vollständig verdunstet ist [11, 12]. Die Verdunstungszeit wässriger Aerosolpartikel mit einem Durchmesser von einigen Mikrometern beträgt bei moderater Luftfeuchtigkeit weniger als eine Sekunde [6]. Bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit (ca. 85%) kann jedoch die Verdunstungsrate mit der Kondensationsrate ins Gleichgewicht kommen und dann bleibt der Flüssigkeitsanteil dauerhaft erhalten. Die Infektionswahrscheinlichkeit wird dann nur durch die Halbwertszeit der Viren limitiert. Die SARS-CoV-2 Halbwertszeit beträgt 1,1 – 1,2 Stunden, d.h. nach einer guten Stunde geht von der Hälfte der Viren in einem Tropfen statistisch gesehen keine Infektionsgefahr mehr aus [11]. Ob auch Aerosolpartikel nach dem Verdunsten der flüssigen Phase noch infektiös sind, wird gegenwärtig kontrovers diskutiert [13, 14, 15]. Diese aus Salzen, Virenmaterial und getrocknetem Schleim bestehenden festen Partikel werden als Tröpfchenkerne bezeichnet. Je nach Feststoffanteil sind die Tröpfchenkerne sehr viel kleiner als die ursprünglichen Tröpfchen, aus denen sie hervorgegangen sind. In Kapitel 9 werden wir darauf näher eingehen. Aufgrund ihrer geringen Größe schweben die Tröpfchenkerne ebenfalls in der Luft und daher bilden sie selbst bei geringer Luftfeuchtigkeit ein langlebiges Aerosol, das sich im Raum mit der Zeit anreichern kann, sofern Quellen vorhanden sind und es nicht gefiltert oder abgeführt wird.

Da die indirekte Infektionswahrscheinlichkeit in einem Raum mit der Anzahl der infizierten Personen und der Aufenthaltsdauer zunimmt, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um die Virenlast in der Raumluft zu begrenzen. Welcher Grenzwert dabei angestrebt werden sollte ist derzeit nicht festgelegt und es ist auch nicht klar, wie die SARS-CoV-2 Konzentration im Raum überhaupt gemessen werden soll. Viele Gebäude verfügen über raumluftechnische (RLT) Anlagen, die dafür sorgen, dass die kontaminierte Luft kontrolliert abgeführt und gefilterte bzw. frische Luft von außen hinzugefügt wird. In Regionen mit moderaten klimatischen Bedingungen erfolgt die Lüftung aber in der Regel über die freie Lüftung mittels Fenster und Türen. Empfohlene Luftwechselraten orientieren sich am CO₂ Ausstoß und anderen Ausdünstungen der Menschen (z.B. Wasserdampf), sowie der Schadstoffanreicherung im Raum (z.B. Radon) und der Vorbeugung von Gebäudeschädigungen (z.B. Schimmelbildung) [16]. Bereits 1858 hat Max von Pettenkofer erkannt, dass im Innenraum CO₂ Werte von maximal 1000 ppm angestrebt werden sollten [17]. Bei einer CO₂ Umgebungsbelastung von 450 ppm in Städten ist dieser Wert aber oft schwierig zu realisieren [18]. Für viele Bereiche wird daher unabhängig von der CO₂ Konzentration empfohlen pro Stunde eine bestimmte Frischluftmenge zuzuführen, die je nach Raumnutzung variiert. In Büros, Gaststätten und Verkaufsräumen sollte pro Stunde bis zum 4 – 8 fachen des Raumvolumens zugeführt werden, um die Menschen und die Gebäude vor Schadstoffen zu schützen und die Leistungsfähigkeit der Personen sicherzustellen [18, 19]. Wenn allerdings Schadstoffe in den Raum emittiert werden, von denen ein erhebliches Gesundheitsrisiko ausgeht, wie z.B. Viren, dann sind je nach Gefährdungsstufe deutlich größere Luftwechselraten von 12 – 15 notwendig [20, 21, 22].

Der wesentliche Vorteil der RLT Anlagen gegenüber der freien Lüftung besteht darin, dass sie kontinuierlich für eine angemessene Raumluftqualität sorgen und ein regelmäßiges manuelles Regulieren mittels Fenstern entfällt, siehe Abbildung 1 (links). Sie müssen aber regelmäßig gewartet und richtig betrieben werden. Oft werden sie aus energetischen Gründen nur mit geringer Frischluftzufuhr und einfachen Filtern betrieben. Zur Verhinderung von indirekten Infektionen ist aber eine ausreichende Frischluftzufuhr oder eine sehr gute Filterung der Raumluft erforderlich [23]. In Deutschland wird aufgrund der klimatischen Bedingungen vielfach mit Hilfe der freien Lüftung durch Fenster Frischluft zugeführt. Bei der Stoßlüftung kann bei geeigneten Windbedingungen oder Temperaturunterschieden die vorhandene Schadstoffkonzentration im Raum innerhalb kurzer Zeit stark verringert werden, aber nach dem Schließen der Fenster steigt die Schadstoffkonzentration wieder allmählich an, wie in Abbildung 1 (rechts) schematisch dargestellt.

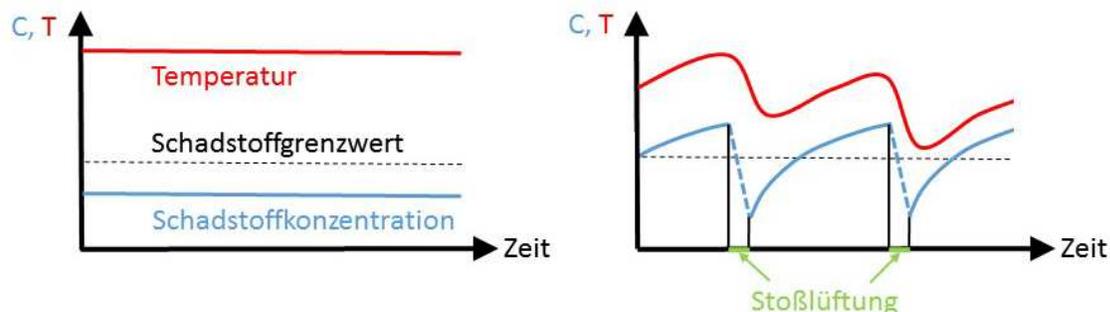


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schadstoffkonzentration und des Temperaturverlaufes in einem Raum mit RLT Anlage (links) und Stoßlüftung (rechts)

Um die Schadstoffkonzentration auf einem niedrigen Niveau zu halten, muss daher häufig stoßgelüftet oder besser dauergelüftet werden. Die Querlüftung ist bei geeigneten Witterungsbedingungen am effektivsten, aber diese kann auch schnell als unangenehm

empfundener werden. Ein gekipptes Fenster führt hingegen meist zu keinem nennenswerten Luftaustausch im Raum [16]. Unter diesen Bedingungen ist es empfehlenswert, zwei Fenster zu öffnen und vor ein Fenster einen Ventilator zu stellen, der von außen frische Luft in den Raum führt. Aufgrund der Druckerhöhung wird die verbrauchte oder kontaminierte Luft dann durch das andere Fenster abgeführt. Mit dieser Methode werden alle Bereiche des Raumes mit Frischluft versorgt und die Verweilzeit des Aerosols im Raum kann kurzgehalten werden, so dass eine indirekte Infektion sehr unwahrscheinlich wird. In der kalten Jahreszeit ist die freie Lüftung aber nicht nur ungemütlich, sondern sie gefährdet auch die Gesundheit. Ferner ist eine freie Lüftung energetisch schlecht und in fensterlosen Räumen nicht möglich. Darüber hinaus ist die Effizienz des Luftaustausches bei der freien Lüftung abhängig von nicht beeinflussbaren Parametern wie der Position und Größe der Fenster, der Geschwindigkeit und Richtung des Windes vor den Fenstern, dem Temperaturunterschied zwischen innen und außen und der Bereitschaft der Menschen zu lüften [24, 25].

Welche Lüftungsart den besten Schutz vor einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion bietet lässt sich schwer feststellen, da die Anzahl der emittierten Viren oder die Virenkonzentration und damit die Infektionswahrscheinlichkeit in einem Raum nicht bekannt ist. Da auch keine Korrelation zwischen Virenkonzentration und anderen Größen wie z.B. der CO₂ Konzentration besteht, kann die Virenlast auch nicht indirekt über den CO₂ Gehalt gemessen werden. Aus diesem Grund sind möglichst hohe Luftwechselraten anzustreben, um die Infektionswahrscheinlichkeit zu minimieren. Aufgrund der tödlichen Gefahr, die von einer SARS-CoV-2 Infektion ausgeht, ist es sicherlich vernünftig, die bereits ohne Infektionsrisiko empfohlenen Luftwechselraten nicht zu unterschreiten, sondern zu übertreffen.

Es ist abzusehen, dass in der aktuellen Pandemie spätestens im Winter zusätzliche Herausforderungen auftreten werden, um das Infektionsrisiko in geschlossenen Räumen zu minimieren. Aber schon die aktuell diskutierte Schulöffnung ohne Einhaltung von Sicherheitsabständen und ohne Nutzung von Mund-Nasen-Bedeckungen oder partikelfiltrierenden Atemschutzmasken wird von vielen Menschen mit Sorge betrachtet, da die Möglichkeit besteht, dass sich die Kinder untereinander infizieren und die Infektionskette dann über die Eltern und Großeltern verläuft. Da die Sterblichkeit mit dem Alter zunimmt, ist diese Sorge vieler Eltern gut begründet und berechtigt. Es ist daher die Frage, ob sich auch in Gebäuden ohne RLT Anlagen mit Filtern der Klasse H13/H14 oder 100% Frischluftzufuhr die Virenlast effektiv minimieren lässt, ohne den Komfort zu reduzieren oder akute Schädigungen der Gesundheit in Kauf zu nehmen.

Es ist erforderlich eine Lösung zu suchen, die einerseits im Raum weder schnelle Luftbewegungen, noch große Temperatur- oder Luftfeuchteschwankungen hervorruft, die zur Beeinträchtigung der Behaglichkeit führen [26], andererseits aber mit infektiösem Virenmaterial kontaminierte Aerosolpartikel (Tröpfchen und Tröpfchenkerne) effizient herausfiltert und sie nicht wie eine „Virenschleuder“ unkontrolliert verteilt [4]. Damit dies gewährleistet werden kann, ist eine ausreichende Luftwechselrate wichtig und die Verweilzeit der emittierten Aerosolpartikel muss möglichst gering sein. Die Luftwechselrate bezeichnet dabei nicht, dass die Luft komplett ausgetauscht wird wie in einer Luftpumpe, sondern den Anteil an frischer oder gereinigter Luft, der bezogen auf das Raumvolumen pro Stunde zugeführt wird [24]. Auf der anderen Seite dürfen die Luftgeschwindigkeit und die turbulente Schwankungsbewegung der Luft nicht zu groß sein, da es ansonsten für die Personen im Raum je nach Bekleidung und Tätigkeit unangenehm werden kann. Abbildung 2 illustriert die Abhängigkeit der Behaglichkeit von der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, der turbulenten Luftschwankungen und der Temperatur gemäß [26]. Die Bereiche unterhalb des jeweiligen

Kurvenverlaufes können als angenehm betrachtet werden. Als Richtwert wird üblicherweise gefordert, dass bei moderaten Raumtemperaturen die Luftgeschwindigkeit im Mittel über lange Zeiträume kleiner als 0,3 m/s sein sollte.

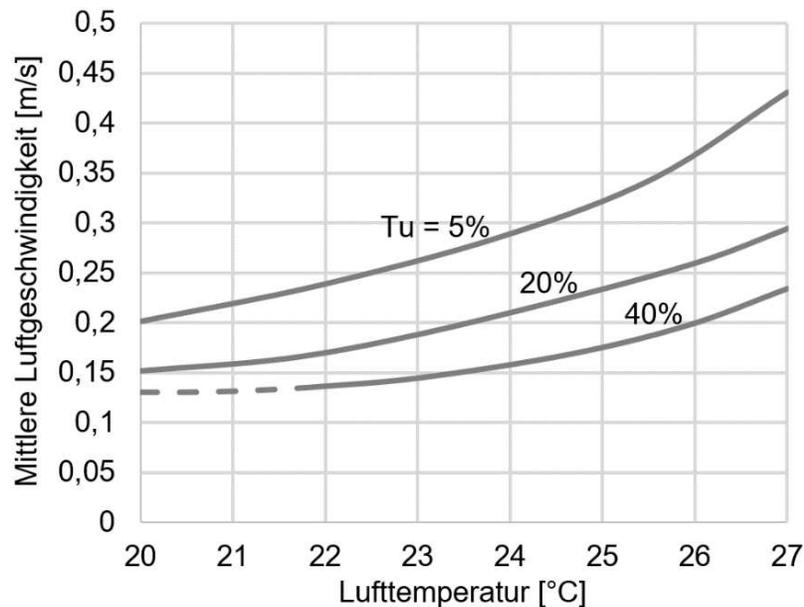


Abbildung 2: Bereiche mit nicht störender Luftgeschwindigkeit nach [26]

Die Strömungsbewegung im Raum ist daher sehr wichtig zu betrachten und sie können durch Einbauten (Lampen) oder großen Objekten im Raum, aber auch durch Öffnungen in den Wänden (Zug) oder die Bewegung von Personen (Vermischung, thermische Konvektion) stark beeinflusst werden [24, 25]. Im Hinblick auf eine effiziente Filterung des Aerosols im Raum mit mobilen Geräten ist daher die richtige Positionierung eines Raumlufthereinigers wichtig. Aber auch die Position, an der die Aerosolpartikel lokal emittiert werden, spielt eine große Rolle. Weitere Einflussparameter sind die von der Aktivität abhängige emittierte Aerosolkonzentration sowie die Verweildauer im Raum.

Aufgrund der Komplexität des Strömungsproblems wird im Rahmen dieser Untersuchungen ein experimenteller Ansatz genutzt, da nur so die vielen Einflussfaktoren physikalisch richtig erfasst werden können.

Für die experimentellen Untersuchungen wurde ein TROTEC TAC V+ Raumlufthereiniger genutzt, der die folgenden Merkmale aufweist [27]:

1. Maximaler Volumenstrom von etwa 1500 m³/h.
2. Filter der Klasse F7 und H14. H14 bedeutet, dass Aerosolpartikel mit einem Durchmesser von 0,1 bis 0,3 µm zu 99,995% abgeschieden werden. Größere Partikel werden zu 100% abgeschieden.
3. Der Filter kann nach dem Einsatz auf über 100°C aufgeheizt werden, um die Viren im Filter zu zerstören und der Entstehung von Biofilmen, Bakterien und Pilzen ohne gesundheitsschädliche chemische Zusatzstoffe oder UV-C Strahlung entgegenzuwirken.
4. Das Gerät kann trotz seines Gewichts leicht bewegt werden, so dass es in diversen Bereichen problemlos eingesetzt werden kann.

2. Versuchsaufbau und Durchführung der PIV Experimente

Das Ziel der ersten Versuchsreihe bestand darin die Ansaug- und Ausblascharakteristik des Raumlufthereinigers bei verschiedenen Leistungsstufen / Volumenströmen zu quantifizieren. Gemäß Abbildung 2 muss dazu die mittlere Luftgeschwindigkeit und die turbulenten Luftschwankungen in der Umgebung des Raumlufthereinigers quantitativ erfasst werden. Diese Größen sind wichtig, um festzustellen, ob die Luftbewegung von Personen in der Nähe als störend empfunden werden. Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich kleiner 0,3 m/s werden bei ruhiger Tätigkeit in der Regel nicht als störend empfunden. Da sich die gefühlte Luftbewegung additiv aus der mittleren und der turbulenten Strömungsbewegung zusammensetzt, muss die Summe aus beiden Anteilen im Mittel kleiner als 0,3 m/s sein. Um diese beiden Größen in Abhängigkeit vom Abstand zum Gerät orts aufgelöst bestimmen zu können, wurde die Particle Image Velocimetry (PIV) eingesetzt [28]. Bei dieser Messtechnik wird die Bewegung künstlich erzeugter Aerosolpartikel, die der Luftbewegung exakt folgen, in einem Laserlichtschnitt mit digitalen Kameras zu zwei Zeitpunkten registriert und anschließend wird mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden die Verschiebung der Partikelbilder bestimmt. Aus der Verschiebung der Partikelbilder kann dann unter Berücksichtigung des Zeitintervalls zwischen den Messungen und einer Kalibrierung die orts aufgelöste Geschwindigkeitsverteilung in der Messebene berührungslos bestimmt werden. Abbildung 3 zeigt zur Illustration Aufnahmen des Versuchsaufbaus und während einer Messung.

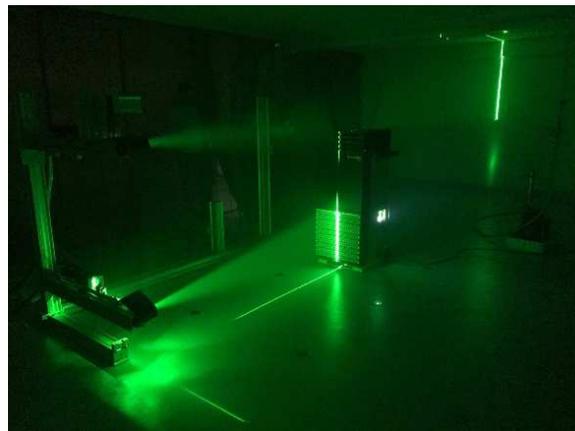


Abbildung 3: Experimenteller Aufbau mit Raumlufthereiniger, zwei Doppelpulslasern und 4 sCMOS Kameras (links) und Aufnahme während der Messung mit PIV (rechts)

Für die Experimente wurden 4 PCO.edge 5.5 sCMOS Kameras mit Zeiss Makro-Objektiven mit Brennweiten von 35 mm und 50 mm verwendet. Das Aerosol wurde mit einem Seedinggenerator der Firma PIVTEC aus Di-2-ethylhexyl-sebacat (DEHS) erzeugt. Der mittlere Durchmesser der Aerosolpartikel beträgt $1 \mu\text{m}$ und die Größenverteilung liegt zwischen $0,1 - 2 \mu\text{m}$ [29]. Für die PIV Strömungsexperimente in Kapitel 6 wurden mit Helium gefüllte Seifenblasen mit einem mittleren Durchmesser von ca. $350 \mu\text{m}$ verwendet, die mit einem HFSB Generator der Firma LaVision erzeugt wurden. Zwei Quantel Evergreen 200 Laser wurden für die Beleuchtung der Partikel eingesetzt, deren Strahlen mithilfe verschiedener Linsen zu Lichtschnitten aufgespannt wurden [28]. Das Messsystem wurde mit der Software DaVis von LaVision GmbH gesteuert, welche auch zur Datenauswertung verwendet wurde.

3. Charakterisierung des Strömungsfeldes in der Umgebung des Raumluftreinigers

In den Abbildungen 4 – 9 sind die Ergebnisse der Messungen bei Volumenströmen von 600 m³/h, 1000 m³/h und 1500 m³/h dargestellt. In der oberen Abbildung sind jeweils der Geschwindigkeitsbetrag farbkodiert und die Richtung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit als Vektoren gezeigt, in der unteren ist der Betrag der turbulenten Luftbewegung dargestellt.

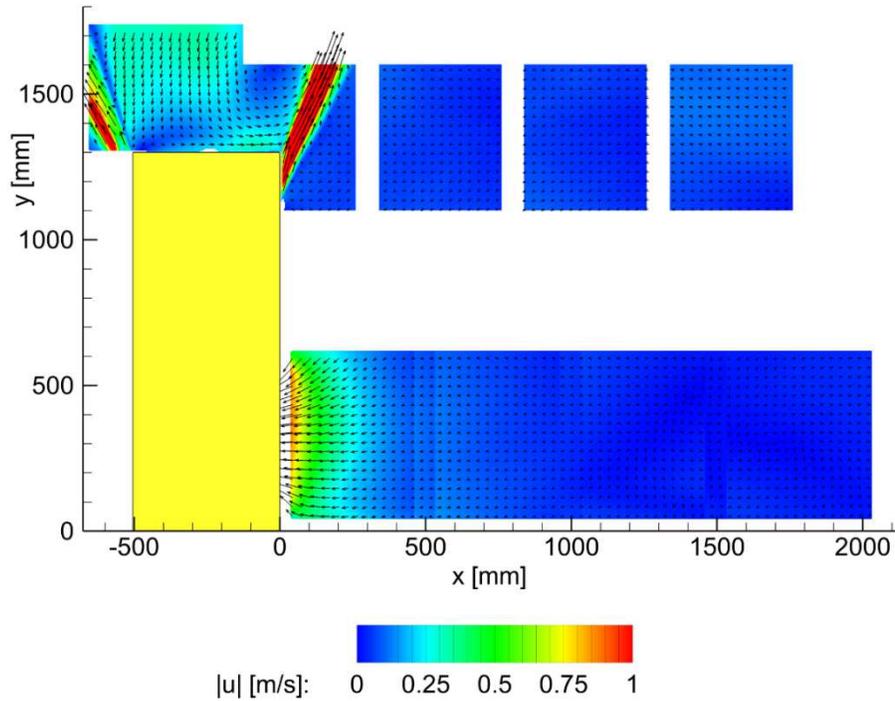


Abbildung 4: Mittleres Strömungsfeld gemessen bei 600 m³/h.

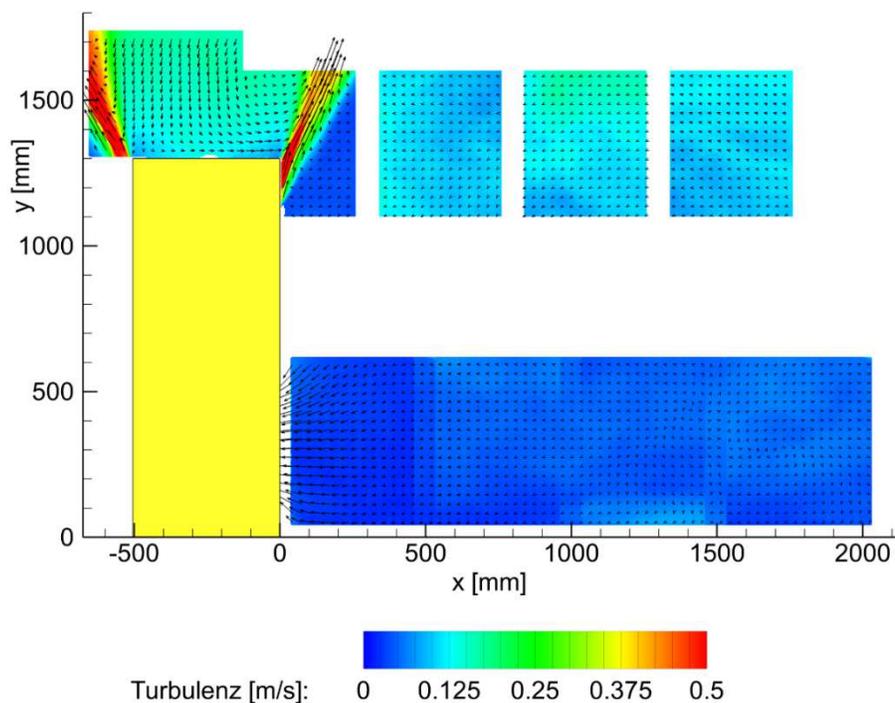


Abbildung 5: Turbulente Strömungsbewegung zeitlich gemittelt bei 600 m³/h.

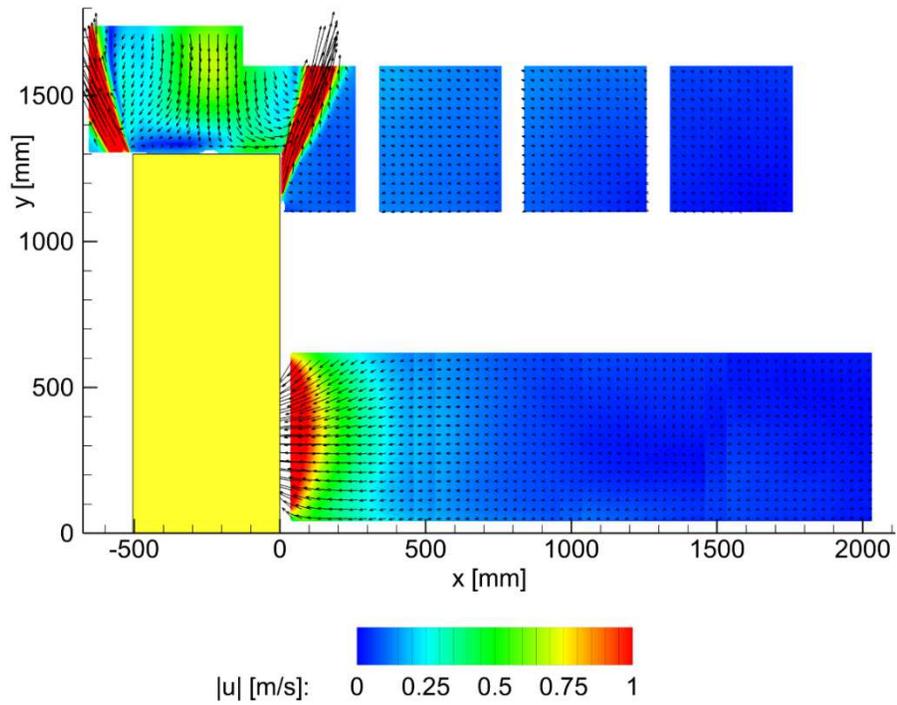


Abbildung 6: Mittleres Strömungsfeld gemessen bei $1000 \text{ m}^3/\text{h}$.

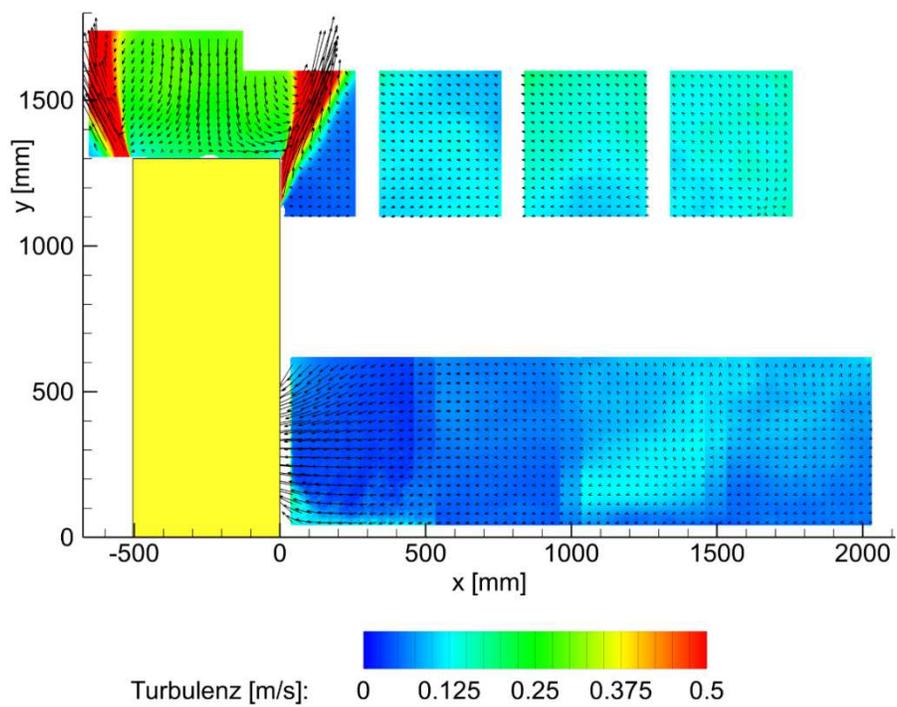


Abbildung 7: Turbulente Strömungsbewegung zeitlich gemittelt bei $1000 \text{ m}^3/\text{h}$.

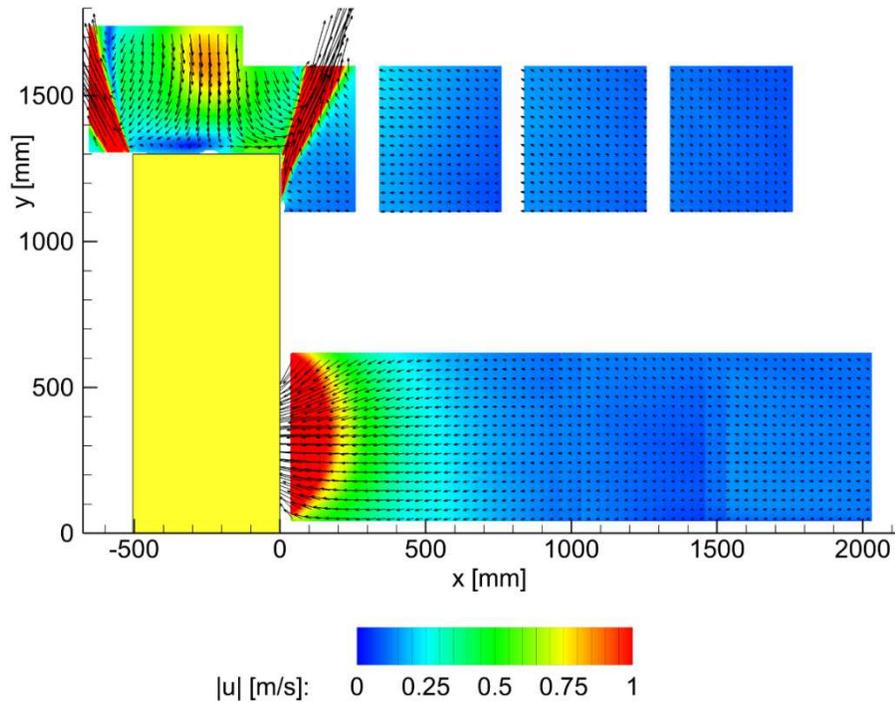


Abbildung 8: Mittleres Strömungsfeld gemessen bei $1500 \text{ m}^3/\text{h}$.

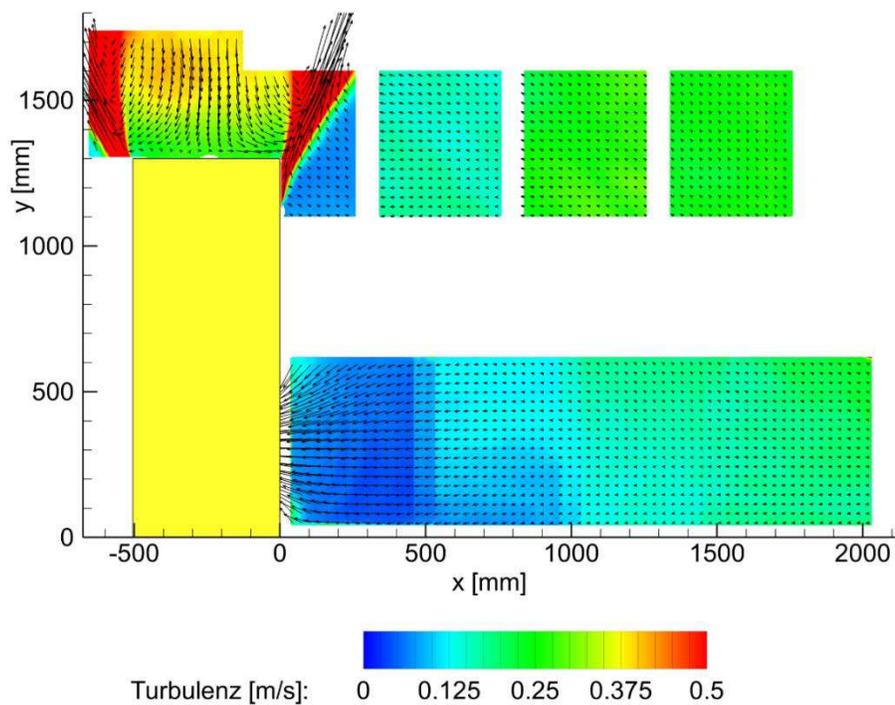


Abbildung 9: Turbulente Strömungsbewegung zeitlich gemittelt bei $1500 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die quantitativen Messergebnisse verdeutlichen, dass die mittlere Strömungsgeschwindigkeit und die turbulente Bewegung in der Umgebung des Gerätes die kritischen Werte gemäß Abbildung 2 nicht übertreffen. Daher ist selbst bei einem Aufenthalt in der unmittelbaren Nähe

des Raumlufreinigers keine Beeinträchtigung des Wohlbefindens durch Luftbewegungen zu erwarten. Bei einem Volumenstrom von $1500 \text{ m}^3/\text{h}$ werden vor dem Ansaugbereich etwas größere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht, allerdings nur im Beinbereich und nur bis ca. 0,5 m Entfernung vor dem Gerät. Im empfindlichen Kopf- und Körperbereich sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und die turbulente Luftbewegung deutlich kleiner als $0,3 \text{ m/s}$. Direkt im Bereich der Ausströmung und oberhalb des Gerätekopfes werden deutlich größere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht. Bei einem Abstand von 0,5 m zum Gerät sind diese aber selbst im Stehen nicht spürbar, da der austretende Freistrah durch Leitbleche stark nach oben gerichtet ist. Es ist daher auch kaum möglich den Auslassstrahl zu verblocken, was zu einer Beeinträchtigung der Filterwirkung im Raum führen könnte. Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass durch den Betrieb des Raumlufreinigers die Luftgeschwindigkeiten den Richtlinien entsprechen.

4. Strömungseffekte durch Objekte

In einer unabhängigen Studie wurde bereits gezeigt, dass die Filterwirkung vom Standort des Gerätes und Objekten im Raum abhängen kann [30]. Um zu ermitteln, inwieweit eine Positionierung des Raumlufreinigers dicht an der Wand und lange Deckenlampen die Strömungsbewegung im Raum nachteilig beeinflussen und damit ggf. die Zeit für die Filterung der Raumluf verzögern können, wurde der Raumlufreiniger dicht an einer Wand positioniert und der Auslassstrahl durch raumteilende Deckenlampen blockiert. Die in Abbildung 10 dargestellte Geschwindigkeitsverteilung verdeutlicht, dass die ausgeblasene Luft zunächst an die Decke steigt und dann an der Decke umgelenkt wird. Aufgrund des Coandă Effektes liegt der Auslassstrahl an der Decke an und breitet sich als sogenannter Wandstrahl aus. Bedingt durch die hervorstehenden Deckenlampen, die über die gesamte Raumlänge verlaufen, kommt es erneut zu einer Strömungsumlenkung und folglich bildet sich ein großer Wirbel aus. Diese Wirbelströmungen sind tendenziell schlecht, da die gefilterte Luft teilweise wieder zum Gerät geführt wird und erneut gefiltert wird, bevor eine hinreichende Aufnahme von Viren im Raum durch Entrainment erfolgen kann [24]. Derartige Konstellationen sollten daher durch geeignete Aufstellung des Gerätes im Raum möglichst vermieden werden.

Um eine effektive Filterung der Raumluf zu ermöglichen, ist zu empfehlen, den Raumlufreiniger möglichst in der Mitte der längsten Raumseite zu positionieren und es ist darauf zu achten, dass die auf die Decke treffenden Luftstrahlen möglichst lange ungestört an der Decke entlangströmen können. Wenn die Decke glatt ist und der Raum nicht zu groß, dann kann der Strahl bis zur anderen Seitenwand strömen. Dort wird er dann nach unten umgelenkt und strömt entlang des Bodens zurück zum Ansaugbereich des Raumlufreinigers, wie in Abbildung 11 (links) schematisch dargestellt. Auf diese Weise wird ein bestmöglicher Luftaustausch sichergestellt, da die kontaminierten Luftbereiche im Raum kontinuierlich über wenige groß Wirbelströmungen zum Gerät befördert werden. Wenn die Luftausbreitung an der Decke z.B. durch eine Lampenreihe unterbrochen wird, dann ist eine Strömungsbewegung wie in Abbildung 11 (rechts) gezeigt zu erwarten, sofern der Raum hinreichend groß ist.

Die Behinderung der Luftausbreitung an der Decke kann auch durch eine starke Wärmequelle (Heizung, Herd, Menschengruppe) im Raum verursacht werden. Wärmequellen bewirken, dass die Dichte der Luft abnimmt und aufgrund der verringerten Dichte wird sie leichter als die Umgebungsluft und daher wird sie durch die schwereren Luftmassen im unteren Bereich verdrängt und steigt auf. Diese thermische Konvektionsströmung gelangt dann zur Decke, wo sie in alle Richtungen umgelenkt wird. Diese Strömung kann daher der durch den Lüfter erzeugten Strömungsbewegung entgegenwirken und zur Strömungsablösung an der Decke

führen. In diesem Fall kann sich wieder eine Wirbelströmung ausbilden, die nicht den gesamten Raum erfasst, und dadurch kann die Filterleistung reduziert werden, analog zu der schematischen Darstellung in Abbildung 11 (rechts). Es ist aber zu beachten, dass die turbulente Luftbewegung im Raum immer dafür sorgen wird, dass die gesamte Raumluft nach einer gewissen Zeit in den Einflussbereich des Lüfters kommt und die Aerosolpartikel dann abgeschieden werden. Das Ziel sollte es aber sein, die Zeit für die Filterung der Raumluft möglichst gering zu halten.

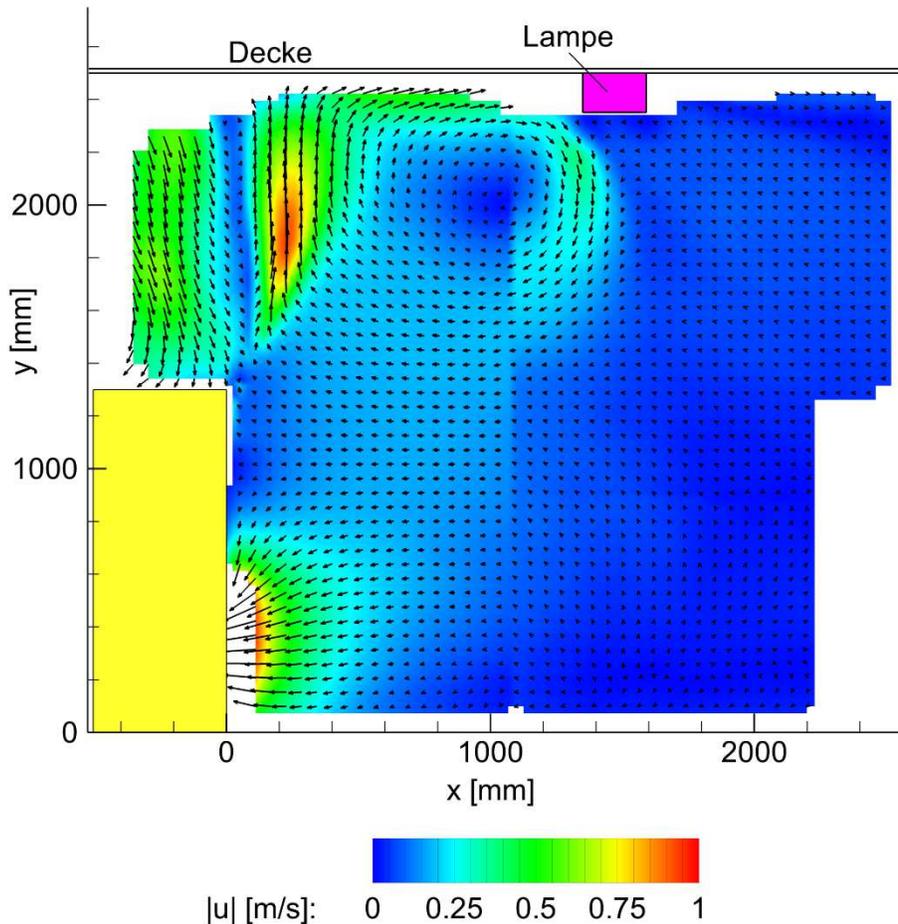


Abbildung 10: Gemessene Raumluftströmung vor dem Gerät mit unterbrochener Decke

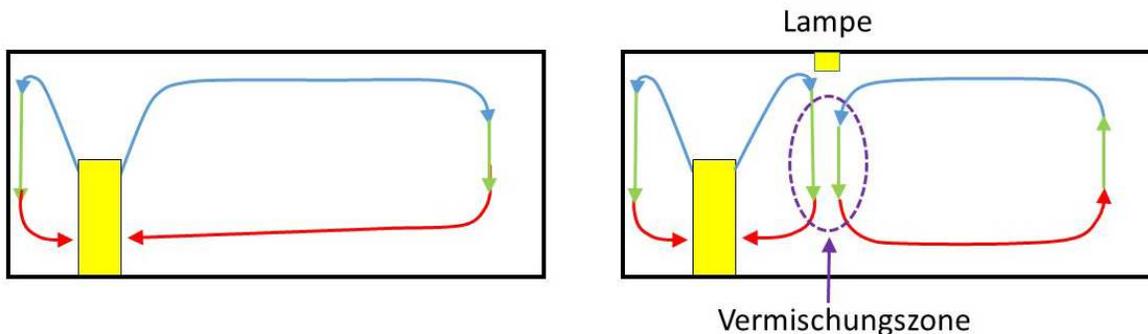


Abbildung 11: Vereinfachte schematische Darstellung der Raumluftströmung in einem leeren Raum (links) und bei Vorhandensein einer Lampenreihe an der Decke (rechts). In der Realität sind die Strömungsphänomene dreidimensional.

5. Versuchsaufbau und Durchführung der Konzentrationsmessungen

Mit dem Ziel, die Filterleistung des Raumlufthereinigers quantitativ zu bestimmen, wurden Konzentrationsmessungen an sechs Positionen in dem 80 m² großen Raum simultan durchgeführt. Zur Ermittlung der Abklingraten der Aerosolkonzentration in der Raumluft wurde das Particle Imaging Verfahren angewendet. Dazu wird der Raum zunächst mit sehr langlebigen Aerosolpartikel, deren Größenverteilung dem beim Atmen, Sprechen und Singen emittierten Aerosolpartikeln entspricht, homogen und mit hoher Konzentration vernebelt. Die Langlebigkeit des Aerosols ist sehr wichtig, da sonst eine Verfälschung der Messergebnisse durch Verdunstung auftreten würde. Ferner ist die geringe Größe wichtig, da sich die Aerosolpartikel sonst im Laufe der Zeit absetzen würden, was ebenfalls systematische Messfehler bewirken würde. Das Aerosol wird mit einem gepulsten Laser beleuchtet und mit einer Kamera mit geeignetem Objektiv abgebildet und für die Weiterverarbeitung gespeichert. Die Anzahl der Partikelbilder auf dem Sensor entspricht der Anzahl der Aerosolpartikel im beleuchteten Volumen. Die Anzahl auf dem Sensor darf nicht zu hoch sein, da überlappende Partikelbilder die Zählung systematisch verfälschen würde. Aus diesem Grund muss der Abbildungsmaßstab des optischen Systems an die Anfangskonzentration des Aerosols angepasst werden. Zur Detektion der Partikelbilder werden digitale Filter angewendet, welche das Rauschen unterdrücken, und anschließend wird mittels eines Intensitätsschwellwerts der Hintergrund entfernt. Als Ergebnis dieser Bildvorverarbeitung verbleiben auf dem Bild lediglich die Partikelbilder, die dann gezählt werden. Ohne diese Bildvorverarbeitung könnten stochastisches Bildrauschen fälschlich als Signal interpretiert werden, was zu systematischen Messfehlern führen würde. Durch Aufnahmen mit einer festen Frequenz über einen ausreichend langen Zeitraum können die einzelnen Partikelbilder in jeder einzelnen Aufnahme zuverlässig gezählt werden. Als Ergebnis der Messungen ergibt sich die Anzahl im Messvolumen über der Zeit, woraus Kenngrößen wie z.B. die Abklingrate, Halbwertszeit etc. ermittelt werden können.

Um die Funktionalität des TROTEC TAC V+ Raumlufthereinigers in einem 80 Quadratmeter großen Raum zu analysieren, wurde die Aerosolkonzentration an 6 unabhängigen Orten im Raum simultan gemessen. Aus Symmetriegründen wurde nur auf der Symmetrieachse des Raumes und in einer Raumhälfte die Konzentration bestimmt. Mit einem PIVTEC Seedinggenerator wurde aus Di-2-ethylhexyl-sebacat (DEHS) das Aerosol mit einer Partikelgrößenverteilung zwischen 0,1 – 2 µm und einem mittleren Durchmesser von ca. 1 µm erzeugt [19]. Zur Aufnahme der Aerosolpartikel wurden 6 PCO.edge 5.5 sCMOS Kameras mit Zeiss Makro-Objektiven mit einer Brennweite von 50 mm verwendet. Für die Beleuchtung des Aerosols im Messvolumen wurden 2 Quantel Evergreen 200 Laser genutzt, wobei die Laser so aufgestellt wurden, dass sich jeweils 3 Messpunkte (Kameras) einen Laserstrahl zur Beleuchtung des lokalen Messvolumens teilen (MP1 – MP3 und MP4 – MP6). Die einzelnen Kameras und Laser wurden mit der Software DAVIS von LaVision zentral angesteuert, sodass die Aufnahmen aller 6 Kameras synchron durchgeführt wurden. Die Aufnahmerate betrug 1 Hz.

Abbildung 12 zeigt die optisch verzerrte Panoramaaufnahme der Versuchsanordnung in dem Raum und Abbildung 13 verdeutlicht in der Draufsicht die Geometrie und Abmessung des Raumes sowie die Positionen des Gerätes und der sechs Messstellen. Es wurden zwei Gerätepositionen gewählt. Position A kann als quasi optimale Position angesehen werden. Eine Positionierung in der Raummitte wäre noch vorteilhafter im Hinblick auf die Filtereffizienz gemäß Abbildung 11, aber eine zentrale Aufstellungsposition wird in den seltensten Fällen in der Praxis realisiert werden. Position B verdeutlicht die ungünstigste Position im Raum, da die

Aufstellung in der Ecke des Raumes und die Lampen an der Decke eine optimale Raumluftrömung verhindern werden, gemäß Abbildung 10.



Abbildung 12: Optisch verzerrte Panoramaaufnahme des Versuchsraumes mit den Komponenten für die Konzentrationsmessungen

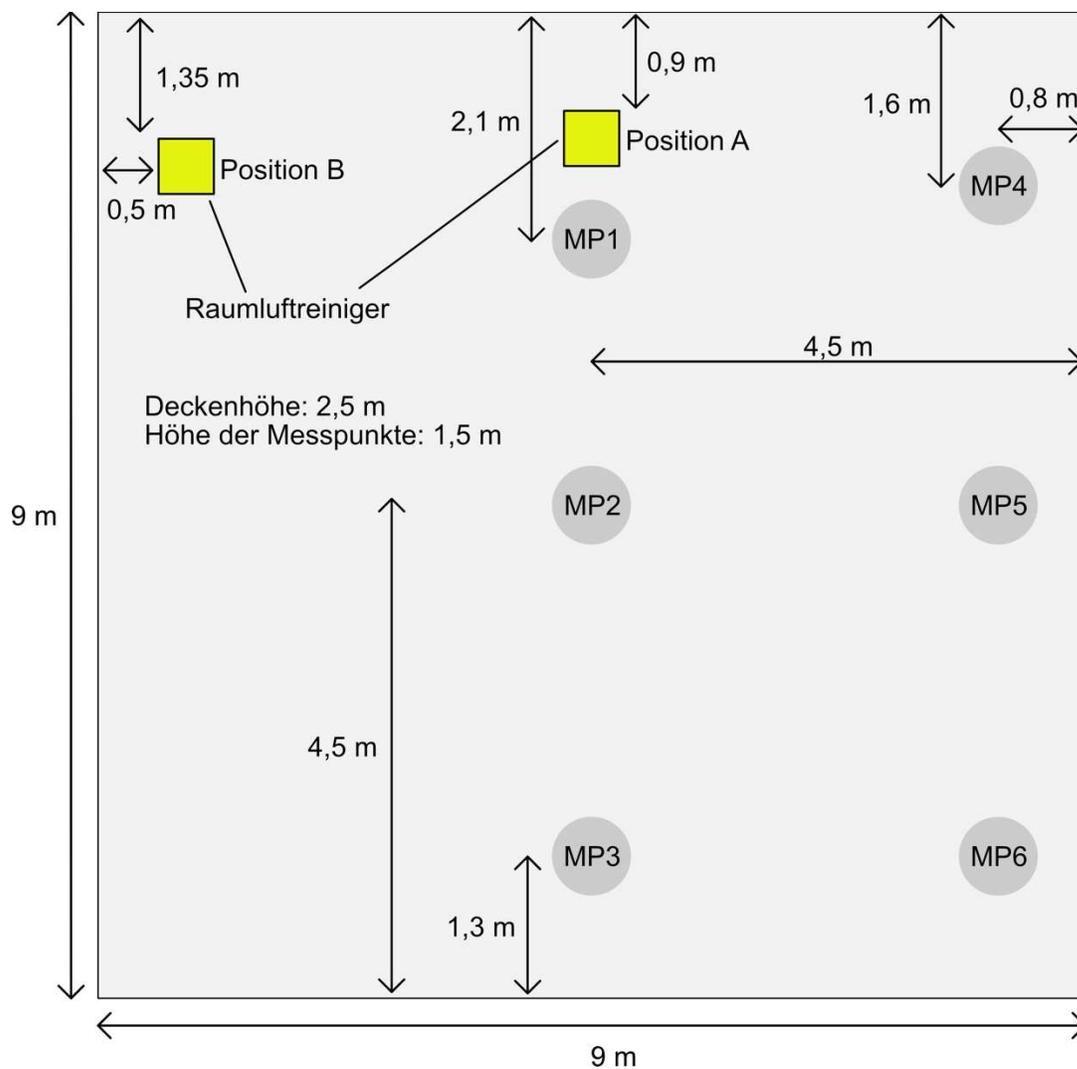


Abbildung 13: Anordnung der Komponenten im Raum für die Konzentrationsmessungen

6. Ergebnisse der Konzentrationsmessungen

Mit Hilfe des in Abschnitt 2 verwendeten Versuchsaufbaus wurde zunächst visuell der Abscheidegrad am Austritt des Gerätes verifiziert. Dazu wurde der gesamte Raum mit einem DEHS Aerosol mit einem Durchmesser von $0,1 - 2 \mu\text{m}$ und einem mittleren Durchmesser von ca. $1 \mu\text{m}$ [19] homogen vernebelt. Mit Hilfe eines Laserlichtschnittes im Bereich der Ausströmung wurde gemessen, ob noch Aerosol aus dem Auslassbereich des Gerätes herauskommt. Abbildung 14 zeigt, dass der an der oberen Ecke des Raumluftreinigers austretende Freistrahls bei den verschiedenen Volumenströmen frei von Aerosol ist (schwarzer Bereich). Die Umgebung des Freistrahles ist hingegen vollständig mit Aerosol kontaminiert (weiße Bereiche). Damit ist die Leistungsfähigkeit des Filters der Klasse H14 selbst bei hohen Volumenströmen optisch klar erkennbar. Gut zu sehen ist auch die turbulente Struktur des Freistrahles und das Entrainment, d.h. die Einmischung von mit Aerosol belasteten Strömungsbereichen in den sauberen Freistrahls [24]. Dieser Entrainment- bzw. Vermischungseffekt ist sehr wichtig für einen effizienten Transport des Aerosols zum Ansaugbereich des Raumluftreinigers.

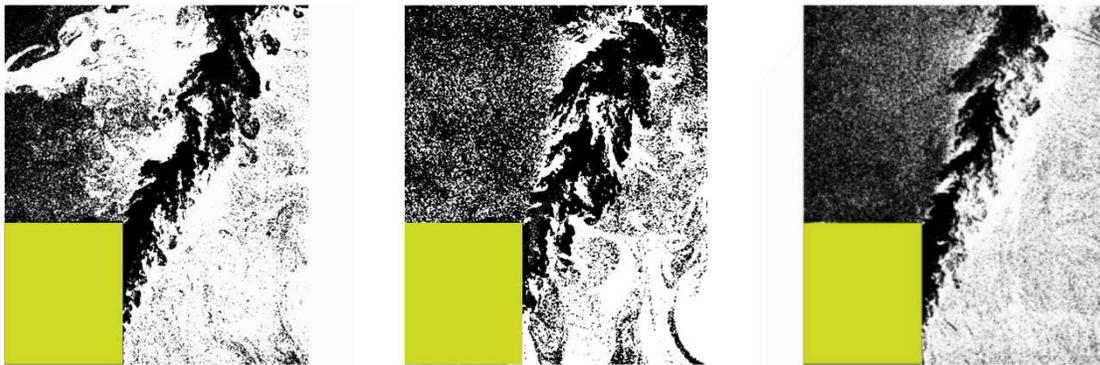


Abbildung 14: Darstellung der Aerosolverteilung im Bereich der Ausströmung bei einem Volumenstrom von $1000 \text{ m}^3/\text{h}$

Abbildung 15 zeigt beispielhaft den Verlauf der Aerosolkonzentration über der Zeit. In der linken Abbildung ist die Aerosolkonzentration bei ausgeschaltetem Raumluftreiniger als Referenz dargestellt. Da alle Öffnungen in dem Raum dicht abgeklebt wurden und die Aerosolpartikel sich kaum absetzen, ist die Konzentration weitgehend konstant über die betrachtete Messzeit, so dass eine Beeinflussung der Konzentrationsmessungen bei den Messungen mit eingeschaltetem Gerät durch natürliche Abscheidungsprozesse nicht beeinflusst wird. Darüber hinaus wurden Tests bei laufendem Gerät ohne F7 und H14 Filter durchgeführt. Dass der Abfall der Partikelkonzentration geringfügig stärker ist als im Fall ohne Betrieb des Raumluftreinigers ist darauf zurückzuführen, dass einige wenige Aerosolpartikel aufgrund der Zentrifugalkräfte im Gebläse abgeschieden werden. Ein Flüssigkeitsfilm konnte aber weder auf dem Lüfter noch im Gehäuse des Gebläses festgestellt werden.

Die Ergebnisse verdeutlichen klar, dass kleine langlebige Tröpfchenkerne oder Tröpfchen unter Bedingungen, bei denen sich die Verdunstungsrate mit der Kondensationsrate im Gleichgewicht befindet, quasi dauerhaft in der Luft verbleiben. Die angegebenen Werte für die Abklingzeiten in Abbildung 15 (links) ermöglichen abzuschätzen, wie lange es dauert bis die Aerosolkonzentration aufgrund von Absetzungsphänomenen mit den Wänden einen gewünschten Wert erreicht. Aufgrund der sehr kleinen Abklingkonstante ist klar, dass das

Aerosol über viele Stunden Infektionen hervorrufen kann, wenn es nicht herausgefiltert wird oder die zeitliche Deaktivierung der Viren eine Infektion unwahrscheinlich macht.

Es ist auch offensichtlich, dass das Aerosol, da es nicht vollständig verdunstet, durch die Luftströmung über sehr große Strecken (im Prinzip viele Kilometer) transportiert werden kann. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei diesem Transport die Konzentration und damit die Infektionswahrscheinlichkeit aufgrund von zwei Prozessen enorm abnimmt. Einerseits sorgt die turbulente Diffusion für eine räumliche Verbreitung des Aerosols, die auch dann stattfindet, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit Null ist. Andererseits wird das über einen Zeitraum freigesetzte Aerosol räumlich stark gestreckt und daher verdünnt, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit nicht Null ist. Wird z.B. bei leichter körperlicher Belastung über einen Zeitraum von 2 Sekunden 1 Liter Luft ausgeatmet und die umgebende Luft hat eine Geschwindigkeit von 1 m/s, dann wird die ausgeatmete Luft aufgrund der Strömung über einen Bereich von 2 m gestreckt. Die Konzentration wird daher rechnerisch um den Faktor 20 abnehmen und damit die Virenlast im Nachlauf der Person, von der das Aerosol ausgeatmet wird. Werden Viren z.B. von einem Radfahrer ausgeatmet, der mit einer Geschwindigkeit von 10 m/s fährt, dann wird die Virenlast im Nachlauf rechnerisch allein aufgrund der Geschwindigkeit um den Faktor 200 verdünnt. Wird noch die turbulente Diffusion berücksichtigt, dann nimmt die Konzentration nochmal um mindestens 1 – 2 Größenordnungen ab. Hinzu kommt noch, dass nicht alle Aerosolpartikel Viren tragen, siehe Kapitel 8. In der freien Natur ist daher bei ausreichender Windgeschwindigkeit eine Aerosolinfektion extrem unwahrscheinlich.

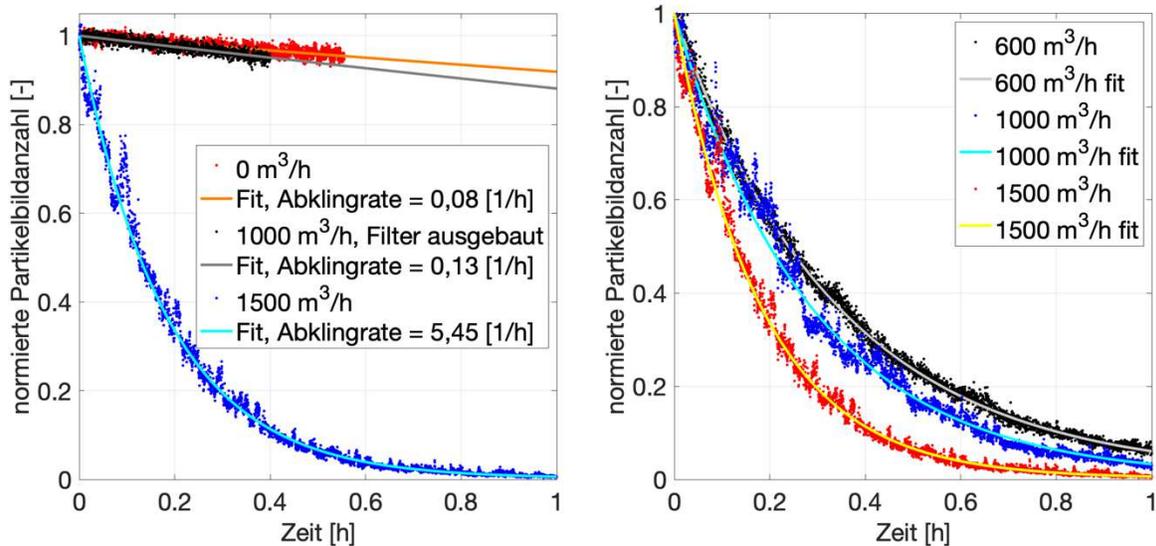


Abbildung 15: Abnahme der Aerosolkonzentration mit der Zeit für verschiedene Volumenströme und zugehörige exponentielle Fitfunktionen

In Abbildung 15 (rechts) ist die Abnahme der Aerosolkonzentration in dem 80 m² großen Raum in Abhängigkeit von der Zeit und dem Volumenstrom des Raumlufthereinigers dargestellt. Die sehr effiziente Abnahme der Konzentration innerhalb weniger Minuten zeigt die Leistungsfähigkeit der F7 / H14 Filterkombination in Verbindung mit dem Volumenstrom des Raumlufthereinigers. Der exponentiell abnehmende Verlauf der Aerosolkonzentration ermöglicht es, charakteristische Größen quantitativ zu bestimmen, die für die Bewertung der Filterleistung ganz wesentlich sind. Die Abklingkonstante ist ein Maß für die Effizienz der Filterung. Je größer der Wert, desto besser die Filterwirkung und desto kürzer die Zeit, die zur Filterung der Raumlufte benötigt wird. Die Halbwertszeit gibt an, wie lange es dauert bis die

Aerosolkonzentration am Ort der Messung auf die Hälfte abgenommen hat. Die mittlere Verweilzeit charakterisiert, wie lange die an den jeweiligen Messpositionen emittierten Aerosole statistisch im Raum verweilen bis sie vom Raumlufreiniger abgeschieden werden.

Tabelle 1: Abnahme der Aerosolkonzentration mit der Zeit für verschiedene Volumenströme. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

Messposition	600 m ³ /h (Position A)	1000 m ³ /h (Position A)	1500 m ³ /h (Position A)	1000 m ³ /h (Position B)
MP1	3,30 0,21 0,30	4,13 0,17 0,24	6,06 0,11 0,17	3,35 0,21 0,30
MP2	3,04 0,23 0,33	3,86 0,18 0,26	5,95 0,12 0,17	3,04 0,23 0,33
MP3	2,90 0,24 0,34	3,48 0,20 0,29	5,48 0,13 0,18	3,22 0,22 0,33
MP4	3,11 0,22 0,32	4,03 0,17 0,25	6,16 0,11 0,16	3,47 0,20 0,29
MP5	3,05 0,23 0,33	3,82 0,18 0,26	6,05 0,11 0,17	3,25 0,21 0,31
MP6	2,86 0,24 0,35	3,65 0,19 0,27	5,62 0,12 0,18	2,95 0,24 0,34
Abklingrate [1/h] Halbwertszeit [h] mittlere Verweilzeit [h]				

Die Filterleistung ist stark vom Volumenstrom des Raumlufreinigers abhängig, aber trotz der Raumgröße nur wenig vom Abstand zum Gerät. Bei 600 m³/h ist bei Position 1 nach rund 12 Minuten die Aerosolkonzentration halbiert und an der am weitesten entfernten Position 6 nach ca. 14 Minuten. Bei einem Volumenstrom von 1500 m³/h dauert eine Halbierung der Aerosolkonzentration bei Position 1 rund 6 Minuten und 7 Minuten an der Position 6.

In der rechten Spalte sind zum Vergleich die Werte für einen Volumenstrom von 1000 m³/h für die Position B des Raumes angegeben. Im Vergleich mit den Ergebnissen an der Position A bei gleichem Volumenstrom ergibt sich eine Beeinträchtigung der Filterleistung von rund 20%. Eine schlechte Position kann folglich durch einen größeren Volumenstrom kompensiert werden, allerdings ist dann bei gleicher Filterleistung der Energiebedarf größer und die Geräuschentwicklung höher. Daher ist die Auswahl der Position durchaus ein wichtiger Punkt.

In der Tabelle 2 wurde ein belasteter und ein neuer Filter der Klasse H14 vergleichend vermessen. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheit von $2\sigma=0,14$ [1/h] lässt sich kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Filtern feststellen. Es ist daher zu erwarten, dass die Filter je nach Belastung eine Lebensdauer von mehreren Jahren aufweisen können.

Tabelle 2: Vergleich zwischen einem belasteten und einem unbelasteten Filter

Messposition	1000 m ³ /h (Position A), belasteter Filter	1000 m ³ /h (Position A), neuer Filter
MP1	4,13 0,17 0,24	4,22 0,16 0,24
MP2	3,86 0,18 0,26	3,75 0,18 0,27
MP3	3,48 0,20 0,29	3,50 0,20 0,29
MP4	4,03 0,17 0,25	4,09 0,17 0,24
MP5	3,82 0,18 0,26	3,82 0,18 0,26
MP6	3,65 0,19 0,27	3,60 0,19 0,28
Abklingrate [1/h] Halbwertszeit [h] mittlere Verweilzeit [h]		

7. Abhängigkeit der Filterleistung von der Raumgeometrie

Die Filterleistung ist nicht nur abhängig von dem Gerät und dem Aufstellungsort, sondern auch von der Geometrie des Raumes. Insbesondere lang gestreckte Räume lassen sich schlechter filtern, da der Strahl an der Decke irgendwann ablöst und sich dann ein Rezirkulationsgebiet ausbildet, das nicht bis zur gegenüberliegenden Wand reicht. Diese Situation ist vergleichbar mit der Situation in Abbildung 11 (rechts) wobei die Ablösung der Strömung von der Decke nicht durch ein Objekt, sondern durch die Reduzierung des Impulses des Wandstrahles mit zunehmender Entfernung, bedingt ist. Die Reduzierung des Impulses wird durch die Wandreibung, die turbulente Luftbewegung und das in Abbildung 14 sehr schön zu sehende Entrainment verursacht. Gerade durch das Entrainment werden langsame Strömungsbereiche mit Aerosol durch den gefilterten Wandstrahl beschleunigt und die dafür erforderliche Arbeit führt zur Verringerung des Wandstrahlimpulses. Die Turbulenz führt primär zu einer Strahlverbreiterung, was ebenfalls zu einer lokalen Impulsabnahme führt und daher die Ablöseposition des Wandstrahles näher zum Gerät verlagert. Aufgrund dieser Effekte ist es möglich, dass der vordere Raumbereich sehr gut gefiltert wird, aber der hintere Bereich nicht. Um diese Situation generisch zu untersuchen, wurden Messungen in einem langgestreckten Raum durchgeführt, der eine Querschnittsfläche von ca. 4 m² aufweist. Es wurden zwei verschiedene Raumlängen untersucht: 22,4 m (Versuchsaufbau siehe Abbildung 16) und 11,8 m (Abbildung 17).

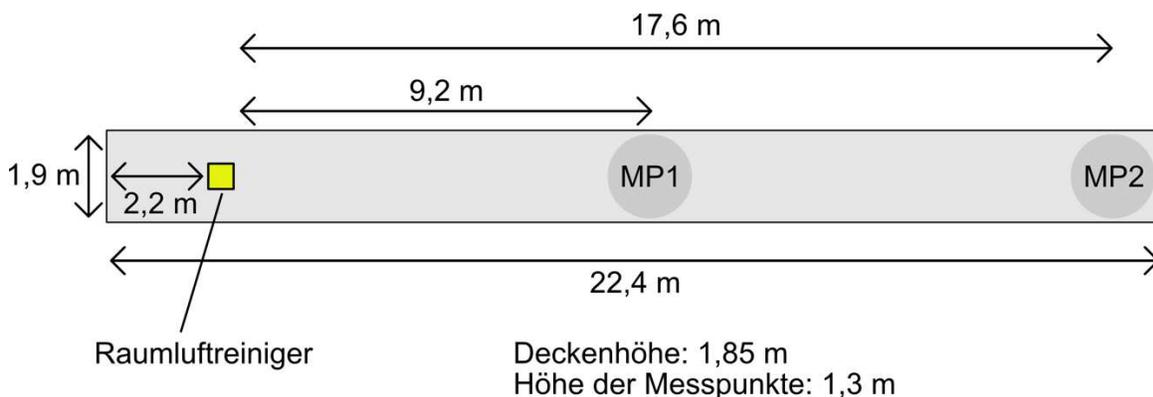


Abbildung 16: Anordnung der Komponenten in der Konfiguration langer Flur für die Konzentrationsmessungen

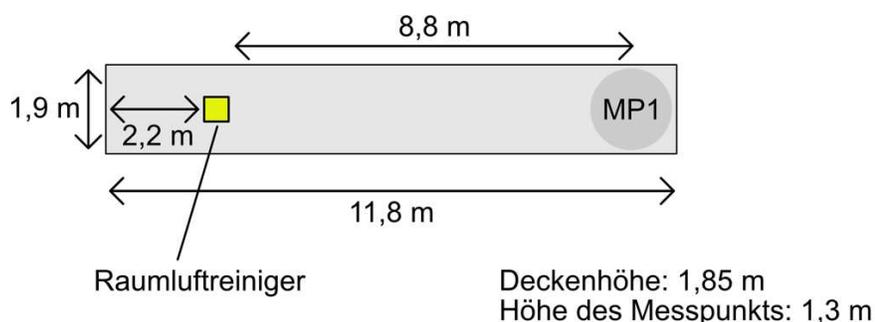


Abbildung 17: Anordnung der Komponenten in der Konfiguration kurzer Flur für die Konzentrationsmessungen

Die aus den Konzentrationsmessungen ermittelten Größen sind in den Tabellen 3 und 4 dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass auch in diesen lang gestreckten Räumen eine recht schnelle Abscheidung der Aerosolpartikel erzielt wird. Auch an dem weit entfernten Messpunkt MP2 in der langen Konfiguration ist eine deutliche Abnahme der Aerosolkonzentration festzustellen, die in etwa der Abnahme an der Position MP1 entspricht. Erwartungsgemäß werden die Aerosolpartikel in der Konfiguration kurzer Flur schneller abgeschieden. Aus dieser Analyse folgt, dass bei sehr langgestreckten Räumen die Verwendung von zwei Raumlufthereinigern an den jeweiligen Enden empfehlenswert sein kann.

Tabelle 3: Abnahme der Aerosolkonzentration in der Konfiguration langer Flur mit der Zeit für verschiedene Volumenströme. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

Volumenstrom	MP1	MP2
600 m ³ /h	4,21 0,16 0,24	3,98 0,17 0,25
1000 m ³ /h	4,83 0,14 0,21	4,49 0,15 0,22
1585 m ³ /h	6,98 0,10 0,14	7,33 0,09 0,14
Abklingrate [1/h] Halbwertszeit [h] mittlere Verweilzeit [h]		

Tabelle 4: Abnahme der Aerosolkonzentration in der Konfiguration kurzer Flur mit der Zeit für verschiedene Volumenströme. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

Volumenstrom	MP1
600 m ³ /h	7,37 0,09 0,14
1000 m ³ /h	9,91 0,07 0,10
1585 m ³ /h	14,57 0,05 0,07
Abklingrate [1/h] Halbwertszeit [h] mittlere Verweilzeit [h]	

8. Vergleich der Abscheiderate des F7 und H14 Filters

RLT Anlagen zur Feinstaubabscheidung mit hoher Luftreinheit sind in der Regel nicht mit Filtern der Klasse H14 ausgerüstet, sondern oft nur mit Filtern der Klasse F7. Es stellt sich daher die Frage, ob ein Filter der Klasse F7 ausreicht, um beim Atmen, Sprechen, Singen, Husten und Niesen erzeugte Aerosolpartikel zuverlässig und effizient abzuscheiden. In [23] wird behauptet, dass mit einer doppelten Filterung der Raumluf mit einem Filter der Klasse F7 insgesamt 99 % der luftgetragenen Bakterien und Viren aus einem Luftstrom entfernt werden. SARS-CoV-2 ist etwas 0,15 µm groß, aber da es entweder über Tröpfchen oder Tröpfchenkerne übertragen wird, sind eher Abscheidegrade im Bereich 0,3 – 1 µm zu betrachten. Der Abscheidegrad eines Filters der Klasse H14 beträgt 99,995 % für Partikel mit einem Durchmesser im Bereich kleiner 0,3 µm und nahezu 100% für alle größeren Durchmesser. Für einen Filter der Klasse F7 beträgt er 40 – 65% im Bereich 0,3 – 1 µm und noch deutlich weniger im Bereich kleiner 0,3 µm. Selbst eine zehnfache Filterung des Aerosols mit einem Filter der Klasse F7 liefert ein schlechteres Abscheideergebnis als die einfache Filterung mit einem Filter der Klasse H14. Die Annahme, dass ein großer Volumenstrom mit

einem F7 Filter zu vergleichbaren Ergebnissen führt wie ein H14 Filter bei kleinem Volumenstrom ist daher nicht plausibel für die betrachtete Größenklasse. Es ist auch zu berücksichtigen, dass die Abscheidung kleiner Partikel auf physikalischen Mechanismen beruht, die nur dann effizient arbeiten, wenn die Strömungsgeschwindigkeit im Filter klein ist. Daher ist eine deutliche Steigerung des Volumenstromes nur dann ratsam, wenn auch die Gesamfläche des Filters vergrößert wird. Ein hoher Volumenstrom führt zwangsläufig auch zu einer großen Luftgeschwindigkeit im Raum und das kann nach Abbildung 2 unangenehm sein. Ferner nimmt mit der Luftgeschwindigkeit auch der Lärm zu. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass eine große Luftgeschwindigkeit in den Lüftungskanälen zu einer Zunahme der Verluste führt und damit der Energiebedarf steigt. Auf der anderen Seite ist der Strömungswiderstand eines Filters der Klasse F7 deutlich kleiner als einer der Klasse H14 was für den Filter der Klasse F7 spricht. Um die Filterleistung der beiden Filter vergleichend bewerten zu können, wurden Versuche bei einem Volumenstrom von 1000 m³/h in dem in Abbildung 17 dargestellten Raum durchgeführt.

Tabelle 5: Abnahme der Aerosolkonzentration in der Konfiguration kurzer Flur mit der Zeit für verschiedene Filterkonfigurationen. F7 + H14, nur F7, keine Filter, Gerät ausgeschaltet. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

Volumenstrom	MP1
1000 m ³ /h (F7 + H14)	9,91 0,07 0,10
1000 m ³ /h (nur F7)	4,15 0,17 0,24
1000 m ³ /h (ohne Filter)	0,65 1,07 1,54
0 m ³ /h	0,66 1,05 1,52
Abklingrate [1/h] Halbwertszeit [h] mittlere Verweilzeit [h]	

Die Ergebnisse der Untersuchung verdeutlichen, dass die Halbwertszeit für die F7 + H14 Konfiguration 4,2 Minuten beträgt, für den F7 Filter alleine 10,2 Minuten und 64 Minuten ohne Filter. Die Analyse zeigt, dass eine RLT Anlage mit Filtern der Klasse F7 bei mehrfacher Filterung durchaus zu guten Abscheidegraden kommt und daher sollte eine vorhandene RLT Anlage mit Filtern der Klasse F7 oder besser auch unbedingt betrieben werden. Trotzdem sollte der Frischluftanteil möglichst groß sein, um den Nachteil zum Filter der Klasse H14 bei der Abscheidung der kleinen Aerosole zu kompensieren.

Wenn eine schnelle und hoch effiziente Filterung erforderlich ist, die auch die kleinsten Aerosolpartikel zuverlässig herausfiltert, dann ist eine Filterkombination der Klasse F7 + H14 zu empfehlen. In Bereichen, die über keine RLT Anlagen verfügen und die nicht zu voluminös sind, bieten mobile Raumluftfilter eine sehr gute Möglichkeit die Aerosole in der Raumluft ohne die Nachteile der freien Lüftung zu entfernen.

9. Betrachtung von Partikeln und deren Infektiosität

Im Rahmen dieser Studie wurde primär die Abscheidung von Aerosolpartikeln mit einem Durchmesser im Bereich 0,3 – 2 µm betrachtet, da diese Größe einerseits physikalisch schwer abzuscheiden ist und weil andererseits diese Größe für SARS-CoV-2 Infektionen aus unserer Sicht besonders relevant sind. Bei Betrachtung der potentiell als gefährlich betrachteten Aerosole müssen 2 Punkte beachtet werden. Wie eingangs erläutert muss zum einen bei der

Größe der Aerosolpartikel zwischen dem nassen Zustand und dem trockenen Zustand unterschieden werden. Werden die Partikel in der Lunge oder dem Atemtrakt erzeugt, so sind sie zunächst nass, d.h. die Feststoffe (Salze, Eiweiße, ...) und eventuell vorhandene Viren befinden sich in einer wässrigen Umgebung. Verlassen diese nassen Aerosolpartikel den Körper, verdunstet die wässrige Phase in kurzer Zeit, wenn die Luftfeuchtigkeit moderate Werte aufweist. Für kleine Partikel mit Durchmessern im Bereich weniger Mikrometer geschieht dies bei geringer umgebender Luftfeuchtigkeit innerhalb von Sekundenbruchteilen [6]. Übrig bleiben feste Tröpfchenkerne, die nur noch einen sehr geringen Wasseranteil aufweisen. Geht man vereinfachend davon aus, dass das gesamte Wasser verdunstet, so ergeben sich die in Abbildung 18 dargestellten Durchmesser der trockenen Aerosolpartikel ausgehend von den nassen Aerosolpartikel. Dargestellt sind 3 Kurven für verschiedene typische Feststoffmassenanteile von 1, 3 und 5% [31]. Die Dichte von Wasser wurde mit 1000 kg/m^3 , die Dichte der Feststoffe mit 1300 kg/m^3 angenommen.

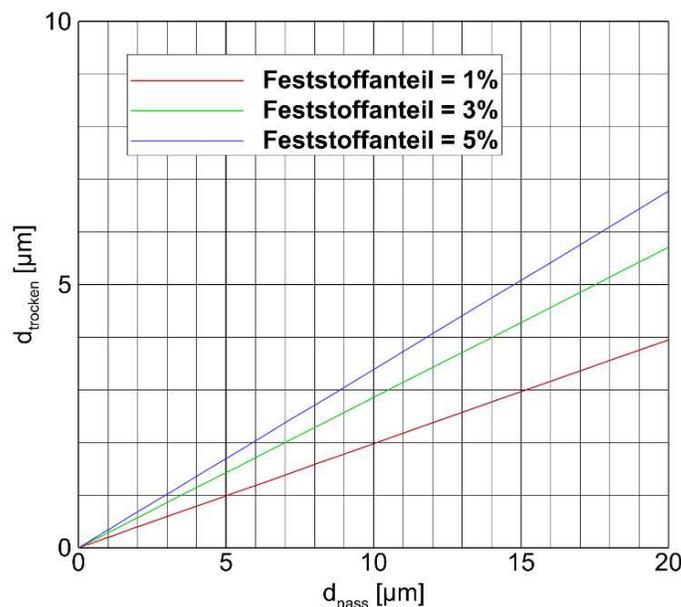


Abb. 18: Durchmesser der getrockneten Aerosolpartikel in Abhängigkeit des anfänglichen Durchmessers der nassen Aerosolpartikel für 3 verschiedene Feststoffmassenanteile

Der Durchmesser der freigesetzten Aerosolpartikel liegt in der Regel im Bereich kleiner $10 \mu\text{m}$, wobei das Maximum der Größenverteilung näherungsweise bei $1 \mu\text{m}$ liegt [32, 33]. Für eine direkte Infektion sind Durchmesser in diesem Bereich maßgeblich, aber für die indirekte Infektion sind die aus Abbildung 18 ablesbaren Durchmesser für die jeweiligen Feststoffanteile zu berücksichtigen. Für die Filterung sind bei moderater Luftfeuchtigkeit ebenfalls letztere relevant. Die Größe der Aerosolpartikel, die abgeschieden werden müssen, liegt daher nach Abbildung 18 im Bereich $0,3 - 3 \mu\text{m}$, wobei nach dieser Rechnung Größen um $0,3 \mu\text{m}$ den überwiegenden Teil der Aerosolpartikel ausmachen. Gemäß dieser Überlegung ist die von uns in dieser Studie primär betrachtete Aerosolgrößenverteilung höchst relevant im Hinblick auf eine SARS-CoV-2 Infektion.

Des Weiteren stellt sich die Frage, wie hoch die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Aerosolpartikel überhaupt ein infektiöses Virus beinhaltet. Hierfür wurde eine einfache Abschätzung durchgeführt, wobei die Virenkonzentration [Viren/ml] auf die Anzahl von Aerosolpartikel pro Volumen [Tröpfchen/ml] bei einem gewissen Partikeldurchmesser bezogen wurde. Das Ergebnis dieser Betrachtung ist in Abbildung 19 dargestellt. Die Wahrscheinlichkeiten sind für

4 verschiedene Virenkonzentrationen angegeben, die sich aus [34] ergeben. Nach diesen Untersuchungen waren 7×10^6 Viren/ml eine durchschnittliche Virenkonzentration und $2,35 \times 10^9$ Viren/ml die maximale Virenkonzentration in der Atemwegsschleimhaut. Es ist ersichtlich, dass gerade kleine Aerosolpartikel nur eine geringe Wahrscheinlichkeit haben, ein Virus zu transportieren. Nicht jedes von einem infizierten Menschen abgegebene Aerosolteilchen ist somit infektiös.

Wird weiter angenommen, dass ein trockenes Aerosolpartikel einen Durchmesser von $1 \mu\text{m}$ hat, so ergibt sich aus Abbildung 18 bei einem Feststoffanteil von 1% ein Durchmesser des nassen Partikels von $5 \mu\text{m}$. Bei einer Virenkonzentration in der Atemwegsschleimhaut von rund 1×10^9 Viren/ml folgt hieraus eine Wahrscheinlichkeit, dass dieses Aerosolpartikel ein Virus enthält von ca. 7%. Somit ist nur etwa jedes 14. Aerosolpartikel infektiös. Auf der anderen Seite überwiegen bei weitem gerade die kleinen Aerosolpartikel in der Raumluft, so dass diese nicht vernachlässigt werden können, insbesondere, wenn man sich lange in einem mit infektiösem Aerosol kontaminierten Raum aufhält. Daher ist eine sehr gute und effiziente Abscheidung der Aerosolpartikel mit kleinem Durchmesser oder eine gute Frischluftzufuhr zur Verdünnung der Virenlast im Raum sehr wichtig, um das indirekte Infektionsrisiko zu minimieren.

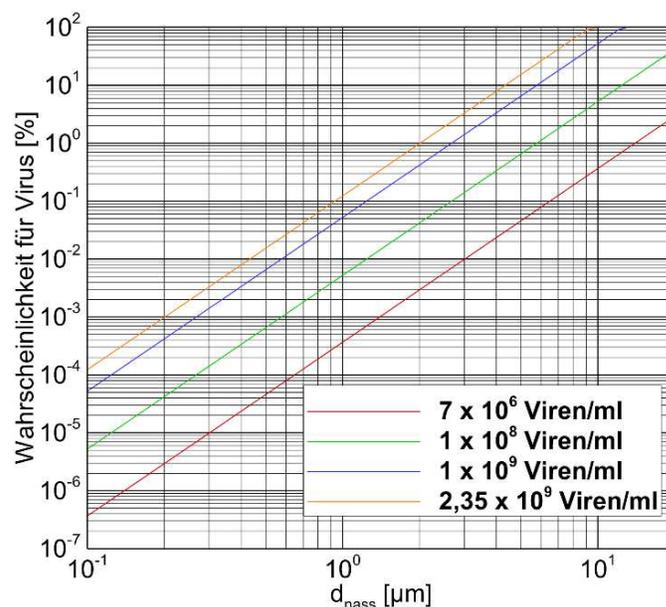


Abb. 19: Ergebnis einer einfachen Abschätzung für die Wahrscheinlichkeit, dass ein nasses Aerosolpartikel ein Virus enthält

Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die quantitativen Messergebnisse zeigen, dass sich mit dem getesteten TROTEC TAC V+ Raumlufreiniger, aufgrund des großen Volumenstromes und der Filterkombination der Klasse F7 + H14, die Aerosolkonzentrationen selbst in Räumen mit einer Fläche von 80 m^2 je nach Volumenstrom in 6 – 15 Minuten halbieren lässt. Bei Räumen mit 20 m^2 wird eine Halbierung je nach Volumenstrom in 3 – 5 Minuten realisiert. Es ist daher mit Raumlufreinigern möglich, die Aerosolkonzentration in Räumen kleiner und mittlerer Größe problemlos auf einem niedrigen Niveau zu halten.

Selbst in einen 22m langen, flurartigen Raum mit über 40 m² konnte bei maximalem Volumenstrom eine Halbierung der Aerosolkonzentration innerhalb von rund 5 Minuten realisiert werden. Bei größeren Räumen, Räumen mit vielen Objekten oder sehr ungünstigen Geometrien sollten ggf. mehrere Raumlufreiniger eingesetzt werden, um alle Bereiche des Raumes zügig zu filtern. Aufgrund der Gefährlichkeit der SARS-CoV-2 Infektion sollte die Luftwechselrate aus unserer Sicht mindestens Werte im Bereich 4 – 8 erreichen.

Um eine möglichst effektive Filterung der Raumluf zu ermöglichen, sollte der Raumlufreiniger möglichst an der längsten Raumseite in der Mitte positioniert sein. Ferner sollte der Deckenbereich in Richtung der Ausströmungen möglichst nicht von Objekten unterbrochen werden, da sonst die Ausbreitung der Wandstrahlen gestört wird und sich ungünstige Wirbelströmungen im Raum etablieren können. Bei ungünstigen Betriebsbedingungen sollte der Volumenstrom erhöht werden, um eine angemessene Filterleistung zu gewährleisten. Es ist auch zu empfehlen, das Gerät im Dauerbetrieb zu betreiben und nicht stoßartig, damit sich keine erhöhte Virenkonzentration im Raum ausbilden kann.

Leistungsstarke Raumlufreiniger mit F7 + H14 Filterkombination können die Aerosolkonzentration in Räumen kleiner und mittlerer Größe auf einem niedrigen Niveau halten und daher kann das indirekte Infektionsrisiko auch bei geschlossenen Fenstern und ohne geeignete RLT Anlage durch diese Geräte stark reduziert werden. Sie sind daher sehr gut geeignet, um z.B. in Klassenzimmern, Geschäften, Warte- oder Behandlungszimmern, dauerhaft für eine geringe Virenlast zu sorgen, ohne sich um das Öffnen von Fenstern kümmern zu müssen und das Wohlbefinden im Raum zu beeinträchtigen. Ferner sorgen sie im Gegensatz zur freien Lüftung mit Fenstern auch dafür, dass eine wirkliche Reduzierung der Virenlast erfolgt, was bei der freien Lüftung oft nicht gewährleistet werden kann. Sie bieten auch gegenüber RLT Anlagen, die ohne oder mit einem geringen Frischluftanteil betrieben werden, den Vorteil, dass die Viren wirklich abgeschieden werden und nicht über andere Kanäle im Gebäude verteilt werden.

Damit der Raumlufreiniger nicht zur Virenschleuder wird, sollte der H14 Filter von dem Gerät einmal täglich für ca. 30 Minuten auf etwa 100°C aufgeheizt werden, um die Viren im Filter zu zerstören und der Entstehung von Biofilmen, Bakterien und Pilzen ohne gesundheitsschädliche chemische Zusatzstoffe oder UV-C Strahlung entgegenzuwirken.

Abschließend ist zu betonen, dass Raumlufreiniger, geöffnete Fenster und leistungsstarke RLT Anlagen zwar geeignete Werkzeuge sind, um dem indirekten Infektionsrisiko zu begegnen, aber das direkte Infektionsrisiko, das durch direktes Anhusten oder beim langen Unterhalten über kurze Distanz erfolgen kann, können sie nicht verringern. Es ist daher wichtig, weiterhin ausreichend große Abstände zu anderen Personen einzuhalten und Mund-Nasen-Bedeckungen oder partikelfiltrierende Atemschutzmasken zu tragen, damit eine direkte Infektion vermieden wird.

Anmerkung

Die Untersuchungen wurden durch die Firma TROTEC GmbH, Heinsberg, finanziell unterstützt. Der Raumlufreiniger TAC V+ wurde für die Untersuchungen von TROTEC bereitgestellt. Die Untersuchungen wurden unter Einhaltung der guten wissenschaftlichen Praxis durchgeführt. Die Unterstützung durch die Firma TROTEC hat keinerlei Auswirkung auf die dargestellten Ergebnisse.

Literatur

- [1] Jayaweera M, Perera H, Gunawardana B, Manatunge J (2020) Transmission of COVID-19 virus by droplets and aerosols: A critical review on the unresolved dichotomy. *Environ Res.* 2020 Sep; 188: 109819. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109819>
- [2] Morawska L, Cao J (2020) Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. *Environment International*, Volume 139, 105730
- [3] Zhang R, Lib Y, Zhang AL, Wang Y, Molina MY (2020) Identifying airborne transmission as the dominant route for the spread of COVID-19. *PNAS* (2020), 10.1073/pnas.2009637117, first published June 11
- [4] Lu J et al. (2020) COVID-19 Outbreak associated with air conditioning in restaurant, Guangzhou, China, 2020. *Emerging Infectious Diseases*, www.cdc.gov/eid, Vol. 26, No. 7, DOI: <https://doi.org/10.3201/eid2607.200764>
- [5] Kähler CJ, Hain R (2020) Fundamental protective mechanisms of face masks against droplet infections. *Journal of Aerosol Science* 148:105617, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105617>
- [6] Kähler CJ, Hain R (2020) Strömungsanalysen zur SARS-CoV-2 Schutzmaskendebatte. <https://www.unibw.de/lrt7/stroemungsanalysen-zur-sars-cov-2-schutzmaskendebatte>
<https://youtu.be/SM2QrPFC3MY>
- [7] Kähler CJ, Hain R (2020) Musizieren während der Pandemie - was rät die Wissenschaft? <https://www.unibw.de/lrt7/musizieren-waehrend-der-pandemie>
<https://youtu.be/0JmcjRhV-rs>
- [8] Wells WF, M.W. Wells MW (1936) Air-bone infection. *Journal A. M. A.*, Cambridge, pp. 1698–1703
- [9] Soper GA (1919) The lessons of the pandemic. *Science*, 49, pp. 501–506
- [10] Fernstrom A, Goldblatt M (2013) Aerobiology and its role in the transmission of infectious diseases. *Journal of Pathogens*, Volume 2013, article ID 493960, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/493960>
- [11] Doremalen van N, Bushmaker T, Morris DH, Holbrook MG, Gamble A, Williamson BN, Tamin A, Harcourt JL, Thornburg NJ, Gerber SI, Lloyd-Smith JO, de Wit E, Munster VJ (2020) Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1. *New England Journal of Medicine* 382:1564–1567, <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>
- [12] Pyankov OV, Bodnev SA, Pyankova OG, Agranovski IE (2018) Survival of aerosolized coronavirus in the ambient air. *Journal of Aerosol Science* 115:158–163, <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.09.009>
- [13] Morawska L, Milton DK (2020) It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19. *Clinical Infectious Diseases*, ciaa939, <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa939>
- [14] Klompas M, Baker MA, Rhee C (2020) Airborne Transmission of SARS-CoV-2 - Theoretical Considerations and Available Evidence. *JAMA*. Published online July 13, doi:10.1001/jama.2020.12458

- [15] McKie R (2020) Did singing together spread coronavirus to four choirs? 17. May, The Guardian / The Observer, <https://www.theguardian.com/world/2020/may/17/did-singing-together-spread-coronavirus-to-four-choirs>
- [16] Heinz E (2016) Wohnraumlüftung – frei und ventilatorgestützt. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
- [17] von Pettenkofer M (1858) Besprechung allgemeiner auf die Ventilation bezüglicher Fragen. Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. J.G. Cotta'sche Buchhandlung, München
- [18] DIN EN 16798 – Gebäude-Energieeffizienz mit LüKK-Systemen
- [19] VDI 2082 – Raumluftechnik Verkaufsstätten (VDI-Lüftungsregeln)
- [20] DIN 1946-4 – Raumluftechnik im Gesundheitswesen
- [21] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2002) Leitlinienentwurf: Ausführung und Betrieb von raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Krankenhäusern. Hyg Med 27. Jahrgang 2002 – Heft 3
- [22] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2015) Krankenhaushygienische Leitlinie für die Planung, Ausführung und den Betrieb von Raumluftechnischen Anlagen in Räumen des Gesundheitswesens. Hyg Med 2015; 40 – 12
- [23] Fachverband Gebäude-Klima e. V. (2020) Betrieb Raumluftechnischer Anlagen unter den Randbedingungen der aktuellen Covid-19-Pandemie. 03.08.2020, Version 3, www.fgk.de/images/Aktuelles/2020/08-20/RLT_Covid19_V3_200803.pdf
- [24] Etheridge D, Sandberg M (1996) Building Ventilation: Theory and Measurement. Wiley ISBN: 978-0-471-96087-4
- [25] Etheridge D (2011) Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design. Wiley ISBN: 978-0-470-66035-5
- [26] DIN 1946 Teil 2 (1994) Raumluftechnik: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- [27] <https://de.trotec.com/produkte-services/maschinen-highperformance/luftreinigung/raumluftreiniger-tac-v/>
- [28] Raffel M, Willert CE, Scarano F, Kähler CJ, Wereley ST, Kompenhans J (2018) Particle Image Velocimetry: a practical guide. Springer, 3. Auflage, ISBN-10: 9783319688510
- [29] Kähler CJ, Sammler B, Kompenhans J (2002) Generation and control of tracer particles for optical flow investigations in air. Experiments in Fluids 33:736–742
- [30] Küpper M, Asbach C, Schneiderwind U, Finger H, Spiegelhoff D, Schumacher S (2019) Testing of an indoor air cleaner for particulate pollutants under realistic conditions in an office room. Aerosol and Air Quality Research 19:1655–1665, doi: 10.4209/aaqr.2019.01.0029
- [31] Stadnytskyi V, et al. (2020) The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission. PNAS 117:11875–11877
- [32] Lee J, Yoo D, Ryu S, Ham S, Lee K, Yeo M, Min K, Yoon C (2019) Quantity, size distribution, and characteristics of cough generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection. Aerosol and Air Quality Research, 19, pp. 840–853

- [33] Johnson GR, Morawska L, Ristovski, ZD, et al. (2011) Modality of human exposed aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science* 42:839–851
- [34] Wölfel R, et al. (2020) Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. *Nature* 581:465–469