
Vereinfachte Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen

^{1,2}Dirk Müller, ¹Kai Rewitz, ¹Dennis Derwein, ²Tobias Maria Burgholz

¹ Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)

² Heinz Trox Wissenschafts gGmbH



This work is licensed under a
[Creative Commons Attribution 3.0 Germany License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/).

Please cite this article as:

D. Müller, K. Rewitz, D. Derwein, T. M. Burgholz, *Vereinfachte Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen*, White Paper, RWTH-EBC 2020-003, Aachen, 2020, DOI: [10.18154/RWTH-2020-08332](https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-08332)

RWTH Aachen University
E.ON Energy Research Center
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)
Mathieustr. 10, 52074 Aachen

T +49 241 80-49760, F +49 241 80-49769

ebc-office@eonerc.rwth-aachen.de, www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc

Vereinfachte Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen

^{1,2} Dirk Müller, ¹ Kai Rewitz, ¹ Dennis Derwein,

² Tobias Maria Burgholz

¹ Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik (EBC), RWTH Aachen

² Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Aachen

Einleitung

Die anhaltende Infektionsgefahr mit COVID-19 (Coronavirus SARS-CoV-2) hat in vielen Ländern zu intensiven Diskussionen geführt, wie unterschiedliche Räume in Zukunft genutzt werden können. Dabei ist zu beachten, dass es in Räumen mit mehreren Personen immer ein Infektionsrisiko geben wird, da die Übertragung des Virus ohne die Nutzung einer im Alltag über einen Mund-Nasen-Schutz hinausgehenden unzumutbaren Schutzkleidung nicht ausgeschlossen werden kann. Viren können ohne direkten Körperkontakt über drei Wege zwischen Personen übertragen werden:

- Kontaktflächen
- Tropfen
- Aerosole

Die Übertragung von Viren über Kontaktflächen kann durch eine regelmäßige Reinigung aller relevanten Oberflächen und durch Desinfektion der Hände deutlich reduziert werden. Eine Übertragung durch Tropfen wird durch das Tragen eines Mund-Nasen-Schutzes ebenfalls wesentlich vermindert. Beide Übertragungswege werden durch den Einsatz raumluftechnischer Anlagen nicht direkt beeinflusst. Eventuell können bei Temperaturen unterhalb typischer Raumtemperaturen Viren länger an Oberflächen aktiv bleiben (Chan et al. 2011), was im Rahmen der folgenden Betrachtungen, allerdings ebenso wie der Einfluss relativer Luftfeuchtigkeit, nicht berücksichtigt wird.

Der vorliegende Beitrag fokussiert sich auf die Übertragung von Viren durch Aerosole, da dieser Übertragungsweg nicht durch einfache Maßnahmen unterbunden werden kann und für eine kritische Ausbreitung von Viren in geschlossenen Räumen verantwortlich ist. Bei Aerosolen handelt es sich um sehr kleine Partikel, die beispielsweise durch die Atmung des Menschen entstehen können. Die Konzentration der mit Viren belasteten

Aerosole kann direkt durch die Lüftung des Raums beeinflusst werden. Daher ist dieser Übertragungsweg für eine sicherheitstechnische Bewertung von Räumen und Veranstaltungen in belüfteten Räumen von besonderer Bedeutung.

Es wird eine vereinfachte Analyse der komplexen Transportprozesse durch Aerosole in belüfteten Räumen beschrieben, die eine Abschätzung des Infektionsrisikos in unterschiedlichen Räumen und Nutzungssituationen erlaubt. In dieser Analyse wird explizit nicht auf medizinische oder Einzelperson-bezogene Faktoren eingegangen, da der Fokus auf den technisch beeinflussbaren Parametern verschiedener Räume beziehungsweise lüftungstechnischer Einrichtungen liegt. Mit dem eingeführten Berechnungsmodell kann abgeschätzt werden, welches, auf einen Referenzzustand normiertes, Infektionsrisiko besteht und in welchen Räumen besondere Vorkehrungen für den Infektionsschutz getroffen werden sollten.

Auf Basis dieses Ansatzes kann gezeigt werden, dass die Luftwechselrate, das Raumvolumen, die Aufenthaltsdauer und die Belegung der Räume das relative Infektionsrisiko maßgeblich beeinflussen. Insbesondere in Räumen mit verhältnismäßig hoher Raumbelegung und langen Aufenthaltsdauern sind hohe, durch maschinelle Belüftung erzeugte Luftwechselraten erforderlich, um das relative Infektionsrisiko durch die aerosolgebundene Übertragung von Viren absenken zu können.

Bekannte Ausbreitungswege von Viren

Bei der Übertragung von Atemwegserkrankungen unterscheidet die Weltgesundheitsorganisation maßgeblich zwischen den drei Mechanismen (World Health Organization 2014):

Bei **direkter Kontaktübertragung** wird ein Virus durch direkten Haut- und Schleimhautkontakt übertragen, ohne dass das Virus ein anderes Medium für den Transportweg nutzt. Die Viren werden so auf unmittelbarem Weg von einer infizierten Person auf eine nicht infizierte Person übertragen. Dabei kann die direkte Kontaktübertragung durch den Verzicht von direktem Körperkontakt eingedämmt werden (World Health Organization 2014).

Bei einer **indirekten Kontaktübertragung** kommt es durch eine sogenannte Tröpfchenübertragung zu einer Übertragung eines Virus auf eine oder mehrere nicht infizierte Personen. Bei der Tröpfchenübertragung werden durch das Versprühen von infektiösen Tröpfchen aus den Atemwegen einer infizierten Person auf die Schleimhäute oder Bindehäute von nicht infizierten Personen Viren im Nahfeld der infizierten Person übertragen. Die Tröpfchen werden beim Husten, Niesen und Sprechen in die Raumluft gesprüht. Je nach Mechanismus der Erzeugung und des Zerfalls treten dabei Tröpfchen in unterschiedlicher Größenverteilung im Bereich von 1 bis 1000 μm auf (Duguid 1946; Papineni und Rosenthal 1997; Han et al. 2013; Asadi et al. 2019).

Die für die Tröpfcheninfektionen relevanten größeren Tröpfchen weisen eine signifikante Sinkgeschwindigkeit auf, so dass sie sich innerhalb weniger Sekunden auf dem Boden oder an anderen Flächen anlagern (Wells 1934). Während dieser Flugphase legen sie eine Entfernung von etwa 1,5 m zurück. Dabei verdunstet nur ein insignifikanter Teil der Flüssigmasse dieser Tröpfchen, so dass es kaum zu einer Änderung der Sinkgeschwindigkeiten kommt. Dieser Mechanismus konnte durch neuere experimentelle Studien noch weiter präzisiert werden. In einer Studie konnte bspw. gezeigt werden, dass Tröpfchen, die beim heftigen Niesen

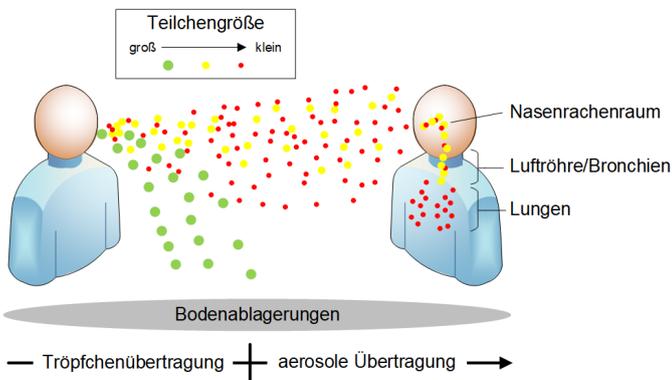
ausgeworfen werden, durchaus Distanzen bis zu 6 m zurücklegen können (Xie et al. 2007).

Da sich die Tröpfchen zügig an Oberflächen absetzen, kann eine Übertragung auch durch die Berührung von kontaminierten Oberflächen erfolgen, wenn die Person nach dem Oberflächenkontakt anschließend beispielsweise über ihre Hände die Viren in den Bereich der eigenen Binde- oder Schleimhäute transportiert (WHO 2014). Beide Übertragungswege der Tröpfcheninfektion können laut Empfehlung der WHO durch Maßnahmen wie gründlicher Handhygiene, Niesen/Husten in die Ellenbogenbeuge und das Tragen von Mund-Nasen-Schutz, sowie dem Einhalten eines Mindestabstands zu anderen Personen, eingedämmt werden (World Health Organization 2020).

Bei einer **Aerosolübertragung** können Viren von einer infizierten Person durch sehr kleine Tröpfchen beziehungsweise Partikel auf eine größere Anzahl nicht infizierter Personen übertragen werden. Wells hat diesen Übertragungsweg durch von infizierten Personen ausgestoßene Tröpfchen bereits 1934 untersucht und festgestellt, dass durch die Verdampfung von Wasser aus dem Tröpfchen unterhalb einer kritischen Partikelgröße sogenannte Tröpfchenkerne (engl. droplet nuclei) entstehen können. Diese Tröpfchenkerne bestehen zum Teil nur noch aus festen Rückständen und haben durch ihre geringe Masse das Potential über mehrere Stunden als Aerosol in der Raumluft transportiert zu werden. Die Tröpfchenkerne weisen eine Sinkgeschwindigkeit von weniger als 3 mm/s auf, so dass auch bei geringen Raumluftgeschwindigkeiten (~ 15 cm/s) eine raumweite Ausbreitung stattfinden kann. Die WHO klassifiziert luftgetragene Partikel mit einem Partikeldurchmesser von mindestens 5 μm als Tröpfchen. Partikel, die nur noch aus festen Rückständen bestehen sowie Tröpfchen unterhalb eines Partikeldurchmessers von 5 μm werden vereinfachend als Tröpfchenkerne zusammengefasst (World Health Organization 2014). Nachfolgend werden luftgetragene Tröpfchenkerne entsprechend dieser Klassifizierung als Aerosole bezeichnet.

Werden Aerosole aus dem Auswurf von Personen mit Atemwegserkrankungen gebildet, besteht das Risiko, sich durch das Einatmen dieser Aerosole zu infizieren, da die kleinen Partikel mit Viren kontaminiert sein können. Dieser Infektionsweg wurde bereits von Wells als ein signifikanter Infektionsweg von Atemwegserkrankungen in Innenräumen erkannt. Dabei führen insbesondere in Krankenhäusern virenbeladene Aerosole häufig zu Infektionen (Lai et al. 2013). Beispielsweise wurde in einer Studie nachgewiesen, dass während der SARS-Pandemie 2002/03 das Virus unter anderem auch durch Aerosole über größere Strecken übertragen wurde (Yu et al. 2004). Kritisch bei diesem Übertragungsweg ist, dass die üblichen Maßnahmen wie Handhygiene, das Einhalten von Mindestabständen und das Tragen von einfachen Mund-Nasen-Bedeckungen nur bedingt oder fast nicht wirksam sind (World Health Organization 2014). Die Entstehung von Tröpfchen und Aerosolen ist anschaulich in Abbildung 1 gezeigt.

Abbildung 1: Schematische Darstellung von Ausbreitungsmechanismen nach (Pan et al. 2019)



In Anbetracht der derzeitigen SARS-CoV-2-Pandemie wird die Rolle von Aerosolen bei der Übertragung des Virus in der Wissenschaft intensiv diskutiert und weltweit untersucht. In einer aktuellen Arbeit wird gezeigt, dass das SARS-CoV-2-Virus eine vergleichbare Stabilität der Aerosole und bei der Anlagerung auf Oberflächen aufweist wie das SARS-CoV-1-Virus (van Doremalen et al. 2020). In einer weiteren Studie am „University of Nebraska Medical Center“ konnte durch die Untersuchung von Luftproben in Isolationsräumen, in denen Corona-Patienten behandelt werden, das SARS-

CoV-2-Virus in der Raumluft nachgewiesen werden (Santarpia et al. 2020).

In Laborversuchen wurden künstlich hergestellte, mit SARS-CoV-2 belastete Aerosole, genauer untersucht. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Infektiosität bis zu 16 Stunden in lungengängigen Aerosolen erhalten bleiben kann (Fears et al. 2020). Innerhalb dieser erheblichen Zeitspanne können sich die Aerosole auch in größeren Räumen ausbreiten, so dass nicht von einer lokalen Infektionsgefahr gesprochen werden kann. Allerdings führt die räumliche Ausbreitung der Aerosole auch zu einer starken Verdünnung der virenbelasteten Partikel in der Raumluft.

Durch eine Rekonstruktion einer Infektionskette in einem Restaurant in Guangzhou (China) konnte eine Übertragung des SARS-CoV-2-Virus über mehrere Tische, wahrscheinlich verursacht von einer ungünstigen Luftführung, nachgewiesen werden. Auch dieses Ereignis spricht für die mögliche Übertragung von SARS-CoV-2 durch Aerosole (Li et al. 2020). In Deutschland wurde unter anderem der Ausbruch von COVID-19 in einem Großschlachtbetrieb auf Aerosolübertragung zurückgeführt. Dabei konnten Übertragungen des Virus über Distanzen von bis zu 8 m identifiziert werden. Als Grund für den Ausbruch wurden unter anderem die besonderen klimatischen Bedingungen bei der Fleischverarbeitung (Raumlufttemperatur 10 °C, hohe Luftfeuchte) sowie eine geringe Außenluftfrate genannt. Die Kühlung der Luft erfolgte mit handelsüblichen Umluftkühlgeräten, die ohne eine zusätzliche Filtration die Raumluft umwälzen (Guenther et al. 2020).

In Anbetracht der bisherigen Datenlage warnen Wissenschaftler ausdrücklich vor der Gefahr, die von Aerosolübertragungen mit SARS-CoV-2 ausgeht (Fineberg 2020). Als mögliche Maßnahmen zur Eindämmung von Aerosolübertragungen in Innenräumen werden dabei insbesondere Lüftungsmaßnahmen, die einen hohen Außenluftwechsel, eine geringe Luftzirkulation und einen schnellen Abtransport von Atemluft zur Folge haben, genannt (Morawska und Cao 2020; Somsen et al. 2020).

Um die Effektivität dieser Maßnahmen genauer zu quantifizieren, müssen die Effekte einer Lüftung oder Luftreinigung auf die Belastung der Raumluft mit Viren näher untersucht werden.

Im Folgenden wird sich dieser Beitrag auf die Ausbreitung von Viren durch Aerosole konzentrieren. Dieser Übertragungsweg kann nicht durch die klassischen Maßnahmen wie beispielsweise eine regelmäßige Desinfektion einer Oberfläche oder das Tragen einer Mund-Nasen-Bedeckung wirksam unterdrückt werden.

Ausbreitung von Viren in Räumen durch Aerosole

Bei der Ausbreitung von Viren in Innenräumen spielt die Art der Luftführung in einem Raum eine zentrale Rolle. Der Großteil aller maschinell belüfteten Räume weist eine Mischlüftung auf. Bei **idealer** Mischlüftung werden alle Verunreinigungen und Partikel im gesamten Raumvolumen gleichmäßig verteilt, so dass es keine lokalen Konzentrationsunterschiede gibt. Die Theorie einer idealen Mischlüftung geht davon aus, dass die Luftbewegungen durch die Lüftung, die thermischen Kräfte und die Diffusion ausreichen, um alle lokalen Emissionen im gesamten Raumvolumen gleichmäßig zu verteilen.

In der Praxis können bei **realen** Mischlüftungen durchaus lokal höhere Konzentrationen einer Belastung auftreten. Um entsprechende Konzentrationsprofile aufzuzeigen, sind örtlich aufgelöste Messungen von den relevanten Belastungen oder alternativ Tracergasen notwendig. Auch über detaillierte Strömungssimulationen können Konzentrationsunterschiede von lokal freigesetzten Belastungen in einem Raum vorhergesagt werden. Vereinfachend können Strömungsvisualisierungen mit künstlichem Nebel helfen, Stagnationsgebiete oder Kurzschlüsse einer Raumluftströmung aufzuzeigen.

Neben Mischlüftungen werden in der Praxis auch Quelllüftungen/Schichtenströmungen und Verdrängungsströmungen eingesetzt. Während die

Verdrängungsströmungen auf Sondergebiete wie beispielsweise einen Reinraum beschränkt sind und daher im Folgenden nicht weiter betrachtet werden, werden Quellluftströmungen insbesondere bei höheren Räumen gerne eingesetzt. Bei dieser Raumluftströmung wird die Zuluft mit einer Untertemperatur in den unteren Raumbereich eingebracht. Die an allen Wärmequellen erwärmte Luft steigt in den oberen Raumbereich und wird dort über Abluftöffnungen abgeführt. Da viele stoffliche Belastungen in einem Raum in Verbindung mit Wärme freigesetzt werden, reichern sich diese Belastungen in der oberen Raumregion an. Die Luft in der unteren Raumregion ist weniger belastet, so dass in der Aufenthaltszone eine höhere Luftqualität erreicht werden kann.

Die Ausbreitung von Schadstoffen im Raum und die wesentlichen Größen der Lüftungseffektivität werden im REHVA Guidebook zur Ventilation Effectiveness beschrieben (Mundt 2004). Dabei ist der Luftaustauschwirkungsgrad ein Maß für die Durchspülung eines Raumes. Die Lüftungswirksamkeit betrachtet die Abfuhr lokaler Emissionen.

In diesem Beitrag werden sich alle Untersuchungen auf den Ansatz einer idealen Mischlüftung beziehen. Eine Bewertung einer Quellluftströmung ist zu einem späteren Zeitpunkt geplant.

Anzumerken ist, dass auch bei einer freien Lüftung eines Raumes durch geöffnete oder gekippte Fenster eine mischluffartige oder quellluftartige Raumluftströmung erzeugt werden kann. Bei einer freien Lüftung ist es allerdings schwierig, einen genauen Wert für den Luftwechsel anzugeben. Der Luftaustausch mit der Umgebung hängt von der Art der Fensteröffnung und der Rahmengenometrie sowie den Wind- und Temperaturverhältnissen ab. Besonders bei einer Querlüftung müssen zudem die Druckverhältnisse in dem Gebäude genau abgebildet werden. Deshalb werden sich alle Analysen in diesem Beitrag auf den Einsatz von maschinellen Lüftungsanlagen beschränken. Eine Übertragung der Ergebnisse auf den Fall einer freien Lüftung ist nur mit den oben genannten Einschränkungen möglich.

Wirkung einer idealen Mischlüftung bei einer Virenübertragung durch Aerosole

Befindet sich mindestens eine infizierte Person in einem Raum, werden potenziell virusbelastete Aerosole in die Raumluft abgegeben. Die belasteten Aerosole werden im Falle einer idealen Mischlüftung im gesamten Raumvolumen verteilt und die Konzentration der mit Viren belasteten Aerosole kann über die Emissionsrate der virustragenden Partikel und dem Außenluftvolumenstrom berechnet werden. Das Raumluftvolumen wirkt sich nur bei einer instationären Betrachtung der Ausbreitungsvorgänge aus. Im stationären Zustand ist nur der Außenluftvolumenstrom als raumlufttechnischer Parameter entscheidend. Werden die virustragenden Partikel durch Filtration aus der Raumluft entfernt oder durch eine andere Technik inaktiv gemacht, kann ein äquivalenter Außenluftvolumenstrom berechnet werden, dessen Wirkung dem Außenluftvolumenstrom in dieser Analyse entspricht.

Für die Bewertung von instationären Effekten in Raumluftströmungen kann die nominale Zeitkonstante τ_n verwendet werden, die die schnellstmögliche Zeit eines Luftwechsels angibt:

$$\tau_n = \frac{V_R}{\dot{V}_R} \quad (1)$$

Wie Spurengasuntersuchungen zeigen, werden stationäre Zustände in der Raumluft nach etwa fünf Raumzeitkonstanten erreicht. Als Indikator für die Güte der Raumluftqualität werden heute in vielen Fällen CO_2 -Sensoren eingesetzt, da Kohlenstoffdioxid bei der menschlichen Atmung freigesetzt wird und somit ein Maß für die Anwesenheit von Personen ist. Bei einer Messung der CO_2 -Konzentration im Raum wird über dieses Indikatorgas ein personenbezogener Außenluftvolumenstrom gemessen, der als Maß für die Güte der Belüftung eines durch Menschen genutzten Raums angesehen werden kann. Als Orientierungswert für die Luftqualität im Raum hat sich seit vielen Jahren eine obere Grenze von 1.000 ppm etabliert.

Wichtig ist, dass diese CO_2 -Konzentration nicht

zwingend mit der Konzentration belasteter Aerosole korreliert, da Kohlenstoffdioxid von allen Personen ausgeatmet wird, belastete Aerosole aber nur von infizierten Personen abgegeben werden. Hier muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins belasteter Aerosole mit der Anzahl der Personen, die sich in einem Raum befinden, steigt.

Infektionsrisiko durch aerosolgebundene Viren in einem Raum

Eine Infektionsübertragung in einem Raum über Aerosole kann unter den heute üblichen Schutzmaßnahmen nicht ausgeschlossen werden. Obwohl dieser Übertragungsweg sehr komplex ist und viele medizinische Details nur zum Teil bekannt sind, soll im Folgenden ein Modell abgeleitet werden, in dem Räume verschiedener Größe und Nutzung in Bezug auf das bestehende Infektionsrisiko verglichen werden können. Für dieses vereinfachte Modell gelten Einschränkungen, die ebenfalls in den kommenden Abschnitten diskutiert werden. Dabei ist zu beachten, dass die Abklingkurven der funktionalen SARS-CoV-2-Viren auf Aerosolen bei unterschiedlichen Raumluftzuständen nicht bekannt sind. Es wird daher für alle nachfolgenden Berechnungen die Annahme getroffen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen SARS-CoV-2-Viren in unterschiedlichen Innenräumen gibt. Diese Annahme kann jedoch insbesondere bei Räumen mit sehr unterschiedlicher relativer Luftfeuchte unzulässig sein, da die Luftfeuchte nachweislich einen Einfluss auf die Abklingrate der funktionalen Viren in Aerosolen hat (Smither et al. 2020). Da die derzeitige Studienlage eine genaue Quantifizierung dieses Effektes nicht zulässt, wird dieser Effekt in dieser Abhandlung vernachlässigt.

In der Literatur lassen sich Ansätze finden, die das Infektionsrisiko als Funktion der Menge beziehungsweise Anzahl eingeatmeter Viren beschreiben. Ein bekannter Ansatz ist das Wells-Riley-Modell (Riley et al. 1978). Dieser Ansatz wurde ursprünglich zur Modellierung von Infektionsketten eines Masernausbruchs in einem Kindergarten entwickelt. Das Infektionsrisiko wird hier auf Basis

einer sogenannten „quanta concentration“ in der Raumluft ermittelt. Ein quantum beschreibt hierbei die Menge an Viren, die von einer Person aufgenommen werden muss, um mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit infiziert zu werden. Das Infektionsrisiko AR_{Inf} nach Wells-Riley wird durch Gleichung (2) beschrieben.

$$AR_{\text{Inf}} = 1 - e^{-\frac{I \cdot q \cdot p \cdot \tau}{LW}} \quad (2)$$

Dabei entspricht I der Anzahl der infizierten Personen, die sich in einem Raum befinden, q steht für die „quanta emission rate“, also der Rate an quanta, die eine infizierte Person an die Raumluft abgibt. Die Atemfrequenz einer Person wird mit p bezeichnet, mit τ wird die Zeit angegeben, die sich eine nicht infizierte Person in der aerosolbelasteten Umgebung aufhält. Mit der Abkürzung LW wird die Luftwechselrate des Raumes beschrieben. Die Gleichung basiert auf der Annahme, dass sich die infizierten und infizierbaren Personen im gleichen Zeitraum im Raum befinden und die „quanta concentration“ in der ideal durchmischten Raumluft für den gesamten Zeitraum der Gleichgewichtskonzentration entspricht (Riley et al. 1978).

Die „quanta emission rate“ ist in diesem Ansatz eine hypothetische Größe und keine direkt messbare Menge, da sie meist nur empirisch aus der Reproduktionszahl in Übertragungsketten im Rahmen von epidemischen Studien ermittelt werden kann. Die Reproduktionszahl ist eine epidemiologische Größe und beschreibt, wie viele Personen eine infizierte Person im Mittel ansteckt (Robert Koch-Institut 2020a). Die Berechnung dieser Größe ist daher mit einer hohen Unsicherheit behaftet, zumal in diesen Studien der Übertragungsmechanismus nicht immer eindeutig der Aerosolübertragung zugeordnet werden kann (Azimi und Stephens 2013). Dai et al. haben in ihrem Ansatz die quanta emission rate auf Basis einer Korrelation zwischen der Reproduktionszahl und quanta emission rate bekannter Atemwegserkrankungen berechnet. Als Reproduktionszahl für SARS-CoV-2 wurde 2 bis 2,5 angenommen und damit eine quanta emission rate von 14 bis 49 quanta/h berechnet (Dai und Zhao 2020).

Für einen modifizierten Wells-Riley-Ansatz wurde die quanta emission rate aus der Rekonstruktion eines Ausbruchs in einem Reisebus zu 857 quanta/h berechnet (Sun und Zhai 2020). Buonanno et al. haben die quanta emission rate über einen alternativen Ansatz auf Basis von medizinischen Parametern bestimmt. Dabei wurde die Anzahl an SARS-CoV-2-Viren im menschlichen Speichel durch medizinische Untersuchungen, sowie der Auswurf von Tröpfchen und Aerosolpartikel bei unterschiedlichen respiratorischen Aktivitäten verwendet, um die quanta emission rate zu berechnen. Für einen Basisfall wurde eine quanta emission rate von 142 quanta/h berechnet. Wird die Unsicherheit der gemessenen Virenkonzentrationen im Speichel und dem Auswurf der unterschiedlichen respiratorischen Aktivitäten in Betracht gezogen, ergeben sich quanta emission rates von weniger als 1 quantum/h bis zu 1.000 quanta/h (Buonanno et al. 2020). Trotz dieser Unsicherheiten wurde in der aktuellen SARS-CoV-2-Pandemie dieser Ansatz in verschiedenen Studien verwendet, um das Infektionsrisiko in Innenräumen durch Aerosolübertragungen abschätzen zu können.

Vereinfachte Bewertung belüfteter Räume

Für einen vereinfachten Ansatz zur Bewertung des Infektionsrisikos in einem mit virustragenden Aerosolen belasteten Raum wird im Folgenden vereinfachend angenommen, dass das Infektionsrisiko mit der Anzahl der eingeatmeten Viren linear steigt. Das Risiko sich zu infizieren ist in diesem Modell somit proportional zur Anzahl der eingeatmeten Viren. Diese Betrachtung entspricht einer Linearisierung des Wells-Riley-Modells, wobei hier die Virenmenge nicht in Form von quantum, sondern als Anzahl an Viren berücksichtigt wird. Es wird darauf hingewiesen, dass die Gültigkeit dieser Linearisierung bisher nicht überprüft werden konnte. Die Linearisierung ist in diesem Beitrag eine wichtige Annahme, um eine Quantifizierung der medizinischen Effekte, die für eine Aerosolübertragung maßgeblich sind, zu umgehen. Die Nutzung des Wells-Riley-Modells würde diese Umgehung nicht zulassen. Demnach kann das Infektionsrisiko AR_{Inf} nach Gleichung (3) als Produkt aus der Anzahl

eingeatmeter Viren n_V und einem Infektionsparameter κ_{Inf} definiert werden. Der Infektionsparameter κ_{Inf} umfasst außer der eingeatmeten Virenmenge pauschal alle Vorgänge, die für das Auslösen einer Infektion maßgeblich sind. An dieser Stelle werden zur Modellierung keine medizinischen oder personenbezogenen Effekte bei dem Übertragungsprozess des Virus betrachtet. Es wird auch nicht berücksichtigt, welche weiteren medizinischen Umstände für die Erkrankung einer Person berücksichtigt werden müssen. Für einen Vergleich von Räumen unterschiedlicher Ausführung und Nutzung werden alle komplexen Faktoren mithilfe des Infektionsparameters κ_{Inf} für eine durchschnittliche Person als gegeben angenommen.

$$AR_{\text{Inf}} = n_V \cdot \kappa_{\text{Inf}} \quad (3)$$

Die Anzahl eingeatmeter Viren n_V lässt sich nach Gleichung (4) allgemein mit dem zeitlichen Integral aus der Virenkonzentration $\zeta(t)$ in einem Raum zum Zeitpunkt t sowie dem Atemvolumenstrom \dot{V}_A berechnen, wobei unter stationären Randbedingungen während der gesamten Aufenthaltsdauer τ eine mittlere Virenkonzentration $\bar{\zeta}$ angenommen werden kann.

$$n_V = \int_{t=0}^{\tau} \zeta(t) \cdot \dot{V}_A \cdot dt = \bar{\zeta} \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \quad (4)$$

In diesem Modellansatz kann die mittlere Virenkonzentration $\bar{\zeta}$ im Raum nach Gleichung (5) aus dem virenbelasteten, ausgeatmeten Aerosolmengenstrom \dot{n}_{Aerosol} einer Person, dem für den Luftwechsel des Raumes maßgeblichen Volumenstrom \dot{V}_R und einem Wahrscheinlichkeitswert für die Anwesenheit mindestens einer infizierten Person P_{KPR} bestimmt werden. Aufkonzentrationseffekte, die auftreten, wenn eine infizierte Person den Raum betritt, werden hier vernachlässigt. Dabei sollte beachtet werden, dass der Effekt der Aufkonzentration insbesondere bei – verglichen mit der jeweiligen nominalen Zeitkonstante – kurzen Aufenthaltsdauern einen größeren Einfluss hat. In dieser Bilanz wird zudem die Anzahl an Viren, die von den Personen im Raum eingeatmet werden, vernachlässigt.

$$\bar{\zeta} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot P_{\text{KPR}} \quad (5)$$

Die Wahrscheinlichkeit P_{KPR} bei n_{Inf} Infizierten in einer Gesamtpopulation n_p mindestens einen Infizierten in einer Gruppe mit n_r Personen in einem Raum zu treffen, ist näherungsweise über Gleichung (6) berechnet (Consileon Business Consultancy GmbH 2020; Tabarrok 2020).

$$P_{\text{KPR}} = 1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_p}\right)^{n_r} \quad (6)$$

Daraus folgt für das absolute Infektionsrisiko AR_{Inf} nach Gleichung (7)

$$AR_{\text{Inf}} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_p}\right)^{n_r}\right) \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{Inf}} \quad (7)$$

Mit dieser Gleichung kann auf Basis der beschriebenen Vereinfachungen das absolute Infektionsrisiko in einem beliebigen Raum berechnet werden. Eine Auswertung und Interpretation der Ergebnisse bleibt jedoch schwierig, da einige Parameter dieser Gleichung nicht mit ausreichender Sicherheit angegeben werden können. Daher soll im nächsten Abschnitt auf ein relatives Risiko einer Infektion in einem Raum eingegangen werden.

Relatives Infektionsrisiko durch Aerosole in verschiedenen Räumen

Unter der Annahme üblicher Lebensbedingungen muss davon ausgegangen werden, dass auch bei strenger Einhaltung empfohlener Vorsichtsmaßnahmen und Verhaltensregeln eine Infektion mit COVID-19 in Räumen niemals gänzlich ausgeschlossen werden kann. Das **absolute** Infektionsrisiko wird niemals Null, wenn sich in einem Raum mindestens zwei Personen befinden. Für eine vereinfachte Risikoabschätzung sollte daher ein Referenzfall definiert werden, an dem alle anderen Fälle bewertet werden können. Durch diesen Referenzfall und unter der Annahme, dass alle unbekannt oder nicht detaillierten medizinischen Phänomene in allen betrachteten Räumen gleich sind, kann statt des nicht exakt zu quantifizierenden absolu-

ten Infektionsrisikos ein **relatives** Infektionsrisiko ermittelt werden.

Als Referenzumgebung wird in diesem Zusammenhang nachfolgend die durchschnittliche Wohnsituation betrachtet, wobei sich jeder Bewohner eines Haushalts wie die Grundgesamtheit aller Personen in Deutschland infizieren kann. Damit kann die Übertragung eines Virus durch Aerosole in einem Raum mit der Wahrscheinlichkeit einer Infektion in einer durchschnittlichen Wohnung verglichen werden. Grundsätzlich kann an dieser Stelle eine beliebige Referenz ausgewählt werden. Die Werte des relativen Risikos beziehen sich immer auf den gewählten Referenzfall.

Für eine typische Wohnung lässt sich der maßgebliche Volumenstrom nach Gleichung (8) als Produkt aus der Grundfläche A_{ref} , der lichten Raumhöhe h_{ref} und der Luftwechselrate LW_{ref} berechnen.

$$\dot{V}_{\text{R,ref}} = A_{\text{ref}} \cdot h_{\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}} \quad (8)$$

Dabei ergibt sich die Luftwechselrate LW im Allgemeinen als Quotient aus Luftvolumenstrom und Raumvolumen:

$$LW = \frac{\dot{V}_{\text{R}}}{V_{\text{R}}} = \frac{1}{\tau_{\text{n}}} \quad (9)$$

Die in Tabelle 1 angenommene Grundfläche für die Referenzwohnung entspricht dabei der mittleren Wohnfläche für Haushalte in Deutschland gemäß Zusatzprogramm „Wohnen in Deutschland“ des Mikrozensus 2018, wobei mit näherungsweise 46 m² pro Kopf zwei anwesende Personen angenommen werden können (Statistische Ämter des Bundes und der Länder 2019). Für Wohnräume wird von einem Austausch der gesamten Raumluft alle zwei Stunden ausgegangen. Zusammen mit einer Aufenthaltsdauer von 8 h, die analog zu einem typischen Arbeitstag gewählt wurde, kann das Referenzszenario somit etwa als ein Tag am Wochenende oder als Arbeitstag im Homeoffice angesehen werden. Zur Berechnung der Wahrscheinlichkeit, einer Person zu begegnen, die infiziert ist, wird für Deutschland von 83 Mio. Einwohnern und Anfang August 2020 etwa 10.000 aktuell infizierten Per-

sonen ausgegangen, die sich aus der Anzahl aller registrierten Fälle abzüglich der bereits genesenen und verstorbenen Personen ergibt (Robert Koch-Institut 2020b). Die Anzahl tatsächlicher Infizierter wird oft um ein Vielfaches höher geschätzt.

Tabelle 1: Annahmen für die Referenzumgebung einer typischen Wohnung

	Parameter	Wert
Grundfläche in m ²	A_{ref}	93
Raumhöhe in m	h_{ref}	2,4
Luftwechsel in 1/h	LW_{ref}	0,5
Anzahl anwesender Personen	$n_{\text{R,ref}}$	2
Aufenthaltsdauer in h	τ_{ref}	8
Wahrscheinlichkeit, mindestens einer infizierten Person zu begegnen	$P_{\text{KPR,ref}}$	0,00024

Wird nun Gleichung (7) für ein beliebiges zu bewertendes Szenario AR_{Inf} und für das Referenzszenario einer typischen Wohnung $AR_{\text{Inf,ref}}$ herangezogen, kann das relative Infektionsrisiko RR_{Inf} entsprechend Gleichung (10) berechnet werden.

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{AR_{\text{Inf}}}{AR_{\text{Inf,ref}}} \quad (10)$$

Eingesetzt folgt

$$\begin{aligned} RR_{\text{Inf}} &= \frac{\frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_{\text{R}}} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R}}}\right) \cdot \dot{V}_{\text{A}} \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{Inf}}}{\frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_{\text{R,ref}}} \cdot \left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R}}}\right) \cdot \dot{V}_{\text{A}} \cdot \tau_{\text{ref}} \cdot \kappa_{\text{Inf}}} \\ &= \frac{\dot{V}_{\text{R,ref}}}{\dot{V}_{\text{R}}} \cdot \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R}}}\right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \\ &= \frac{A_{\text{ref}} \cdot h_{\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}}}{V \cdot LW} \cdot \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R}}}\right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \end{aligned} \quad (11)$$

Durch diese relativierte Risikobewertung kann der nach heutigem Wissensstand nicht quantifizierbare allgemeine Infektionsparameter κ_{Inf} aus der Gleichung entfernt werden, wobei vereinfachend angenommen wird, dass dieser in allen betrachteten Umgebungen und für alle Personen gleich ist. Zudem können unter der Annahme, dass sich in beiden Umgebungen Personen mit gleichen physiologischen Eigenschaften aufhalten, sowohl die ausgeatmete Aerosolmenge \dot{n}_{Aerosol} als auch der Atemvolumenstrom \dot{V}_A gekürzt werden. Übrig gebliebene Größen in der Gleichung sind ausschließlich technische Parameter des Raumes, die Raumbelegung und die das aktuelle Infektionsgeschehen beschreibenden statistischen Größen.

Unterschiedliche Raumparameter und Nutzungen

Um das relative Infektionsrisiko gegenüber einem Aufenthalt in der eigenen Wohnumgebung zu bewerten, werden nachfolgend Randbedingungen für verschiedene belüftete Vergleichsumgebungen definiert, wobei mit einem Fahrzeug und einer Flugzeugkabine neben Räumen in Gebäuden beispielhaft auch Transportmittel mit einbezogen werden. Wenn nicht anders angegeben bezieht sich das Raumluftvolumen dabei jeweils auf die lichten Innenabmessungen ohne Berücksichtigung von Möblierung oder sonstigen Einbauten.

Bei den Aufenthaltszeiten werden keine Pausen oder Unterbrechungen berücksichtigt. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die in Normen und Richtlinien angegebenen Auslegungswerte für Luftwechselraten oftmals nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen. Hier ist eine Prüfung des wirklichen Anlagenbetriebs anzuraten. Weiterhin sind für die Luftwechselraten Annahmen für personenbezogene Außenluftvolumenströme notwendig, da viele Lüftungsanlagen mit variablem Volumenstrom betrieben werden. In den meisten Fällen wird der Volumenstrom in diesen Anlagen nach der CO_2 -Konzentration in der Abluft geregelt. Alle hier genannten Werte für Luftwechsel, Aufenthaltszeiten und Belegungen sind nicht als allgemeingültig für die jeweiligen Raumtypen, sondern

exemplarisch für das jeweils angenommene Beispiel zu verstehen.

Die Annahmen für die Vergleichsmessungen in Tabelle 2 ergeben sich wie folgt: Als weiteres Wohngebäude wird ein **Einfamilienhaus** mit ähnlicher Raumhöhe, hygienischem Luftwechsel und Aufenthaltsdauer wie die Referenzwohnung angenommen. Zusammen mit einer Grundfläche von 140 m^2 ergibt sich ein Volumen von näherungsweise 336 m^3 , das hier vereinfachend als ein Luftverbund angenommen wird. Um auch Situationen mit mehreren Hausgästen betrachten zu können, werden nachfolgend Belegungen von bis zu 20 Personen betrachtet.

Grundlage für die Referenzwerte eines **Klassenraums** für einen beispielhaften Schultag mit Unterricht von 8:00 bis 13:00 Uhr stammen aus einer in Frühjahr und Sommer 2019 von der Heinz Trox Wissenschafts gGmbH durchgeführten Feldstudie zur Luftqualität und Akustik in Schulen. Einbezogen wurden 48 zufällig ausgewählte Klassenräume verschiedener allgemeinbildender Schultypen in Aachen und Neukirchen-Vluyn. Die Auswertung der aufgenommenen Raumgeometrien ergibt eine mittlere Grundfläche von 64 m^2 und mit einer durchschnittlichen lichten Höhe von $3,27 \text{ m}$ ein Raumvolumen von etwa 210 m^3 für durchschnittlich 27 Sitzplätze. Die Werte der Feldstudie decken sich mit Untersuchungen der Unfallkasse NRW (Neumann und Buxtrup 2014). Je nach Kurszusammensetzung und Klassenverband sind bei der Belegung größere Schwankungen möglich. Die im Rahmen der durchgeführten Feldstudie erfassten maschinellen Lüftungsgeräte hatten Nennvolumenströme von bis zu $850 \text{ m}^3/\text{h}$, die wegen der erhöhten Strömungsgeräusche während des Unterrichts allerdings nicht mit höchster Gebläsestufe betrieben werden konnten. Entsprechend können Luftwechselraten von unterhalb $4/\text{h}$ als realistisch angenommen werden.

Stellvertretend für einen typischen Arbeitsplatz wird eine Büroumgebung bei einer durchschnittlichen 40-Stunden-Woche betrachtet. In Anlehnung an die Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR

A1.2, die die Arbeitsstättenrichtlinien konkretisieren, werden pro Arbeitsplatz 8 m² Grundfläche angenommen. Für ein **Mehrpersonenbüro** mit vier Plätzen ergeben sich bei konservativer Abschätzung somit eine Grundfläche von 26 m² und ein Raumvolumen von 65 m³ bei Einhaltung der für diese Grundfläche minimal zulässigen lichten Raumhöhe von 2,75 m. Als **Großraumbüro** gelten weiterhin Büros mit einer Grundfläche ab 400 m² mit einer lichten Höhe von mindestens 3 m, woraus sich ein Mindestraumvolumen von 1.200 m³ ergibt. Zusammen mit einem Platzbedarf von minimal 12 m² pro Arbeitsplatz ergibt sich eine maximale Besetzung von 33 Personen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2013).

Als weitere Nichtwohngebäude werden ein **Hörsaal** sowie eine Messehalle herangezogen. Für einen exemplarischen großen Hörsaal mit einer Bestuhlung für etwa 1.000 Personen wird eine Grundfläche von 935 m² und ein Volumen von etwa 10.000 m³ angenommen. Bei Hörsälen der RWTH Aachen werden typischerweise 3 bis 3,5 Luftwechsel pro Stunde eingestellt.

Mit einer **Messehalle** wird weiterhin eine Umgebung mit sehr großem Raumvolumen betrachtet. Die angenommene Vergleichsumgebung ist an eine große Halle der Messe Frankfurt angelehnt. Mit Seitenlängen von rund 75 und 160 m sowie einer mittleren lichten Höhe von etwa 13 m ergeben sich eine Brutto-Grundfläche von 12.000 m² und ein Luftvolumen von etwa 156.000 m³. Die angegebenen Luftwechsel wurden dem aktuellen „Schutz- und Hygienekonzept zur Durchführung von Fachmessen und -kongressen auf dem Gelände der Messe Frankfurt (Stand 18.05.2020)“ entnommen. Mit der auf Basis aktueller Bestimmungen vorgesehenen Grundfläche von 3 m² pro Person bzw.

verkauftem Ticket ergibt sich die Maximalbelegung der Halle von 4.000 Personen.

Um einen direkten Vergleich der beiden Transportmittel PKW und Flugzeug zu ermöglichen, wird exemplarisch eine Reise von Düsseldorf nach Berlin mit jeweiliger Aufenthaltszeit betrachtet. Die Referenzdaten eines entsprechenden **Flugzeugs** für Kurz- bis Mittelstrecken orientieren sich am Airbus A320-200, der häufig für die genannte Strecke eingesetzt wird. Damit ergibt sich ein Kabinenvolumen von etwa 195 m³ für bis zu 168 bzw. 180 Personen bei Maximalbelegung in Abhängigkeit der Klassenaufteilung (Stansted News Limited; Deutsche Lufthansa AG). Gemäß des ASHRAE-Handbuchs für HVAC Applications werden zwischen 11 und 15 Luftwechsel pro Stunde angenommen (2019 ASHRAE Handbook 2019).

Die Eckdaten für ein **Fahrzeug** mit fünf Sitzplätzen und einem Kabinenvolumen von ca. 3 m³ wurden von Großmann übernommen (Großmann 2013), wobei der sehr weitgefaste Wertebereich der Luftwechselrate unter üblichen Nutzungsbedingungen längerfristig kaum ausgereizt werden dürfte. Mit einbezogen sind hier hohe Zuluftgeschwindigkeiten, die aus sicherheitsrelevanten Gründen zur Enteisung oder Sichtklärung der Frontscheibe notwendig sind. Entsprechend hohe Gebläsestufen werden darüber hinaus auch für das gezielte Anströmen bestimmter Körperteile nach dem Einsteigen in eine überhitzte Fahrzeugkabine oder zur Verdunstung von Schweiß durch erzwungene Konvektion eher kurzzeitig, denn für eine dauerhafte Klimatisierung genutzt. Für eine Fahrtgeschwindigkeit von etwa 115 km/h und Klimaanlage im Automatikmodus werden Luftwechselraten mit Werten in einer Größenordnung von 30/h als Anhaltswert angenommen, wobei dieser nicht zuletzt stark vom Alter des Fahrzeuges abhängt (Ott et al. 2008).

Tabelle 2 – Annahmen und typische Randbedingungen für Vergleichsumgebungen

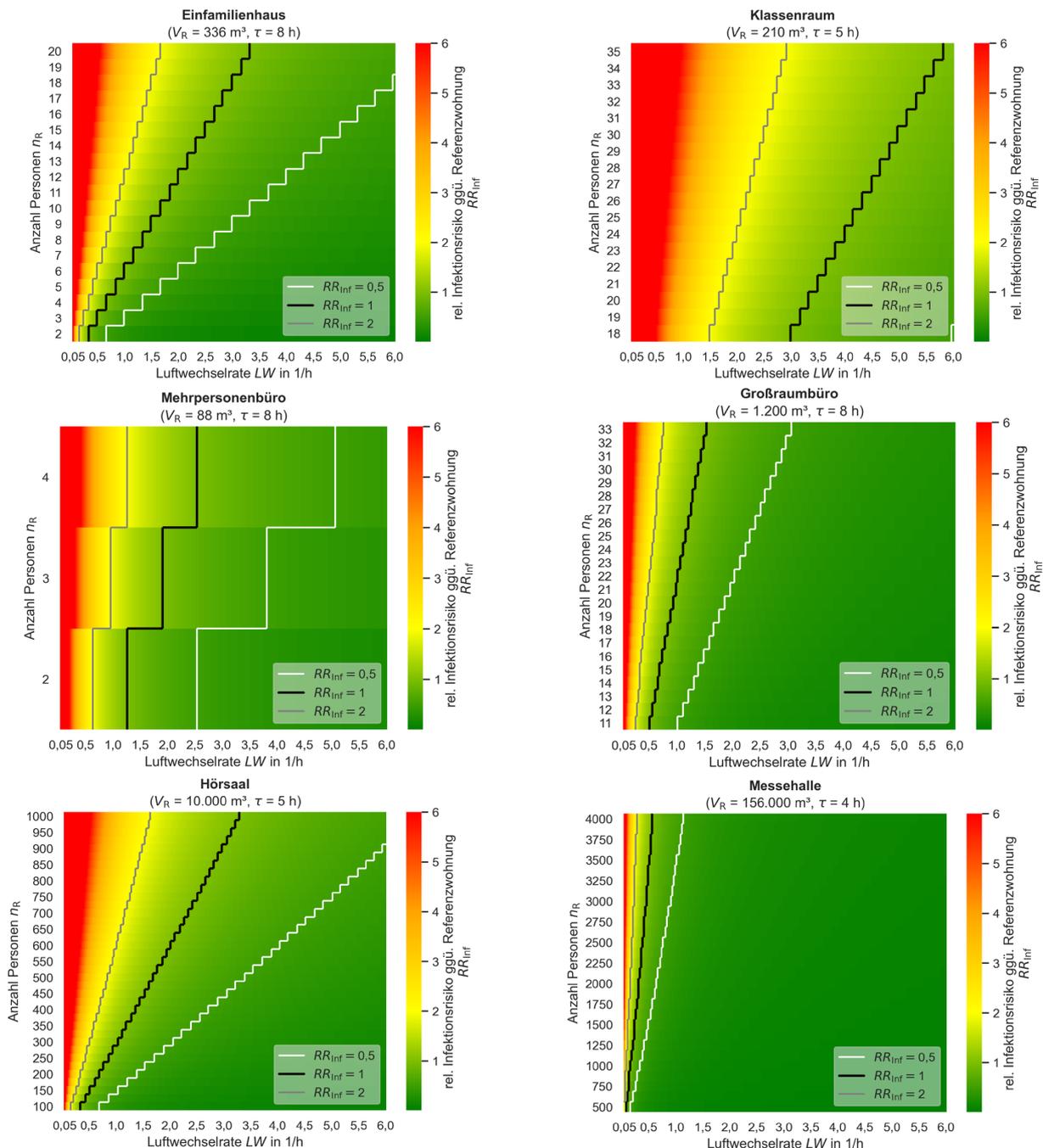
		Einfamilienhaus	Klassenraum	Mehrpersonenbüro	Großraumbüro	Hörsaal (groß)	Messehalle (groß)	PKW	Flugzeug
V	m ³	390	210	65	1200	10.000	138.000	3	195
LW	1/h	0,5	bis 4	bis 4	bis 4	bis 3,5	2 ... 5	10 ... 200	11 ... 15
n_{R,max}	-	20	35	4	33	1000	4000	5	180
τ	h	8	5	8	8	1,5	2,5	5,5	1

Vergleich des relativen Infektionsrisikos in unterschiedlicher Umgebungen

Im Folgenden wird das Infektionsrisiko für die verschiedenen Räume unter variablen Randbedingungen relativ zur als Referenzumgebung angenommenen Wohnung grafisch dargestellt. In den nachstehenden Diagrammen ist die Anzahl der Personen über der Luftwechselrate aufgetragen, wobei das relative Infektionsrisiko entsprechend einer um die Farbe Orange erweiterten Ampel farblich angegeben ist. Um das Vergleichen verschiedener Szenarien anhand der Farben zu ermöglichen, wurden für alle immobilen Umgebungen in Abbildung 2

dieselben Luftwechsel- und Risikoachsen gewählt. Gelb entspricht dabei einem doppelten, rot einem mindestens sechsfachen relativen Infektionsrisiko. Die den Farbverläufen überlagerten Linien geben zur einfacheren Orientierung die Grenzen des halben, gleichen und doppelten Infektionsrisikos gegenüber der Referenzumgebung an. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Visualisierungen, die basierend auf allen genannten Vereinfachungen über Gleichung (11) berechneten Werte darstellen, nur für die jeweils exemplarisch angenommenen Raumvolumina und Aufenthaltsdauern gelten. Auf den Einfluss letztgenannter Größen wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Abbildung 2: Relatives Infektionsrisiko verschiedener immobilier Vergleichsumgebungen gegenüber Referenzwohnung durch Aerosole



Im Fall eines **Einfamilienhauses** wird zunächst von einer Familie mit vier Personen ausgegangen, wobei das relative Infektionsrisiko analog zur angenommenen Besetzung der Referenzwohnung bereits ab zwei Personen angegeben ist. Bei einer angesetzten Luftwechselrate von 0,5/h liegt das Infektionsrisiko bei vier Personen bereits um ein Drittel höher als im Fall der Referenzwohnung: Während beide Personen in erstgenannter Umgebung jeweils etwa 46 m² Grundfläche und 110 m³ Luftvolumen zur Verfügung stehen, bleiben im betrachteten Einfamilienhaus 35 m² und 84 m³ pro Kopf übrig. Sind bei einer Familienfeierlichkeit oder zu einem vergleichbaren Anlass 20 Personen anwesend, liegt das relative Infektionsrisiko bei unverändertem Lüftungsverhalten bei etwa 6,6. Für ein relatives Risiko von 1 wären 3,3 Luftwechsel pro Stunde notwendig. Es sei darauf hingewiesen, dass die hier getroffene Annahme eines Luftverbundes im gesamten Haus in der Realität nicht uneingeschränkt gegeben ist, so dass es zu lokal höheren Infektionsrisiken innerhalb des Gebäudes kommen kann.

Klassenräume sind wegen ihrer mitunter hohen Belegungsdichte und langen Nutzungsdauern als besonders kritisch anzusehen. Würde ebenfalls von einem halben Luftwechsel pro Stunde ausgegangen, der bei ungünstigen Außenbedingungen und einer unzureichend genutzten Fensterlüftung durchaus realistisch ist, ergäbe sich bei angenommener Maximalbesetzung mit 35 anwesenden Personen ein fast 12-fach so hohes Infektionsrisiko wie in der Referenzumgebung. Selbst bei einer sehr geringen Belegung von 18 Personen wäre für ein relatives Risiko von 1 noch etwa ein dreifacher Luftwechsel pro Stunde und somit ein Volumenstrom von 630 m³/h notwendig. Ein Volumenstrom in dieser Größenordnung kann ganzjährig nur von einer Lüftungstechnischen Anlage bereitgestellt werden. Dabei muss das verursachte Strömungsgeräusch so gering sein, dass die Lernumgebung nicht negativ beeinflusst wird. Eine reine Fensterlüftung wird insbesondere im Winter und bei lauter Außenumgebung nicht für einen ausreichenden Luftwechsel sorgen können.

Beim Vergleich der Büroräume machen sich die für Großraumbüros in der ASR A1.2 deutlich großzügiger bemessenen Verkehrsflächen bemerkbar. Während beim mit vier Personen voll besetzten **Mehrpersonenbüro** für ein relatives Risiko von 1 ein etwa 2,5-facher Luftwechsel pro Stunde notwendig ist, würden im **Großraumbüro** hierfür selbst bei der angenommenen Vollbesetzung von 33 Personen etwa 1,5 Luftwechsel pro Stunde ausreichen. Die im Diagramm minimal berücksichtigte Anzahl an Personen entspricht mit 11 Personen einem Drittel der Maximalbesetzung.

Im Falle des großen **Hörsaals** reicht bei Vollbesetzung ein 3,3-facher Luftwechsel pro Stunde aus, um ein relatives Infektionsrisiko von 1 zu erreichen. Auch geringere Belegungsdichten mit einem Zehntel der Maximalbesetzung werden dargestellt, um eine typische Prüfungssituation oder weniger zahlreich besuchte Veranstaltungen berücksichtigen zu können. Bei der **Messehalle** liegt das Infektionsrisiko bei typischen Luftwechselraten – sogar bei Maximalbelegung – deutlich unterhalb des Risikos in der häuslichen Referenzumgebung. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Raumtypen sind in diesen Veranstaltungsräumen ohnehin deutlich größere Raumvolumina notwendig, um beispielsweise im Brandfall eine hinreichend große rauchfreie Schicht sicherzustellen. Obwohl die flächenbezogene Personendichte nicht unähnlich der eines Klassenraums ist, steht jeder Person eine deutlich größere vertikale Luftsäule zur Verfügung. Hier ist anzumerken, dass Standaufbauten die Verkehrsfläche gegenüber der Brutto-Grundfläche deutlich reduzieren können.

Insbesondere bei großen Räumen ist zu berücksichtigen, dass die hier getroffene Annahme einer idealen Mischlüftung kritisch hinterfragt werden muss. Eine vollständige Verdünnung der belasteten Aerosole ist nicht immer zu erwarten, so dass lokal höhere Konzentrationen an Aerosolen auftreten können. Allerdings wird in dieser ersten Analyse auch die Speicherkapazität des Raumvolumens vernachlässigt, obwohl für eine Luftwechselrate von 3/h, die im Falle einer Messe als realistisch angenommen werden kann, die Raumzeitkonstante

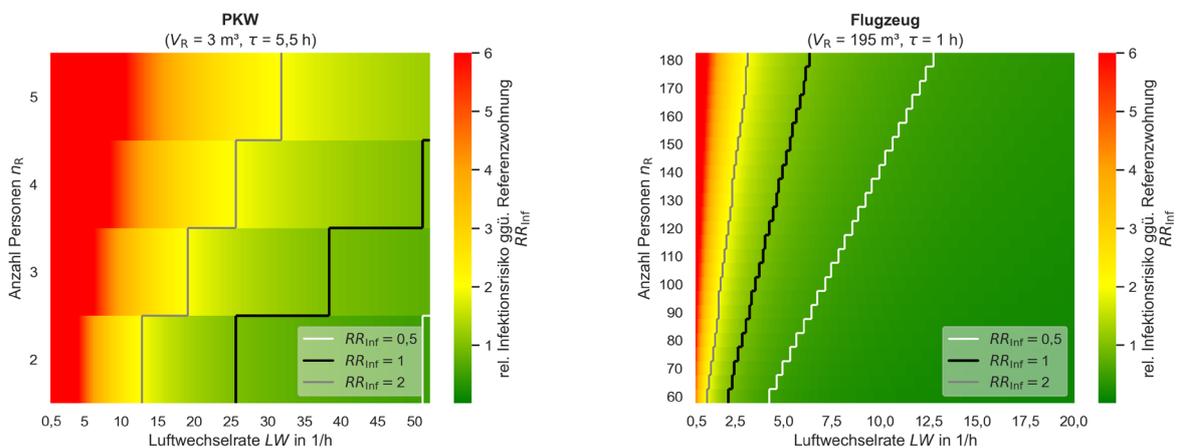
20 Minuten beträgt. Folglich würden die hier angesetzten stationären Werte erst nach einer Stunde und vierzig Minuten (entsprechend $5 \cdot \tau_n$) erreicht. Zur Abklärung der Konzentrationsverteilung in größeren Räumen sind Messungen im Herbst dieses Jahres durch die Heinz Trox-Stiftung geplant.

Für den Vergleich unterschiedlicher Transportmittel wird exemplarisch eine Strecke von Düsseldorf nach Berlin betrachtet. Die Ergebnisse werden hier aufgrund der signifikant unterschiedlichen Luftwechselraten jeweils mit fallspezifischen Achsenkalierungen dargestellt. Bei zwei Personen im **Fahrzeug** sind etwa 25 Luftwechsel pro Stunde notwendig, um einem vergleichbaren Risiko wie in der Referenzumgebung ausgesetzt zu sein. Bei der doppelten Anzahl an Personen verdoppelt sich näherungsweise auch das relative Risiko. Um dann bei gleichem relativem Infektionsrisiko eine fünfte Person mitnehmen zu können, wäre die Anzahl der Luftwechsel auf 32/h zu erhöhen. Die hohen Zahlen für die Luftwechselraten werden durch das

geringe Volumen der Fahrzeugkabine begründet. Im Gegensatz zu anderen Umgebungen ist in Fahrzeugen eine aktive Einflussnahme der Passagiere durch das Öffnen von Fenstern oder eine Anpassung der Gebläsestufe einfach möglich.

In einem **Flugzeug** für Kurz- und Mittelstreckenflüge würden selbst bei Vollbesetzung mit 180 Personen 6,4 Luftwechsel pro Stunde für ein relatives Infektionsrisiko von 1 ausreichen. Wäre nur jeder dritte Platz besetzt, würde sich für die 60 reisenden Personen bei derselben Luftwechselrate auch das relative Infektionsrisiko auf ein Drittel verringern. Mit den als realistisch angenommenen Luftwechselraten zwischen 11 und 15/h liegt das relative Infektionsrisiko mit Maximalbesetzung bei etwa 0,58 bzw. 0,42. Für eine genauere Analyse muss untersucht werden, inwieweit der hohe Umluftanteil in einer Flugzeugkabine von Aerosolen befreit werden kann. Außenluft kann insbesondere in höheren Flughöhen nur über die Triebwerke oder einen eigenen Kompressor bereitgestellt werden.

Abbildung 3: Relatives Infektionsrisiko verschiedener mobiler Vergleichsumgebungen gegenüber Referenzwohnung durch Aerosole



Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde ein Ansatz entwickelt, der ein relatives Infektionsrisiko durch einen Virustransport über Aerosole in unterschiedlichen Räumen und Nutzungen gegenüber einer Wohnung als Referenzumgebung berechnet. Auf Basis des aktuellen Verhältnisses aus den an COVID-19 erkrankten Personen und der Gesamtbevölkerung

in Deutschland wurde für die jeweilige Raumbelastung die Wahrscheinlichkeit modelliert, mit der eine infizierte Person im Raum anwesend ist. Mit dieser Wahrscheinlichkeit und auf Basis raumspezifischer Parameter sowie einer hypothetischen Rate an infektiösen Aerosolpartikeln, die eine infizierte Person an die Raumluft abgibt, wurde ein Modell für die Gleichgewichtskonzentration an infektiösen Aerosolpartikeln in der Raumluft aufgestellt.

Die Raumluft wurde in der Studie vereinfacht als ideal durchmischt angesehen und die Speichermasse des Raumes vernachlässigt. Das absolute Infektionsrisiko wurde dabei näherungsweise linear abhängig von der Anzahl der eingeatmeten, infektiösen Aerosolpartikel mit einem hypothetischen Infektionsparameter modelliert. Durch den Bezug des absoluten Infektionsrisikos eines beliebigen Raumes auf das Risiko einer Referenzumgebung konnte der schwer quantifizierbare Infektionsparameter aus dem Modell entfernt werden.

Das relative Infektionsrisiko wurde für verschiedene Wohn- und Nichtwohngebäude sowie Transportmittel mit variablen, raumtypischen Luftwechselraten und Personenbelegungen berechnet. Für jeden Raumtyp wurden konstante, typische Raumvolumina und Aufenthaltszeiten angenommen. Als Referenzumgebung diente dabei eine durchschnittliche Wohnung in Deutschland. Für die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine infizierte Person im Raum befindet, wurde das aktuelle Verhältnis an infizierten Personen zur Gesamtbevölkerung der Bundesrepublik Deutschland angenommen. Dieser Wert kann immer an die aktuellen und auch lokalen Gegebenheiten angepasst werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass ein relatives Infektionsrisiko durch Aerosole bei hinreichend großen Luftwechselraten in allen Vergleichsumgebungen kleiner 1 erreicht werden kann. Das Infektionsrisiko durch belastete Aerosole ist in diesem Fall geringer als in der Referenzumgebung einer typischen Wohnung. Auch wenn dieser Wert keine absolute Sicherheit indiziert, erlaubt dieser Bezug eine Abwägung weitergehender Schutzmaßnahmen. Allerdings wird auch deutlich, dass ohne eine verlässliche Belüftung eines Raumes sehr hohe Infektionsrisiken entstehen.

In Klassenräumen zeigt diese Analyse, dass in Anbetracht der hohen Belegungsdichten und Aufenthaltsdauern hohe Luftwechselraten erforderlich sind, um ein relatives Infektionsrisiko im Bereich 1 einzuhalten. Kurzfristig sollte in der Praxis zumindest eine CO₂-Ampel als Indikator für die personenbezogene Außenluftmenge verwendet

werden. Bei allen neuen Schulen und bei Sanierungsmaßnahmen ist der Einbau einer ausreichend bemessenen Lüftungstechnik dringend anzuraten. In Räumen mit größerem Raumvolumen wie Großraumbüros, Hörsälen und Messehallen ergibt sich auch für vergleichsweise geringe Luftwechselraten ein relatives Infektionsrisiko kleiner 1, da die personenbezogenen Luftmengen aufgrund der großen Raumluftvolumina sehr hoch sind. Zusätzliche Speicher- oder Puffereffekte wurden in dieser Analyse nicht berücksichtigt.

Im Fahrzeug dagegen sind aufgrund des geringen Raumluftvolumens hohe Luftwechselraten notwendig, um ein relatives Infektionsrisiko kleiner 1 erreichen zu können. Im direkten Vergleich liegt das Infektionsrisiko bei typischen Luftwechselraten im Flugzeug deutlich unter dem der Referenzumgebung.

Abschließend sei noch einmal hervorgehoben, dass das im Rahmen dieses Beitrags vorgestellte Verfahren die Analyse relativer Risiken ermöglicht und so dem öffentlichen Diskurs, der häufig absolutes Risiko und Sicherheiten in den Vordergrund stellt, eine vergleichende Sichtweise gegenüberstellt.

Ausblick

Für genauere Betrachtungen ist das Rechenmodell in einem nächsten Schritt entsprechend zu modifizieren. Folgende Aspekte könnten in zukünftige Betrachtungen mit einbezogen werden, die den Umfang des vorgestellten Modells erweitern.

Berücksichtigung unterschiedlicher Infektionsgeschehen

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde davon ausgegangen, dass die Personen des Referenzhaushalts und der zu betrachtenden Vergleichsumgebung derselben Grundgesamtheit entstammen. Um lokale Hotspots bzw. Infektionsherde zu berücksichtigen, können für Referenz- und Vergleichsumgebung verschiedene Anzahlen Infizierter sowie unterschiedlich große Populationen

angenommen werden.

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{A_{\text{ref}} \cdot h_{\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}}}{V \cdot LW} \cdot \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf,ref}}}{n_{\text{p,ref}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \quad (12)$$

Berücksichtigung verschiedener Aktivitätslevel

Im Rahmen dieses Beitrags wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die Atemvolumenströme in Referenz- und Vergleichsumgebung nicht voneinander unterscheiden, wodurch diese sich gegenseitig aufheben und nicht weiter berücksichtigt werden mussten. Anhand von Gleichung (13) könnten durch die Betrachtung verschiedener Atemvolumenströme näherungsweise unterschiedliche Aktivitätslevel und Arbeitsschweren einbezogen werden:

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{A_{\text{ref}} \cdot h_{\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}}}{V \cdot LW} \cdot \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf,ref}}}{n_{\text{p,ref}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_{\text{A}}}{\dot{V}_{\text{A,ref}}} \quad (13)$$

Weiterhin können in diese Analyse neue Erkenntnisse zur Produktionsrate mit Viren belasteter Aerosole aufgenommen werden, die unterschiedliche metabolischen Raten berücksichtigen.

Berücksichtigung verschiedener Sprechanteile und -lautstärken

Weiterhin sollten verschiedene Sprechanteile und -lautstärken über eine Differenzierung der ausgeatmeten Aerosolmengen zwischen Referenz- und Vergleichsumgebung berücksichtigt werden, da diesbezüglich zwischen der Stillarbeit in einer Bibliothek, einem Kinobesuch oder der Arbeit in einem Callcenter signifikante Unterschiede in Bezug auf die jeweilige Aerosolexposition zu erwarten sind. Die erhöhte Abgabe von Aerosolen in Folge bestimmter respiratorischer Aktivitäten konnte bereits im Zusammenhang einer Chorprobe nachgewiesen werden (Hamner et al. 2020). In diesem Kontext könnte auf Untersuchungen von Asadi et al. zurückgegriffen werden (Asadi et al. 2019).

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{A_{\text{ref}} \cdot h_{\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}}}{V \cdot LW} \cdot \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf}}}{n_{\text{p}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{\text{Inf,ref}}}{n_{\text{p,ref}}}\right)^{n_{\text{R,ref}}}\right)} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_{\text{A}}}{\dot{V}_{\text{A,ref}}} \cdot \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{n}_{\text{Aerosol,ref}}} \quad (14)$$

Einfluss der Lüftungseffektivität

Je nach eingesetzter Luftführung und Temperaturverhältnisse kann es zu erheblichen Unterschieden in der Aerosolkonzentration in einem Raum kommen. Dabei müssen lokale Effekte in realen Mischlüftungen wie Stagnations- und Kurzschlussströmungen thematisiert und bewertet werden. Ergänzend kann die Wirkung einer Quellluftströmung auf die Aerosolausbreitung betrachtet werden. Die natürliche Auftriebsströmung der bodennah mit Untertemperatur und geringerem Impuls eingebrachten Zuluft transportiert die kontaminierte Atemluft aus der Aufenthaltszone direkt nach oben und in Richtung der deckennahen Absaugung. So wird eine bessere Luftqualität in Bodennähe ermöglicht. Zudem sollten im Zusammenhang maschineller Lüftung der Einfluss der Luftfilterung sowie die Wirksamkeit ergänzender Reinigungsmethoden wie etwa der Einsatz von UVC-Quellen untersucht werden.

Instationäre Effekte in Raumlüftströmungen

Abschließend kann auf instationäre Effekte der Raumlüftströmungen, insbesondere in großen Räumen, eingegangen werden. Hier kann die Speicherkapazität des verfügbaren Raumvolumens berücksichtigt werden, was insbesondere die Bewertung von Räumen mit temporärer Nutzung beeinflusst. Ergänzend ist die Untersuchung natürlicher Lüftungsszenarien mit Quer- und Stoßlüftung von großer Wichtigkeit, da die meisten Gebäude in Deutschland über keine maschinelle Lüftungsanlage verfügen.

Danksagung

Der Beitrag wurde durch die Heinz Trox-Stiftung finanziell unterstützt.

Literaturverzeichnis

2019 ASHRAE Handbook. Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Applications (2019). Atlanta, GA: ASHRAE.

Asadi, Sima; Wexler, Anthony S.; Cappa, Christopher D.; Barreda, Santiago; Bouvier, Nicole M.; Ristenpart, William D. (2019): Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 2348. DOI: 10.1038/s41598-019-38808-z.

Azimi, Parham; Stephens, Brent (2013): HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: Predicting risk reductions and operational costs. In: *Building and Environment* 70, S. 150–160. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.08.025.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) (Hg.) (2013): ASR A1.2, Raumabmessungen und Bewegungsflächen. Online verfügbar unter https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/pdf/ASR-A1-2.pdf?__blob=publicationFile&v=7, zuletzt aktualisiert am Mai 2018, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Buonanno, G.; Stabile, L.; Morawska, L. (2020): Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. In: *Environment international* 141. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105794.

Chan, K. H.; Peiris, J. S. Malik; Lam, S. Y.; Poon, L. L. M.; Yuen, K. Y.; Seto, W. H. (2011): The Effects of Temperature and Relative Humidity on the Viability of the SARS Coronavirus. In: *Advances in virology* 2011. DOI: 10.1155/2011/734690.

Consileon Business Consultancy GmbH (Hg.) (2020): Coronavirus-Risiko-Rechner. Online verfügbar unter <https://covid-o-mat.de/>, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Dai, Hui; Zhao, Bin (2020): Association of infected

probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces: a Wells-Riley equation based investigation.

Deutsche Lufthansa AG (Hg.): Airbus A320-200. Online verfügbar unter <https://www.lufthansa.com/de/de/320>, zuletzt geprüft am 03.08.2020. 2019: DIN 1946-6:2019-12, Raumluftechnik_- Teil_6: Lüftung von Wohnungen_- Allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Auslegung, Ausführung, Inbetriebnahme und Übergabe sowie Instandhaltung.

Duguid, J. P. (1946): The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. In: *The Journal of Hygiene* 44 (6), S. 471–479. DOI: 10.1017/S0022172400019288.

Fears, Alyssa C.; Klimstra, William B.; Duprex, Paul; Hartman, Amy; Weaver, Scott C.; Plante, Kenneth S. et al. (2020): Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions. In: *Emerging infectious diseases* 26 (9). DOI: 10.3201/eid2609.201806.

Fineberg, Harvey V. (2020): Rapid Expert Consultation on the Possibility of Bioaerosol Spread of SARS-CoV-2 for the COVID-19 Pandemic (April 1, 2020). Washington, D.C.: National Academies Press.

Großmann, Holger (2013): Pkw-Klimatisierung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Guenther, Thomas; Czech-Sioli, Manja; Indenbirken, Daniela; Robitailles, Alexis; Tenhaken, Peter; Exner, Martin et al. (2020): Investigation of a superspreading event preceding the largest meat processing plant-related SARS-Coronavirus 2 outbreak in Germany. In: *SSRN Journal*. DOI: 10.2139/ssrn.3654517.

Han, Z. Y.; Weng, W. G.; Huang, Q. Y. (2013): Characterizations of particle size distribution of the droplets exhaled by sneeze. In: *Journal of the Royal Society, Interface* 10 (88). DOI: 10.1098/rsif.2013.0560.

Lai, Ka man; Nasir, Zaheer Ahmad; Taylor, Jonathon (2013): Bioaerosols and Hospital Infections. In: Ian Colbeck und Mihalis Lazaridis (Hg.): Aerosol Science. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, S. 271–289.

Li, Yuguang; Qian, Hua; Hang, Jian; Chen, Xuguang; Hong, Ling; Liang, Peng et al. (2020): Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant.

Morawska, Lidia; Cao, Junji (2020): Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. In: Environment international 139. DOI: 10.1016/j.envint.2020.105730.

Mundt, Elisabeth (Hg.) (2004): Ventilation effectiveness. Brussels: Rehva (REHVA Guidebook, 2).

Neumann, Hans-Dieter; Buxtrup, Martin (2014): Gesunde Luft in Schulen – Teil 2. Beurteilung der CO₂-Konzentration und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. Hg. v. Unfallkasse Nordrhein-Westfalen.

Düsseldorf (Prävention in NRW, 57). Online verfügbar unter https://www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/praevention_in_nrw/PIN_57_Gesunde_Luft_in_Schulen_II.pdf, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Ott, Wayne; Klepeis, Neil; Switzer, Paul (2008): Air change rates of motor vehicles and in-vehicle pollutant concentrations from secondhand smoke.

In: Journal of exposure science & environmental epidemiology 18 (3), S. 312–325. DOI: 10.1038/sj.jes.7500601.

Pan, M.; Lednický, J. A.; Wu, C-Y (2019): Collection, particle sizing and detection of airborne viruses. In: Journal of applied microbiology 127 (6), S. 1596–1611. DOI: 10.1111/jam.14278.

Papineni, R. S.; Rosenthal, F. S. (1997): The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. In: Journal of aerosol

medicine : the official journal of the International Society for Aerosols in Medicine 10 (2), S. 105–116. DOI: 10.1089/jam.1997.10.105.

Riley, E. C.; Murphy, G.; Riley, R. L. (1978): Airborne spread of measles in a suburban elementary school. In: American journal of epidemiology 107 (5), S. 421–432. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a112560.

Robert Koch-Institut (Hg.) (2020): COVID-19: Fallzahlen in Deutschland und weltweit. Online verfügbar unter https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Fallzahlen.html, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Santarpia, Joshua L.; Rivera, Danielle N.; Herrera, Vicki; Morwitzer, M. Jane; Creager, Hannah; Santarpia, George W. et al. (2020): Aerosol and Surface Transmission Potential of SARS-CoV-2.

Smither, Sophie J.; Eastaugh, Lin S.; Findlay, James S.; Lever, Mark S. (2020): Experimental aerosol survival of SARS-CoV-2 in artificial saliva and tissue culture media at medium and high humidity. In: Emerging microbes & infections 9 (1), S. 1415–1417. DOI: 10.1080/22221751.2020.1777906.

Somsen, G. Aernout; van Rijn, Cees; Kooij, Stefan; Bem, Reinout A.; Bonn, Daniel (2020): Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. In: The Lancet Respiratory Medicine 8 (7), S. 658–659. DOI: 10.1016/S2213-2600(20)30245-9.

Stansted News Limited (Hg.): Airbus ACJ320. Business Air News magazine. Online verfügbar unter https://www.businessairnews.com/hb_aircraftpage.html?recnum=ACJ320, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Statistische Ämter des Bundes und der Länder (Hg.) (2019): Wohnen in Deutschland. Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/woh->

nen-in-deutschland-5122125189005.html, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

Sun, Chanjuan; Zhai, Zhiqiang (2020): The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. In: Sustainable Cities and Society 62. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102390.

Tabarrok, Alex (2020): COVID-19 Event Risk Assessment Planner. Hg. v. Marginal Revolution. Online verfügbar unter <https://marginalrevolution.com/marginalrevolution/2020/03/covid-19-event-risk-assessment-planner.html>, zuletzt geprüft am 03.08.2020.

van Doremalen, Neeltje; Bushmaker, Trenton; Morris, Dylan H.; Holbrook, Myndi G.; Gamble, Amandine; Williamson, Brandi N. et al. (2020): Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. In: The New England journal of medicine 382 (16), S. 1564–1567. DOI: 10.1056/NEJMc2004973.

Wells, William Firth (1934): On Air-Borne Infection*. In: American journal of epidemiology 20 (3), S. 611–618. DOI: 10.1093/oxfordjournals.aje.a118097.

World Health Organization (2014): Infection prevention and control of epidemic- and pandemic-prone acute respiratory infections in health care health care. WHO Guidelines. Geneva: Pandemic and Epidemic Diseases, World Health Organization.

World Health Organization (2020): Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions. WHO Guidelines. World Health Organization. Geneva. Online verfügbar unter <https://www.who.int/publications/i/item/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations>, zuletzt geprüft am 28.07.2020.

Xie, X.; Li, Y.; Chwang, A. T. Y.; Ho, P. L.; Seto, W. H. (2007): How far droplets can move in indoor environments--revisiting the Wells evaporation-falling curve. In: Indoor air 17 (3), S. 211–225. DOI:

10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x.

Yu, Ignatius T. S.; Li, Yuguo; Wong, Tze Wai; Tam, Wilson; Chan, Andy T.; Lee, Joseph H. W. et al. (2004): Evidence of airborne transmission of the severe acute respiratory syndrome virus. In: The New England journal of medicine 350 (17), S. 1731–1739. DOI: 10.1056/NEJMoao32867.