

STUDIEN zur Bedeutung der Luftfeuchte



Neuartige Coronavirus-Pandemie (COVID-19): ÜBERLEGUNGEN ZUR REDUZIERUNG DER ÜBERTRAGUNG IN GEBÄUDEN

Zusammenfassung

Angesichts der raschen Ausbreitung des Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) haben Unternehmen, Bundes-, Landes-, Kreis- und Stadtverwaltungen, Universitäten, Schulbezirke, Kirchen, Gefängnisse, Gesundheitseinrichtungen, Organisationen für betreutes Wohnen, Kindertagesstätten, Hausbesitzer und andere Gebäudeeigentümer bzw. -nutzer nun die Gelegenheit, das Übertragungspotenzial durch Maßnahmen im Rahmen eines Built-Environment-Konzeptes (BE = „gebaute Umwelt“) zu reduzieren.

In den vergangenen zehn Jahren wurden umfangreiche Forschungsarbeiten über das Vorhandensein, die Häufigkeit, die Vielfalt, die Funktion und die Übertragung von Mikroben in Gebäuden (BE) durchgeführt und häufige Wege und Mechanismen der Erregerweitergabe aufgedeckt. In diesem Papier fassen wir diese Mikrobiologie der BE-Forschung und die bekannten Informationen über SARS-CoV-2 zusammen, um Entscheidungsträgern im BE-Bereich, Gebäudebetreibern und allen Bewohnern von Innenräumen eine praktikable und realistische Anleitung zu geben, wie sie die Verbreitung von Infektionskrankheiten durch umweltbedingte Übertragungswege minimieren können.

Wir glauben, dass diese Informationen den Unternehmen, öffentlichen Verwaltungen und Privatpersonen, die für bauliche Maßnahmen und Umweltleistungen verantwortlich sind, die Entscheidungen bezüglich des Ausmaßes und der Dauer sozialdistanzierender Maßnahmen während viraler Epidemien und Pandemien erleichtern können.

Autoren:

Leslie Dietz, Patrick F. Horve,
David A. Coil, Mark Fretz,
Jonathan A. Eisen,
Kevin Van Den Wymelenberg,

Originaltitel:

2019 Novel Coronavirus (COVID-19)
Pandemic: Built Environment
Considerations To Reduce Transmission

Literaturstelle:

mSystems 5:e00245-20.
<https://doi.org/10.1128/mSystems.00245-20>

Veröffentlicht:

März 2020

Die deutsche Übersetzung basiert auf
einer gekürzten Fassung des Originaltextes

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

Die Coronavirus-Krankheit 2019 (COVID-19)

Im Dezember 2019 wurde das neuartige Coronavirus SARS-CoV-2 in der Stadt Wuhan in der Provinz Hubei, einem wichtigen Verkehrsknotenpunkt in Zentralchina, entdeckt. Die ersten COVID-19-Fälle wurden mit einem großen Markt für Meeresfrüchte in Wuhan in Verbindung gebracht, was zunächst auf einen direkten Übertragungsweg über Nahrungsmittel hindeutete (8). Seither hat man herausgefunden, dass die Übertragung von Mensch zu Mensch einer der Hauptwege bei der Verbreitung von COVID-19 ist (9). Nachdem die ersten Fälle erkannt wurden, hat sich COVID-19 innerhalb weniger Monate auf 171 Länder und Territorien ausgebreitet, und es gibt etwa 215 546 bestätigte Fälle (Stand: 18. März 2020). Es wurden die Übertragungswege Wirt-zu-Mensch und Mensch-zu-Mensch identifiziert. Es gibt vorläufige Hinweise darauf, dass eine umgebungsvermittelte Übertragung möglich sein könnte – dies bedeutet, dass COVID-19-Patienten möglicherweise durch das Berühren einer unbelebten Oberfläche in einer gebauten Umgebung infiziert wurden (10, 11).

Einführung

Aufgrund der weltweit zunehmenden Infektionen mit dem schweren akuten respiratorischen Coronavirus-2-Syndrom (SARS-CoV-2), das die Coronavirus-Krankheit 2019 (COVID-19) verursacht, werden die Prävention und Bekämpfung von SARS-CoV-2 sowohl in der wissenschaftlichen Gemeinschaft als auch in der breiten Öffentlichkeit mit Interesse und Besorgnis verfolgt. Viele der aktuell umgesetzten Maßnahmen gehören zum Standard-Repertoire der Eindämmung virologischer Atemwegserkrankungen, doch es sollten auch andere, weniger bekannte Übertragungswege in den Blick genommen werden, um eine weitere Ausbreitung zu verhindern. Beispielsweise sind durch die Umgebung begünstigte Übertragungswege in Gebäuden bei anderen Krankheitserregern seit Jahrzehnten ein Problem, vor allem in Krankenhäusern. In den vergangenen Jahren wurden umfangreiche Forschungen über das Vorhandensein, die Verbreitung, die Vielfalt, die Funktion und die Übertragung von Mikroorganismen in der gebauten Umwelt (BE) durchgeführt. Dank dieser Arbeit konnten häufige Wege und Mechanismen der Keimverbreitung identifiziert werden, die Rückschlüsse auf mögliche Verfahren zur Eindämmung von SARS-CoV-2 durch Maßnahmen im BE-Bereich zulassen.

COVID-19 und die Rolle der gebauten Umwelt (BE) bei der Übertragung

Als „gebauten Umwelt“ bezeichnet man die Gesamtheit aller Umgebungselemente, die von Menschen errichtet oder produziert wurden, wie beispielsweise Gebäude, PKWs, Straßen, öffentliche Verkehrsmittel und andere von Menschenhand geschaffene Räume (22). Da die meisten Menschen mehr als 90 % ihres täglichen Lebens innerhalb einer gebauten Umgebung verbringen, ist es wichtig, die potentielle Übertragungsdynamik von COVID 19 innerhalb des BE-Ökosystems ebenso wie das menschliche Verhalten, die räumliche Dynamik und die Betriebsfaktoren von Gebäuden zu verstehen, da all dies die Ausbreitung und Übertragung von COVID-19 fördern oder auch eindämmen kann. Gebaute Umgebungen sind potentielle Übertragungsvektoren für die Ausbreitung von COVID-19, da sie enge Interaktionen zwischen Individuen herbeiführen, mikrobentragende Objekte und Flächen (Gegenstände oder Materialien, die wahrscheinlich Infektionskrankheiten übertragen kön-

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

nen) enthalten und den Austausch bzw. die Übertragung über die Luft begünstigen (23, 24). Die Nutzerdichte in Gebäuden, die wiederum von der Art und dem Konzept der Immobilie, von deren Belegungsplan und von der Aktivität in ihrem Inneren abhängig ist, begünstigt Ansammlungen von auf Menschen übertragbaren Mikroorganismen (22). Je mehr Personen sich in den Innenräumen aufhalten und je aktiver dieser sind, desto höher ist meist die soziale Interaktion und die Übertragungsrate aufgrund des direkten Kontaktes zwischen den Individuen (25) und aufgrund des Berührens unbelebter Oberflächen in der Umgebung (z. B. mikrobentragende Objekte).

Wenn sich Personen durch die gebaute Umgebung bewegen, haben sie direkten und indirekten Kontakt mit den sie umgebenden Oberflächen. Viruspartikel können sich aufgrund natürlicher mechanischer Luftstrommuster oder Turbulenzen in der Innenraumumgebung, beispielsweise durch das Auftreten der Füße beim Gehen und Thermikblasen aufgrund der menschlichen Körperwärme, ablagern und wieder aufgewirbelt werden (22, 34). Diese resuspendierenden Viruspartikel können sich dann wieder auf den Objekten und Flächen niederlassen. Wenn eine Person mit einer Oberfläche in Kontakt kommt, findet ein Austausch von mikrobiellem Leben statt (35), d. h. es werden Viren von der Person auf die Oberfläche übertragen und umgekehrt (36). Einmal infiziert, scheiden Personen mit COVID-19 Viruspartikel aus, bevor, während und nachdem sie Symptome zeigen (37, 38). Diese Viruspartikel können sich dann auf unbelebten Objekten in der gebauten Umgebung absetzen und ein potentielles Übertragungsrisiko darstellen (18, 34, 39). Es gibt Hinweise darauf, dass mikrobentragende Objekte und Flächen mit SARS-CoV-2-Partikeln von infizierten Personen kontaminiert werden können, durch Körperflüssigkeiten wie Speichel und Nasensekret, durch den Kontakt mit verunreinigten Händen und durch das Absetzen von aerosolisierten Viruspartikeln und großen Tröpfchen, die beim Sprechen, Niesen, Husten und Erbrechen verbreitet werden (34, 40). Eine Studie zur Umgebungskontamination durch MERS-CoV ergab, dass fast jede berührbare Oberfläche in einem Krankenhaus mit MERS-CoV-Patienten durch das Virus kontaminiert war (41), und auch die Untersuchung eines Krankenzimmers mit einem unter Quarantäne gestellten COVID-19-Patienten zeigte eine umfangreiche Umgebungskontamination (18, 34). Aktuell wird immer mehr Wissen über die Übertragungsdynamik von COVID-19 gesammelt, und Studien zu SARS und MERS-CoV, vorläufige Daten zu SARS-CoV-2 sowie Empfehlungen der CDC legen den Schluss nahe, dass sich SARS-CoV-2 möglicherweise auf Objekten und Flächen halten kann, für einige Stunden bis hin zu fünf Tagen (39, 42, 43), je nach Material (43). Laut vorläufigen Studien zur Beständigkeit von SARS-CoV-2 überlebt das Virus am längsten bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 40 % auf Kunststoffoberflächen (mittlere Halbwertszeit: 15,9 h) und am kürzesten in Aerosolform (mittlere Halbwertszeit: 2,74 h) (43); das Überleben in Aerosolen wurde jedoch bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % bestimmt. Auf der Grundlage von Daten im Zusammenhang mit SARS und MERS gehen wir davon aus, dass SARS CoV 2 in Aerosolen bei einer niedrigeren relativen Luftfeuchtigkeit wahrscheinlich länger überleben kann. SARS-CoV-2 überlebt bei 40 % relativer Luftfeuchtigkeit auf Kupfer (mediane Halbwertszeit: 13,4 h), Pappe (mediane Halbwertszeit: 8,45 h) und Stahl (mediane Halbwertszeit: 13,1 h) länger als in der Luft, jedoch weniger lang als auf Kunststoff (43). Es ist jedoch anzumerken,

Übertragung durch Aerosole und Oberflächen

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

dass es bisher keine dokumentierten Fälle einer COVID-19-Infektion gibt, die von mikrobentragenden Objekten oder Flächen herrühren. Es gibt vorläufige Daten, die das Vorhandensein von SARS-CoV-2 in Stuhlproben belegen, was darauf hindeutet, dass die Übertragung möglicherweise auch fäkal-oral erfolgen kann (18, 29, 34, 44). Obwohl COVID-19-Infektionen bisher nur durch die Ausbreitung von Atemtröpfchen und nicht durch Ablagerungen auf Objekten oder Flächen dokumentiert wurden, sollten dennoch Schritte unternommen werden, um alle möglicherweise mit SARS-CoV-2 belasteten Oberflächen zu reinigen und zu desinfizieren, in der Annahme, dass das aktive Virus auch durch den Kontakt mit diesen unbelebten Materialien übertragen werden kann (34, 39). Um optimale Sicherheit zu garantieren, sollte daher unbedingt die Möglichkeit in Betracht gezogen werden, dass das Virus durch Aerosole und durch Oberflächen übertragen wird (45). Eine Konzeptualisierung der SARS-CoV-2-Ausscheidung zeigt Abb. 2.



Es wurde bereits nachgewiesen, dass SARS durch Tröpfchen übertragen werden kann und meist auch auf diese Weise übertragen wird (46). Da es sich bei SARS-CoV-2 um einen Schwester-Stamm des SARS-Virus aus dem Jahr 2002 – das bekanntermaßen von Mensch zu Mensch übertragen wird – handelt (47) und angesichts der hohen Inzidenz der beobachteten Übertragungen von Mensch zu Mensch sowie der raschen Ausbreitung von COVID-19 auf der ganzen Welt und in Gemeinden, besteht nun kein Zweifel mehr daran, dass SARS-CoV-2 auch durch Tröpfchen verbreitet werden kann (13, 48). Doch auf der Grundlage früherer Untersuchungen zu SARS (49) gilt die Übertragung durch Aerosolisierung weiterhin als sekundäre Übertragungsmethode, insbesondere innerhalb der gebauten Umwelt. Um eine Virusübertragung durch Luftzufuhrsysteme in gebauten Umgebungen zu vermeiden,

Abbildung 2

Konzeptualisierung der SARS-CoV-2-Ausscheidung. (a) Sobald eine Person mit SARS-CoV-2 infiziert ist, sammeln sich Viruspartikel in der Lunge und in den oberen Atemwegen an. (b) Tröpfchen und aerosolisierte Viruspartikel werden durch alltägliche Aktivitäten wie Husten, Niesen und Sprechen sowie durch nicht-routinemäßige Ereignisse wie Erbrechen aus dem Körper ausgeschieden und können sich in die nahe Umgebung und auf andere Personen ausbreiten (34, 40). (c und d) Viruspartikel, die aus Mund und Nase ausgeschieden werden, befinden sich häufig an den Händen (c) und können auf oft berührte Gegenstände (d) wie Computer, Brillen, Wasserhähne und Arbeitsplatten übertragen werden. Derzeit gibt es keine bestätigten Fälle einer Übertragung von mikrobenbelasteten Objekten und Flächen auf Menschen, doch es wurden Viruspartikel auf unbelebten Materialien in gebauten Umgebungen gefunden (34, 39, 42).

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

werden in der Regel integrierte Filtermedien benötigt. Für Wohn- und Gewerbegebäude wird in der Regel ein Mindesteffizienzberichtswert (MERV) von 8 festgelegt, d. h. es müssen 70 bis 85 % aller Partikel mit einer Größe von 3,0 bis 10,0 µm abgefangen werden. Mit diesem Konzept lassen sich die Auswirkungen von Ablagerungen und Effizienzverlusten bei Kühlschlangen und anderen Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagenkomponenten (HVAC) minimieren. Um die einströmende Außenluft auf der Grundlage der lokalen Außenpartikelwerte zu filtern, sind höhere MERV-Werte erforderlich. Für Räume mit Schutzatmosphäre in Krankenhäusern ist die strengste Mindestfiltereffizienz vorgeschrieben (50). Ein erster Filter mit einem MERV-Wert von 7 (MERV-7) oder höher muss den Heiz- und Kühlgeräten vorgelagert sein, und ein zweiter hocheffizienter Schwebstofffilter (HEPA-Filter) wird hinter den Kühlschlangen und Ventilatoren platziert. HEPA-Filter sind so ausgelegt, dass sie mindestens 99,97 % aller Partikel mit einer Größe von nur 0,3 µm abfangen (51). In den meisten Wohn- und Gewerbegebäuden kommen MERV-5- bis MERV-11-Filter zum Einsatz, in besonders sensiblen Gesundheitsumgebungen auch Anlagen mit einem Wert von MERV-12 oder mehr, oder HEPA-Filter. MERV-13-Filter haben das Potenzial, Mikroben und andere Partikel mit einer Größe von 0,3 bis 10,0 µm zu entfernen. Die meisten Viren, einschließlich der Coronaviren, haben eine Größe von 0,004 bis 1,0 µm. Daher ist die Wirksamkeit derartiger Filtrationstechniken gegen Krankheitserreger wie SARS-CoV-2 begrenzt (52). Außerdem ist kein Filtersystem perfekt. Kürzlich wurde festgestellt, dass Ritzen in den Rändern von Filtern ein Grund dafür waren, warum die Filtersysteme in Krankenhäusern bestimmte Erreger nicht aus der allgemeinen Atemluft entfernen konnten (53). In den vergangenen Jahren hat die Share Economy neue Umgebungen und Konzepte geschaffen, dank derer sich mehrere Menschen ein und dieselben Räume teilen können. Es ist möglich, dass die Übertragung von Infektionskrankheiten durch diesen Trend zur Share Economy beeinflusst wird. Gemeinsam genutzte Arbeitsräume (beispielsweise in Coworking-Spaces), Zimmer, Autos, Fahrräder und andere Elemente der gebauten Umwelt können die Wahrscheinlichkeit von durch die Umgebung vermittelten Infektion erhöhen und die Durchsetzung sozialdistanzierender Maßnahmen erschweren. Beispielsweise befand sich früher auch im Rahmen alternativer Transportkonzepte meist nur eine Person in einem Fahrzeug, heute dagegen bildet man häufig Fahrgemeinschaften oder nutzt Transportnetzwerke, wodurch sich das Gefährdungspotenzial erhöhen kann.

Maßnahmen zur Infektionsvermeidung in gebauten Umgebungen

Hinsichtlich der Ausbreitung von COVID-19 können sich Situationen sehr schnell ändern, doch sowohl innerhalb als auch außerhalb der gebauten Umwelt lassen sich Infektionsketten durch gezielte Maßnahmen unterbrechen. Auf der persönlichen Ebene spielt sorgfältiges Händewaschen eine entscheidende Rolle bei der Vermeidung von Infektionen mit SARS CoV-2, anderen Coronaviren und vielen Atemwegskeimen (54–56). Man sollte den Kontakt und die räumliche Nähe zu infizierten Personen meiden und sich häufig und mindestens 20 Sekunden lang die Hände mit Seife und heißem Wasser waschen (39). Da es sich zudem nur schwer feststellen lässt, wer infiziert ist und wer nicht, lassen sich Infektionsketten oft am besten unterbrechen, indem man große Ansammlungen von Einzelpersonen meidet, was auch als „Social Distancing“ bekannt ist.

Filtersysteme

Share Economy

Handhygiene

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

Zum jetzigen Zeitpunkt empfiehlt die Food and Drug Administration (FDA) nicht, dass symptomfreie Personen im Alltag hochwertige Masken tragen sollten, denn man möchte derartige Masken und Materialien für mit COVID-19 infizierte Personen sowie für medizinisches Personal und Familienangehörige, die in ständigem Kontakt mit COVID-19-Infizierten stehen, vorrätig halten (57). Darüber hinaus kann das Tragen einer Maske ein falsches Gefühl der Sicherheit vermitteln, wenn man sich in potenziell kontaminierten Bereichen bewegt, und die falsche Handhabung und Verwendung von Masken kann die Übertragungsgefahr sogar erhöhen (58). Sobald diese Masken jedoch in ausreichender Zahl verfügbar werden, wäre es ratsam, eine solche Maske zu tragen, wobei die Beschäftigten des Gesundheitswesens, die sich täglich in einer gefährdeteren Umgebung aufhalten, hier natürlich weiterhin Vorrang haben. Es gibt viele Hinweise darauf, dass eine Übertragung über die Luft (49) durch aerosolisierte Partikel auch über Entfernungen von mehr als 1,8 Metern hinweg möglich ist und dass eine Maske dabei helfen würde, Infektionen auf diesem Weg zu verhindern.

Seit Ende Januar 2020 haben viele Länder Reiseverbote erlassen, um Infektionen von Mensch zu Mensch und die partikelbasierte Übertragung zu verhindern. Diese Mobilitätseinschränkungen wurden erlassen, um die Verbreitung von COVID-19 einzudämmen (59). Auch innerhalb lokaler Gemeinschaften kann eine Vielzahl von Schritten unternommen werden, um eine weitere Ausbreitung zu verhindern (60). Derartige Maßnahmen sind als „Social Distancing außerhalb des Gesundheitswesens“ bekannt. Zu diesen gehört die Schließung von Bereichen mit hohem Personenaufkommen, wie beispielsweise Schulen und bestimmte Arbeitsumgebungen. Diese Maßnahmen auf Gemeindeebene verhindern die Übertragung von Krankheiten durch die gleichen Mechanismen wie die weltweiten Reisebeschränkungen, indem sie den typischen Kontakt von Mensch zu Mensch reduzieren, die Gefahr einer Kontamination von Oberflächen und Objekten durch Viruspartikel ausscheidende Personen verringern und die Wahrscheinlichkeit minimieren, dass infektiöse Partikel über die Luft andere im selben Raum oder in unmittelbarer Nähe befindliche Personen erreichen. Diese Entscheidungen werden von Einzelpersonen getroffen, die administrative Entscheidungsbefugnisse im Hinblick auf große Amtsbereiche, Gemeinde oder Gebäudekomplexe haben und die unter Berücksichtigung zahlreicher Faktoren – darunter Gesundheitsrisiken bzw. soziale und wirtschaftliche Auswirkungen – abwägen. Darüber hinaus werden auch in Zeiten erheblicher sozialer Distanzierungs- und Quarantänenvorschriften bestimmte Gebäudetypen und Raumnutzungen als kritische und wesentliche Infrastruktur angesehen, wie z. B. Gesundheitseinrichtungen, Wohngebäude und Lebensmittelgeschäfte. Je besser die relevanten Faktoren im Hinblick auf gebaute Umgebungen verstanden wurden, desto einfacher sind Entscheidungen darüber, ob und für welche Dauer sozialdistanzierende Maßnahmen durchgeführt werden sollen. Dies gilt auch für Personen, die in Zeiten sozialer Distanzierung für den Baubetrieb und Umweltdienste im Zusammenhang mit essentieller und kritischer Infrastruktur verantwortlich sind, sowie für alle Gebäudearten vor und nach der Durchführung sozialdistanzierender Maßnahmen.

Mund-Nasen-Masken**Social Distancing**

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

In der gebauten Umwelt können auch die Umgebung betreffende Maßnahmen ergriffen werden, um die Ausbreitung von SARS-CoV-2 zu verhindern, beispielsweise lassen sich Viruspartikel auf Oberflächen chemisch eliminieren (39). Es hat sich gezeigt, dass 62 bis 71-prozentiges Ethanol MERS-, SARS- (42) und SARS-CoV-2-Erreger zuverlässig vernichtet (34). Diese Ethanolkonzentration ist typisch für die meisten alkoholbasierten Handdesinfektionsmittel, die bei richtiger Anwendung somit gute Dienste bei der Bekämpfung von SARS-CoV-2 in gebauten Umgebungen leisten. Gegenstände sollten aus den Spülbeckenbereichen entfernt werden, um sicherzustellen, dass aerosolisierte Wassertropfen keine Viruspartikel auf häufig verwendete Gegenstände tragen, und die Arbeitsplatten um die Spülbecken herum sollten regelmäßig mit einer 10-prozentigen Bleichlösung oder einem alkoholhaltigen Reinigungsmittel behandelt werden. Auch hier darf man jedoch nicht vergessen, dass bei früheren Coronavirus-Ausbrüchen die Übertragung von Tröpfchen beim Sprechen, Niesen, Husten und Erbrechen als wichtigster und weitaus häufigerer Infektionsweg identifiziert wurde, und nicht der fäkal-orale Weg (34, 38, 39). Die Verwalter und Betreiber von Gebäuden sollten Schilder über die Wirksamkeit des mindestens 20 sekundigen Händewaschens mit Seife und heißem Wasser anbringen, stets gefüllte Seifenspender aufstellen, den Zugang zu alkoholbasierten Händedesinfektionsmitteln ermöglichen und Protokolle für die routinemäßige Reinigung von Oberflächen mit hohem Kontaminationsrisiko (beispielsweise in der Nähe von Waschbecken und Toiletten) einführen (39). Um die Übertragung von Mikroben und damit unerwünschter Krankheitserreger zu verhindern, ist es vor allem wichtig, eine angemessene Hand-Hygiene zu gewährleisten (39, 61).

Desinfektion

Die Einführung verbesserter Betriebsverfahren im Bereich der Heiz- und Klimatechnik in Gebäuden kann das Ausbreitungspotenzial von SARS-CoV-2 ebenfalls verringern. Auch wenn die Viruspartikel zu klein sind, um selbst von den besten HEPA- und MERV-Filtern zurückgehalten zu werden, können Vorkehrungen im Bereich der Belüftung die Ausbreitung von SARS-CoV-2 minimieren. Ordnungsgemäß eingebaute und gewartete Filter können das Risiko einer Übertragung über die Luft verringern – wohlgernekt jedoch nicht ganz eliminieren. Ein höherer Außenluftanteil und verstärkte Luftaustauschraten in Gebäuden können in gebauten Umgebungen die Konzentration von Schadstoffen (einschließlich Viren) in der Innenraum-Atemluft verringern. Höhere Außenluftanteile können erreicht werden, indem man die Außenluftklappen an den Lüftungsanlagen besonders weit öffnet, sodass mehr Raumluft und damit auch eventuell vorhandene luftgetragene Viren abgesaugt werden (62). In Bezug auf diese Parameter des Gebäudebetriebs sind jedoch einige Vorsichtsmaßnahmen zu beachten. Erstens kann ein höherer Außenluftanteil den Energieverbrauch steigern. Über kürzere Zeiträume hinweg wird sich diese Maßnahme zum Schutz der Gesundheit sicherlich lohnen, doch der Gebäudebetreiber wird mit dem Ende der Risikoperiode möglichst schnell zu normalen Verhältnissen zurückkehren wollen. Zweitens haben nicht alle Lüftungsanlagen die Kapazität, um den Außenluftanteil nennenswert zu erhöhen, und bei denjenigen, die dies können, müssen die Filter möglicherweise häufiger gewartet werden. Drittens könnte die Übertragungsgefahr sogar steigen, wenn durch eine Intensivierung des Luftstromes lediglich die vorhandene Luft verstärkt umgewälzt und keine frische Luft von außen zugeführt wird. Bei höheren Luftstromgeschwindigkeiten könnten mehr Mikroben

Belüftung

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

von belasteten Objekten und Flächen aufgenommen werden, sodass sich das Kontaminationspotenzial im gesamten Gebäude erhöht, wenn die Raumluft schneller und in größeren Mengen verteilt wird und möglicherweise mehr ultrafeine Partikel resuspendiert werden (62). Darüber hinaus könnte eine Erhöhung der Raumluftzirkulationsrate die Menschen im Gebäude mit noch mehr lebensfähigen luftgetragenen Viren in Kontakt bringen, die von anderen Gebäudenutzern ausgeschieden werden. Die Verwalter und Betreiber von Gebäuden sollten daher gemeinsam in Erfahrung bringen, ob eine Erhöhung des Außenluftanteils sinnvoll ist und welche Nachteile oder indirekten Auswirkungen zu berücksichtigen sind, ehe sie einen Plan zur Regulierung des Außenluftanteils und der Luftaustauschraten ausarbeiten. Es gibt immer mehr Hinweise darauf, dass Feuchtigkeit eine Rolle für das Überleben membrangebundener Viren wie SARS-CoV-2 spielt (63–65).

Frühere Forschungen haben ergeben, dass viele Viren, einschließlich der Coronaviren, bei typischen Innentemperaturen und einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 40 % im Allgemeinen weniger gut überleben können (63, 66, 67), zudem reduzierte eine höhere relative Luftfeuchtigkeit in Innenräumen bei simuliertem Hustentests nachweislich die Infektiosität von Grippeviren (67). Laut den Erkenntnissen aus Studien mit anderen Viren, darunter auch Coronaviren, verringert eine höhere relative Feuchtigkeit auch die Ausbreitung in der Luft, da größere Tröpfchen, die Viruspartikel enthalten, zurückgehalten werden, wodurch sie sich schneller auf Raumoberflächen ablagern (63, 68, 69). Eine höhere Luftfeuchtigkeit schädigt lipidumhüllte Viren (zu denen auch die Coronaviren zählen) vermutlich durch Wechselwirkungen mit den polarisierten Membranfortsätzen, sodass sich die chemische Zusammensetzung der Membran verändert und das Virus abgetötet wird (70, 71). Darüber hinaus können Veränderungen der Luftfeuchtigkeit einen Einfluss darauf haben, wie anfällig eine Person für eine Infektion mit Viruspartikeln ist (72) und wie weit die Viren in die Atemwege vordringen (68). Eine verminderte relative Luftfeuchtigkeit dagegen verringert nachweislich das Ausscheiden eindringender Krankheitserreger über den körpereigenen Schleim und schwächt die angeborene Immunabwehr (72–74). Eine relative Luftfeuchtigkeit von mehr als 80 % kann jedoch zu einer verstärkten Schimmelbildung führen, was potenziell schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit haben kann (75). Obwohl der aktuelle Belüftungsstandard für Gesundheits- und Pflegeeinrichtungen (ASHRAE 170-2017) im Hinblick auf die relative Luftfeuchtigkeit einen breiteren Bereich von 20 bis 60 % zulässt, empfiehlt es sich unter Umständen, die relative Luftfeuchtigkeit dauerhaft auf einen Bereich von 40 bis 60 % einzustellen, um die Ausbreitung und das Überleben von SARS-CoV-2 innerhalb der gebauten Umgebung zu begrenzen, das Schimmel-Risiko zu minimieren und die Schleimhautbarrieren der menschlichen Nutzer in einem ausreichend feuchten und intakten Zustand zu halten (50, 67). Die Raumluftbefeuchtung wurde bei den meisten HVAC-Systemkonzepten nicht berücksichtigt, was vor allem auf die Kosten der Ausstattung und auf Bedenken hinsichtlich der Wartung im Zusammenhang mit dem Risiko einer Überbefeuchtung, welche die Gefahr einer Schimmelbildung erhöht, zurückzuführen ist. Zwar sollten die Verwalter und Betreiber von Gebäuden die Kosten, Vorteile und Risiken einer zentralen Befeuchtungsanlage in Betracht ziehen (insbesondere bei Neubauten oder als Nachrüstungsoption), doch kann dies als Reaktion auf einen spezifischen Virusausbruch oder eine Virusepisode zu zeitin-

Luftfeuchtigkeit**40 – 60 % relative Feuchte**

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

tensiv sein. Darüber hinaus kann eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit zu einer verstärkten Ablagerung auf Filtern führen, wodurch der Luftstrom abnimmt. In Pandemiesituationen jedoch erleichtert dieses Vorgehen wahrscheinlich das Auffangen von Viruspartikeln, und dieser Vorteil überwiegt den erhöhten Wartungsaufwand des Filters. Daher ist eine gezielte Raumluftbefeuchtung eine weitere Option, die in Betracht gezogen werden sollte – zudem kann sie die Wahrscheinlichkeit verringern, dass ein Wartungsfehler zu einer Überbefeuchtung führt.

Die Quelle der Gebäudelüftung und die Länge des Verteilungsweges können die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften in Innenräumen beeinflussen. Die Belüftung eines Gebäudes durch Einleiten von Luft direkt durch die Fassade in angrenzende Räume ist eine Strategie, wenn man sich nicht auf die Wirksamkeit einer Filtration des gesamten Gebäudes verlassen will, um die Verbreitung von Mikroorganismen im System zu verhindern. Es hat sich gezeigt, dass die direkte Zufuhr von Außenluft durch die Fassade in ein angrenzendes Raumvolumen die phylogenetische Vielfalt von Bakterien- und Pilzgemeinschaften in Innenräumen erhöht und Gemeinschaften schafft, die den im Freien lebenden Mikroben ähnlicher sind als diejenigen in einer Luft, die durch ein zentralisiertes HVAC-System zugeführt wurde (76). In einigen Gebäuden kann ein ähnlicher Ansatz durch verteilte HVAC-Einheiten realisiert werden, wie z. B. verpackte Terminalklimaanlagen (PTAC), die häufig in Hotels, Motels, Seniorenheimen, Eigentumswohnungen und Apartments zu finden sind, oder durch passive Belüftungsstrategien an der Fassade, wie z. B. gedämpfte Belüftungsöffnungen (77, 78). Bei den meisten Gebäuden ist es jedoch am einfachsten, die Außenluft direkt durch das Gebäude zu leiten, indem man ein Fenster öffnet. Die Fensterlüftung umgeht nicht nur die Lüftungskanäle, sondern erhöht auch den Anteil der Außenluft und den Gesamtluftaustausch (79). Die Verwalter und Betreiber von Gebäuden sollten einen Plan zur Verbesserung der Belüftung über die Fassade und insbesondere die Fenster erarbeiten, sofern die Außentemperaturen dies zulassen. Es sollte darauf geachtet werden, dass die Bewohner keinen extremen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind, und Vorsicht ist geboten, wenn die räumliche Nähe eine Virenübertragung von einer Wohnung zur nächsten begünstigen würde (94, 95).

Fensterlüftung

Lichteinwirkung ist ein weiteres Mittel zur Verringerung der Lebensfähigkeit bestimmter infektiöser Erreger in Innenräumen. Tageslicht ist ein allgegenwärtiges und bestimmendes Element in der Architektur: Im Rahmen von Mikrokosmos-Studien hat sich gezeigt, dass es in Hausstaub vorkommende Bakterien verändert, sodass diese sich weniger gut im Menschen verbreiten als es in dunkleren Räumen der Fall wäre (80). Darüber hinaus reduzierte Tageslicht sowohl im UV- als auch im sichtbaren Spektralbereich die Lebensfähigkeit von Bakterien, was anhand von Vergleichen mit Kontrollproben aus dunkleren Mikrokosmosräumen bestätigt wurde (80). In einer Studie, die Sonnenlicht auf Influenzavirus-Aerosolen simulierte, ließ sich die Halbwertszeit des Virus signifikant reduzieren, von 31,6 Minuten in der Dunkelheits-Kontrollgruppe auf etwa 2,4 Minuten im simulierten Sonnenlicht (81). In Gebäuden wird ein Großteil des Sonnenlichtspektrums durch Architektur-Fensterglas gefiltert, und das hindurchgelassene UV-Licht wird von den Oberflächen weitgehend absorbiert und nicht tiefer in den Raum reflektiert. Daher sind weitere For-

Tageslicht

Überlegungen zur Reduzierung von Übertragungen in der gebauten Umwelt

schungsarbeiten erforderlich, um den Einfluss von natürlichem Licht auf SARS-CoV-2 in Innenräumen zu verstehen; bis dahin ist Tageslicht jedoch eine kostenlose, frei verfügbare Ressource für die Gebäudenutzer und hat nur geringe Nachteile, jedoch viele dokumentierte positive Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit (80–83). Um reichlich Tages- und Sonnenlicht hereinzulassen, sollten die Verwalter und Betreiber von Gebäuden daher dazu aufrufen, Jalousien und Rollläden zu öffnen, wann immer diese nicht benötigt werden (um Blendeffekte zu vermeiden, die Privatsphäre zu schützen oder den Komfort der Nutzer aus anderen Gründen zu erhöhen).

Während die Wirkung von Tageslicht auf Innenraum-Viren und SARS-CoV-2 noch unerforscht ist, wird spektral abgestimmtes elektrisches Licht bereits als technisches Mittel für die Desinfektion in Innenräumen eingesetzt. UV-Licht im Bereich kürzerer Wellenlängen (254 nm UV C [UVC]) ist besonders keimtötend, und auf diesen Teil des Lichtspektrums abgestimmte Vorrichtungen werden in klinischen Einrichtungen wirksam eingesetzt, um infektiöse Aerosole zu inaktivieren und um die Überlebensfähigkeit bestimmter Viren zu verringern (84). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Großteil des UVC-Lichtes in der Atmosphäre eliminiert wird, während das UVA- und UVB-Spektrum teilweise durch die Gebäude-Glasschichten ausgefiltert wird. Die Zahl der durch die Luft übertragenen Viren, die einsträngige RNA (ssRNA) enthalten, lässt sich bereits mit einer niedrigen Dosis UV-Licht um 90 % reduzieren, bei RNA-Viren auf Oberflächen wird dagegen eine höhere UV-Dosis benötigt (85, 86). Eine frühere Studie hat gezeigt, dass eine zehninminütige Bestrahlung mit UVC-Licht bereits 99,999 % der überprüften Coronaviren (SARS-CoV und MERS-CoV) eliminierte (87). Keimtötende UV-Strahlung (UVGI) ist möglicherweise jedoch nicht ganz ungefährlich, wenn die Personen im Raum hochenergetischem Licht ausgesetzt werden. Aus diesem Grund werden die UVGI Quellen in mechanischen Lüftungswegen oder in Systemen im oberen Raumbereich installiert, um die Luft indirekt und gefahrlos durch konvektive Luftbewegungen zu behandeln (88, 89). Vor Kurzem hat sich gezeigt, dass weit entferntes UVC-Licht im Bereich von 207 bis 222 nm luftgetragene aerosolisierte Viren wirksam eliminieren kann. Zwar deuten vorläufige Ergebnisse aus In-vivo-Nagetier-Modellen und dreidimensionale (3-D) In-vitro-Modelle menschlicher Haut darauf hin, dass keine Schäden an der Haut und den Augen von Personen zu befürchten sind (90, 91), dennoch muss die Sicherheitsmarge im Rahmen weiterer Untersuchungen überprüft werden, ehe dieses Verfahren in die Tat umgesetzt werden kann. Wenn es sicher eingesetzt werden kann, lassen sich mithilfe von UVC- und UVGI-Licht eine ganze Reihe potenzieller Desinfektionsstrategien für Gebäude und für eine Tiefenreinigung im Gesundheitswesen realisieren. Eine gezielte UVC- und UVGI-Desinfektion kann in verschiedenen Arten von Räumen, in denen sich positiv auf COVID-19 getestete Personen aufgehalten haben, angebracht sein, doch ein routinemäßiger Einsatz dieses Verfahrens kann unbeabsichtigte Folgen haben und kommt nur bei entsprechenden Vorsichtsmaßnahmen infrage.

UV-C Licht

Büroformen

Die räumliche Anordnung von Gebäuden kann soziale Interaktionen fördern oder erschweren. In den vergangenen Jahren hat die westliche Gesellschaft ein Baukonzept bevorzugt, das visuelle Transparenz und ein Gefühl von „Geräumigkeit“ in Innenräumen betont, sei es zu Hause in Form von Großraumkonzepten oder am Arbeitsplatz, wo eine offene Büroraumplanung mit weitläufigen Layouts die Anwesenden bewusst auf Knotenpunkte „zufälliger Begegnungen“ lenkt, um die Zusammenarbeit und den Ideenaustausch unter den Mitarbeitern zu fördern. Zwar haben diese räumlichen Konfigurationen aus kultureller Sicht viele Vorteile, doch sie können unbeabsichtigt die Gefahr einer Übertragung von Viren durch gezielte menschliche Interaktion erhöhen. Ein Grund hierfür ist, dass große, hoch frequentierte offene Büroräume – ganz im Gegensatz zum Einzelbüro – den direkten Kontakt zwischen den Beschäftigten fördern. Die Raumsyntaxanalyse zeigt eine Beziehung zwischen der räumlichen Disposition und der Intensität des persönlichen Kontaktes (Abb. 3) – dieses Verhältnis korreliert nachweislich mit der Häufigkeit und Vielfalt von Mikroben in einem bestimmten Raum (92). Das Verständnis dieser räumlichen Konzepte könnte Teil des Entscheidungsprozesses sein, ob sozialdistanzierende Maßnahmen umgesetzt werden sollen, in welchem Umfang die Personendichte begrenzt werden soll und wie lange die Maßnahmen aufrechterhalten werden sollen.

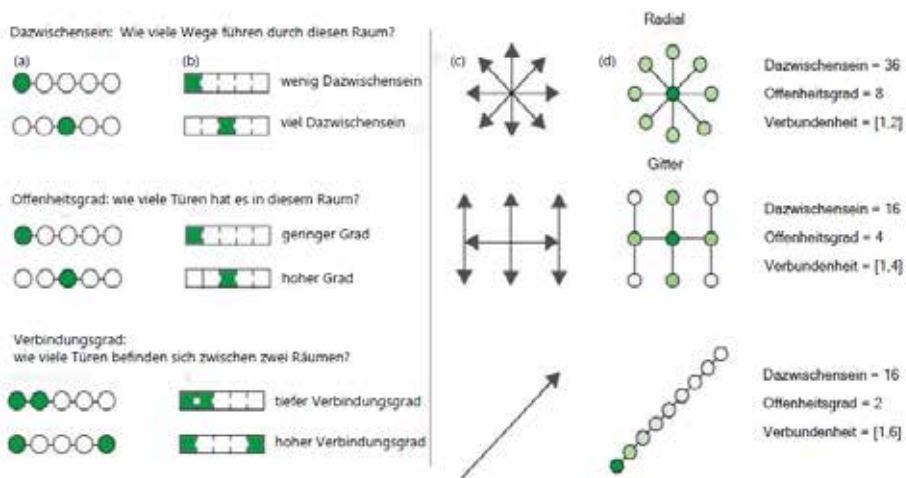


Abbildung 3

Grafiken zur räumlichen Konnektivität, die das Verhältnis zwischen Trennendem und Verbindendem in gemeinsam genutzten Räumen und im Hinblick auf Türanordnungen verdeutlichen. (a) Bei den Kreisen und Linien handelt es sich um eine klassische Netzwerkdarstellung. (b) Die Rechtecke verdeutlichen die Übertragung in ein architektonisches Netzwerkkonzept. Die farbliche Abstufung dient als Maß für das „Dazwischensein“ (die Anzahl der kürzesten Wege zwischen allen Raumpaaren, die durch einen gegebenen Raum führen, über die Summe aller kürzesten Wege zwischen allen Raumpaaren im Gebäude), die Intensität (die Anzahl der Verbindungen eines Raumes zu anderen Räumen zwischen zwei beliebigen Räumen) und die Verbundenheit (die Anzahl der Türen zwischen zwei beliebigen Räumen). (c) Die Pfeile stellen mögliche Richtungen der Ausbreitung von Mikroben dar, die durch die Aufteilung der gebauten Umgebung bestimmt werden. (d) Die Kreise repräsentieren den aktuellen Wissensstand über die mikrobielle Ausbreitung auf der Büroformen Grundlage der durch die Raumaufteilung bestimmten Keimkonzentrationen in der gebauten Umgebung. Dunklere Farben stehen für eine höhere Keimkonzentration, hellere Farben für eine niedrigere.

Schlussfolgerung

Die Anzahl der Personen, die sich mit COVID-19 infiziert haben oder mit dem Virus SARS-CoV-2 in Kontakt kamen, steigt dramatisch an. Es wurden mikrobiologische Forschungsarbeiten im BE-Bereich aus mehr als einem Jahrzehnt ausgewertet, um aktuelle Erkenntnisse hinsichtlich der Überwachung und des Zustandekommens häufiger Pathogenübertragungswege und -mechanismen in gebauten Umgebungen zu gewinnen, die möglichst genau auf SARS-CoV-2 zutreffen. Wir hoffen, dass diese Informationen dabei helfen, mittels informierter Entscheidungen und fundierter Infektionsvermeidungsmaßnahmen das Übertragungspotenzial im Rahmen eines Built-Environment-Konzeptes zu minimieren. Zudem sollen diese Informationen Unternehmen sowie öffentlichen Verwaltungen und Privatpersonen, die für den Bau und den Betrieb von Gebäuden verantwortlich sind, Entscheidungen bezüglich des Ausmaßes und der Dauer sozialdistanzierender Maßnahmen während viraler Epidemien und Pandemien erleichtern.

Quellen:

1. Parrish CR, Holmes EC, Morens DM, Park E-C, Burke DS, Calisher CH, Laughlin CA, Saif LJ, Daszak P. 2008. Cross-species virus transmission and the emergence of new epidemic diseases. *Microbiol Mol Biol Rev* 72:457–470. doi:10.1128/MMBR.00004-08.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
2. de Groot RJ, Baker SC, Baric RS, Brown CS, Drosten C, Enjuanes L, Fouchier RAM, Galiano M, Gorbalenya AE, Memish ZA, Perlman S, Poon LLM, Snijder EJ, Stephens GM, Woo PCY, Zaki AM, Zambon M, Ziebuhr J. 2013. Commentary: Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV): announcement of the Coronavirus Study Group. *J Virol* 87:7790–7792. doi:10.1128/JVI.01244-13.FREE Full TextGoogle Scholar
3. Peiris JSM, Lai ST, Poon LLM, Guan Y, Yam LYC, Lim W, Nicholls J, Yee WKS, Yan WW, Cheung MT, Cheng VCC, Chan KH, Tsang DNC, Yung RWH, Ng TK, Yuen KY, SARS Study Group. 2003. Coronavirus as a possible cause of severe acute respiratory syndrome. *Lancet* 361:1319–1325. doi:10.1016/S0140-6736(03)13077-2. CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
4. Hui DSC, Chan MCH, Wu AK, Ng PC. 2004. Severe acute respiratory syndrome (SARS): epidemiology and clinical features. *Postgrad Med J* 80:373–381. doi:10.1136/pgmj.2004.020263.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
5. World Health Organization. 5 January 2020. Pneumonia of unknown cause – China. World Health Organization, Geneva, Switzerland.Google Scholar
6. Peeri NC, Shrestha N, Rahman MS, Zaki R, Tan Z, Bibi S, Baghbanzadeh M, Aghamohammadi N, Zhang W, Haque U. 22 February 2020. The SARS, MERS and novel coronavirus (COVID-19) epidemics, the newest and biggest global health threats: what lessons have we learned? *Int J Epidemiol* doi:10.1093/ije/dyaa033.CrossRefGoogle Scholar
7. Ramadan N, Shaib H. 2019. Middle East respiratory syndrome coronavirus (MERS-CoV): a review. *Germs* 9:35–42. doi:10.18683/germs.2019.1155.CrossRefGoogle Scholar
8. Wu P, Hao X, Lau EHY, Wong JY, Leung KSM, Wu JT, Cowling BJ, Leung GM. 2020. Real-time tentative assessment of the epidemiological characteristics of novel coronavirus infections in Wuhan, China, as at 22 January 2020. *Euro Surveill* 25:2000044. <https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.3.2000044>. CrossRefPubMedGoogle Scholar
9. Li Q, Guan X, Wu P, Wang X, Zhou L, Tong Y, Ren R, Leung KSM, Lau EHY, Wong JY, Xing X, Xiang N, Wu Y, Li C, Chen Q, Li D, Liu T, Zhao J, Li M, Tu W, Chen C, Jin L, Yang R, Wang Q, Zhou S, Wang R, Liu H, Luo Y, Liu Y, Shao G, Li H, Tao Z, Yang Y, Deng Z, Liu B, Ma Z, Zhang Y, Shi G, Lam TTY, Wu JTK, Gao GF, Cowling BJ, Yang G, Leung GM, Feng Z. 29 January 2020. Early transmission dynamics in Wuhan, China, of novel coronavirus-infected pneumonia. *N Engl J Med* doi:10.1056/NEJMoa2001316.CrossRefPubMedGoogle Scholar
10. Rothan HA, Byrareddy SN. 26 February 2020. The epidemiology and pathogenesis of coronavirus disease (COVID-19) outbreak. *J Autoimmun* doi:10.1016/j.jaut.2020.102433.CrossRefPubMedGoogle Scholar
11. Sizun J, Yu MW, Talbot PJ. 2000. Survival of human coronaviruses 229E and OC43 in suspension and after drying on surfaces: a possible source of hospital-acquired infections. *J Hosp Infect* 46:55–60. doi:10.1053/jhin.2000.0795.CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
12. Chen Y, Liu Q, Guo D. 2020. Emerging coronaviruses: genome structure, replication, and pathogenesis. *J Med Virol* 92:418–423. doi:10.1002/jmv.25681.CrossRefPubMedGoogle Scholar
13. Chan J-W, Yuan S, Kok K-H, To KK-W, Chu H, Yang J, Xing F, Liu J, Yip CC-Y, Poon R-S, Tsoi H-W, Lo S-F, Chan K-H, Poon V-M, Chan W-M, Ip JD, Cai J-P, Cheng V-C, Chen H, Hui C-M, Yuen K-Y. 2020. A familial cluster of pneumonia associated with the 2019 novel coronavirus indicating person-to-person transmission: a study of a family cluster. *Lancet* 395:514–523. doi:10.1016/S0140-6736(20)30154-9.CrossRefPubMedGoogle Scholar
14. Fehr AR, Perlman S. 2015. Coronaviruses: an overview of their replication and pathogenesis. *Methods Mol Biol* 1282:1–23. doi:10.1007/978-1-4939-2438-7_1. CrossRefPubMedGoogle Scholar
15. Walls AC, Park Y-J, Tortorici MA, Wall A, McGuire AT, Veesler D. 2020. Structure, function, and antigenicity of the SARS-CoV-2 spike glycoprotein. *Cell* 180:1–12. Google Scholar
16. South China Agricultural University. 2020. Pangolin is found as a potential intermediate host of new coronavirus in South China Agricultural University. <https://scau.edu.cn/2020/0207/c1300a219015/page.htm>.Google Scholar
17. Cui J, Li F, Shi Z-L. 2019. Origin and evolution of pathogenic coronaviruses. *Nat Rev Microbiol* 17:181–192. doi:10.1038/s41579-018-0118-9.CrossRefPubMedGoogle Scholar
18. Perlman S. 2020. Another decade, another coronavirus. *N Engl J Med* 382:760–762. doi:10.1056/NEJMe2001126.CrossRefGoogle Scholar
19. Zhu N, Zhang D, Wang W, Li X, Yang B, Song J, Zhao X, Huang B, Shi W, Lu R, Niu P, Zhan F, Ma X, Wang D, Xu W, Wu G, Gao GF, Tan W, China Novel Coronavirus Investigating and Research Team. 2020. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *N Engl J Med* 382:727–733. doi:10.1056/NEJMoa2001017.CrossRefPubMedGoogle Scholar
20. CDC. 2020. 2019-nCoV real-time RT-PCR diagnostic panel (CDC) - fact sheet for healthcare providers. Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.Google Scholar
21. Millán-Oñate J, Rodríguez-Morales AJ, Camacho-Moreno G, Mendoza-Ramírez H, Rodríguez-Sabogal IA, Álvarez-Moreno C. A new emerging zoonotic virus of concern: the 2019 novel coronavirus (COVID-19). *Infectio*, in press.Google Scholar
22. Horve PF, Lloyd S, Mhuireach GA, Dietz L, Fretz M, MacCrone G, Van Den Wymelenberg K, Ishaq SL. 2020. Building upon current knowledge and techniques of indoor microbiology to construct the next era of theory into microorganisms, health, and the built environment. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 30:219–217. doi:10.1038/s41370-019-0157-y.CrossRefGoogle Scholar
23. Adams RI, Bhangar S, Dannemiller KC, Eisen JA, Fierer N, Gilbert JA, Green JL, Marr LC, Miller SL, Siegel JA, Stephens B, Waring MS, Bibby K. 2016. Ten questions concerning the microbiomes of buildings. *Build Environ* 109:224–234. doi:10.1016/j.buildenv.2016.09.001.CrossRefGoogle Scholar
24. Tellier R, Li Y, Cowling BJ, Tang JW. 2019. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infect Dis* 19:101. doi:10.1186/s12879-019-3707-y.CrossRefPubMedGoogle Scholar
25. Andrews JR, Morrow C, Walensky RP, Wood R. 2014. Integrating social contact and environmental data in evaluating tuberculosis transmission in a South African township. *J Infect Dis* 210:597–603. doi:10.1093/infdis/jiu138.CrossRefPubMedGoogle Scholar
26. Mizumoto K, Chowell G. 2020. Transmission potential of the novel coronavirus (COVID-19) onboard the Diamond Princess Cruises Ship, 2020. *Infect Dis Model* 5:264–270. doi:10.1016/j.idm.2020.02.003.CrossRefPubMedGoogle Scholar
27. Wu JT, Leung K, Leung GM. 2020. Nowcasting and forecasting the potential domestic and international spread of the 2019-nCoV outbreak originating in Wuhan, China: a modelling study. *Lancet* 395:689–697. doi:10.1016/S0140-6736(20)30260-9.CrossRefPubMedGoogle Scholar
28. Zhang S, Diao M, Yu W, Pei L, Lin Z, Chen D. 2020. Estimation of the reproduction number of novel coronavirus (COVID-19) and the probable outbreak size on the Diamond Princess cruise ship: a data-driven analysis. *Int J Infect Dis* 93:201–204. doi:10.1016/j.ijid.2020.02.033.CrossRefPubMedGoogle Scholar
29. Poon LLM, Peiris M. 2020. Emergence of a novel human coronavirus threatening human health. *Nat Med* 26:317–319. doi:10.1038/s41591-020-0796-5.CrossRefGoogle Scholar
30. Guerra FM, Bolotin S, Lim G, Heffernan J, Deeks SL, Li Y, Crowcroft NS. 2017. The basic reproduction number (R0) of measles: a systematic review. *Lancet Infect Dis* 17:e420–e428. doi:10.1016/S1473-3099(17)30307-9.CrossRefGoogle Scholar
31. Biggerstaff M, Cauchemez S, Reed C, Gambhir M, Finelli L. 2014. Estimates of the reproduction number for seasonal, pandemic, and zoonotic influenza: a systematic review of the literature. *BMC Infect Dis* 14:480. doi:10.1186/1471-2334-14-480.CrossRefPubMedGoogle Scholar
32. Zhao S, Cao P, Gao D, Zhuang Z, Chong MKC, Cai Y, Ran J, Wang K, Yang L, He D, Wang MH. 20 February 2020. Epidemic growth and reproduction number for the novel coronavirus disease (COVID-19) outbreak on the Diamond Princess Cruise Ship from January 20 to February 19, 2020: a preliminary data-driven analysis. *SSRN* doi:10.2139/ssrn.3543150.CrossRefGoogle Scholar

33. Mizumoto K, Kagaya K, Zarebski A, Chowell G. 2020. Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. *Euro Surveill* 25(10):pii=2000180. <https://www.eurosurveillance.org/content/10.2807/1560-7917.ES.2020.25.10.2000180>.Google Scholar
34. Ong SWX, Tan YK, Chia PY, Lee TH, Ng OT, Wong MSY, Marimuthu K. 2020. Air, surface environmental, and personal protective equipment contamination by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) from a symptomatic patient. *JAMA* doi:10.1001/jama.2020.3227.CrossRefGoogle Scholar
35. Stephens B, Azimi P, Thoemmes MS, Heidarinejad M, Allen JG, Gilbert JA. 2019. Microbial exchange via fomites and implications for human health. *Curr Pollution Rep* 5:214. doi:10.1007/s40726-019-00126-3.CrossRefGoogle Scholar
36. Vandegrift R, Fahimipour AK, Muscarella M, Bateman AC, Van Den Wymelenberg K, Bohannon B. 26 March 2019. Moving microbes: the dynamics of transient microbial residence on human skin. *bioRxiv* doi:10.1101/586008.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
37. Rothe C, Schunk M, Sothmann P, Bretzel G, Froeschl G, Wallrauch C, Zimmer T, Thiel V, Janke C, Guggemos W, Seilmaier M, Drosten C, Vollmar P, Zwirgmaier K, Zange S, Wölfel R, Hoelscher M. 2020. Transmission of 2019-nCoV infection from an asymptomatic contact in Germany. *N Engl J Med* 382:970–971. doi:10.1056/NEJMc2001468.CrossRefPubMedGoogle Scholar
38. Yaqian M, Lin W, Wen J, Chen G. 2020. Epidemiological and clinical characteristics of SARS-CoV-2 and SARS-CoV: a system review. *Infectious Diseases (except HIV/AIDS)*. medRxiv doi:10.1101/2020.02.20.20025601.Abstract/FREE Full Text-Google Scholar
39. CDC. 2020. Coronavirus disease 2019 (COVID-19). Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.Google Scholar
40. Doultree JC, Druce JD, Birch CJ, Bowden DS, Marshall JA. 1999. Inactivation of feline calicivirus, a Norwalk virus surrogate. *J Hosp Infect* 41:51–57. doi:10.1016/S0195-6701(99)90037-3.CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
41. Bin SY, Heo JY, Song M-S, Lee J, Kim E-H, Park S-J, Kwon H-I, Kim SM, Kim Y-I, Si Y-J, Lee I-W, Baek YH, Choi W-S, Min J, Jeong HW, Choi YK. 2016. Environmental contamination and viral shedding in MERS patients during MERS-CoV outbreak in South Korea. *Clin Infect Dis* 62:755–760. doi:10.1093/cid/civ1020.CrossRefPubMedGoogle Scholar
42. Kampf G, Todt D, Pfaender S, Steinmann E. 2020. Persistence of coronaviruses on inanimate surfaces and its inactivation with biocidal agents. *J Hosp Infect* 104:246–251. doi:10.1016/j.jhin.2020.01.022.CrossRefPubMedGoogle Scholar
43. van Doremalen 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. *N Engl J Med* doi:10.1056/NEJMc2004973.CrossRefPubMedGoogle Scholar
44. Xiao F, Tang M, Zheng X, Liu Y, Li X, Shan H. 2020. Evidence for gastrointestinal infection of SARS-CoV-2. *Gastroenterology* doi:10.1053/j.gastro.2020.02.055. CrossRefPubMedGoogle Scholar
45. Lipsitch M, Allen J. 16 March 2020. Coronavirus reality check: 7 myths about social distancing, busted. *USA Today*, McLean, VA. <https://www.usatoday.com/story/opinion/2020/03/16/coronavirus-social-distancing-myths-realities-column/5053696002/>.Google Scholar
46. Bell DM, World Health Organization Working Group on International and Community Transmission of SARS. 2004. Public health interventions and SARS spread, 2003. *Emerg Infect Dis* 10:1900–1906. doi:10.3201/eid1011.040729. CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
47. Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses. 2020. The species Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2. *Nat Microbiol* doi:10.1038/s41564-020-0695-z.CrossRefPubMedGoogle Scholar
48. Chang D, Xu H, Rebaza A, Sharma L, Dela Cruz CS. 2020. Protecting health-care workers from subclinical coronavirus infection. *Lancet Respir Med* 8:e13. doi:10.1016/S2213-2600(20)30066-7.CrossRefGoogle Scholar
49. Booth TF, Kournikakis B, Bastien N, Ho J, Kobasa D, Stadnyk L, Li Y, Spence M, Paton S, Henry B, Mederski B, White D, Low DE, McGeer A, Simor A, Vearncombe M, Downey J, Jamieson FB, Tang P, Plummer F. 2005. Detection of airborne severe acute respiratory syndrome (SARS) coronavirus and environmental contamination in SARS outbreak units. *J Infect Dis* 191:1472–1477. doi:10.1086/429634. CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
50. American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers, Inc. (ASHRAE). 2017. Ventilation of health care facilities (ANSI/ASHRAE/ASHE standard 170-2017). American Society of Heating, Refrigerating and Air Condition Engineers, Inc., Atlanta, GA.Google Scholar
51. Institute of Environmental Sciences and Technology. 2016. HEPA and ULPA Filters (IEST-RP-CC001.6). Institute of Environmental Sciences and Technology, Schaumburg, IL.Google Scholar
52. Goldsmith CS, Tatti KM, Ksiazek TG, Rollin PE, Comer JA, Lee WW, Rota PA, Bankamp B, Bellini WJ, Zaki SR. 2004. Ultrastructural characterization of SARS coronavirus. *Emerg Infect Dis* 10:320–326. doi:10.3201/eid1002.030913. CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
53. Knowles H. 3 July 2019. Mold infections leave one dead and force closure of operating rooms at children's hospital. *Washington Post*, Washington, DC.Google Scholar
54. So RCH, Ko J, Yuan YWY, Lam JJ, Louie L. 2004. Severe acute respiratory syndrome and sport: facts and fallacies. *Sports Med* 34:1023–1033. doi:10.2165/00007256-200434150-00002.CrossRefPubMedGoogle Scholar
55. Goldberg JL. 2017. Guideline implementation: hand hygiene. *AORN J* 105:203–212. doi:10.1016/j.aorn.2016.12.010.CrossRefGoogle Scholar
56. Chaovanich A, Wongsawat J, Dowell SF, Inthong Y, Sangsajja C, Sanguanwongse N, Martin MT, Limpakarnjanarat K, Sirirat L, Waicharoen S, Chittaganpitch M, Thawatsupha P, Auwanit W, Sawanpanyalert P, Melgaard B. 2004. Early containment of severe acute respiratory syndrome (SARS); experience from Bamrasnaradura Institute, Thailand. *J Med Assoc Thai* 87:1182–1187.PubMedGoogle Scholar
57. Center for Devices, Radiological Health. 2020. N95 respirators and surgical masks (face masks). US Food and Drug Administration, Silver Spring, MD.Google Scholar
58. Centers for Disease Control and Prevention. 2020. Interim guidance for the use of masks to control seasonal influenza virus transmission. Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.Google Scholar
59. Ryu S, Gao H, Wong JY, Shiu EYC, Xiao J, Fong MW, Cowling BJ. 2020. Nonpharmaceutical measures for pandemic influenza in nonhealthcare settings-international travel-related measures. *Emerg Infect Dis* doi:10.3201/eid2605.190993. CrossRefGoogle Scholar
60. Fong MW, Gao H, Wong JY, Xiao J, Shiu EYC, Ryu S, Cowling BJ. 2020. Nonpharmaceutical measures for pandemic influenza in nonhealthcare settings-social distancing measures. *Emerg Infect Dis* doi:10.3201/eid2605.190995. CrossRefGoogle Scholar
61. Vandegrift R, Bateman AC, Siemens KN, Nguyen M, Wilson HE, Green JL, Van Den Wymelenberg KG, Hickey RJ. 2017. Cleanliness in context: reconciling hygiene with a modern microbial perspective. *Microbiome* 5:76. doi:10.1186/s40168-017-0294-2.CrossRefGoogle Scholar
62. Qian H, Zheng X. 2018. Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings. *J Thorac Dis* 10:S2295–S2304. doi:10.21037/jtd.2018.01.24.CrossRefGoogle Scholar
63. Kim SW, Ramakrishnan MA, Raynor PC, Goyal SM. 2007. Effects of humidity and other factors on the generation and sampling of a coronavirus aerosol. *Aerobiologia* 23:239–248. doi:10.1007/s10453-007-9068-9.CrossRefGoogle Scholar
64. Casanova LM, Jeon S, Rutala WA, Weber DJ, Sobsey MD. 2010. Effects of air temperature and relative humidity on coronavirus survival on surfaces. *Appl Environ Microbiol* 76:2712–2717. doi:10.1128/AEM.02291-09. Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
65. Chan KH, Malik Peiris JS, Lam SY, Poon LLM, Yuen KY, Seto WH. 2011. The effects of temperature and relative humidity on the viability of the SARS coronavirus. *Adv Virol* 2011:734690. doi:10.1155/2011/734690.CrossRefPubMedGoogle Scholar
66. BioSpace. 11 February 2020. Condair study shows indoor humidification can reduce the transmission and risk of infection from coronavirus. *BioSpace*, Urbandale, IA.Google Scholar
67. Noti JD, Blachere FM, McMillen CM, Lindsley WG, Kashon ML, Slaughter DR, Beezhold DH. 2013. High humidity leads to loss of infectious influenza virus from simulated coughs. *PLoS One* 8:e57485. doi:10.1371/journal.pone.0057485.CrossRefGoogle Scholar

68. Marr LC, Tang JW, Van Mullekom J, Lakdawala SS. 2019. Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence. *J R Soc Interface* 16:20180298. doi:10.1098/rsif.2018.0298.CrossRefGoogle Scholar
69. Xie X, Li Y, Chwang ATY, Ho PL, Seto WH. 2007. How far droplets can move in indoor environments—revisiting the Wells evaporation-falling curve. *Indoor Air* 17:211–225. doi:10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x.CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
70. Yang W, Marr LC. 2012. Mechanisms by which ambient humidity may affect viruses in aerosols. *Appl Environ Microbiol* 78:6781–6788. doi:10.1128/AEM.01658-12.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
71. Memarzadeh F, Olmsted RN, Bartley JM. 2010. Applications of ultraviolet germicidal irradiation disinfection in health care facilities: effective adjunct, but not stand-alone technology. *Am J Infect Control* 38:S13–S24. doi:10.1016/j.ajic.2010.04.208.CrossRefPubMedGoogle Scholar
72. Kudo E, Song E, Yockey LJ, Rakib T, Wong PW, Homer RJ, Iwasaki A. 2019. Low ambient humidity impairs barrier function and innate resistance against influenza infection. *Proc Natl Acad Sci U S A* 116:10905–10910. doi:10.1073/pnas.1902840116.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
73. Eccles R. 2002. An explanation for the seasonality of acute upper respiratory tract viral infections. *Acta Otolaryngol* 122:183–191. doi:10.1080/00016480252814207.CrossRefPubMedGoogle Scholar
74. Salah B, Dinh Xuan AT, Fouilladiu JL, Lockhart A, Regnard J. 1988. Nasal mucociliary transport in healthy subjects is slower when breathing dry air. *Eur Respir J* 1:852–855.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
75. Block SS. 1953. Humidity requirements for mold growth. *Appl Microbiol* 1:287–293. doi:10.1128/AEM.1.6.287-293.1953.CrossRefPubMedGoogle Scholar
76. Kembel SW, Jones E, Kline J, Northcutt D, Stenson J, Womack AM, Bohannon BJ, Brown GZ, Green JL. 2012. Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome. *ISME J* 6:1469–1479. doi:10.1038/ismej.2011.211.CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
77. Mhuireach GÁ, Brown GZ, Kline J, Manandhar D, Moriyama M, Northcutt D, Rivera I, Van Den Wymelenberg K. 2020. Lessons learned from implementing night ventilation of mass in a next-generation smart building. *Energy Build* 207:109547. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109547.CrossRefGoogle Scholar
78. Meadow JF, Altrichter AE, Kembel SW, Kline J, Mhuireach G, Moriyama M, Northcutt D, O'Connor TK, Womack AM, Brown GZ, Green JL, Bohannon BJM. 2014. Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source. *Indoor Air* 24:41–48. doi:10.1111/ina.12047.CrossRefPubMedGoogle Scholar
79. Howard-Reed C, Wallace LA, Ott WR. 2002. The effect of opening windows on air change rates in two homes. *J Air Waste Manag Assoc* 52:147–159. doi:10.1080/10473289.2002.10470775.CrossRefPubMedGoogle Scholar
80. Fahimipour AK, Hartmann EM, Siemens A, Kline J, Levin DA, Wilson H, Betancourt-Román CM, Brown GZ, Fretz M, Northcutt D, Siemens KN, Huttenhower C, Green JL, Van Den Wymelenberg K. 2018. Daylight exposure modulates bacterial communities associated with household dust. *Microbiome* 6:175. doi:10.1186/s40168-018-0559-4.CrossRefGoogle Scholar
81. Schuit M, Gardner S, Wood S, Bower K, Williams G, Freeburger D, Dabisch P. 2020. The influence of simulated sunlight on the inactivation of influenza virus in aerosols. *J Infect Dis* 221:372–378. doi:10.1093/infdis/jiz582.CrossRefGoogle Scholar
82. Dijk D-J, Duffy JF, Silva EJ, Shanahan TL, Boivin DB, Czeisler CA. 2012. Amplitude reduction and phase shifts of melatonin, cortisol and other circadian rhythms after a gradual advance of sleep and light exposure in humans. *PLoS One* 7:e30037. doi:10.1371/journal.pone.0030037.CrossRefPubMedGoogle Scholar
83. Issa MH, Rankin JH, Attalla M, Christian AJ. 2011. Absenteeism, performance and occupant satisfaction with the indoor environment of green Toronto schools. *Indoor Built Environ* 20:511–523. doi:10.1177/1420326X11409114.CrossRefWeb of ScienceGoogle Scholar
84. Rutala WA, Weber DJ, Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee (HIPAC). 2017. Guideline for disinfection and sterilization in healthcare facilities, 2017. Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.Google Scholar
85. Tseng C-C, Li C-S. 2007. Inactivation of viruses on surfaces by ultraviolet germicidal irradiation. *J Occup Environ Hyg* 4:400–405. doi:10.1080/15459620701329012.CrossRefPubMedGoogle Scholar
86. Lytle CD, Sagripanti J-L. 2005. Predicted inactivation of viruses of relevance to biodefense by solar radiation. *J Virol* 79:14244–14252. doi:10.1128/JVI.79.22.14244-14252.2005.Abstract/FREE Full TextGoogle Scholar
87. Bedell K, Buchaklian AH, Perlman S. 2016. Efficacy of an automated multiple emitter whole-room ultraviolet-C disinfection system against coronaviruses MHV and MERS-CoV. *Infect Control Hosp Epidemiol* 37:598–599. doi:10.1017/ice.2015.348.CrossRefGoogle Scholar
88. Nardell EA, Bucher SJ, Brickner PW, Wang C, Vincent RL, Becan-McBride K, James MA, Michael M, Wright JD. 2008. Safety of upper-room ultraviolet germicidal air disinfection for room occupants: results from the Tuberculosis Ultraviolet Shelter Study. *Public Health Rep* 123:52–60. doi:10.1177/003335490812300108.CrossRefPubMedGoogle Scholar
89. Miller SL, Linnis J, Luongo J. 2013. Ultraviolet germicidal irradiation: future directions for air disinfection and building applications. *Photochem Photobiol* 89:777–781. doi:10.1111/php.12080.CrossRefGoogle Scholar
90. Welch D, Buonanno M, Grilj V, Shuryak I, Crickmore C, Bigelow AW, Randers-Pehrson G, Johnson GW, Brenner DJ. 2018. Far-UVC light: a new tool to control the spread of airborne-mediated microbial diseases. *Sci Rep* 8:2752. doi:10.1038/s41598-018-21058-w.CrossRefPubMedGoogle Scholar
91. Buonanno M, Stanislauskas M, Ponnaiya B, Bigelow AW, Randers-Pehrson G, Xu Y, Shuryak I, Smilenov L, Owens DM, Brenner DJ. 2016. 207-nm UV light—a promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. II: In-vivo safety studies. *PLoS One* 11:e0138418. doi:10.1371/journal.pone.0138418.CrossRefGoogle Scholar
92. Kembel SW, Meadow JF, O'Connor TK, Mhuireach G, Northcutt D, Kline J, Moriyama M, Brown GZ, Bohannon BJM, Green JL. 2014. Architectural design drives the biogeography of indoor bacterial communities. *PLoS One* 9:e87093. doi:10.1371/journal.pone.0087093.CrossRefPubMedGoogle Scholar
93. NIAID. 2020. Novel coronavirus SARS-CoV-2. Flickr.Google Scholar
94. Yu IT, Li Y, Wong TW, Tam W, Chan AT, Lee JH, Leung DY, Ho T. 2004. Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. *N Engl J Med* 350:1731–1739. doi:10.1056/NEJMoa032867.CrossRefPubMedWeb of ScienceGoogle Scholar
95. Li Y, Duan S, Yu ITS, Wong TW. 2004. Multi-zone modeling of probable SARS virus transmission by airflow between flats in Block E, Amoy Gardens. *Indoor Air* 15:96–111. doi:10.1111/j.1600-0668.2004.00318.x.CrossRefGoogle Scholar
96. Liu Y, Ning Z, Chen Y, Guo M, Liu Y, Gali NK, Sun L, Duan Y, Cai J, Westerdahl D, Liu X, Ho K-F, Kan H, Fu Q, Lan K. 2020. Aerodynamic characteristics and RNA concentration of SARS-CoV-2 aerosol in Wuhan hospitals during COVID-19 outbreak. *bioRxiv* doi:10.1101/2020.03.08.982637.Google Scholar