

# **Quantifizierung eines Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerätes zur Reduzierung der indirekten SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosolpartikel**

**Christian J. Kähler, Thomas Fuchs, Rainer Hain**

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

## **Übersicht**

SARS-CoV-2 Infektionen in Innenräumen durch Tröpfchen und Aerosole werden gegenwärtig als besonders bedeutend eingeschätzt. FFP2/3 Atemschutzmasken, die fest und dicht sitzen, bieten im Allgemeinen einen sehr guten Schutz. In öffentlichen Verkehrsmitteln, beim Einkauf oder im Wartezimmer sind sie daher bestens geeignet, um sich vor einer direkten und indirekten Infektion zu schützen. Leider erschweren diese Masken das Atmen und das Tragen kann auf Dauer unangenehm sein. Daher sollten diese Masken maximal 3 × 75 Minuten pro Tag getragen werden. Für Schulen oder bei der Arbeit sind sie daher kaum geeignet. Es stellt sich daher die Frage, wie Menschen in geschlossenen Räumen dauerhaft vor einer SARS-CoV-2 Infektion geschützt werden können. Große Sicherheitsabstände bieten einen Fremd- und Eigenschutz, aber sie schützen nicht vor einer indirekten Infektion, wenn die Virenlast im Raum groß ist. Mund-Nasen-Bedeckungen bieten nur einen Fremdschutz vor einer direkten Infektion aber sie schützen nicht vor einer indirekten Infektion. Das gleiche trifft auf Faceshields und kleine Schutzwände zu. Indirekte Infektionen können wirksam durch das freie Lüften mit Fenstern oder raumluftechnischen (RLT) Anlagen, die 100% Außenluft in den Raum leiten, verhindert werden, sofern die Luftwechselrate dem sechsfachen des Raumvolumens pro Stunde entspricht. Das freie Lüften mittels Fenstern ist aber selten effizient genug und spätestens im Winter ist das Öffnen von Fenstern nicht mehr möglich, ohne massiv Energie zu verschwenden und die Gesundheit sowie das Wohlbefinden der Menschen zu gefährden. Der Betrieb von RLT Anlagen wird in der kalten Jahreszeit ebenfalls sehr energieintensiv. Ferner sind RLT Anlagen in den meisten Gebäuden nicht vorhanden. Die Frage ist daher, wie ein weitgehend sicherer Schutz vor einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion in geschlossenen Räumen realisiert werden kann ohne thermische Energie und damit wertvolle Ressourcen zu vergeuden. Technisch lässt sich das Problem mit mobilen Entkeimungsgeräten oder Raumlufreinigern lösen, die die gefährlichen Aerosolpartikel abscheiden oder die Viren durch UV-Strahlung oder durch Kontakt mit Ladungsträgern inaktivieren. Das Potenzial der Geräte ist groß und, da viele deutsche Hersteller diese Geräte herstellen, sind sie auch verfügbar. Allerdings bieten viele der angebotenen Geräte keinen wirksamen Schutz, da der Volumenstrom zu klein, der Abscheidegrad der Filter zu gering und die Leistungsfähigkeit der UV-C und Ionisationseinheit zu schwach ist. Das Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät erscheint die Leistungsanforderungen zu erfüllen und daher wird das Gerät in dieser Studie auf seine Eignung zum Schutz vor einer SARS-CoV-2 Infektion hin analysiert und bewertet.

## 1. Einleitung

Nach gegenwärtigem Stand der Forschung wird SARS-CoV-2 hauptsächlich über Tröpfchen und Aerosolpartikel 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 und Aerosolpartikel 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 und Aerosolpartikel beim Ein- und Ausatmen bis zu einer festgelegten Größenklasse zuverlässig abscheiden, wenn sie fest und dicht am Gesicht anliegen [5, 6]. Werden diese Masken ohne Auslassventil verwendet, dann sind keine großen Sicherheitsabstände zwischen Personen erforderlich, um eine direkte Infektion zu verhindern. Darüber hinaus muss nichts unternommen werden, um indirekte Infektionen durch eine erhöhte Virenlast im Raum zu unterbinden, da partikelfiltrierende Atemschutzmasken auch vor diesem Übertragungsweg sicher schützen [5, 7].

Partikelfiltrierende Atemschutzmasken gehören zum Arbeitsschutz in Krankenhäusern, Laboratorien, Isolierstationen, OP-Sälen und sehr vielen technischen Arbeitsbereichen, in denen mit Feinstaub und gesundheitsschädlichen Stoffen gearbeitet wird (z.B. Schleifen, Schweißen, Löten). Das Argument, dass die SARS-CoV-2 Viren nicht zuverlässig abgeschieden werden könnten, weil die Viren kleiner als 0,16 µm sind, ist nicht richtig, denn SARS-CoV-2 wird ja mittels Tröpfchen oder Tröpfchenkernen transportiert und diese sind deutlich größer als einzelne Viren und können von geeigneten partikelfiltrierenden Masken zuverlässig abgeschieden werden [6]. Es ist auch zu berücksichtigen, dass ganz kleine Aerosolpartikel oft keine Viren tragen und selbst wenn sie ein Virus mit sich führen, müssten sehr viele dieser sehr kleinen Aerosolpartikel eingeatmet werden, um eine Infektion hervorzurufen [8]. Schätzungen gehen davon aus, dass eine Dosis von mindestens 500 – 2000 Viren erforderlich ist, um eine SARS-CoV-2 Infektion auszulösen [9, 10].

Ein wesentlicher Nachteil der partikelfiltrierenden Masken ohne Ventil besteht darin, dass sie die Atmung erschweren. Um eine Überbeanspruchung der Träger zu verhindern, sollten sie nur für maximal 75 Minuten am Stück getragen werden [11]. Bevor die Masken erneut getragen werden wird eine Tragepause von 30 Minuten empfohlen [11]. Für die Benutzung öffentlicher Verkehrsmittel in der Stadt oder beim Einkaufen sind partikelfiltrierenden Masken folglich sehr gut geeignet, da diese Tätigkeiten oft in weniger als 75 Minuten erledigt werden können und weil diese „persönliche Isolation“ die Mobilität nicht einschränkt [7]. In der Schule wird es schon schwieriger diese zeitlichen Forderungen zu erfüllen und im Büro bei einem 8 Stunden Arbeitstag müssen andere Schutzvorkehrungen getroffen werden, da die Masken nicht länger als 3 x 75 Minuten pro Tag getragen werden sollten [11]. Es ist aber auch zu berücksichtigen, dass diese Masken nicht nur die Atmung erschweren und teilweise unbequem sind, sondern dass sie auf Dauer auch nennenswerte Kosten verursachen. Verwendet eine Schulklasse mit 25 Kindern täglich FFP2/3 Atemschutzmasken für einen Stückpreis von 4 Euro, dann ergäbe sich bei 200 Schultagen im Jahr eine Summe von 20000 Euro pro Klasse und Jahr oder 800 Euro pro Kind im Jahr. Neben diesen Kosten ist noch zu berücksichtigen, dass die Masken Müll verursachen und dadurch weitere Kosten entstehen. Daher ist diese Lösung ökonomisch und ökologisch nicht sinnvoll.

Alternativ könnten die Menschen in öffentlichen Gebäuden mit Publikumsverkehr oder gemeinschaftlich genutzten Räumen hinreichend große Sicherheitsabstände einhalten, um eine direkte Infektion zu vermeiden. In Schulen, Büros oder Wartezimmern ist aber auch diese Möglichkeit nicht umsetzbar, da die entsprechenden Räumlichkeiten nicht zur Verfügung

stehen. Eine Verdoppelung der Abstände zwischen den Schülerinnen und Schülern in beide Raumrichtungen würde eine Vervielfachung der benötigten Klassenraumfläche erfordern. Der Mangel an Klassenräumen könnte durch einen Schulbetrieb in vier Schichten gelöst werden, allerdings fehlen dafür die Lehrkräfte und deren Einstellung wäre mit immensen Kosten verbunden und daher finanziell nicht tragbar. Abgesehen von den Kosten steht das Lehrpersonal nicht zur Verfügung, so dass diese Möglichkeit auch nicht realisierbar ist. Ferner ist bei diesem Konzept zu berücksichtigen, dass Abstände alleine in einem geschlossenen Raum keine Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion gewährleisten können. Da die Virenlast in einem Raum mit der Anzahl der infizierten Personen und deren Aufenthaltsdauer und Aktivität abhängt, müssen zusätzlich Maßnahmen ergriffen werden, um die Virenlast in der Raumluft zu begrenzen, da sonst indirekte Infektionen auftreten können. Um eine gemeinschaftliche Raumnutzung über mehrere Stunden zu ermöglichen, ist es empfehlenswert die direkte Infektionsgefahr entweder über einfache Mund-Nasen-Bedeckungen, Faceshields oder kleine Plexiglaswände zwischen Personen an einem Tisch (Schulbank) zu begrenzen und die indirekte Infektionsgefahr über andere Maßnahmen.

Eine Möglichkeit indirekte Infektionen zu verhindern besteht darin die Raumluft mit Hilfe der freien Lüftung über geöffnete Fenster zu realisieren, so dass die Virenlast im Raum keine kritischen Werte annehmen kann. Die freie Lüftung funktioniert physikalisch aber nur dann, wenn entweder ein Temperaturunterschied zwischen drinnen und draußen besteht oder der Wind vor den Fenstern weht [12, 13]. Ein Temperaturunterschied ist oft nicht vorhanden und wenn er besteht, dann wird er beim freien Lüften schnell reduziert, so dass dieser Mechanismus meist nicht effizient ist oder nur für kurze Zeit wirksam ist. Der Wind vor dem Fenster ist auch nur selten stark genug, um eine ausreichende Lüftung zu gewährleisten. Da die Wirksamkeit der freien Lüftung abhängig ist von nicht beeinflussbaren Faktoren (Temperatur, Wind, Größe/Position der Fenster) ist die Frage, wie gelüftet werden soll, wenn diese physikalischen Mechanismen nicht nutzbar sind. Es ist aber auch zu berücksichtigen, dass das freie Lüften während der kalten Jahreszeit zu Erkältungen führt und das Wohlbefinden der Menschen beeinträchtigt. Ferner muss an das manuelle Lüften gedacht werden und man muss es auch wollen und können (in vielen Schulen lassen sich die Fenster nicht öffnen). Ein weiteres ganz wesentliches Argument, dass gegen das freie Lüften spricht, ist die Verschwendung von thermischer Energie. Die Häuser werden aufwendig und kostenintensiv isoliert, um einen Beitrag zur Begrenzung der globalen Erderwärmung zu leisten. Die Forderung einiger Menschen, dass die Klimaziele während der Pandemie von nachrangiger Bedeutung sein sollen, ist nicht nachvollziehbar. Statt die thermische Energie über die freie Lüftung zu verschwenden, sollten daher Maßnahmen ergriffen werden, die den Schutz der Menschen während der Pandemie mit den Klimazielen in Einklang bringen.

Viele Gebäude verfügen über moderne raumlufttechnische (RLT) Anlagen, die dafür sorgen, dass die kontaminierte Luft kontrolliert abgeführt und gefilterte bzw. „frische“ Außenluft von draußen hinzugefügt wird. 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. Um die indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr zu reduzieren, müssen die Anlagen aber richtig betrieben werden. Oft werden sie aus energetischen Gründen nur mit geringer Außenluftzufuhr und einfachen Filtern betrieben. Zur Verhinderung von indirekten SARS-CoV-2 Infektionen ist aber ein großer Außenluftanteil (möglichst 100%) oder eine sehr gute Filterung der Raumluft mit Filtern der Klasse H13 / H14 erforderlich [14]. Die bestehenden RLT Anlagen werden meist mit einfachen Filtern der Klasse F7 / F9 betrieben und nicht mit hochwertigen Filtern der Klasse H13 / H14, die in der Lage sind 99,995% der Aerosolpartikel ab einer Größe von 0,1 – 0,3 µm zuverlässig

abzuscheiden. Folglich ist mit vielen installierten RLT Anlagen ein energetisch günstiger und sicherer Umluftbetrieb nicht möglich. Eine Umrüstung der RLT Anlagen ist in der Regel auch nicht realisierbar, da der Einbau von Filtern der Klasse H13 / H14 aufgrund des erhöhten Druckwiderstands zu einer Reduzierung des Volumenstromes führen würde. Aufgrund der Gefährlichkeit von SARS-CoV-2 sind aber Luftwechselraten von mindestens 6 pro Stunde zu fordern. Abschätzungen, die begründen sollen, dass eine Luftwechselrate von 1 – 3 pro Stunde einen ausreichenden Schutz vor einer indirekten Infektion bieten, beruhen auf falschen Annahmen. Man sollte sich vor Augen führen, dass in Räumen, in denen infektiöse Personen behandelt werden, Luftwechselraten von 12 – 15 empfohlen bzw. vorgeschrieben sind [15, 16, 17]. Daher ist es nicht nachvollziehbar, warum dem Ausstoß gefährlicher Viren in Schulen und Büros mit einem Luftwechselrate von 1 – 3 begegnet werden soll. Eine Luftwechselzahl von 6 pro Stunde kann als guter Kompromiss zwischen technischer Realisierbarkeit und Sicherheit von einer SARS-CoV-2 Infektion angesehen werden und damit als Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen. Wenn leistungsstarke RLT Anlagen verfügbar sind, dann sollten sie derart betrieben werden, dass die Luftwechselzahl mindestens 6 pro Stunde beträgt und der Außenluftanteil sollte möglichst 100% betragen. Diese Betriebsart ist zwar energetisch schlecht, aber die Nachteile der freien Lüftung können so immerhin verhindert werden. Es ist aber zu berücksichtigen, dass viele Gebäude nicht über RLT Anlagen verfügen und daher besteht die Frage, wie in öffentlichen Gebäuden ein normaler Betrieb / Aufenthalt realisiert werden kann. Ferner ist die Frage, ob sich die energetischen Nachteile der RLT Anlagen nicht durch einen Umluftbetrieb beheben lassen, bei dem die Raumluft durch einen Filter geleitet wird, der virenbelastete Aerosolpartikel abscheidet oder die Viren mit UV-C oder über die Ionisation der Raumluft inaktiviert, um eine Infektion verhindern zu können. Die Raumluft müsste dann nicht geheizt oder die Luftfeuchtigkeit angepasst werden, wie dies bei RLT Anlagen nötig wäre, die einen großen Außenluftanteil in den Raum führen. Somit könnten die Kosten gesenkt und wertvolle Ressourcen geschont werden.

Eine einfache und bewährte Methode Tröpfchen und Aerosole aus der Raumluft abzuscheiden bieten Raumluftreiniger [8]. Sind diese mit einem Filter der Klasse H13 / H14 ausgestattet und ist der Volumenstrom groß genug, um die sechsfache Menge des Raumvolumens pro Stunde durch den Filter zu führen, dann sind diese Geräte grundsätzlich geeignet indirekte SARS-CoV-2 Infektionen zu verhindern. Ferner scheiden diese Geräte auch Pollen und Feinstaubpartikel ab, so dass Allergiker und Menschen mit Atemwegserkrankungen von den Geräten profitieren. Neben der reinen Abscheidung der Tröpfchen und Aerosolpartikel können noch andere physikalische Mechanismen eingesetzt werden, um die Viren zu inaktivieren, so dass sie keine Infektionen mehr verursachen können. Diese Inaktivierung kann mit Hilfe von UV Strahlung grundsätzlich realisiert werden. Wird nur die UV Technologie verwendet, dann können aber meist keine großen Volumenströme realisiert werden, da bei großen Volumenströmen die Verweildauer der Viren in der elektromagnetischen Strahlung zu kurz ist oder der Abstand zur UV Quelle zu groß wird, um eine verlässliche Inaktivierung der Viren zu gewährleisten. Durch eine Erhöhung der UV Strahlungsleistung ließe sich das Problem grundsätzlich lösen, allerdings kann dann gesundheitsschädliches Ozon entstehen. Die UV Technologie sollte bei großen Volumenströmen daher immer nur in Kombination mit anderen Technologien zur Bekämpfung der Viren eingesetzt werden.

Eine weitere Technologie, die zur Bekämpfung von Viren genutzt werden kann, beruht auf der Ionisation der Luft und der Aerosolpartikel. Die elektrisch geladene Luft kann beim Kontakt mit den Viren diese direkt inaktivieren und so deren Fähigkeit eine Infektion auszulösen zerstören. Die schädliche Wirkung ionisierter Luft auf Viren und andere Krankheitserreger wird in Kliniken genutzt, um z.B. die Heilung von chronischen Wunden zu beschleunigen [18, 19]. Darüber

hinaus lagern sich geladene Ionen an Aerosolpartikeln an und durch elektrostatische Wechselwirkung kann es anschließend zu einem Zusammenschluss mit weiteren Aerosolpartikeln zu größeren Clustern kommen. Diese Cluster können grundsätzlich besser gefiltert werden als Einzelpartikel. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass in normalen Aufenthaltsräumen die Aerosolkonzentration im Raum meist sehr gering ist, so dass eine Clusterbildung recht unwahrscheinlich ist, weil die Abstände zwischen den Aerosolpartikeln zu groß sind. Folglich spielt die direkte Inaktivierung der Viren durch die ionisierte Luft aus unserer Sicht eine bedeutendere Rolle im Hinblick auf die Verhinderung von SARS-CoV-2 Infektionen, als die Clusterbildung.

Im Rahmen dieser Studie wird das Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät analysiert, das alle drei physikalischen Mechanismen zur Bekämpfung der Viren und Keime in der Raumluft gleichzeitig einsetzt. Aufgrund der Komplexität des Strömungsproblems wird für die Analyse ein experimenteller Ansatz genutzt, da nur auf diese Weise die vielen Einflussfaktoren physikalisch richtig erfasst und bewertet werden können.

Das Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät zeichnet sich laut Herstellerangaben durch folgende Merkmale aus [20]:

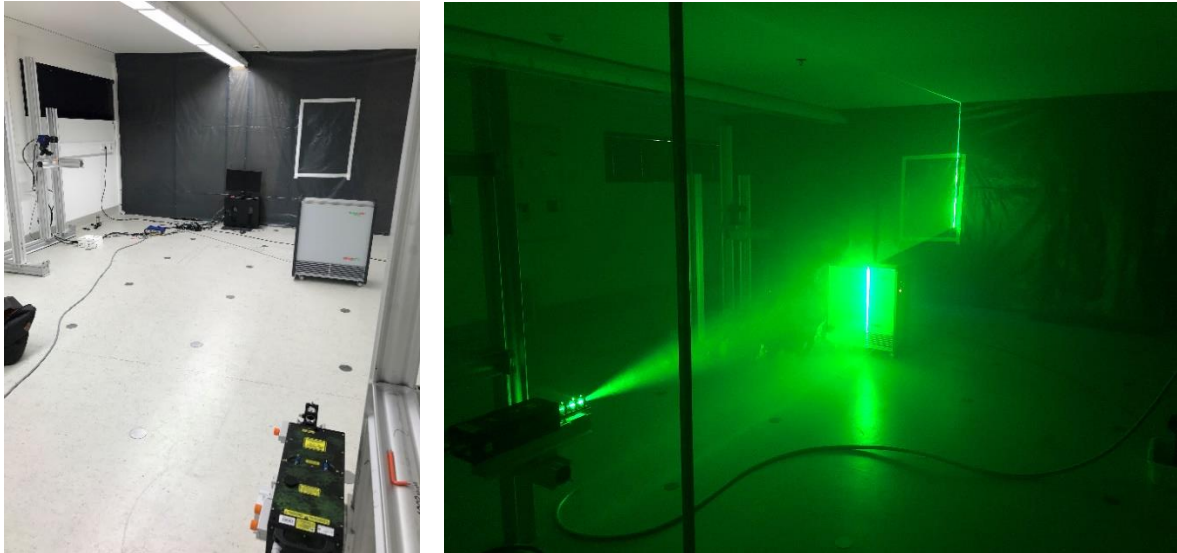
1. Volumenstrom bis maximal 330 m<sup>3</sup>/h.
2. Feinfilter an der Ansaugseite des Gerätes zur Abscheidung von Staubpartikel etc. aus der Raumluft.
3. Ionisation der Luftmoleküle mittels Kaltplasma zur Zerstörung/Inaktivierung der Reproduktionsfähigkeit von Viren mittels elektrischer Ladungen.
4. Elektrostatische Abscheidung geladener Aerosolpartikel und Keime.
5. UV-C Strahlungseinheit zur Zerstörung von Viren-RNA mittels elektromagnetischer Strahlung.
6. Ionisation der Luftmoleküle zur Zerstörung von Viren mittels elektrischer Ladungen im Raum und Abscheidung über Clusterbildung.

## **2. Versuchsaufbau und Durchführung der PIV Experimente**

Das Ziel der ersten Versuchsreihe bestand darin das Strömungsfeld in der Umgebung des Entkeimungsgeräts bei einem maximalem Volumenstrom von 330 m<sup>3</sup>/h zu quantifizieren. Dazu muss die mittlere Strömungsgeschwindigkeit der Luft und die turbulente Luftbewegung am Ein- und Auslass des Entkeimungsgerätes quantitativ bestimmt werden. Beide Größen sind wichtig, da Menschen Luftbewegungen leicht als störend empfinden. Gemäß DIN 1946 Teil 2 [21] können Strömungsgeschwindigkeiten kleiner als 0,3 m/s bei ruhiger Tätigkeit als nicht störend angenommen werden. 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 orts aufgelöst bestimmen zu können, wurde die Particle Image Velocimetry (PIV) eingesetzt [22]. Bei dieser Messtechnik wird die Position künstlich erzeugter Aerosolpartikel in einem Laserlichtschnitt mit digitalen Kameras zu zwei Zeitpunkten registriert und anschließend wird mit digitalen Bildverarbeitungsmethoden die lokale Verschiebung der Partikelbilder bestimmt. Aus der Verschiebung der Partikelbilder kann dann unter Berücksichtigung des Zeitintervalls zwischen den Messungen und einem Kalibrierfaktor die

ortsaufgelöste Geschwindigkeitsverteilung in der Messebene berührungslos bestimmt werden. Abbildung 1 zeigt zur Illustration Aufnahmen des Versuchsaufbaus und während einer PIV Messung.



*Abbildung 1: Experimenteller Aufbau mit Entkeimungsgerät, einem Doppelpuls laser und einer sCMOS Kamera (links) und Aufnahme während der Messung mit PIV (rechts)*

Für die Experimente wurde eine PCO.edge 5.5 sCMOS Kamera mit Zeiss Milvus-Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm verwendet. Die Aerosolpartikel wurden 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 reicht von  $0,1 - 2 \mu\text{m}$  [23]. Ein Quantel Evergreen 200 Laser wurden für die Beleuchtung der Partikel eingesetzt, dessen Strahl mithilfe verschiedener Linsen zu einem Lichtschnitt aufgefächert wurde [22]. Das Messsystem wurde mit der Software DaVis von LaVision GmbH gesteuert, welche auch zur Datenauswertung verwendet wurde. Zur Erfassung des gesamten Strömungsfeldes vor und über dem Entkeimungsgerätes wurde das PIV Equipment traversiert.

### **3. Luftbewegung in der Umgebung des Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerätes**

In den folgenden beiden Abbildungen sind die Ergebnisse der PIV Messungen bei einem maximalen Volumenstrom des Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerätes von ca.  $330 \text{ m}^3/\text{h}$  dargestellt. In Abbildung 2 ist der Betrag der Geschwindigkeit farbkodiert visualisiert. Die Richtung der mittleren Luftbewegung ist anhand der Orientierung der Vektorpfeile zu erkennen und die Länge der Vektoren verdeutlicht den Betrag der Geschwindigkeit. In der Abbildung 3 ist der Betrag der mittleren turbulenten Luftbewegung als Farbverlauf gezeigt. Je größer die turbulente Strömungsbewegung ist, umso stärker fluktuiert die Luftbewegung um den Wert der mittleren lokalen Strömungsgeschwindigkeit. Die Vektoren symbolisieren die Größe und Richtung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit gemäß Abbildung 2 zur Orientierung.

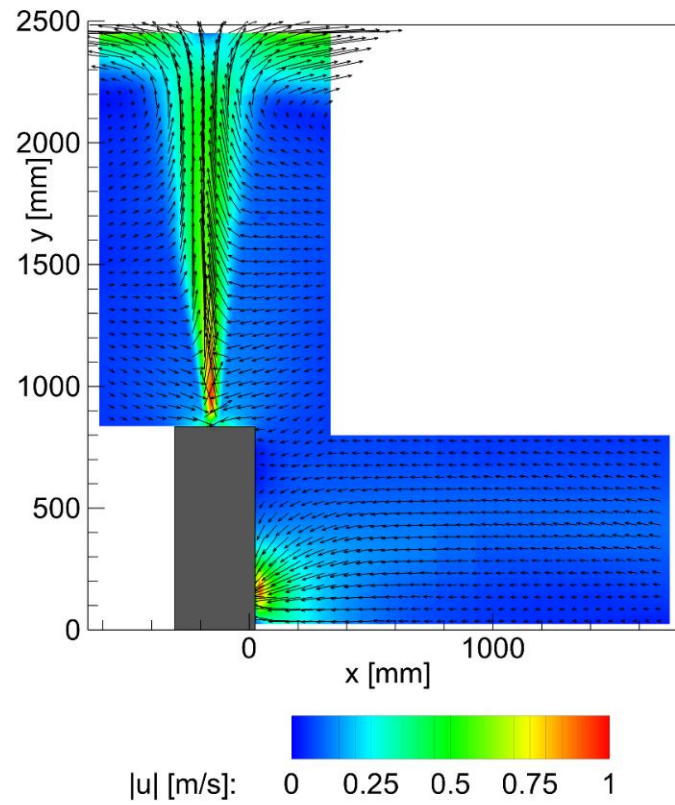


Abbildung 2: Betrag und Richtung der mittleren Strömungsbewegung bei  $330 \text{ m}^3/\text{h}$ .

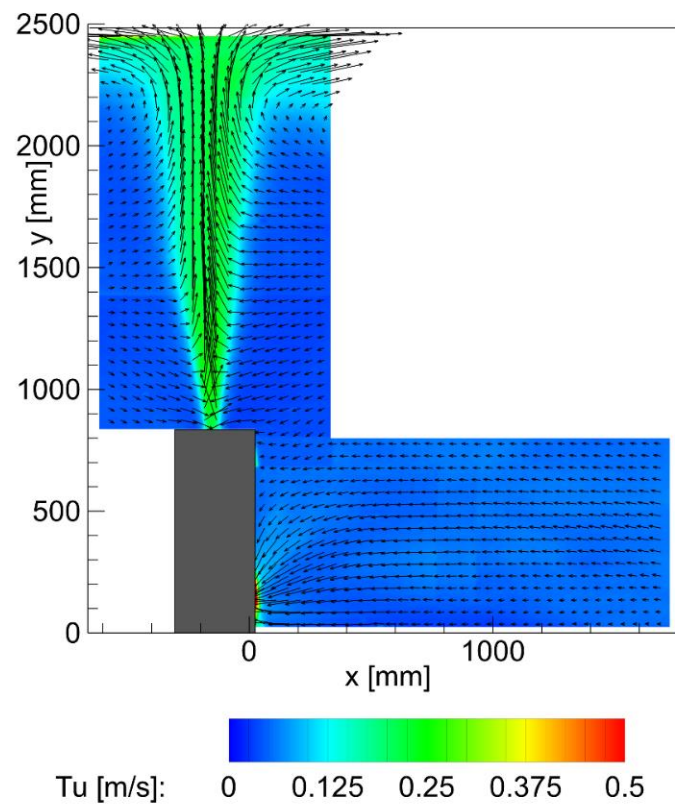


Abbildung 3: Turbulente Luftbewegung zeitlich gemittelt bei  $330 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Die quantitativen PIV Messergebnisse verdeutlichen, dass die Summe aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der mittleren turbulenten Bewegung in der Umgebung des Gerätes die empfohlenen Grenzwerte gemäß DIN 1946 Teil 2 nicht überschreiten. Daher ist selbst bei einem Aufenthalt in der unmittelbaren Nähe des Entkeimungsgerätes keine Beeinträchtigung des Wohlbefindens durch gleichmäßige oder fluktuierende Luftbewegungen zu erwarten. Bei einem maximalen Volumenstrom von 330 m<sup>3</sup>/h werden vor dem Ansaugbereich nur bis zu einem Abstand von bis etwa 0,2 m Strömungsgeschwindigkeiten bis 0,5 m/s erreicht. Diese treten allerdings nur im Fußbereich auf, so dass sie von Personen nicht als störend empfunden werden können. Im empfindlichen Kopf- und Körperbereich sind die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und die überlagerte turbulente Luftbewegung in der Summe deutlich kleiner als 0,3 m/s.

Direkt oberhalb des Luftauslasses werden größere Strömungsgeschwindigkeiten erreicht. Da die Luft aber senkrecht nach oben aus dem Gerät ausströmt, ist eine Beeinträchtigung des Wohlbefindens durch die Luftströmung nicht möglich. Ferner ist aufgrund des senkrechten Austritts des Freistrahles eine Verblockung der Strömung durch Gegenstände im Raum nicht ohne weiteres realisierbar. Eine Verblockung des Auslassstrahls könnte zu einer Beeinträchtigung der Filterleistung führen und sollte daher vermieden werden. Als Zwischenergebnis dieser Analyse lässt sich feststellen, dass durch den Betrieb des Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerätes die Luftbewegung innerhalb der empfohlenen Grenzwerte liegt.

In der Abbildung 2 ist sehr schön zu erkennen, dass die ausströmende Luft bis zur Decke strömt und dann in beide Richtungen zu ungefähr gleichen Teilen umgelenkt wird. Die Luft breitet sich dann aufgrund des Coandă Effektes entlang der Decke aus, bis sie durch die Wände des Raumes nach unten umgelenkt wird und dann zum Ansaugbereich des Gerätes zurückströmt. Diese Luftbewegung ist in Abbildung 4 (links) schematisch durch Pfeile dargestellt. Damit sich eine großräumige Zirkulationsbewegung im Raum ausbilden kann, sollte die Ausbreitung der Luftströmung nicht durch größere Objekte im Deckenbereich (lange hervorstehende Lampen, Deckenvorsprünge, Deckenbalken,...) blockiert werden [8, 24]. Je ungestörter sich die Luft ausbreiten kann, umso effizienter und schneller wird die kontaminierte Raumluft durch das Gerät geführt. Wird die Strömungsausbreitung gestört, dann bilden sich komplexere Raumluftströmungen aus, wie in Abbildung 4 (rechts) beispielhaft dargestellt. Diese Raumluftbewegung kann zu einer verminderten Filterleistung oder reduzierten Inaktivierungsrate der Viren führen.

Um diese unerwünschte Luftbewegung zu kompensieren kann an dem Entkeimungsgerät ein etwas größerer Volumenstrom eingestellt werden. Da mit zunehmendem Volumenstrom aber die Betriebskosten steigen und der Geräuschpegel zunimmt, sollte auf eine geeignete Positionierung des Gerätes im Raum geachtet werden. Um eine energetisch effiziente und effektive Filterung der Raumluft zu ermöglichen, ist eine Aufstellung des Entkeimungsgerätes in der Mitte der längsten Raumseite empfehlenswert und der auf die Decke treffende Luftstrahl sollte sich möglichst ungestört entlang der Decke ausbreiten können ohne blockiert zu werden.

Bei genauer Betrachtung der Vektoren in Abbildung 2 ist zu erkennen, dass Teile der aus dem Raum zurückströmenden Luft direkt mit dem aus dem Gerät austretenden Freistrahle in Wechselwirkung tritt und sich erneut in den Raum ausbreitet, ohne durch das Gerät geführt zu werden. Dies ist ein ganz natürlicher strömungsmechanischer Vorgang, der als Entrainment bezeichnet wird. Ist der Volumenstrom des Gerätes hinreichend groß gewählt, dann wird sichergestellt, dass die am Gerät vorbeigeführte Luftmenge in hinreichend kurzer Zeit gefiltert



und die Viren abgeschieden oder inaktiviert werden. Dafür sorgt letztlich die turbulente Vermischung im Raum. Das Ziel sollte es aber sein, die Zeit für die Filterung der Raumluft möglichst gering zu halten, damit eine Luftwechselrate von 6 pro Stunde energetisch günstig erreicht werden kann. Wie schnell die Filterung der Raumluft und damit die Inaktivierung der Viren letztlich erfolgt lässt sich mit Hilfe von Konzentrationsmessungen bestimmen.

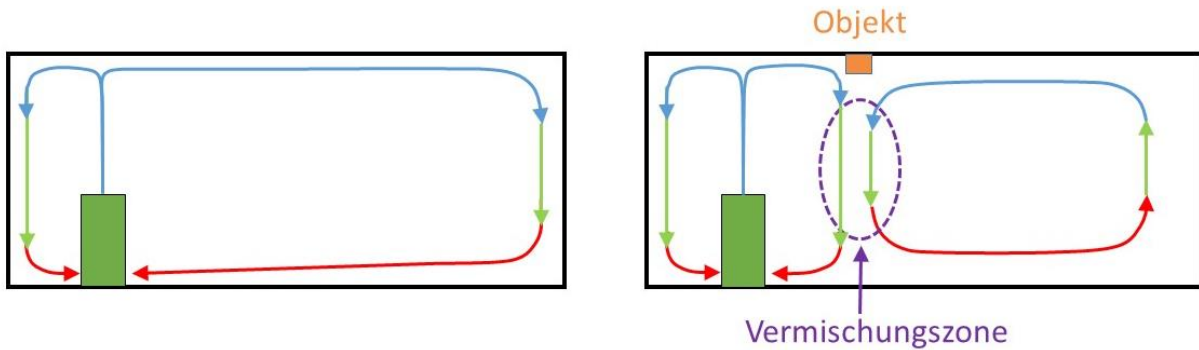


Abbildung 4: Idealisierte Darstellung der Luftströmung in einem leeren Raum (links) und bei Vorhandensein eines in den Raum ragenden Balkens (rechts). In der Realität sind die Strömungsphänomene dreidimensional.

#### 4. Versuchsaufbau und Durchführung der Konzentrationsmessungen

Um die Filterleistung des Entkeimungsgeräts und damit die Abscheidung und Inaktivierung von Viren quantitativ zu bestimmen, wurde zunächst die zeitliche Abnahme der Partikelkonzentration an drei Positionen in einem 80 m<sup>2</sup> großen Raum simultan gemessen. Da das Raumvolumen 200 m<sup>3</sup> beträgt, das Gerät aber nur einen Volumenstrom von 330 m<sup>3</sup>/h aufweist, kann eine Luftwechselrate von 6 pro Stunde nicht erreicht werden. Dafür müssten in dem Raum mehrere Geräte gleichzeitig betrieben werden. Die Abklingkurven ermöglichen aber die Ergebnisse auf andere Raumgrößen zu übertragen. Kleinere Räume werden im nächsten Kapitel analysiert.

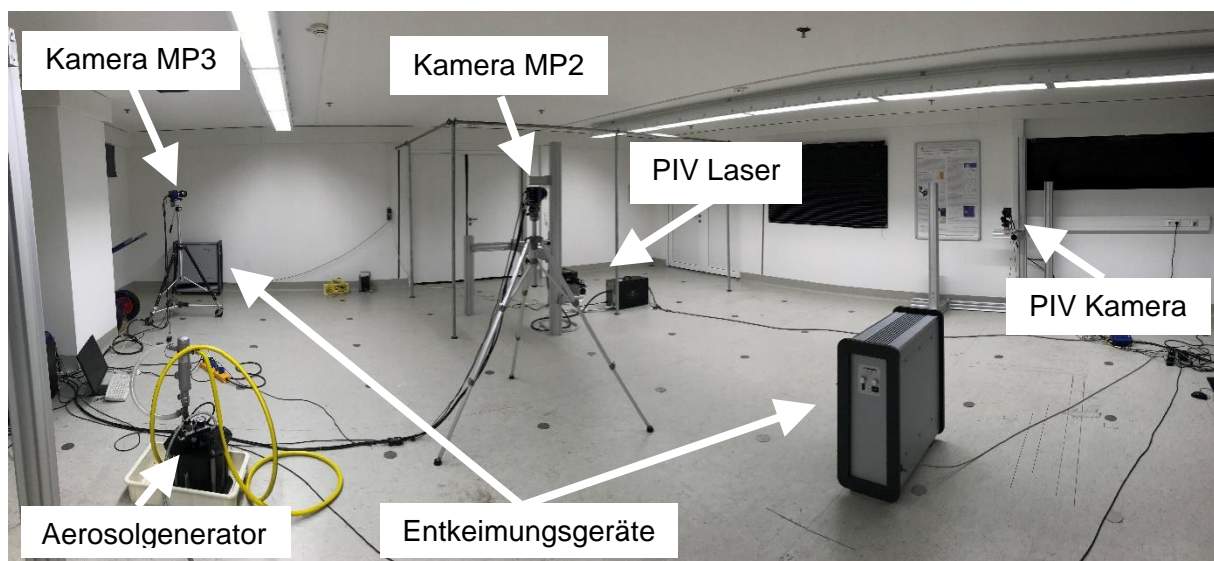
Abbildung 5 verdeutlicht in der Draufsicht die Geometrie und Abmessungen des Raumes. Da der Raum für ein einziges Gerät dieser Leistungsklasse laut Herstellerangaben zu groß ist, wurden Versuche mit zwei Geräten durchgeführt, die an den Positionen A1 und A2 aufgestellt wurden. Anschließend wurden die beiden Geräte an den Eckpositionen B1 und B2 installiert, um den Einfluss des Aufstellungsortes auf die Filterleistung und die Zeit bis zur Inaktivierung der Viren quantifizieren zu können. Schließlich wurden zum Vergleich Messungen mit einem einzelnen Gerät durchgeführt, das sich an der Position B1 befand.

Die Messpositionen sind in der Abbildung 5 mit MP1 – MP3 bezeichnet. Zur Ermittlung der zeitlichen Abnahme der Aerosolpartikel in der Raumluft wurde das Particle Imaging Verfahren angewendet. Bei diesem Verfahren wird der Raum zunächst mit sehr langlebigen Aerosolpartikeln, 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 systematische Verfälschung der Messergebnisse durch Verdunstung auftreten würde. Ferner ist die geringe Größe der Aerosolpartikel wichtig, da große Aerosolpartikel im Laufe der Zeit absinken würden, was ebenfalls systematische Messfehler bewirken würde. Die Aerosolpartikel werden mit einem gepulsten Laser beleuchtet und mit einer Kamera mit geeignetem Objektiv abgebildet und für die Weiterverarbeitung digital gespeichert. Die Anzahl der Partikelbilder auf dem Sensor



Halbwertszeit ist ein Maß dafür wie lange es dauert, bis sich die Anzahl der Aerosolpartikel an der betrachteten Messposition um 50% reduziert hat. Nach der doppelten Halbwertszeit ist die Konzentration der Aerosolpartikel folglich auf 25% vom Startwert abgefallen. Die Verweildauer ist die Zeit, die die freigesetzten Aerosolpartikel im Mittel benötigen, um von der jeweiligen Messposition bis zum Abscheidungsort im Entkeimungsgerät zu gelangen. Auf dem Weg vom Freisetzungsort bis zum Abscheideort wird die Virenlast natürlich aufgrund der konvektiven Bewegung und der turbulenten Vermischung der Raumluft abnehmen, so dass das Infektionsrisiko mit zunehmendem Abstand von der Quelle strömungsbedingt reduziert wird.

Um die Funktionalität des Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerätes in einem 80 m<sup>2</sup> großen Raum analysieren zu können, wurde die Aerosolkonzentration simultan an 3 unabhängigen Positionen diagonal im Raum gemessen. Mit einem PIVTEC Seedinggenerator wurde aus Di-2-ethylhexyl-sebacat (DEHS) Aerosolpartikel mit einer Größenverteilung zwischen 0,1 – 2 µm und einem mittleren Durchmesser von ca. 1 µm erzeugt [19]. Für die Beleuchtung der Aerosolpartikel wurde der Ausgangsstrahl eines Quantel Evergreen 200 Laser diagonal durch den Raum geleuchtet. Zur Aufnahme der Aerosolpartikel in den Messvolumina (MP1 – MP3) wurden 3 PCO.edge 5.5 sCMOS Kameras mit Zeiss Milvus-Objektiven mit einer Brennweite von 50 mm verwendet. Die einzelnen Kameras und der Laser wurden mit der Software DaVis von LaVision zentral angesteuert, sodass die Aufnahmen aller Kameras synchron durchgeführt wurden. Die Aufnahmezeit betrug bei den Messungen 1 Hz. Abbildung 6 zeigt in einer verzerrten Panoramaaufnahme die Anordnung der verwendeten Komponenten im Raum.

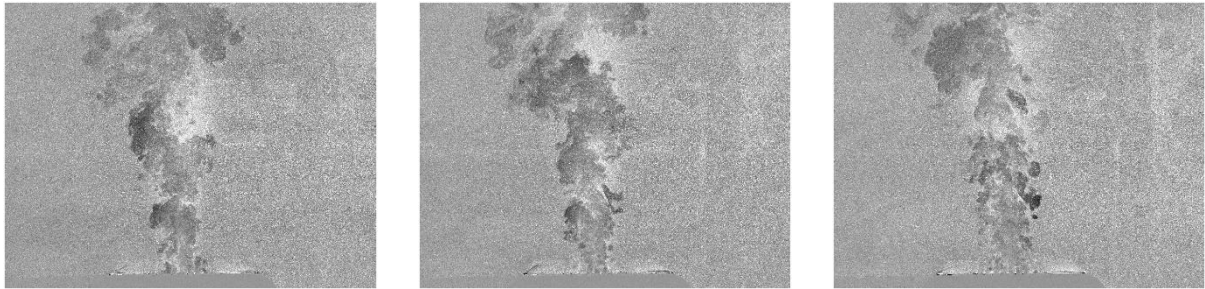


*Abbildung 6: Optisch verzerrte Panoramaaufnahme des Versuchsraumes mit den Komponenten für die PIV und Konzentrationsmessungen*

## **5. Konzentrationsmessungen in einem quadratischen Raum mit 80 m<sup>2</sup>**

Mit Hilfe des in Abschnitt 2 verwendeten PIV Versuchsaufbaus wurde zunächst visuell der Abscheidegrad am Austritt des Gerätes analysiert. Dazu wurde der gesamte Raum mit DEHS Aerosolpartikeln mit einem Durchmesser von 0,1 – 2 µm und einem mittleren Durchmesser von ca. 1 µm [23] homogen vernebelt. Mit Hilfe eines Laserlichtschnittes im Bereich der Ausströmung wurde untersucht, ob noch Aerosolpartikel aus dem Auslassbereich des Gerätes

herauskommen. Abbildung 7 zeigt, dass die Umgebung des Freistrahles vollständig mit Aerosolpartikeln kontaminiert ist (weiße Bereiche). Der zentral aus dem Gerät austretende Freistrahle ist hingegen frei von Aerosolpartikeln (dunkler Bereich). Dass die gefilterte Luft in der Abbildung nicht völlig schwarz erschien hängt mit der effizienten Vermischung mit der umgebenden Raumluft zusammen, die in der Abbildung 7 schön zu erkennen ist. Der Vorgang, bei dem kontaminierte Luftbereiche in den sauberen Strahl eindringen wird als Entrainment bezeichnet [12]. Analysen, bei denen nur im Ansaugbereich Aerosolpartikel zugeführt wurden zeigen klar, dass diese zuverlässig durch die elektrostatische Filterung abgeschieden werden.



*Abbildung 7: Darstellung der Aerosolverteilung im Bereich der Ausströmung bei einem Volumenstrom von 330 m<sup>3</sup>/h*

Um die Filterleistung und die Inaktivierung der Viren in dem 80 m<sup>2</sup> großen Raum quantitativ bewerten zu können, zeigt Abbildung 8 (links) den Verlauf der gemessenen Aerosolpartikelanzahl in Abhängigkeit von der Zeit. Zusätzlich ist die zeitliche Abnahme der Aerosolkonzentration bei ausgeschaltetem Entkeimungsgerät als Referenz dargestellt. Da alle Öffnungen in dem Raum luftdicht abgeklebt wurden und die sehr kleinen Aerosolpartikel sich kaum absetzen, nimmt die Partikelkonzentration in der Referenzmessung nur sehr langsam ab. Das Ergebnis der Referenzmessung verdeutlicht darüber hinaus, dass kleine langlebige Tröpfchenkerne oder Tröpfchen unter Bedingungen, bei denen sich die Verdunstungsrate mit der Kondensationsrate im Gleichgewicht befindet, in der Luft über Stunden in der Raumluft verbleiben. Daher ist es wichtig die Virenlast im Raum technisch zu begrenzen, so dass sich nach Möglichkeit keine infektiöse Virenkonzentration im Raum bilden kann.

Es ist auch offensichtlich, dass die Aerosolpartikel durch die Luftströmung über sehr große Distanzen (im Prinzip viele Kilometer) transportiert werden können, wenn die Ausbreitung nicht durch Wände verhindert wird. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei diesem Prozess die Konzentration und damit die Infektionswahrscheinlichkeit aufgrund von zwei Prozessen sehr schnell reduziert wird. Einerseits bewirkt die turbulente Diffusion 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 folglich verdünnt, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit ungleich Null ist. Wird z.B. bei leichter körperlicher Belastung über einen Zeitraum von 2 Sekunden 1 Liter Luft ausgeatmet und strömt die umgebende Luft mit einer mittleren Geschwindigkeit von 10 m/s am Austrittsort vorbei, dann wird die ausgeatmete Luft aufgrund der Strömung über einen Bereich von 20 m gestreckt. Die Konzentration wird daher rechnerisch um den Faktor 200 abnehmen und damit die Virenlast im Nachlauf der Person, von der das Aerosol ausgeatmet wird. Wird darüber hinaus noch die turbulente Diffusion berücksichtigt, dann nimmt die Konzentration nochmal deutlich ab. Diese strömungsmechanischen Prozesse erklären, warum außerhalb geschlossener Räume eine SARS-CoV-2 Infektion sehr unwahrscheinlich ist und daher kaum nachgewiesen werden

konnte. Hinzu kommt noch, dass nicht alle Aerosolpartikel Viren tragen [8]. In der freien Natur ist daher bei ausreichender Windgeschwindigkeit oder Bewegung der Personen eine Aerosolinfektion extrem unwahrscheinlich, wenn Abstände zwischen den Personen von mindestens 1,5 m eingehalten werden.

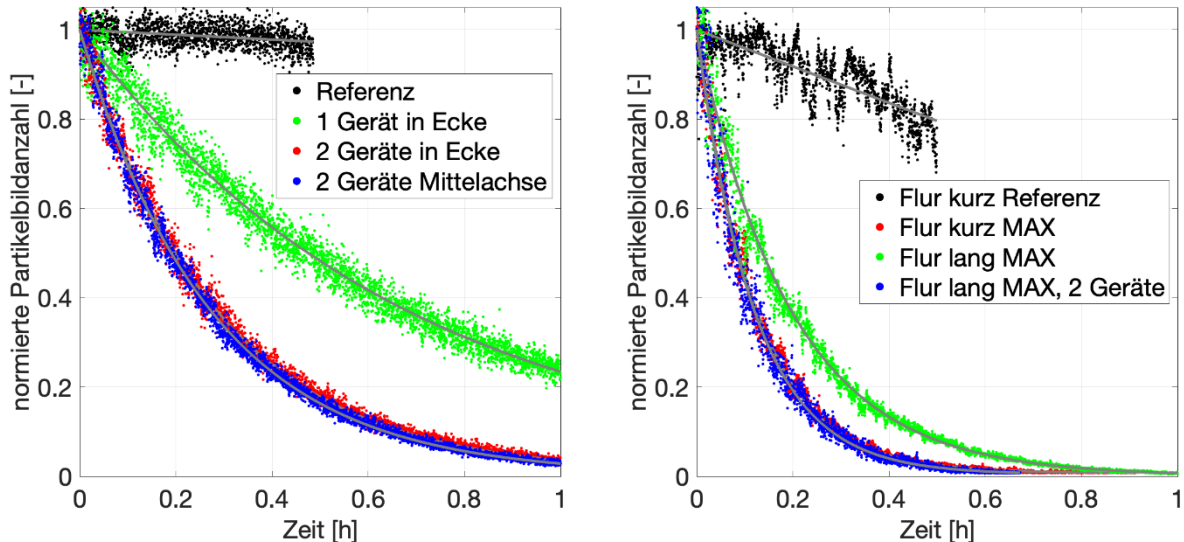


Abbildung 8: Abnahme der Aerosolkonzentration mit der Zeit für verschiedene Volumenströme und zugehörige exponentielle Fitfunktionen

Der Vergleich der verschiedenen Messkurven in Abbildung 8 (links) verdeutlicht die Abnahme der Aerosolkonzentration in dem 80 m<sup>2</sup> großen Raum in Abhängigkeit von der Zeit für die verschiedenen Aufstellungskonfigurationen. Der Vergleich verdeutlicht den Effekt der Positionierung und der Anzahl der Geräte auf die Filterleistung und damit auf die Inaktivierung der Viren im Raum. Deutlich zu erkennen ist der Effekt des Volumenstromes. Eine Verdoppelung der Geräteanzahl und damit des Volumenstromes sorgt für eine Halbierung der Zeit, die erforderlich ist, um eine bestimmte Konzentration zu erhalten. Soll die Aerosolkonzentration in einem Raum mit einem bestimmten Volumen in einer bestimmten Zeit halbiert werden, dann lässt sich mit Hilfe dieser gemessenen Kurven abschätzen wie groß der Volumenstrom sein muss, um die gewünschte Zielvorgaben zu erreichen.

Der exponentiell abnehmende Verlauf der Aerosolpartikelzahl ermöglicht charakteristische Größen quantitativ zu bestimmen, die für die Bewertung der Effizienz des Entkeimungsgerätes ganz wesentlich sind. Die Abklingkonstante, die sich aus der exponentiellen Abnahme der Konzentration in Abbildung 8 ergibt, ist ein Maß für die Effizienz der Filterung. Je größer der Wert, desto schneller die Abnahme und umso besser die Filterwirkung und desto kürzer die Zeit, die zur Filterung der Raumluft 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 Entkeimungsgerät abgeschieden werden. Tabelle 1 zeigt die aus den gemessenen Abklingfunktionen bestimmten Größen für die verschiedenen Konfigurationen.

Zunächst kann festgestellt werden, dass die Filterleistung trotz der Raumgröße nur wenig von der Messposition abhängig ist. Die Annahme, dass in den Ecken des Raumes möglicherweise Aerosolpartikel lange verbleiben ist daher nicht gerechtfertigt. Die Turbulenz in der Raumluft ist der Grund dafür, dass sich die Konzentration im Raum sehr gleichmäßig verhält. Darüber



hinaus kann aus der Tabelle abgelesen werden, dass auch der Aufstellungsort der Geräte keinen signifikanten Einfluss auf die Filterleistung hat. Bei 330 m<sup>3</sup>/h ist bei der Konfiguration A1 + A2 die Aerosolkonzentration in etwa 11,5 Minuten halbiert und bei der Konfiguration B1 + B2 nach rund 12 Minuten. Der Einfluss der Positionierung auf die Filterleistung ist gemäß dieser Analyse nicht sehr groß. Wird hingegen nur ein Entkeimungsgerät verwendet, dann verlängert sich die Halbwertszeit auf rund 25 Minuten (MP3). Dieses Ergebnis verdeutlicht zweifelsfrei, dass der Volumenstrom des Gerätes sehr gut an die Raumgröße angepasst sein muss, um eine gewünscht Filterleistung zu erzielen. Kleine Geräte mit geringem Volumenstrom können in einem großen Raum keine Sicherheit vor einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion bieten. Beträgt das Volumen des Raumes  $x \text{ m}^3$ , dann sollte der Volumenstrom des Gerätes mindestens  $6x/h$  betragen, um eine ausreichende Sicherheit vor einer SARS-CoV-2 Infektion zu gewährleisten. Bei einem Raumvolumen von rund 200 m<sup>3</sup> wäre somit ein Volumenstrom von 1200 m<sup>3</sup>/h erforderlich, um die Forderung zu erfüllen.

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

Messposition	Position A1 & A2	Position B1 & B2	Position B1
<b>MP1</b>	3,69   0,19   0,27	3,53   0,20   0,28	1,51   0,46   0,66
<b>MP2</b>	3,63   0,19   0,28	3,35   0,21   0,30	1,51   0,46   0,66
<b>MP3</b>	3,85   0,18   0,26	3,74   0,19   0,27	1,65   0,42   0,61
Abklingrate [1/h]   Halbwertszeit [h]   mittlere Verweilzeit [h]			

Aufgrund der Gefährlichkeit von SARS-CoV-2 sollte diese Forderung von  $6x/h$  keinesfalls unterschritten werden. Aussagen, dass eine Luftwechselzahl von 1 – 2 ausreicht, um SARS-CoV-2 Infektionen wirksam zu verhindern, beruhen auf falschen Annahmen. In Bereichen, in denen sich nachweislich infizierte Personen aufhalten, werden üblicherweise Luftwechselzahlen von 12 – 15 gefordert [15, 16, 17]. Eine Luftwechselzahl von 6 stellt einen sinnvollen und realistischen Kompromiss zwischen Sicherheit und Realisierbarkeit dar. Sollten trotz einer Luftwechselrate von 6 pro Stunde SARS-CoV-2 Infektionen in Innenräumen nicht wirkungsvoll verhindert werden können, dann könnten dies bedeuten, dass sich sehr viele infizierte Personen in dem Raum aufgehalten haben. Eine Erhöhung der Luftwechselzahl wäre dann ratsam. Die gegenwärtigen Infektionszahlen lassen aber darauf schließen, dass dieser Fall derzeit sehr unwahrscheinlich ist. Es könnte aber auch sein, dass sich die anwesenden Personen nicht durch eine indirekte Infektion aufgrund der Virenlast im Raum infiziert haben, sondern durch direkte Infektionen, die entstehen können, wenn nicht infizierte Personen von infizierten Personen stark angehustet werden oder sich diese Personen ohne ausreichenden Abstand länger unterhalten. Gegen die direkte Infektionsgefahr können Entkeimungsgeräte und Raumluftreiniger wenig ausrichten. Die Verhinderung direkter Infektionen erfordert Abstände oder das Tragen von partikelfiltrierenden Atemschutzmasken, Mund-Nasen-Bedeckungen, Faceshields oder Barrieren aus Plexiglas.

Das getestete Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät kann in Räumen bis zu einer Größe von 22 m<sup>2</sup> eingesetzt werden, wenn alleine die Filterleistung betrachtet wird. Aufgrund der integrierten Ionisationstechnologie ist es laut Herstellerangaben aber möglich das Gerät

auch in größeren Räumen bis zu 50 m<sup>2</sup> zu betreiben [20]. Aufgrund der Ionisation der Luft werden laut Hersteller die Viren am Ort der Freisetzung bereits zum großen Teil inaktiviert. Daher bietet das Gerät laut Hersteller nicht nur einen Schutz vor einer indirekten Infektion, sondern teilweise auch gegenüber einer direkten Infektion. Wie wirkungsvoll die Ionisation wirkt kann auf der Basis der hier durchgeführten Experimente nicht beantwortet werden, da in den Laboren des Instituts keine Versuche mit infektiösen Viren durchgeführt werden können. Aber auch ohne diese Schutzfunktion durch die Ionisierung ist das Gerät leistungsfähig genug, um in Behandlungszimmern, Wartezimmern, normalen Büros, im Empfangsbereich von Praxen, in Apotheken oder in Essens- und Aufenthaltsräumen in Altenheimen, kleinen Geschäften, usw. das indirekte Infektionsrisiko deutlich zu reduzieren, so dass indirekte Infektionen äußerst unwahrscheinlich werden.

## **6. Abhängigkeit der Filterleistung von der Raumgeometrie**

Die Filterleistung ist nicht nur abhängig von der Anzahl der Geräte und deren Aufstellungsort, sondern auch von der Geometrie des Raumes. Insbesondere in langgestreckten Räumen lassen sich Aerosolpartikel im Allgemeinen weniger effizient abscheiden, da der Wandstrahl an der Decke gemäß Lehrbuchmeinung [12] irgendwann ablöst und sich dann ein Rezirkulationsgebiet ausbildet, das nicht bis zur gegenüberliegenden Wand reicht. Diese Situation ist vergleichbar mit den in Abbildung 4 (rechts) dargestellten Verhältnissen, wobei die Ablösung der Strömung von der Decke in einem langen Raum nicht durch ein Objekt, sondern durch die Reduzierung des Impulses des Wandstrahles mit zunehmender Entfernung, verursacht wird. Die Reduzierung des Impulses wird durch die Wandreibung, die turbulente Luftbewegung und das in Abbildung 7 sichtbare Entrainment bewirkt. Durch das Entrainment werden langsame Strömungsbereiche mit Aerosolpartikeln durch den schnellen Wandstrahl beschleunigt und die dafür erforderliche Arbeit führt zur Verringerung des Wandstrahlimpulses. Die Turbulenz führt primär zu einer Strahlverbreiterung, was wiederum zu einer lokalen Impulsabnahme führt und daher die Ablöseposition des Wandstrahles näher zum Gerät verlagert. Aufgrund dieser Effekte erscheint es plausibel, dass der vordere Raumbereich sehr gut gefiltert und die Viren inaktiviert werden, während der hintere Bereich des Raumes eher unbeeinflusst bleibt. In einer vorherigen Arbeit wurde aber bereits gezeigt, dass diese Lehrbuchmeinung nicht zwingend der Realität entspricht [8]. Um diese Situation mit dem Viromed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät zu untersuchen, wurden Messungen in einem langgestreckten Raum durchgeführt, der eine Querschnittsfläche von ca. 4 m<sup>2</sup> aufweist. Es wurden zwei verschiedene Raumlängen untersucht: 22,4 m (Versuchsaufbau siehe Abbildung 9) und 11,8 m (Abbildung 10).

Die aus den Konzentrationsmessungen in Abbildung 8 (rechts) ermittelten Größen sind in den Tabellen 2 und 3 für die jeweiligen Raumgrößen zusammengefasst. Es ist deutlich, dass auch in langgestreckten Räumen eine recht schnelle Abscheidung der Aerosolpartikel erzielt wird. Werden zwei Geräte an den jeweiligen Stirnflächen des Raumes positioniert, beträgt die Halbwertszeit weniger als 5 Minuten. Wird nur ein Gerät eingesetzt, dann ergibt sich eine Halbwertszeit von 8 ½ Minuten. Selbst an dem weit entfernten Messpunkt MP2 in der langen Konfiguration ist eine deutliche Abnahme der Aerosolpartikel mit der Zeit festzustellen, die in etwa der Abnahme an der Position MP1 entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass in sehr langgestreckten Räumen die Verwendung von zwei Entkeimungsgeräten an den jeweiligen Enden empfehlenswert sein kann, wenn eine sehr schnelle Abnahme der Virenlast erforderlich ist, wie z.B. auf dem Flur einer Station im Krankenhaus/Altenheim, einer Praxis oder in einem Hotel.

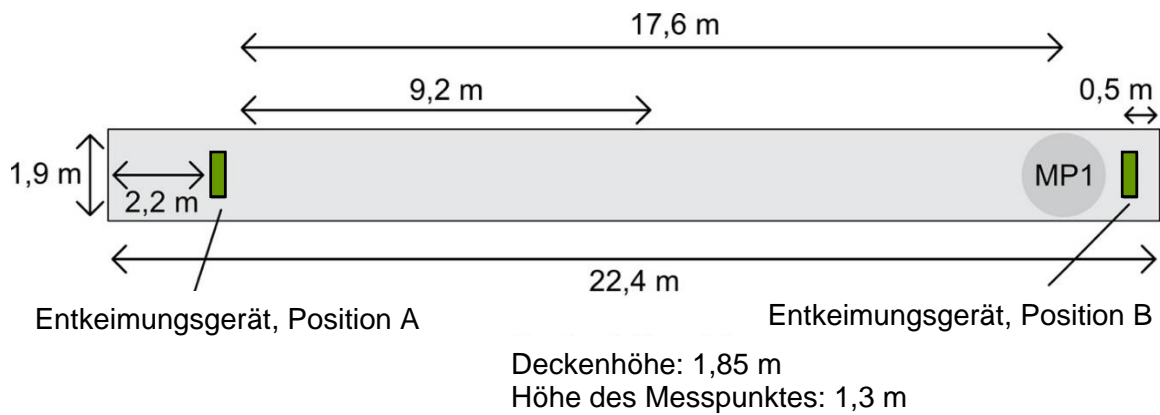


Abbildung 9: Anordnung der Komponenten in der Konfiguration langer Flur für die Konzentrationsmessungen

Tabelle 2: Abnahme der Aerosolkonzentration in der Konfiguration langer Flur mit der Zeit für verschiedene Konfigurationen. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

Messposition	Position A & B	Position A
MP1	8,39   0,08   0,12	5,05   0,14   0,20
Abklingrate [1/h]   Halbwertszeit [h]   mittlere Verweilzeit [h]		

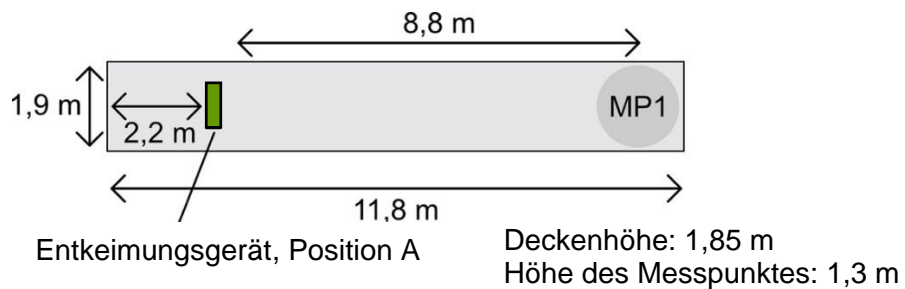


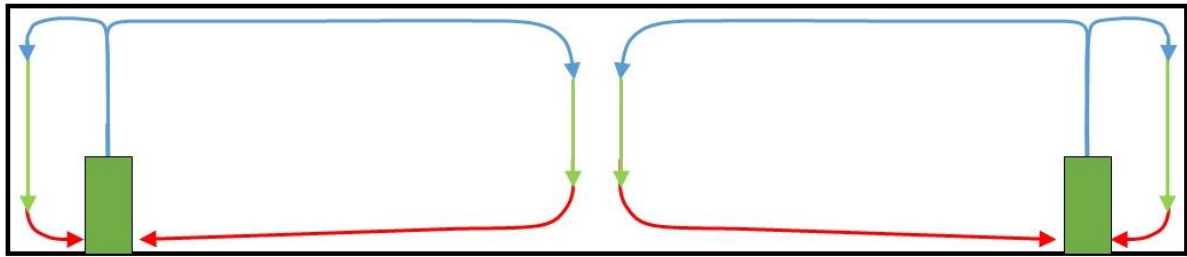
Abbildung 10: Anordnung der Komponenten in der Konfiguration kurzer Flur für die Konzentrationsmessungen

Tabelle 2: Abnahme der Aerosolkonzentration in der Konfiguration kurzer Flur mit der Zeit. Abklingrate (schwarz), Halbwertszeit (grün) und mittlere Verweilzeit (blau).

Messposition	Position A	Referenz
MP1	8,09   0,09   0,12	0,45   1,54   2,22
Abklingrate [1/h]   Halbwertszeit [h]   mittlere Verweilzeit [h]		



Schematisch lässt sich die zeitlich gemittelte Strömungssituation in dem langen Raum mit zwei Geräten wie in Abbildung 11 schematisch darstellen.



*Abbildung 11: Idealisierte Darstellung der Luftströmung in einem langen, leeren Raum, in dem zwei Entkeimungsgeräte betrieben werden. In der Realität sind die Strömungsphänomene dreidimensional.*

Erwartungsgemäß werden die Aerosolpartikel in der Konfiguration kurzer Flur deutlich schneller abgeschieden. Die Halbwertszeit beträgt gemäß Tabelle 3 rund 5 Minuten bei einem Volumenstrom von 330m<sup>3</sup>/h. Die Abklingkonstante beträgt 8,09 und das bedeutet, dass bei diesem Raumvolumen eine Luftwechselrate von rund über 8 pro Stunde erreicht wird. Ohne Betrieb des Entkeimungsgerätes beträgt die Halbwertszeit über 90 Minuten. Dieser Vergleich verdeutlicht das Potential zum Schutz der Personen im Raum durch den Einsatz von Entkeimungsgeräten und Raumlufreinigern in geschlossenen Räumen.

### **Zusammenfassung und Schlussfolgerung**

Die quantitativen Messergebnisse zeigen, dass sich mit dem getesteten Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät, die Aerosolkonzentrationen in einem Raumen mit einer Größe von 22,5 m<sup>2</sup> in rund 5 Minuten halbieren lässt. Die Luftwechselrate beträgt in diesen Fällen 8 pro Stunde. Damit ist ein einziges Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgerät sehr gut geeignet, um in Räumen bis ca. 30 m<sup>2</sup> eine hohe Sicherheit von einer indirekten SARS-CoV-2 Infektion zu gewährleisten. Die Raumgröße entspricht typischen Behandlungszimmern, Wartezimmern, Empfangsbereichen, Apotheken, Büros,...

In einem 42,5 m<sup>2</sup> großen Raum konnte beim gleichzeitigen Betrieb von zwei Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgeräten eine Halbwertszeit von 4,8 Minuten erzielt werden und die Luftwechselrate betrug 8,4. Der Vergleich mit den Ergebnissen in dem kleineren Raum verdeutlicht, dass eine Skalierung einfach möglich ist. D.h. wenn die Raumgröße verdoppelt wird, dann ändert sich die Luftwechselrate, Halbwertszeit und Verweildauer der Aerosolpartikel im Raum nicht signifikant, wenn auch die Anzahl der Geräte oder der Volumenstrom verdoppelt wird.

Bei Räumen mit 80 m<sup>2</sup> und dem Betrieb von zwei Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgeräten wird eine Halbierung der Aerosolpartikelkonzentration in ca. 11 Minuten realisiert. Die Luftwechselrate liegt folglich etwas niedriger als 4 pro Stunde und damit unterhalb des von uns empfohlenen Wertes von 6 Raumlufwechsel pro Stunde. Da das Gerät aber neben der Filterung der Aerosolpartikel auch über eine Ionisierungseinheit verfügt, deren Leistung am Gerät frei eingestellt werden kann, sollte bei dieser Raumgröße ein zusätzlicher Schutz vor einer SARS-CoV-2 Infektion durch die Ionisation der Raumluf realisiert werden.

Bei noch größeren Räumen, Räumen mit vielen großen Objekten, Unterbrechungen der Decke durch Balken oder raumteilende Lampe, oder sehr verwinkelten Räume, sollten ausreichend

Entkeimungsgeräte eingesetzt werden, um alle Bereiche zügig zu filtern. Aufgrund der Gefährlichkeit der SARS-CoV-2 Infektion sollte die von den Geräten erbrachte Luftwechselrate einen Werte von 6 Luftwechseln pro Stunde nicht unterschreiten, es sei denn zusätzliche Schutzeinrichtungen können ergänzend genutzt werden (Ionisation der Raumluft, UV-C, RLT Anlagen, freie Lüftung). Luftwechselraten von 6 pro Stunde stellen einen guten Kompromiss aus technischer Realisierbarkeit und Sicherheit von einer indirekten Infektion dar.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass leistungsstarke Entkeimungsgeräte die Aerosolkonzentration in Räumen schnell reduzieren und auf einem niedrigen Niveau halten können. Daher kann das indirekte Infektionsrisiko auch bei geschlossenen Fenstern und ohne geeignete RLT Anlage durch diese Geräte minimiert werden. Sie sind daher sehr gut geeignet, um z.B. in Behandlungszimmern, Wartezimmern, Empfangsbereichen, Apotheken, Altenheimen, Büros, Geschäften dauerhaft für eine geringe Virenlast im Raum zu sorgen. Das regelmäßige Öffnen von Fenstern entfällt und das Wohlbefinden im Raum wird nicht beeinträchtigt. Sie bieten auch gegenüber RLT Anlagen, die ohne oder mit einem geringen Frischluftanteil betrieben werden, den Vorteil, dass die Viren wirklich abgeschieden und mittels UV-C Strahlung und ionisierter Ladung inaktiviert werden und nicht über andere Kanäle im Gebäude verteilt werden. Darüber hinaus sind die Geräte energieeffizient, da die kostspielig erwärmte Raumluft nicht nach draußen geführt wird, wie bei der freien Lüftung oder RLT Anlagen mit großem Außenluftanteil, sondern nur die gesundheitsschädlichen Anteile der Raumluft (Viren, Bakterien, Pollen, Feinstaub,...) abgeschieden und inaktiviert werden. Damit leisten diese Geräte nicht nur einen Beitrag zur Verbesserung der Raumluftqualität, sondern auch zum Klimaschutz während der Pandemie.

Bei der Anschaffung von Entkeimungsgeräten oder Raumluftreinigern ist ganz wichtig, dass die Geräte auch über zuverlässige Einrichtungen zur Abscheidung und Inaktivierung der Viren verfügen. Günstige Geräte verfügen in der Regel weder über ausreichend große Volumenströme (6-fache des Raumvolumens pro Stunde!) noch über effiziente Filter der Klasse H13 / H14 oder vergleichbar, die bei den großen Volumenströmen die erforderlichen Abscheidegrad erbringen, oder leistungsstarke Ionisations- oder UV-C Einheiten.

Abschließend ist zu betonen, dass Entkeimungsgeräte zwar geeignete Werkzeuge sind, um das indirekte Infektionsrisiko zu minimieren, aber das direkte Infektionsrisiko, das durch direktes Anhusten oder beim langen Unterhalten über kurze Distanz erfolgen kann, können sie nur teilweise durch Ionisation der Luft verhindern. Es ist daher wichtig, weiterhin ausreichend große Abstände zu anderen Personen einzuhalten, einfache Mund-Nasen-Bedeckungen oder Faceshields zu tragen oder sich durch Barrieren aus Plexiglas vor einer direkten SARS-CoV-2 Infektion zu schützen.

### **Anmerkung**

Die Untersuchungen wurden durch die Firma Viomed GmbH, Rellingen, finanziell unterstützt. Die Viomed Klinik Akut V 500 Entkeimungsgeräte wurde für die Untersuchungen von der Firma Viomed GmbH bereitgestellt. Die Untersuchungen wurden unter Einhaltung der guten wissenschaftlichen Praxis durchgeführt. Die Unterstützung durch die Firma Viomed GmbH 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, Li 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](http://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] DIN EN 149 (2009) Respiratory protective devices – filtering half masks to protect against particles – requirements, testing, marking. German version EN, 149 (2009) 2001+A1, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin
- [7] 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>
- [8] Kähler CJ, Fuchs T, Hain R (2020) Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? DOI: 10.13140/RG.2.2.27503.46243 <https://www.unibw.de/lrt7/raumlufreiniger.pdf> <https://youtu.be/3Y3KEIUdFFU>
- [9] Geddes L (2020) Does a high viral load or infectious dose make covid-19 worse? NewScientist, Magazine issue 3276, <https://www.newscientist.com/article/2238819-does-a-high-viral-load-or-infectious-dose-make-covid-19-worse/>
- [10] <https://www.erinbromage.com/post/the-risks-know-them-avoid-them>
- [11] DGUV Regeln 112–190 (2011) Benutzung von Atemschutzgeräten. Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft [https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/DGUV-Regeln/112\\_190.pdf](https://www.bgbau.de/fileadmin/Medien-Objekte/Medien/DGUV-Regeln/112_190.pdf)
- [12] Etheridge D, Sandberg M (1996) Building Ventilation: Theory and Measurement. Wiley ISBN: 978-0-471-96087-4
- [13] Etheridge D (2011) Natural Ventilation of Buildings: Theory, Measurement and Design. Wiley ISBN: 978-0-470-66035-5
- [14] 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](http://www.fgk.de/images/Aktuelles/2020/08-20/RLT_Covid19_V3_200803.pdf)
- [15] DIN 1946-4 – Raumluftechnik im Gesundheitswesen

- [16] Deutsche Gesellschaft für Krankenhaushygiene (2002) Leitlinienentwurf: Ausführung und Betrieb von raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Krankenhäusern. Hyg Med 27. Jahrgang 2002 – Heft 3
- [17] 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
- [18] <https://wundnetz-kiel.de/kalt-plasma-behandlung-neue-wege-im-wundmanagement/>
- [19] <https://safw.ch/images/safw/dokumente/Barten-Stratmann.pdf>
- [20] <https://www.viromed.de/entkeimung/>
- [21] DIN 1946 Teil 2 (1994) Raumluftechnik: Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)
- [22] 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
- [23] 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
- [24] 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