

Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage)

Dirk Müller^{1,2}, Kai Rewitz¹, Dennis Derwein¹, Tobias Maria Burgholz², Marcel Schweiker³,
Janine Bardey², Peter Tappler⁴

¹ Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

² Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Aachen

³ Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, RWTH Aachen

⁴ IBO Innenraumanalytik OG, Wien



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, M. Schweiker, J. Bardey, P. Tappler *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage)*, White Paper, RWTH-EBC 2021-002, Aachen, 2021, DOI: [10.18154/RWTH-2021-02417](https://doi.org/10.18154/RWTH-2021-02417)

This article is the 2nd revised and corrected edition of the article *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen*, White Paper, RWTH-EBC 2020-005, Aachen, 2020, DOI: [10.18154/RWTH-2020-11340](https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-11340)

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

Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage)

Dirk Müller^{1,2}, Kai Rewitz¹, Dennis Derwein¹, Tobias Maria Burgholz², Marcel Schweiker³, Janine Bardey², Peter Tappler⁴

¹ Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

² Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Aachen

³ Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Uniklinik RWTH Aachen

⁴ IBO Innenraumanalytik OG, Wien

1. Einleitung

Die anhaltende Infektionsgefahr durch das neue Beta-Coronavirus SARS-CoV-2 als Auslöser von COVID-19 hat in vielen Ländern zu intensiven Diskussionen über zukünftige Nutzungsmöglichkeiten von Innenräumen geführt. Dabei ist zu beachten, dass es in Innenräumen mit mehreren Personen immer ein Infektionsrisiko geben wird, da die Übertragung des Virus ohne die Nutzung einer im Alltag über eine Mund-Nasen-Bedeckung (MNB)¹ hinausgehenden und damit für viele Tätigkeiten 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 einer MNB 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 Aerosolpartikel, da dieser Übertragungsweg inzwischen als einer der Hauptübertragungswege erachtet wird (Robert Koch-Institut 2020c), nicht durch einfache Maßnahmen unterbunden werden kann und für eine kritische Ausbreitung von Viren in geschlossenen Räumen verantwortlich ist. Bei einem Aerosol handelt es sich um ein Trägergas (hier Luft), in dem sehr kleine Partikel schweben, die beispielsweise durch die Atmung des Menschen entstehen können. Die Konzentration der mit Viren belasteten Aerosolpartikel kann direkt durch die Lüftung des Raums beeinflusst werden. Daher ist dieser Übertragungsweg für eine sicherheitstechnische Bewertung von Innenräumen und Veranstaltungen in belüfteten Räumen von besonderer Bedeutung.

1.1 Bekannte Ausbreitungswege von Viren in Räumen

Bei der Übertragung von Atemwegserkrankungen unterscheidet die Weltgesundheitsorganisation maßgeblich zwischen 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

¹ Der Begriff Mund-Nasen-Bedeckungen (MNB) wird in diesem Beitrag als Sammelbegriff für Alltags- und Stoffmasken (häufig ebenfalls als MNB bezeichnet), medizinische Gesichtsmasken (oft als Mund-

Nasen-Schutz (MNS) bezeichnet) sowie für partikel-filtrierende Halbmasken verwendet, siehe auch Abschnitt Mund-Nasen-Bedeckungen.

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 auf direkten 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 (Han et al. 2013; Papineni und Rosenthal 1997; Duguid 1946; Asadi et al. 2019).

Die für die Tröpfcheninfektionen relevanten größeren Tröpfchen weisen eine signifikante Sinkgeschwindigkeit auf, sodass sie sich innerhalb weniger Sekunden auf dem Boden oder an anderen Flächen anlagern (Wells 1934). Während dieser Flugphase legen sie im Durchschnitt eine Entfernung von etwa 1,5 m zurück. Dabei verdunstet nur ein insignifikanter Teil der Flüssigmasse dieser Tröpfchen, sodass es kaum zu einer Änderung der Sinkgeschwindigkeiten kommt. Dieser Mechanismus konnte durch neuere experimentelle Studien noch weiter präzisiert werden. In einer Studie konnte beispielsweise 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 gründliche Handhygiene, Niesen/Husten in die Ellenbogenbeuge und das Tragen von MNB sowie das Einhalten eines Mindestabstands zu anderen Personen eingedämmt werden (World Health Organization 2020).

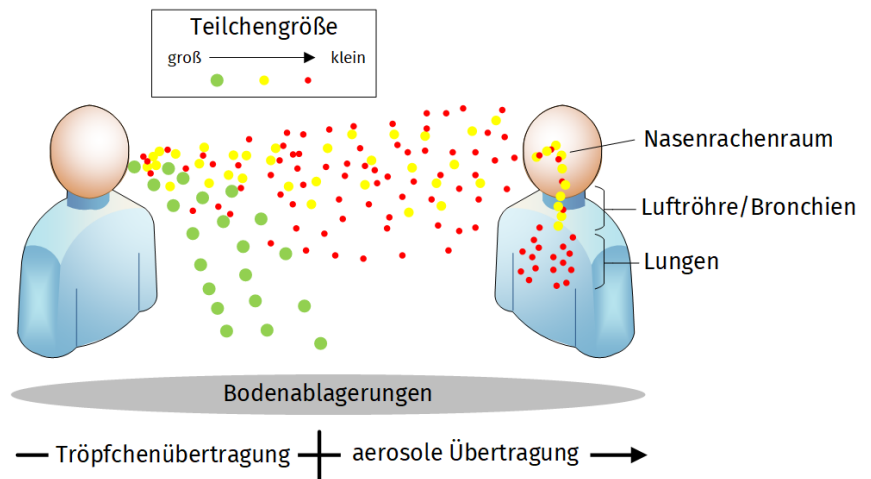


Abbildung 1 – Schematische Darstellung von Ausbreitungsmechanismen nach (Pan et al. 2019)

Bei einer **Übertragung durch Aerosolpartikel** können Viren von einer infizierten Person durch sehr kleine Tröpfchen beziehungsweise Partikel auf eine größere Anzahl nicht infizierter Personen übertragen werden. Wells hat diesen Übertragungswege 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 Aerosolpartikel in der Raumluft transportiert zu werden. Die Tröpfchenkerne weisen eine Sinkgeschwindigkeit von weniger als 3 mm/s auf, sodass 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). Die Gesellschaft für Aerosolforschung e.V. nutzt den Begriff Aerosolpartikel (Gesellschaft für Aerosolforschung e. V. 2020). Nachfolgend werden die Kombination aus Luft und luftgetragenen Tröpfchenkernen als Aerosol und die Tröpfchenkerne als Aerosolpartikel 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 Aerosolpartikel mit Viren kontaminiert sein können. Dabei führen insbesondere in Krankenhäusern virenbeladene Aerosolpartikel häufig zu Infektionen (Lai et al. 2013). So wurde beispielsweise in einer Studie nachgewiesen, dass während der SARS-Pandemie 2002/03 das Virus unter anderem auch durch Aerosolpartikel 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 Stoffmasken nur bedingt oder fast gar nicht wirksam sind (World Health Organization 2014). Die Ausbreitungsmechanismen von Tröpfchen und Aerosolpartikeln sind schematisch in Abbildung 1 gezeigt.

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 auf der Oberfläche von Aerosolpartikeln und bei der Anlagerung auf sonstigen 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. Van Doremalen hat unter Laborbedingungen Halbwertszeiten von etwa 1,1 Stunden von Viren in

Aerosolen ermittelt (van Doremalen et al. 2020). Eine weitere Studie deutet darauf hin, dass die Infektiosität bis zu 16 Stunden auf lungengängigen Aerosolpartikeln erhalten bleiben kann (Fears et al. 2020). Innerhalb dieser erheblichen Zeitspanne können sich die Aerosole auch in größeren Räumen ausbreiten, sodass nicht von einer lokalen Infektionsgefahr gesprochen werden kann. Allerdings führt die räumliche Ausbreitung der Aerosole auch zu einer starken Verdünnung der virenbelasteten Aerosolpartikel 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 hinweg nachgewiesen werden, die wahrscheinlich durch eine ungünstige Luftführung verursacht wurde. 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 eine Übertragung durch Aerosolpartikel zurückgeführt. Dabei konnten Übertragungen des Virus über Distanzen von bis zu 8 m nachgewiesen werden. Als Grund für den Ausbruch wurden unter anderem die besonderen klimatischen Bedingungen bei der Frischfleischverarbeitung (10 °C Raumlufttemperatur, hohe Luftfeuchte) sowie eine geringe Außenluft-rate genannt. Die Kühlung der Luft erfolgte mit handelsüblichen Umluftkühlgeräten, die die Raumluft ohne eine zusätzliche Filtration und ohne Frischluftzufuhr umwälzen (Guenther et al. 2020).

In Anbetracht der bisherigen Datenlage warnen Wissenschaftler ausdrücklich vor der Gefahr, die von einer Übertragung durch Aerosolpartikel mit SARS-CoV-2 ausgeht (Fineberg 2020). Als mögliche Maßnahmen zur Eindämmung dieses Übertragungsweges 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 aerosolpartikelgetragenen Viren näher untersucht werden.

1.2 Einfluss der Raumluchtströmung auf die Ausbreitung von virenbelasteten Aerosolen

Bei der Ausbreitung von virenbelasteten Aerosolen 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 Aerosolpartikel im gesamten Raumvolumen gleichmäßig verteilt, sodass 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 Konzentration 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 Raumluchtströmung aufzuzeigen.

Neben Mischlüftungen werden in der Praxis auch Quelllüftungen/Schichtenströmungen und Verdrängungsströmungen eingesetzt. Während die Verdrängungsströmungen auf Sondergebiete wie beispielsweise Reinnräume beschränkt sind und daher im Folgenden nicht weiter betrachtet werden, können Quellluftströmungen insbesondere bei höheren Räumen eingesetzt werden. Bei dieser Form einer Raumluchtströmung wird die Zuluft mit einer Unter-temperatur 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, sodass in

der Aufenthaltszone eine höhere Luftqualität erreicht werden kann.

In diesem Beitrag werden sich alle Untersuchungen auf den Ansatz einer idealen Mischlüftung beziehen. Quellluftströmungen haben zwar das Potential, zu einer Verringerung der Anzahl eingeatmeter virenbelasteter Aerosolpartikel beizutragen, allerdings ist hier detailliert zu untersuchen, in welcher Raumhöhe die kritischen Aerosole entstehen. Anzumerken ist, dass auch bei einer freien Lüftung eines Raums durch geöffnete oder gekippte Fenster eine mischlufartige oder quellluftartige Raumluchtströmung erzeugt werden kann. Bei einer freien Lüftung ist jedoch die Angabe eines genauen Wertes für den Luftwechsel, der für die folgenden Betrachtungen entscheidend ist, mit größeren Unsicherheiten und Schwankungen behaftet. Der Luftaustausch mit der Umgebung hängt von der Art der Fensteröffnung und der Rahmengeometrie sowie den Wind- und Temperaturverhältnissen ab. Die in dieser Studie verwendeten Werte für den Luftwechsel können daher nur als Anhaltswerte verstanden werden.

Befindet sich mindestens eine infizierte Person in einem Raum, werden durch ihre Atmung und Sprechaktivitäten virenbelastete Aerosole in die Raumlucht abgegeben. Die belasteten Aerosole werden im Falle einer idealen Mischlüftung im gesamten Raumvolumen gleichmäßig verteilt und die Konzentration der mit Viren belasteten Aerosolpartikel kann über die Emissionsrate der virustragenden Partikel und dem Außenluftvolumenstrom berechnet werden. Diese Bilanzierung geht von stationären Verhältnissen aus. Die instationären Effekte bei einer Änderung der Emissionsrate werden bei diesem Ansatz nicht berücksichtigt. Ob diese Vernachlässigung des Raumluftvolumens gerechtfertigt ist, kann die Berechnung der nominalen Zeitkonstante τ_n zeigen. Die nominale Zeitkonstante wird nach Gleichung (1) als Verhältnis des Raumvolumens V_R und des Zuluftvolumenstroms $\dot{V}_R$ berechnet und beschreibt die schnellstmögliche Zeit eines vollständigen Luftaustausches bei einer Verdrängungsströmung.

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

Spurengasuntersuchungen haben gezeigt, dass stationäre Konzentrationen mit Einbringung einer Quelle mit konstanten Emissionen in einen Raum nach etwa fünf Raumzeitkonstanten erreicht werden (Mundt 2004). Sollen instationäre Emissionsquellen oder variable Außenluftvolumenströme betrachtet werden, muss eine Transportgleichung für eine oder mehrere Zonen in einem Raum gelöst werden. Ein entsprechendes Verfahren mit einer Raumzone wird bei der Bewertung der Fensterlüftung vorgestellt.

Als Indikator für die Güte der Raumluftqualität werden heute in vielen Fällen Kohlenstoffdioxidensoren eingesetzt, da CO₂ bei der menschlichen Atmung freigesetzt wird und somit ein Maß für die Anwesenheit beziehungsweise Atmung von Personen ist. Bei einer Messung der CO₂-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 (Pettenkofer-Maßstab) etabliert.

Wichtig ist, dass diese CO₂-Konzentration nicht zwingend mit der Konzentration belasteter Aerosole korreliert, da alle Personen CO₂ ausatmen, während belastete Aerosole nur von infizierten Personen abgegeben werden. Insbesondere beim Einsatz von Luftreinigern würde eine Beschränkung der Betrachtungen auf die CO₂-Konzentration folglich zu einer Überschätzung des Infektionsrisikos führen, weshalb diese als alleinige Indikatorgröße nicht uneingeschränkt geeignet ist. Vielmehr ist zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins belasteter Aerosole vom aktuellen Infektionsgeschehen abhängt und mit der Anzahl der im Raum anwesenden Personen steigt.

Mögliche Einflussfaktoren auf die Inaktivierung von Viren sind die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte und die Sonneneinstrahlung. Am Beispiel von SARS-CoV-2 korreliert eine Erhöhung der Temperatur, der Luftfeuchte und der Einstrahlung jeweils mit einem Anstieg der Abbaurate der Virus-RNA (Dabisch et al. 2020). Allerdings lassen sich keine pauschalen Aussagen hinsichtlich der Einflussfaktoren beziehungsweise ihrer Auswirkungen treffen.

Vielmehr müssen diese für jeden Erreger separat betrachtet werden. So ergibt sich für das Influenzavirus ein Bereich relativer Feuchte von etwa 40 bis 60 %, um eine maximale Inaktivierung zu erreichen, wohingegen für das Poliomyelitis-Virus bei Feuchten unterhalb von 40 % die höchste Inaktivierung nachgewiesen werden konnte (Hemmes et al. 1960; Schaffer et al. 1976). Weiterhin hat die relative Luftfeuchte einen Einfluss auf die Suspensionszeit von Aerosolen und die Resuspension von bereits abgelagerten Partikeln (Yang et al. 2012; Hosseini 2020). Da der Einfluss auf die Inaktivierung von Viren nicht pauschal modelliert werden kann, für das SARS-COV-2-Virus nicht vorliegt und eine Quantifizierung des Einflusses auf die Suspensionszeit von Aerosolen nur unter unsicheren Randbedingungen erfolgen kann, werden diese Einflussfaktoren in die nachfolgende Berechnung nicht mit einbezogen.

2. Abschätzung des absoluten Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren

Eine Infektionsübertragung in einem Raum über Aerosolpartikel kann unter den heute üblichen Schutzmaßnahmen niemals vollständig ausgeschlossen werden. Obwohl dieser Übertragungsweg sehr komplex ist und viele medizinische Details nur zum Teil bekannt sind, soll im Folgenden ein Ansatz zur Abschätzung des absoluten Infektionsrisikos AR_{Inf} beschrieben werden. In der Literatur sind insbesondere Modelle zu 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, wenn sie von einer Person aufgenommen wird, mit einer gegebenen Wahrscheinlichkeit zu einer Infektion führt. Das absolute Infektionsrisiko AR_{Inf} nach Wells-Riley wird durch Gleichung (2) beschrieben.

$$AR_{\text{Inf}} = 1 - e^{-\frac{I \cdot q \cdot \dot{V}_A \cdot \tau}{\dot{V}_R}} \quad (2)$$

Dabei entspricht I der Anzahl der infizierten Personen, die sich in einem Raum befinden. Die „quanta emission rate“, also die Rate an quanta, die eine infizierte Person an die Raumluft abgibt, wird mit q bezeichnet. Der Atemvolumenstrom einer Person wird mit $\dot{V}_A$ und die Zeit, die sich eine nicht infizierte Person in der aerosolpartikelbelasteten Umgebung aufhält, wird mit τ angegeben. Mit $\dot{V}_R$ wird der zugeführte Luftvolumenstrom in den Raum 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 einer Übertragung durch Aerosolpartikel 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 der 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 wurden 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 ermitteln. Für einen Basisfall wurde eine quanta emission rate von 142 quanta/h berechnet. Wird die Unsicherheit der gemessenen Virenkon-

Tabelle 1 – Annahmen für die Referenzsituation „Schulstunde“ in einem maschinell belüfteten Klassenraum

	Einheit	Parameter	Wert
Grundfläche	m ²	A_{ref}	66,7
Raumhöhe	m	h_{ref}	3
Luftwechselrate	h ⁻¹	LW_{ref}	4,375
Luftvolumenstrom	m ³ /h	$\dot{V}_{R,\text{ref}}$	875
Anzahl anwesender Personen	–	$n_{R,\text{ref}}$	25
Aufenthaltsdauer	h	τ_{ref}	1
Wahrscheinlichkeit, mindestens einer infizierten Person zu begegnen	–	$P_{\text{KPR},\text{ref}}$	0,087
Gruppe 1			
Anzahl Personen	–	$n_{R,g1,\text{ref}}$	1
Atemvolumenstrom	m ³ /h	$\dot{V}_{A,g1,\text{ref}}$	0,54 (Sitzen)
Emittierte Aerosolkonzentration	ml/m ³	$\zeta_{\text{Aerosol},g1,\text{ref}}$	0,0096 (Sprechen)
Filtrationseffizienz MNB	–	$PR_{g1,\text{ref}}$	0 (kein MNB)
Gruppe 2			
Anzahl Personen	–	$n_{R,g2,\text{ref}}$	24
Atemvolumenstrom	m ³ /h	$\dot{V}_{A,g2,\text{ref}}$	0,54 (Sitzen)
Emittierte Aerosolkonzentration	ml/m ³	$\zeta_{\text{Aerosol},g2,\text{ref}}$	0,0018 (Atmen)
Filtrationseffizienz MNB	–	$PR_{g2,\text{ref}}$	0 (kein MNB)

zentrationen 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. 2020b). Trotz dieser Unsicherheiten wurde in der aktuellen SARS-CoV-2-Pandemie dieser Ansatz in verschiedenen Studien verwendet, um das Infektionsrisiko in Innenräumen durch Aerosolpartikel abschätzen zu können.

Im Folgenden soll das absolute Infektionsrisiko in einer Schulstunde in einem nach dem Stand der Technik belüfteten Klassenraum abgeschätzt werden. Die angesetzte Referenzsituation einer „Schulstunde“ in einem maschinell belüfteten Klassenraum ist gekennzeichnet durch ein Raumvolumen von 200 m³, eine Aufenthaltsdauer von 60 Minuten und die Anwesenheit von 25 sitzenden Personen, von denen stets nur eine Person aktiv spricht. Mit einem spezifischen Zuluftvolumenstrom von 35 m³/h pro Person, welcher auf dem empfohlenen personen- und flächenbezogenen Luftstrom der Kategorie II nach DIN EN 15251 basiert (DIN EN 15251), ergibt sich eine Luftwechselrate von etwa 4,4 h⁻¹. Alle Daten der Referenzsituation sind in Tabelle 1 dargestellt.

Eine Quantifizierung dieses Infektionsrisikos bleibt beim gegenwärtigen Stand des Wissens zwar mit vielen Unsicherheiten behaftet, gleichwohl existieren in der Literatur inzwischen entsprechende Ansätze, die sich an dokumentierten Superspreading-Events orientieren (Buonanno et al. 2020a; Lelieveld et al. 2020; Miller et al. 2020). Buonanno et al. betrachten in ihrem Szenario C eine Besprechung bei einem Raumvolumen von 300 m³ und einer Luftwechselrate von 3 h⁻¹. Unter der Voraussetzung, dass eine mit SARS-CoV-2 infizierte und infektiöse Person an der Besprechung teilnimmt, berechnen sie für die in dieser Situation exponierten Personen ein individuelles Infektionsrisiko von 1 % nach 72 Minuten Aufenthaltszeit. Dabei berücksichtigen sie, dass die infektiöse Person mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit wenig infektiös, durchschnittlich infektiös oder sehr infektiös sein kann.

Die in diesem Fall getroffenen Annahmen bezüglich Luftvolumenstrom und Anzahl aktiver Sprecher entsprechen weitgehend der hier gewählten Referenzsituation „Schulstunde“ und es ist auf der Grundlage

des Zahlengerüsts dieser Autoren zu erwarten, dass auch in der hier gewählten Referenzsituation im statistischen Mittel bei Anwesenheit einer infizierten Person das Infektionsrisiko bei 1 % liegt. Somit ergibt sich auf einen Block von vier Schulstunden mit 25 Anwesenden das Risiko einer weiteren infizierten Person. Auch bei Anwesenheit eines Superemitters ergibt sich in diesem Fall statistisch nur eine infizierte Person pro Schulstunde und eine schwach infektiöse Person führt nach 100 Schulstunden zu einer sekundären Infektion.

Neben diesem Ansatz zur Abschätzung des relativen Infektionsrisikos gibt es noch eine Reihe weiterer Berechnungswerkzeuge, die der Bestimmung des absoluten Infektionsrisikos in Innenräumen dienen und öffentlich zugänglich sind. Hierzu zählen unter anderem der *COVID 19 Aerosol Transmission Risk Calculator* (Lelieveld et al. 2020; Max Planck Institute for Chemistry 2020) und eine auf den Ergebnissen des Max-Planck-Instituts für Chemie basierende Version, die über Zeit Online verfügbar ist (Dinklage et al. 2020), der kommerzielle *COVID 19 Risk Calculator* (VA Science 2020), der Rechner *COVID-19 Infektionsrisiko durch Aerosole* (Kriegel et al. 2020; HRI 2020), das *COVID-19 Airborne Transmission Tool* (CIRES 2020) und der *Facility Infection Risk Estimator v2.0* (Branch Pattern 2020).

Die Bewertungen der beschriebenen Referenzsituation „Schulstunde“ durch diese Berechnungsansätze ist in Tabelle 2 angegeben. Alle Berechnungen wurden mit den Zahlenwerten der Referenzsituation aus Tabelle 1 durchgeführt, soweit sie in den jeweiligen Berechnungsansätzen als Eingangsgrößen Berücksichtigung finden. Alle übrigen Werte der Berechnungsansätze, die in Tabelle 1 nicht definiert sind, wurden unverändert gemäß den Angaben der Autoren für die jeweilige Berechnung übernommen.

Als Ergebnis geben die verschiedenen Berechnungsansätze entweder die Wahrscheinlichkeit für mindestens eine oder genau eine Neuinfektion an, sowie die daraus resultierende durchschnittliche Anzahl an Neuinfektionen. Das Risiko für mindestens eine Neuinfektion liegt im Bereich zwischen 2 % (Max Planck Institute for Chemistry 2020) und 3,5 % (VA Science 2020). Die durchschnittliche Anzahl von

Tabelle 2 – Vergleich verschiedener Berechnungsansätze bezogen auf das absolute Risiko sowie die Anzahl von Neuinfektionen für die Referenzsituation einer Schulstunde aus Tabelle 1

Berechnungs- werkzeug	Kurzbeschreibung und Anmerkungen	Infektionsrisiko	Durchschnittliche Anzahl von Neu- infektionen
COVID 19 Aerosol Transmission Risk Calculator (Lelieveld et al. 2020; Max Planck Institute for Chemistry 2020)	– Gleiche Sprechaktivität für alle Teilnehmer – Keine Berücksichtigung der körperlichen Aktivität – Annahme: ein Teilnehmer ist hoch ansteckend	Risiko für min- destens eine Neuinfektion: 2 %	–
COVID 19 Risk Calculator (VA Science 2020)	– Kommerzielles Tool – Berücksichtigt zwei Szenarien: 1) Sprecher ist infiziert 2) Eine andere Person ist infiziert	Risiko für min- destens eine Neuinfektion: 1) 3,553 % 2) 0,764 %	1) 0,888 2) 0,191
„So schnell verbreitet sich das Coronavirus in Innenräumen“ (Din- klage et al. 2020)	– Berücksichtigung der Belüftungsart möglich (hier: Belüftungsanlage) – Gleiche Sprechaktivität für alle Personen – körperliche Aktivität nicht berücksichtigt	Risiko für genau eine Neuinfektion < 1 %	0
COVID-19 Infektionsri- siko durch Aerosole (Kriegel et al. 2020)	– Kombiniert körperliche und Sprech- aktivität für alle Personen	Risiko für genau eine Neuinfek- tion: 6,2 %	1
COVID-19 Airborne Transmission Tool (CIRES 2020)	– Berücksichtigt die körperliche Aktivität, aber nicht die Sprechaktivität – Berücksichtigt standortabhängig die Krankheitsprävalenz	Risiko für genau eine Neuinfek- tion: 0,74 %	0,17
Facility Infection Risk Estimator v2.0 (Branch Pattern 2020)	– Unterscheidet zwischen Erwachsenen und Kindern – Schließt verschiedene Lüftungs- und Filtermethoden ein – Berücksichtigt die Sprechaktivität aber nicht die körperliche Aktivität	–	0 (Erwachsene pro Tag, ausge- hend von einer Lehrperson) 0,6 (Kinder, aus- gehend von 24 Schüler*innen)

Neuinfektionen erreicht für alle Berechnungsansätze maximal den Wert 1.

Das bereits genannte Infektionsrisiko von 1 % wird in dieser Arbeit als absolutes Risiko für die Referenzsituation verwendet. Die Zusammenstellung der unterschiedlichen Berechnungsansätze zeigt jedoch, dass sich dieses Infektionsrisiko nach dem heutigen Stand des Wissens in einem Bereich zwischen 0,74 % (CIRES 2020) und 6,2 % (HRI 2020) bewegt. Der hier verwendete Wert von 1 % entspricht dem von

Buonanno et al. angebenen statistischen Mittel bei Anwesenheit einer infizierten Person.

Dieser große Wertebereich der verschiedenen Autoren bei der Abschätzung des absoluten Risikos verdeutlicht die schwierige Auswertung von Infektionsereignissen. Viele Eingangsparameter wie etwa die Sprechanteile und körperliche Aktivität, die Luftwechselraten und die genauen Expositionszeiten der Personen können nachträglich nur ungenau ermittelt werden. Bei einigen Berechnungsansätzen wird

zudem der Abbau der Viren in der Luft über die Zeit berücksichtigt, während andere Ansätze von einer langen Infektiosität der Viren auf den Aerosolpartikeln ausgehen.

Das berechnete absolute Infektionsrisiko muss immer in Relation zur Wahrscheinlichkeit gesehen werden, dass in der Schulstunde der Referenzsituation überhaupt eine infizierte Person anwesend ist, so wie es auch im Berechnungsansatz von (CIRES 2020) berücksichtigt wird. Die Wahrscheinlichkeit P_{KPR} , bei n_{Inf} Infizierten in einer Gesamtpopulation n_p mindestens eine infizierte Person in einer Gruppe mit n_R Personen in einem Raum zu treffen, kann auf Basis der Binomialverteilung und unter Berücksichtigung des aktuellen Infektionsgeschehens berechnet werden. Mit dem Ansatz dieser Binomialverteilung kann die Wahrscheinlichkeit P bestimmt werden, eine gegebene Anzahl infizierter Personen k in einem Raum mit insgesamt n_R anwesenden Personen anzutreffen. Dabei ist $p = n_{Inf}/n_p$ die Infektionshäufigkeit abhängig vom aktuellen Infektionsgeschehen, da hier die Anzahl der infizierten Personen n_{Inf} ins Verhältnis zur Gesamtpopulation n_p gesetzt wird. Dieser Wert wird durch Gleichung (3) bestimmt und kann alternativ zu einer landesweiten Betrachtung auch als ein regionaler Wert formuliert werden, wenn statt der Werte des Landes die Werte für ein als unabhängig betrachtetes Gebiet eingesetzt werden.

$$P(k | p, n_R) = \binom{n_R}{k} \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n_R - k} \quad (3)$$

$$P_{KPR} = 1 - P(0 | p, n_R) = 1 - \left(1 - \frac{n_{Inf}}{n_p}\right)^{n_R} \quad (4)$$

Für die Berechnung der Wahrscheinlichkeit P_{KPR} , dass mindestens eine infizierte Person in einem Raum ist ($k \geq 1$), kann die Wahrscheinlichkeit, dass keine Person infiziert ist ($k = 0$) von eins subtrahiert werden, da die Summe über alle Möglichkeiten einer Binomialverteilung immer gleich eins ist, siehe Gleichung (4).

Für Deutschland ergeben sich unter der Annahme von 83 Mio. Einwohnern die in Abbildung 2 gezeigten Wahrscheinlichkeiten, mindestens eine infizierte Person in der hier diskutierten Referenzsituation anzutreffen.

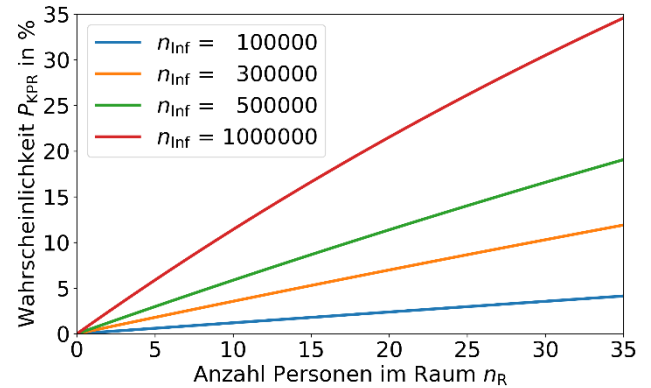


Abbildung 2 – Wahrscheinlichkeit, eine infizierte Person zu treffen abhängig von Infektionsgeschehen und Raumbelegung

Das Diagramm zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit, bei angenommenen 300.000 Infizierten in Deutschland mindestens einen Infizierten in der beschriebenen Referenzsituation zu treffen, bei 8,7 % liegt. Die Wahrscheinlichkeit, eine infizierte Person anzutreffen und sich bei dieser Person in einer Schulstunde anzustecken, wird durch die Multiplikation der Einzelwahrscheinlichkeiten berechnet und beträgt für die Referenzsituation unter den getroffenen Annahmen 0,087 %. Dieser Wert kann immer an das aktuelle Infektionsgeschehen angepasst werden, indem die Anzahl aller registrierten Fälle abzüglich der bereits genesenen und verstorbenen Personen ermittelt werden (Robert Koch-Institut 2020b).

3. Relative Bewertung des Infektionsrisikos

Die Auswertung unterschiedlicher Berechnungsverfahren zeigt, dass keine genauen Werte für die Wahrscheinlichkeit einer Infektionsübertragung in einem Raum angegeben werden können. Daher soll in diesem Beitrag ein relatives Infektionsrisiko abgeleitet werden, in dessen Berechnung nur technische Daten des Raums, der verwendeten Anlagentechnik, Angaben zur Sprechaktivität und der körperlichen Aktivität sowie zur Verwendung von MNB eingehen. Dadurch können Infektionsrisiken unterschiedlicher Räume einfach verglichen werden und die Bestimmung des absoluten Infektionsrisikos kann auf Basis aktueller Erkenntnisse für die eingeführte Referenzsituation „Schulstunde“ angepasst werden. Für die Berechnung dieses relativen Infektionsrisikos RR_{Inf}

wird die Referenzsituation als Bezugswert verwendet. Diese Referenzsituation definiert damit das relative Risiko von eins und kann immer mit Untersuchungen zu einem absoluten Infektionsrisiko für SARS-CoV-2 mit der beschriebenen Methodik über die Nutzung der Referenzsituation in Verbindung gebracht werden.

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 proportional zur Anzahl der eingeatmeten Viren. Diese Betrachtung entspricht einer Linearisierung des Wells-Riley-Ansatzes mit Hilfe einer Taylorreihenentwicklung erster Ordnung um die Stelle 0, wie in Gleichung (5) beschrieben.

$$T_1 AR_{\text{Inf}}(\tau; 0) = \frac{I \cdot q \cdot \dot{V}_A}{\dot{V}_R} \cdot \tau \quad (5)$$

Die Werte aus der Taylorreihenentwicklung sind zu jedem Zeitpunkt immer größer als die Werte des Wells-Riley-Ansatzes und stellen somit eine Risikoabschätzung zur sicheren Seite dar. Für die Referenzsituation „Schulstunde“ ergibt sich bei einer stationären Betrachtung des Szenario C von Buonanno et al. ein absolutes Infektionsrisiko von 1,77 % für den Wells-Riley-Ansatz und 1,78 % für das linearisierte Modell ($I = 1$ Person, $q = 9,7$ quanta/Person/h, $\dot{V}_A = 1,38 \text{ m}^3/\text{h}$, $\dot{V}_R = 900 \text{ m}^3/\text{h}$ und $\tau = 1,2 \text{ h}$) (Buonanno et al. 2020a).

Mit dieser Linearisierung kann das Infektionsrisiko AR_{Inf} nach Gleichung (6) 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 Effekte bei der Übertragung des Virus betrachtet. Es wird auch nicht berücksichtigt, welche weiteren medizinischen Umstände für die Erkrankung einer Person berücksichtigt werden müssen. Vielmehr wird für einen Vergleich unterschiedlicher Räume die Komplexität der Infektionsübertragung in den Infektionsparameter

κ_{Inf} gelegt und dieser Wert für eine durchschnittliche Person interpretiert. Der Parameter κ_{Inf} wird so gewählt, dass dadurch die Linearisierung des Wells-Riley-Ansatzes in Gleichung (5) abgebildet werden kann.

$$AR_{\text{Inf}} \approx n_V \cdot \kappa_{\text{Inf}} \quad (6)$$

Bei dieser Vereinfachung muss zusätzlich beachtet werden, dass die Abklingkurven der funktionalen SARS-CoV-2-Viren auf Aerosolpartikeln bei unterschiedlichen Raumlufzuständen nicht bekannt sind. Es wird daher für alle nachfolgenden Berechnungen die Annahme getroffen, dass es keine signifikanten Unterschiede zwischen SARS-CoV-2-Viren in unterschiedlich konditionierten Räumen gibt. Diese Annahme kann jedoch insbesondere bei sehr unterschiedlicher relativer Luftfeuchte unzulässig sein, da die Luftfeuchte nachweislich einen Einfluss auf die Abklingrate der funktionalen Viren auf Aerosolpartikeln hat (Smither et al. 2020). Da die derzeitige Studienlage eine genaue Quantifizierung dieses Effektes nicht zulässt, wird dieser Effekt in dieser Abhandlung nicht betrachtet.

Die Menge eingeatmeter Viren n_V lässt sich nach Gleichung (7) allgemein mit dem zeitlichen Integral aus der Virenkonzentration $\zeta(t)$ in einem Raum zum Zeitpunkt t sowie dem Atemvolumenstrom $\dot{V}_A$ berechnen, wobei bei stationären Verhältnissen während der gesamten Aufenthaltsdauer τ eine mittlere Virenkonzentration $\bar{\zeta}$ angenommen werden kann.

$$n_V = \int_{t=0}^{\tau} \zeta(t) \cdot \dot{V}_A \cdot dt = \bar{\zeta} \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \quad (7)$$

Die instationäre Virenkonzentration in der Raumluf kann durch die Bilanzgleichung (8) beschrieben werden. Der Quellterm setzt sich aus dem Produkt des Erwartungswertes für die Anwesenheit infizierter Personen in einem Raum E_{KPR} und dem Verhältnis aus dem pro Person ausgestoßenen Aerosolmengenstrom $\dot{n}_{\text{Aerosol}}$ zum Raumvolumen V_R zusammen. Der Senkenterm wird durch den virenfreen Zuluftvolumenstrom $\dot{V}_R$ pro Raumvolumen V_R multipliziert mit der Virenkonzentration ζ im Raum beschrieben. In dieser Bilanz wird die Anzahl an Viren, die von den

Personen im Raum eingeatmet werden, vernachlässigt.

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{V_R} \cdot E_{\text{KPR}} - \frac{\dot{V}_R}{V_R} \cdot \zeta \quad (8)$$

Die Lösung der inhomogenen Differentialgleichung erster Ordnung aus Gleichung (8) ergibt den zeitlichen Verlauf der Aerosolkonzentration in Gleichung (9) für die Anfangsbedingung $\zeta(t = 0) = 0$.

$$\zeta(t) = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}} \cdot E_{\text{KPR}}}{\dot{V}_R} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\dot{V}_R}{V_R} \cdot t\right)\right) \quad (9)$$

Der Erwartungswert für die Anwesenheit infizierter Personen in einem Raum E_{KPR} kann durch eine Summenbildung über die Anzahl der Personen im Raum nach Gleichung (10) ermittelt werden.

$$\begin{aligned} E_{\text{KPR}} &= \sum_{k=1}^{n_R} k \cdot B(k|p, n_R) \\ &= \sum_{k=1}^{n_R} k \cdot \binom{n_R}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n_R-k} \end{aligned} \quad (10)$$

Durch eine Indexverschiebung in der Summe und den binomischen Lehrsatz kann diese Summe ausgewertet werden und es ergibt sich nach Gleichung (11) als Ergebnis das Produkt aus der Personenanzahl im Raum n_R und der Infektionshäufigkeit p .

$$\begin{aligned} E_{\text{KPR}} &= n_R \cdot p \cdot \sum_{k=0}^{n_R-1} \binom{n_R-1}{k} \cdot p^k \cdot (1-p)^{n_R-1-k} \\ &= n_R \cdot p \cdot (p + 1 - p)^{n_R-1} \\ &= n_R \cdot p \\ &= n_R \cdot \frac{n_{\text{Inf}}}{n_p} \end{aligned} \quad (11)$$

Die stationäre Aerosolkonzentration $\bar{\zeta}$ ergibt sich nach Gleichung (12) für die Annahme eines stationären Zustandes ($\frac{d\zeta}{dt} = 0$) in Gleichung (8). Bei stationären Verhältnissen kann somit in diesem Modellansatz die mittlere und in diesem Fall konstante Virenkonzentration $\bar{\zeta}$ im Raum nach Gleichung (12) aus dem virenbelasteten, ausgeatmeten Aerosolmengestrom $\dot{n}_{\text{Aerosol}}$ einer Person, dem für den Luftwechsel des Raums maßgeblichen Volumenstrom $\dot{V}_R$

und dem Erwartungswert für die Anwesenheit infizierter Person E_{KPR} bestimmt werden. Da im ersten Teil dieser Arbeit nur stationäre Zustände betrachtet werden sollen, können Konzentrationsänderungen, die auftreten, wenn eine infizierte Person den Raum betritt oder verlässt, vernachlässigt werden. Dabei sollte beachtet werden, dass der Effekt des Anstiegs oder des Abklingens einer Virenkonzentration insbesondere bei – verglichen mit der jeweiligen nominalen Zeitkonstante – kurzen Aufenthaltsdauern einen Einfluss auf das Ergebnis hat und daher zeitaufgelöst betrachtet werden muss.

$$\bar{\zeta} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot E_{\text{KPR}} \quad (12)$$

Daraus folgt für das absolute Infektionsrisiko AR_{Inf} nach Gleichungen (6) bis (12) die Darstellung in Gleichung (13).

$$AR_{\text{Inf}} = \frac{\dot{n}_{\text{Aerosol}}}{\dot{V}_R} \cdot n_R \cdot \frac{n_{\text{Inf}}}{n_p} \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \cdot \kappa_{\text{Inf}} \quad (13)$$

Mit dieser Gleichung kann auf Basis der beschriebenen Vereinfachungen das absolute Infektionsrisiko in einem beliebigen Raum berechnet werden. Eine Auswertung dieser Gleichung ist nicht möglich, da kein Wert für den Parameter κ_{Inf} angegeben werden kann. Allerdings kann mit diesem Ansatz jeder Raum mit dem Klassenraum der Referenzsituation verglichen werden. Da immer das gleiche Virus betrachtet und in Bezug auf die Ausbreitung, Deaktivierung und Ablagerung der aerosolpartikelgetragenen Viren im Raum von einem ähnlichen Verhalten ausgegangen wird, kann der unbekannte Wert aus der Berechnung des relativen Infektionsrisikos RR_{Inf} durch Division durch die Gleichung der Referenzsituation entfernt werden. Für einen beliebigen Raum lässt sich der Volumenstrom nach Gleichung (14) als Produkt aus der Grundfläche A , der lichten Raumhöhe h und der Luftwechselrate LW berechnen.

$$\dot{V}_R = A \cdot h \cdot LW \quad (14)$$

Die Luftwechselrate LW ergibt sich als Quotient aus Luftvolumenstrom und Raumvolumen und entspricht dem Kehrwert der Raumzeitkonstante, beschrieben durch Gleichung (15).

$$LW = \frac{\dot{V}_R}{V_R} = \frac{1}{\tau_n} \quad (15)$$

Wird nun das absolute Infektionsrisiko AR_{Inf} einer beliebigen Raumsituation aus Gleichung (13) mit dem absoluten Infektionsrisiko $AR_{Inf,ref}$ der gegebenen Referenzsituation ins Verhältnis gesetzt, ergibt sich ein relatives Infektionsrisiko RR_{Inf} entsprechend Gleichung (16):

$$RR_{Inf} = \frac{AR_{Inf}}{AR_{Inf,ref}} \quad (16)$$

Für den **instationären Fall** folgt aufgrund der zeitlichen Abhängigkeit der abgegebenen Aerosolmenge das relative Infektionsrisiko nach Gleichung (17).

$$RR_{Inf,instat} = \frac{AR_{Inf,instat}}{AR_{Inf,ref,instat}} = \frac{\kappa_{Inf}}{\kappa_{Inf}} \cdot \frac{\int_{t=0}^{\tau} \zeta(t) \cdot \dot{V}_A \cdot dt}{\int_{t=0}^{\tau_{ref}} \zeta_{ref}(t) \cdot \dot{V}_{A,ref} \cdot dt} \quad (17)$$

Für den **stationären Fall** ergibt sich nach Einsetzen des absoluten Infektionsrisikos nach Gleichung (13) der in Gleichung (18) beschriebene Zusammenhang.

Um weitere relevante Einflüsse auf das Infektionsrisiko wie verschiedene Sprech- und körperliche Aktivitäten, das Tragen von MNB sowie den Einsatz von Luftreinigern berücksichtigen zu können, wird dieser vereinfachte Berechnungsansatz erweitert. Analog zur Referenzsituation, bei der zwischen Sprechenden und nicht Sprechenden Anwesenden differenziert wurde, wird in Gleichung (19) eine mittlere emittierte Aerosolmenge $\bar{n}_{Aerosol}$ für eine beliebige Anzahl an Gruppen eingeführt. Berücksichtigt werden neben der Anzahl der der jeweiligen Gruppe i zugehörigen

Personen n_{gi} die Atemvolumenströme $\dot{V}_{A,gi}$ in Abhängigkeit der körperlichen Aktivitäten und die Konzentration emittierter Aerosolpartikel $\zeta_{Aerosol,gi}$ abhängig von der Sprechaktivität (Sprechanteile und -lautstärken) entsprechend Tabelle 3. Die Reduktion der emittierten Aerosolpartikel bei Tragen von MNB wird durch die Schutzwirkung PR_{gi} nach Gleichung (19) berücksichtigt.

Wird vereinfachend von zwei Gruppen ausgegangen, ergibt sich mit Gleichung (19) für eine beliebige Vergleichsumgebung sowie die Referenzumgebung das Verhältnis der mittleren emittierten Aerosolmengen wie in Gleichung (20) dargestellt.

Eine möglichst genaue Berücksichtigung verschiedener Sprechanteile und körperlicher Aktivitäten für Referenz- und Vergleichsumgebung ist bei der Bestimmung des Infektionsrisikos zentral, da zwischen der Stillarbeit in einer Bibliothek oder der Arbeit in einem Callcenter mit hohem Sprechanteil sowie zwischen leichter sitzender und körperlich anstrengender Tätigkeit in Bezug auf die jeweilige Aerosolexposition große Unterschiede zu erwarten sind.

Für das relative stationäre Infektionsrisiko folgt unter zusätzlicher Berücksichtigung eines per Luftreiniger eingebrachten effektiven Volumenstroms $\dot{V}_{LR,eff}$ schließlich der Zusammenhang in Gleichung (21).

Zur Berücksichtigung der eingeatmeten Aerosolmenge sind für die Atemvolumenströme $\dot{V}_A$ der Vergleichsumgebung und $\dot{V}_{A,ref}$ in Gleichung (21) die Werte der jeweiligen Gruppe einzusetzen, aus deren Sicht das relative Infektionsrisiko betrachtet werden soll. Im Rahmen dieses Beitrags handelt es sich hierbei stets um die für Gruppe 2 definierten Werte $\dot{V}_{A,g2}$ (Tabelle 4) beziehungsweise $\dot{V}_{A,g2,ref}$ (Tabelle 1).

$$RR_{Inf} = \frac{\frac{\dot{n}_{Aerosol}}{\dot{V}_R} \cdot n_R \cdot \frac{n_{Inf}}{n_p} \cdot \dot{V}_A \cdot \tau \cdot \kappa_{Inf}}{\frac{\dot{n}_{Aerosol,ref}}{\dot{V}_{R,ref}} \cdot n_{R,ref} \cdot \frac{n_{Inf}}{n_p} \cdot \dot{V}_{A,ref} \cdot \tau_{ref} \cdot \kappa_{Inf}} = \frac{\frac{\dot{n}_{Aerosol}}{\dot{V}_R} \cdot n_R \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_{A,ref}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{ref}}}{\frac{\dot{n}_{Aerosol,ref}}{\dot{V}_{R,ref}} \cdot n_{R,ref}} = \frac{\dot{n}_{Aerosol}}{\dot{n}_{Aerosol,ref}} \cdot \frac{V_{R,ref} \cdot LW_{ref}}{V_R \cdot LW} \cdot \frac{n_R}{n_{R,ref}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_{A,ref}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{ref}} \quad (18)$$

$$\bar{n}_{\text{Aerosol}} = \frac{1}{n_R} \sum_i (1 - PR_{gi}) \cdot \dot{V}_{A,gi} \cdot \zeta_{\text{Aerosol},gi} \cdot n_{gi} \quad (19)$$

$$\frac{\bar{n}_{\text{Aerosol}}}{\bar{n}_{\text{Aerosol,ref}}} = \frac{\frac{1}{n_R} [\dot{V}_{A,g1} \cdot \zeta_{\text{Aerosol},g1} \cdot n_{g1} \cdot (1 - PR_{g1}) + \dot{V}_{A,g2} \cdot \zeta_{\text{Aerosol},g2} \cdot (n_R - n_{g1}) \cdot (1 - PR_{g2})]}{\frac{1}{n_{R,\text{ref}}} [\dot{V}_{A,g1,\text{ref}} \cdot \zeta_{\text{Aerosol},g1,\text{ref}} \cdot n_{g1,\text{ref}} \cdot (1 - PR_{g1,\text{ref}}) + \dot{V}_{A,g2,\text{ref}} \cdot \zeta_{\text{Aerosol},g2,\text{ref}} \cdot (n_{R,\text{ref}} - n_{g1,\text{ref}}) \cdot (1 - PR_{g2,\text{ref}})]} \quad (20)$$

$$RR_{\text{Inf}} = \frac{\bar{n}_{\text{Aerosol}}}{\bar{n}_{\text{Aerosol,ref}}} \cdot \frac{V_{R,\text{ref}} \cdot LW_{\text{ref}}}{V_R \cdot LW + \dot{V}_{L,\text{eff}}} \cdot \frac{n_R}{n_{R,\text{ref}}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_{A,\text{ref}}} \cdot \frac{\tau}{\tau_{\text{ref}}} \quad (21)$$

3.1 Verschiedene körperliche Aktivitäten und Sprechaktivitäten

Die erhöhte Abgabe von Aerosolpartikeln infolge bestimmter respiratorischer Aktivitäten konnte im Zusammenhang einer Chorprobe nachgewiesen werden, sodass dieser Einfluss bei einem aerosolgebundenen Infektionsweg mitbetrachtet werden muss (Hamner et al. 2020; Miller et al. 2020). Tabelle 3 beinhaltet die in der Literatur angegebenen Werte der Atemvolumenströme in Abhängigkeit der körperlichen Aktivität und die emittierten Aerosolpartikelkonzentrationen in Abhängigkeit der Sprechaktivität (Buonanno et al. 2020b).

3.2 Mund-Nasen-Bedeckungen

Eine präventive Maßnahme, die sowohl das Eintragen von virenbelasteten Aerosolpartikeln in die Raumluft als auch die Anzahl inhalierter Aerosolpartikel aus der Raumluft vermindern kann, ist das Tragen von Mund-Nasen-Bedeckungen (MNB). Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) unterscheidet zwischen einfachen Stoff- und Alltagsmasken (in der Definition als MNB bezeichnet), medizinischen Gesichtsmasken (u. A. Mund-Na-

sen-Schutz (MNS)) sowie partikelfiltrierenden Halbmasken (Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) 2020). Diese werden wie eingangs beschrieben in diesem Beitrag, wenn nicht weiter differenziert, als MNB zusammengefasst, während MNB im Sinne des BfArM hier als Stoffmasken bezeichnet werden.

Die Schutzwirkung von MNB wird von ihrer Filterwirkung und der Anpassung an die Gesichtsform beeinflusst. Die Filterwirkung ist abhängig von Tröpfchengröße, Anzahl der Lagen und Qualität des Materials (Zangmeister et al. 2020; Whiley et al. 2020). Die Schutzwirkung wird in dieser Studie vereinfacht durch eine von der Tröpfchengröße unabhängige Partikelrückhalterate von $PR = 0,5$ dargestellt. Der gewählte Wert bildet eine konservative Abschätzung innerhalb der bisher gemessenen Schutzwirkung von 15 Stoffmasken unterschiedlicher Passformen im getragenen Zustand (MW 71,2 %, SD 17,6, Min 28 %, Max 99 %) (Mueller et al. 2020) beziehungsweise der erfassten signifikanten Reduktion der Viruslast (Leung et al. 2020). Dieser Wertebereich wird durch Studien gestützt, die das Infektionsrisiko mit und ohne MNB in der Bevölkerung untersuchen. Sie zeigen Effekte wie eine viermal geringere Mortalität abhängig von

Tabelle 3 – Übersicht über Atemvolumenströme und Aerosolkonzentrationen

Körperliche Aktivität	Atemvolumenstrom $\dot{V}_A$ in m ³ /h	Sprechaktivität	Aerosolkonzentration ζ_{Aerosol} in ml/m ³
Ausruhen (1,0 met)	0,49	Atmen	0,0018
Sitzen, leichte Tätigkeit (1,1 met)	0,54	Sprechen	0,0096
Stehen, leichte Tätigkeit (1,6 met)	0,78	Lautes Sprechen / Singen	0,0600
Gehen, leichte Anstrengung (2,8 met)	1,38		
Moderate Anstrengung (4,8 met)	2,35		
Schwere Anstrengung (6,7 met)	3,30		

einer höheren Nutzungszeit von MNB in der Öffentlichkeit (Leffler et al. 2020), eine Reduktion von Infektionen um 47 % bis 80 % (Liang et al. 2020) und eine durchschnittliche Reduktion der Infektionsrate in Deutschland von 47 % (Mitze et al. 2020). Der in dieser Studie angesetzte Wert ist auch konservativer als der von Lelieveld (Lelieveld et al. 2020) für die Eintragung von Aerosolpartikeln ermittelte Wert von 60 %, da in der Praxis eine MNB nicht immer bestimmungsgerecht getragen wird. Gleichzeitig ist dieser Wert nicht durch einlagige, meist selbstgemachte Stoffmasken zu erreichen, die je nach Stoff Filtereffizienzen von deutlich unter 50 % aufweisen (Drewnick et al. 2020; Konda et al. 2020).

Eine weitere Reduktion der Filtereffizienz und Schutzwirkung entsteht durch Leckagen. Bereits eine Leckagefläche von 1 % kann selbst bei MNS zu einer Reduktion der Filtereffizienz von 50 % für Partikelgrößen zwischen 0,03 und 2,5 μm führen (Drewnick et al. 2020).

Das Tragen von Visieren hat wahrscheinlich keinen Einfluss auf die Abgabe von Aerosolpartikeln, da die Strömung lediglich umgelenkt wird und kleinere Partikel aufgrund ihrer geringen Trägheit der Strömung folgen können. Nur größere Partikel werden eventuell abgeschieden und können sich als Beschlag an den Visieren zeigen. Auf die Einatmung von Aerosolen hat das Tragen von Visieren ebenfalls keinen positiven Effekt.

3.3 Luftreiniger

Aktuell gibt es eine Diskussion um den Einsatz von Luftreinigern, die zur Beseitigung von aktiven Viren, die auf Aerosolpartikel im Raum transportiert werden, eingesetzt werden können. Die Luftreinigung hat grundsätzlich keinen Einfluss auf die CO_2 -Konzentration und der Reinigungseffekt kann daher auch nicht anhand einer CO_2 -Konzentration kontrolliert werden. Eine direkte Messung der Aerosolkonzentration in einem Raum ist ebenfalls kein Maß für die Bestimmung der Reinigungsleistung, da im Falle eines typischen Klassenraums nur ein geringer Teil der Aerosolpartikel aus der Atemluft stammen. Die meisten Aerosole werden von der Kleidung, der Haut und allen anderen Oberflächen eines Raums unregelmäßig abgegeben und Konzentrationen wesentlich durch Einzelereignisse mit viel Abrieb dominiert.

Bei der Verwendung eines Luftreinigers kann bezogen auf einen Raum ein effektiver Volumenstrom $\dot{V}_{\text{LR,eff}}$ berechnet werden, indem der absolute Volumenstrom durch das Gerät, der Abscheidegrad des verwendeten Filtermaterials beziehungsweise der Fraktionsabscheidegrad η_{FAG} des Filters und die lokale Lüftungswirksamkeit ϵ_i^c berücksichtigt werden. Dieser Zusammenhang wird in Gleichung (22) dargestellt.

$$\dot{V}_{\text{LR,eff}} = \dot{V}_{\text{LR}} \cdot \eta_{\text{FAG}} \cdot \epsilon_i^c \quad (22)$$

$$\epsilon_i^c = \frac{c_{\text{ab}}}{c_i} \quad (23)$$

Der Volumenstrom $\dot{V}_{\text{LR}}$ bezieht sich auch auf die Luftleistung des Luftreinigungsgerätes und wird durch den Hersteller spezifiziert oder mit einer geeigneten Methode bestimmt.

Für Viren auf Aerosolpartikeln muss die Abscheideleistung des Filters im Bereich der Größenklasse PM1 (aerodynamischer Durchmesser $\leq 1 \mu\text{m}$) betrachtet werden. Der Fraktionsabscheidegrad η_{FAG} des Filters wird vom Hersteller des Filtermaterials gemäß der ISO 16890 angegeben (DIN EN ISO 16890-1). Als Beispiel kann die Filterkassette ISO ePM1 90 % genannt werden, welche bedeutet, dass 90 % der Partikel im Bereich von 0,3 bis 1 μm abgeschieden werden. Die relevanten Durchmesser liegen bei den hier betrachteten Aerosolpartikeln bei etwa 0,3 μm , sodass der Wert der Filterkassette ISO ePM1 zumindest als gute Näherung für den Fraktionsabscheidegrad η_{FAG} des Filters verwendet werden kann. Höherwertige Schwebstofffilter (HEPA 13 und 14) scheiden nahezu alle Partikel in dieser Größenklasse ab. Die Hersteller der Filtergeräte müssen sicherstellen, dass der spezifizierte Volumenstrom des Luftreinigers vollständig über den Filter geführt wird. Eine eventuell vorhandene Leckage muss von dem Volumenstrom des Geräts subtrahiert werden, da dieser Anteil keinen Beitrag zur Luftreinigung leistet.

Die Lüftungswirksamkeit kann als Schadstoffkonzentration in der Abluft c_{ab} bezogen auf die Schadstoffkonzentration an einem Ort im Raum c_i nach Gleichung (23) definiert werden. Sie beschreibt die Fragestellung, ob die relevanten Aerosolpartikel in einem Raum überhaupt in den Einzugsbereich eines

Luftreinigers gelangen und ob sich im Bereich des Luftreinigers eine Kurzschlussströmung ausbildet, die eine Erfassung der aerosolpartikelbelasteten Raumluft erschwert. Bei einer vollständigen Durchmischung des Raums (ideale Mischlüftung) ist dieser Wert eins. Genaue Werte können nur über aufwändige Messungen oder Strömungsberechnungen ermittelt werden.

Wird für einen Klassenraum eine ideale Mischlüftung angenommen, kann die CO_2 -Konzentration mit einem einfachen Bilanzmodell in Abhängigkeit von der Personenanzahl und ihrer Aktivität sowie des Außenluftvolumenstroms berechnet werden. Soll zusätzlich die Leistung eines Luftreinigers berechnet werden, kann die Abscheidung der von den Personen ausgeatmeten Aerosolpartikel berechnet werden. Dieser Wert stimmt nicht mit der insgesamt im Raum befindlichen Menge überein, allerdings werden die für das Infektionsrisiko kritischen Aerosolpartikel erfasst. Die CO_2 -Konzentrationen werden durch ein Luftreinigungsgerät nicht verändert.

4. Vergleich des relativen Infektionsrisikos in unterschiedlichen Räumen

Um das relative Infektionsrisiko gegenüber einem Aufenthalt in der beschriebenen Referenzsituation zu bewerten, werden Randbedingungen für verschiedene belüftete Vergleichsumgebungen definiert (Tabelle 4). Wenn nicht anders angegeben, bezieht sich das Raumluftvolumen dabei jeweils auf die lichten Abmessungen des Raums ohne Berücksichtigung von anwesenden Personen, Möblierung oder sonstigen Einbauten.

Bei den Aufenthaltszeiten werden keine Pausen oder sonstige Unterbrechungen berücksichtigt. Für die Luftwechselraten werden typische Auslegungswerte verwendet. Es sei allerdings an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die in Normen und Richtlinien angegebenen Werte oftmals nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen. Hier sind eine Überprüfung des realen Anlagenbetriebs und eine Messung der Luftvolumenströme anzuraten. Weiterhin sind für die Luftwechselraten Annahmen für personenbezogene Außenluftvolumenströme notwendig, falls eine raumlufttechnische Anlage mit variablem Volumenstrom betrieben wird. In den meisten Fällen

wird der Volumenstrom in diesen Anlagen nach der CO_2 -Konzentration in der Abluft geregelt, da die CO_2 -Werte ein guter Indikator für den personenbezogenen Luftvolumenstrom sind. Alle nachfolgend genannten Werte für Luftwechselraten, Belegungen sowie Sprech- und körperliche Aktivitäten sind nicht als allgemeingültig für die jeweiligen Raumtypen, sondern exemplarisch für das jeweils angenommene Beispiel zu verstehen. Des Weiteren wird in diesen Vergleichsszenarien angenommen, dass nur in manchen Szenarien MNB getragen werden und keine speziellen Luftreiniger eingesetzt werden.

4.1 Beschreibung der Räume

Für eine Auswertung des relativen Infektionsrisikos werden ein Klassenraum, ein Mehrpersonen- und Großraumbüro sowie ein großer Hörsaal betrachtet. Zusätzlich werden Werte für eine Turnhalle, eine Messehalle, einen PKW und ein Flugzeug ermittelt.

Das Raumvolumen des hier betrachteten **Klassenraums** entspricht mit 200 m^3 genau dem Wert der angesetzten Referenzumgebung. Dieser Wert stimmt näherungsweise mit Ergebnissen einer in Frühjahr und Sommer 2019 von der Heinz Trox Wissenschafts gGmbH durchgeführten Feldstudie zur Luftqualität, Akustik und Beleuchtung in Schulen in NRW überein (Burgholz und Müller). 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 $3,3 \text{ m}$ ein Raumvolumen von etwa 210 m^3 bei durchschnittlich 27 Sitzplätzen. 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 der höchsten Gebläsestufe betrieben werden konnten. Die Annahme der Referenzsituation, welche eine Belegung mit 25 Personen und einem Volumenstrom von $35 \text{ m}^3/\text{h}$ pro

Person annimmt, überschätzt den Nennvolumenstrom der meisten eingesetzten Anlagen in der Praxis und bildet daher einen optimalen Fall ab. Entsprechend können bei den Klassenräumen Luftwechselraten kleiner als 4 h^{-1} als realistisch angenommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem klassischen Frontal- beziehungsweise Klassenunterricht immer nur eine Person redet und mit dieser Annahme ein Idealfall betrachtet wird.

Stellvertretend für typische Arbeitsumgebungen werden zwei verschiedene Bürosituationen betrachtet. In Anlehnung an die Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A1.2, die die Arbeitsstättenrichtlinien konkretisieren, werden pro Arbeitsplatz 8 m^2 Grundfläche angenommen. Für ein **Mehrpersonenbüro** mit vier Arbeitsplätzen ergeben sich bei konservativer Abschätzung somit eine Grundfläche von 32 m^2 und ein Raumvolumen von 88 m^3 bei Einhaltung der für diese Grundfläche minimal zulässigen lichten Raumhöhe von $2,75 \text{ m}$. Durchschnittlich wird von einer sprechenden Person ausgegangen.

Als **Großraumbüro** gelten weiterhin Büros mit einer Grundfläche ab 400 m^2 mit einer lichten Höhe von mindestens 3 m , woraus sich ein Mindestraumvolumen von 1.200 m^3 ergibt. In Anlehnung an die Technischen Regeln für Arbeitsstätten ASR A1.2 ergibt sich zusammen mit einem Platzbedarf von minimal 12 m^2 pro Arbeitsplatz eine maximale Besetzung von 33 Personen (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2013). Es wird angenommen, dass alle Anwesenden sitzen und durchschnittlich jede vierte der anwesenden Personen sprechaktiv ist.

Als Nichtwohngebäude mit größeren Raumvolumina werden ein Hörsaal, eine Turnhalle sowie eine Messehalle betrachtet. Für einen exemplarischen **großen Hörsaal** mit einer Bestuhlung für etwa 1.000 Personen werden eine Grundfläche von 935 m^2 und ein Volumen von etwa 10.000 m^3 angenommen. Bei Hörsälen der RWTH Aachen werden typischerweise 3 bis $3,5$ Luftwechsel pro Stunde eingestellt. Es wird wie bei der Schule davon ausgegangen, dass immer nur eine Person spricht, während alle anderen aufmerksam zuhören. Da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die zur Reduktion des Infektionsrisi-

kos durch Tröpfchenübertragung empfohlenen Mindestabstände unabhängig von der Besetzung eingehalten werden können, wird mit Ausnahme der stehenden vortragenden Person durchweg das Tragen von MNB als gegeben angenommen.

Die betrachtete **Turnhalle** ist an eine Einzelhalle nach DIN 18032-1 angelehnt (DIN 18032-1). Mit Seitenlängen von 15 und 27 m sowie einer mittleren lichten Höhe von etwa $5,5 \text{ m}$ ergeben sich eine Brutto-Grundfläche von 405 m^2 und ein Luftvolumen von etwa 2.230 m^3 . Die angegebenen Luftwechsel entsprechen mit einem Luftvolumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person den Empfehlungen der DIN 18032-1. Unter der Annahme, dass der Sportunterricht einer Schulklasse in dieser Halle durchgeführt wird, ergibt sich die Maximalbelegung der Halle von 35 Personen. Bezüglich der Sprech- und körperlichen Aktivität werden zwei verschiedene Gruppen eingeteilt, wobei sich im Mittel etwa jede zehnte Person schwer körperlich betätigt und zur Verständigung laut ruft, während die übrigen Anwesenden atmen und sich moderater körperlicher Anstrengung betätigen.

Die **Messehalle** hat ein sehr großes Raumvolumen und die hier angenommene Werte sind an eine große Halle der Messe Frankfurt angelehnt. Mit Kantenlängen von rund 75 und 160 m sowie einer mittleren lichten Höhe von etwa 13 m ergeben sich eine Brutto-Grundfläche von 12.000 m^2 und ein Luftvolumen von etwa 156.000 m^3 . Die angegebenen Luftwechsel wurden dem „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 m^2 pro Person beziehungsweise verkauftem Ticket ergibt sich die Maximalbelegung der Halle von 4.000 Personen. Während etwa jede zehnte Person als stehend und sprechend angenommen wird, bewegen sich die übrigen Anwesenden gehend (leichte körperliche Aktivität) und ohne zu sprechen durch die Halle. Auch hier muss vom Unterschreiten empfohlener Mindestabstände ausgegangen werden, sodass für alle Anwesenden das Tragen von MNB als vorgegeben angesehen wird. Die Auswertung der relativen Risiken für Personen beziehungsweise Atemvolumenströme der Gruppe 2 stellt in diesem Fall wegen

Tabelle 4 – Annahmen und typische Randbedingungen für Vergleichsumgebungen

		Klassen- raum	Mehrpersonen- büro	Großraum- büro	Großer Hörsaal
V_R	m^3	200	88	1.200	10.000
LW	h^{-1}	bis 5	bis 4	bis 4	bis 3,5
$n_{R,max}$	-	35	4	33	1000
τ	h	1	1	1	1
Gruppe 1					
$n_{R,g1}$	-	1	1	25 %	1
$\dot{V}_{A,g1}$	m^3/h	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,78 (Stehen)
$\zeta_{Aerosol,g1}$	ml/m^3	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)
PR_{g1}	-	0	0,5	0	0
Gruppe 2					
$\dot{V}_{A,g2}$	m^3/h	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)
$\zeta_{Aerosol,g2}$	ml/m^3	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)
PR_{g2}	-	0	0,5	0	0,5

		Turnhalle (Einzelhalle)	Messehalle (groß)	PKW	Flugzeug
V_R	m^3	2.230	156.000	3	195
LW	h^{-1}	bis 2,5	2 bis 5	10 bis 200	11 bis 15
$n_{R,max}$	-	35	4000	5	180
τ	h	1	1	1	1
Gruppe 1					
$n_{R,g1}$	-	10 %	10 %	1	5
$\dot{V}_{A,g1}$	m^3/h	3,3 (Schwere Akt.)	0,78 (Stehen)	0,54 (Sitzen)	0,78 (Stehen)
$\zeta_{Aerosol,g1}$	ml/m^3	0,06 (Laut Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)
PR_{g1}	-	0	0,5	0	0,5
Gruppe 2					
$\dot{V}_{A,g2}$	m^3/h	2,35 (Moderate Akt.)	1,38 (Leicht Akt.)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)
$\zeta_{Aerosol,g2}$	ml/m^3	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)
PR_{g2}	-	0	0,5	0,5	0,5

der größeren körperlichen Aktivität somit eine Abschätzung zur sicheren Seite dar.

Neben Immobilien werden nachfolgend mit einem PKW und einem Flugzeug für Kurz- bis Mittelstrecken auch Transportmittel betrachtet. Die Eckdaten für ein **Fahrzeug mit fünf Sitzplätzen** und einem Kabinenvolumen von etwa 3 m^3 wurden von Großmann übernommen (Großmann 2013), wobei der sehr weit-gefasste 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 als für eine dauerhafte Klimatisierung genutzt. Für eine Fahrtgeschwindigkeit von etwa 115 km/h und den Betrieb einer Klimaanlage im Automatikmodus werden Luftwechselraten mit Werten in einer Größenordnung von 30 h^{-1} als Anhaltswert angenommen, wobei dieser nicht zuletzt stark vom Alter des Fahrzeuges abhängt (Ott et al. 2008). Es wird weiterhin abgeschätzt, dass die das Fahrzeug führende Person im Gegensatz zu den übrigen Passagieren keinen MNB tragen darf und spricht. Bezogen auf die ausgeatmete Menge an Aerosolpartikeln stellt diese Annahme für den Fall, dass im Mittel durchgehend stets nur eine (allerdings beliebige) Person spricht, eine konservative Abschätzung dar.

Die Referenzwerte für ein **Flugzeug** orientieren sich am Airbus A320-200, der häufig für Kurz- und Mittelstreckenflüge eingesetzt wird. Damit ergibt sich ein Kabinenvolumen von etwa 195 m^3 für bis zu 168 beziehungsweise 180 Personen bei Maximalbelegung in Abhängigkeit der Klassenaufteilung (Stansted News Limited; Deutsche Lufthansa AG). Gemäß dem ASHRAE-Handbuch für HVAC Applications werden zwischen 11 und 15 Luftwechsel pro Stunde angenommen (2019 ASHRAE Handbook 2019).

4.2 Berechnung des relativen Infektionsrisikos in unterschiedlichen Räumen

Im Folgenden wird das Infektionsrisiko für die verschiedenen Vergleichsräume unter variablen Randbedingungen relativ zum in der Referenzsituation angenommenen Klassenraum grafisch dargestellt. In den nachstehenden Diagrammen ist die Anzahl der Personen über der Luftwechselrate aufgetragen, wobei das relative Infektionsrisiko entsprechend einer erweiterten Ampel farblich angegeben ist. Um das Vergleichen verschiedener Szenarien anhand der Farben zu ermöglichen, wurden für alle Umgebungen in Abbildung 3 bis Abbildung 5 dieselben Risikoachsen gewählt. Gelb entspricht dabei einem doppelten, Orange einem vierfachen, Hellrot einem sechsfachen und Dunkelrot einem mindestens achtfachen relativen Infektionsrisiko. Weiterhin wurden für alle immobilien Vergleichsumgebungen dieselben Luftwechselrate-Achsen mit einem Wertebereich von $0,05$ bis 6 h^{-1} gewählt.

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 die basierend auf allen genannten Vereinfachungen über Gleichungen (20) und (21) berechneten Werte darstellen, nur für die jeweils exemplarisch angenommenen Randbedingungen gelten und keine für den jeweiligen Raumtypen allgemeingültige Aussage ermöglichen. Wie bereits zuvor beschrieben sind die berechneten Werte immer aus Sicht von Gruppe 2 zu sehen.

Das stark erhöhte relative Infektionsrisiko in einer **Turnhalle** liegt insbesondere in der schweren körperlichen Anstrengung und dem erhöhten Ausstoß von Aerosolpartikeln durch hohe Sprechaktivität begründet: Wird die Turnhalle mit der hier angenommenen Maximalbesetzung von 35 Sport treibenden Personen und einem personenbezogenen Zuluftvolumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ (DIN 18032-1) genutzt, was einer Luftwechselrate von etwa $1,06 \text{ h}^{-1}$ entspricht, sind die der Gruppe 2 zugeordneten Personen (moderate körperliche Aktivität, keine Sprechaktivität) einem etwa 47-fachen relativen Risiko ausgesetzt. Im Falle einer unbelüfteten Halle ($0,5 \text{ h}^{-1}$) würde dieser

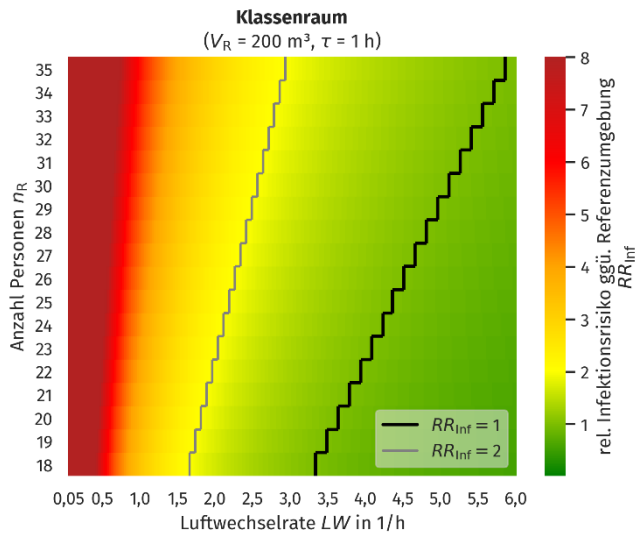
Wert bereits bei 17 Anwesenden erreicht. Würde das relative Risiko aus Sicht der Personen der Gruppe 1 statt Gruppe 2 mit entsprechend höherer Sprech- und körperlicher Aktivität betrachtet, ergäben sich gemäß Tabelle 3 um etwa 40 % höhere Infektionsrisiken. Sport sollte daher vorübergehend im Außenbereich oder nur mit deutlich reduzierter Personenanzahl in Sporthallen durchgeführt werden.

Um in beiden betrachteten Bürotypen einem ähnlichen relativen Infektionsrisiko durch aerosolgebundene Viren ausgesetzt zu sein wie in der Referenzsituation, sind Luftwechselraten von $1,4 \text{ h}^{-1}$ im mit vier Personen voll besetzten Mehrpersonenbüro beziehungsweise $1,7 \text{ h}^{-1}$ im Großraumbüro mit 33 Anwesenden notwendig. Dass beide Werte trotz der sehr unterschiedlichen räumlichen Randbedingungen in einer ähnlichen Größenordnung liegen, ergibt sich aus den daraus abgeleiteten Annahmen gemäß Tabelle 4: Während die für **Großraumbüros** in der ASR A1.2 deutlich großzügiger bemessenen Verkehrsflächen und das somit größere durchschnittliche Raumvolumen pro Person von etwa 36 m^3 isoliert betrachtet auf ein deutlich geringeres Infektionsrisiko bei vergleichbarem Luftwechsel hindeuten würde, wird für Großraumbüros gerade durch den folglich größeren Abstand zwischen den Personen davon ausgegangen, dass auf das Tragen von MNB verzichtet wird.

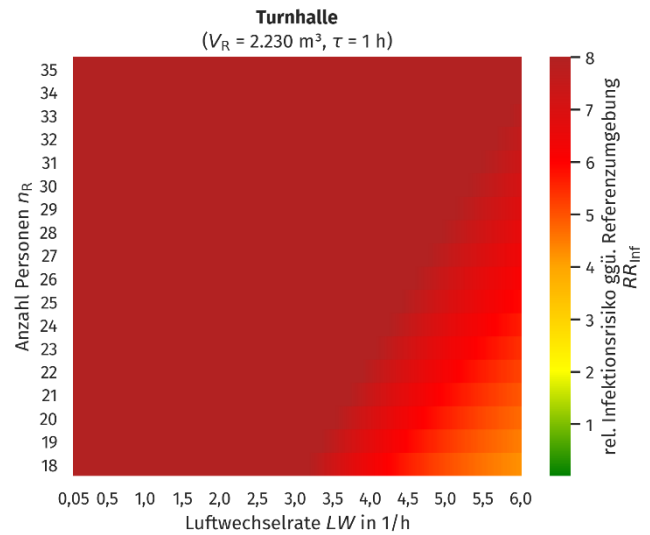
Obschon im **Mehrpersonenbüro** bei Vollbesetzung jeder Person mit 22 m^3 deutlich weniger Luftvolumen als im Großraumbüro zur Verfügung steht, kann dieser Effekt durch das konsequente Tragen von MNB ausgeglichen werden, was die Wirksamkeit präventiver Maßnahmen in diesem Modell verdeutlicht. Für die im Diagramm angenommenen Minimalbesetzungen von 2 beziehungsweise 11 Personen ergeben sich für die oben angegebenen Luftwechselraten relative Risiken von 0,76 für das Mehrpersonenbüro beziehungsweise 0,34 für das Großraumbüro. Wird für beide Bürotypen von derselben Luftwechselrate ausgegangen, ist bei jeweiliger Vollbesetzung und den getroffenen Annahmen somit im Vergleich das Arbeiten im Mehrpersonenbüro sicherer, während bei kleinen Besetzungsgraden das relative Infektionsrisiko in Großraumbüros geringer ausfällt.

Im Falle eines großen **Hörsaals** reicht bei Vollbesetzung ein 1,5-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 abbilden zu können. Vorlesungen können auf Basis dieser Analyse in diesen Räumen auch bei einer hohen Belegungsdichte durchgeführt werden. Kann eine vollständige Durchmischung des Raums bei kleinen Luftwechselraten nicht sichergestellt werden, sollte eine Überprüfung dieser Annahme durch Strömungsberechnungen oder Tracergasexperimente erfolgen. Durch die teilweise enge Bestuhlung ist das Tragen von MNB zu empfehlen, um eine Übertragung von Viren durch Tröpfchen zu unterbinden. Kleine Hörsäle für Seminare und ähnliche Veranstaltungen können wie Klassenräume behandelt werden.

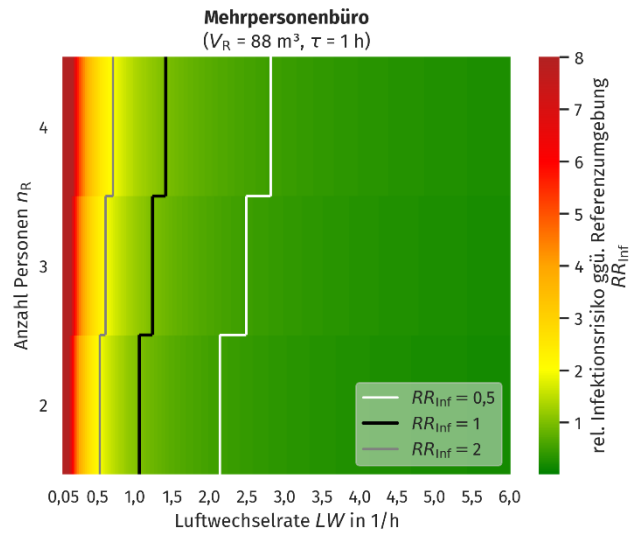
Bei der **Messehalle** ergibt sich für eine typische geringe Luftwechselrate von 2 h^{-1} ein relatives Risiko von 0,19 bei 1000 anwesenden Personen beziehungsweise 1,5 bei Vollbesetzung. Werden stattdessen 5 Luftwechsel pro Stunde angenommen, verringert sich das jeweilige Infektionsrisiko auf 0,08 beziehungsweise 0,6. Um einem ähnlichen Infektionsrisiko wie in der Referenzsituation ausgesetzt zu sein, wäre selbst bei Vollbesetzung eine Luftwechselrate von 3 h^{-1} hinreichend, die durch die installierte Anlagentechnik bereits im unteren Teillastbetrieb bereitgestellt werden kann. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Raumtypen sind in dieser Art von Veranstaltungsräumlichkeiten 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 somit jeder Person eine deutlich größere vertikale Luftsäule zur Verfügung. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass Standaufbauten die Verkehrsfläche gegenüber der Brutto-Grundfläche deutlich reduzieren können. Besonders bei großen Räumen ist zu berücksichtigen, dass die hier getroffene Annahme einer idealen Mischlüftung kritisch hinterfragt werden muss.



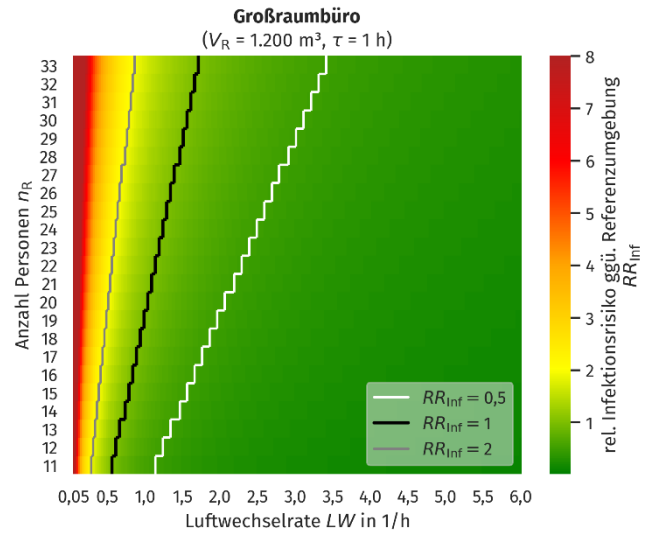
a) Vergleichsumgebung Klassenraum



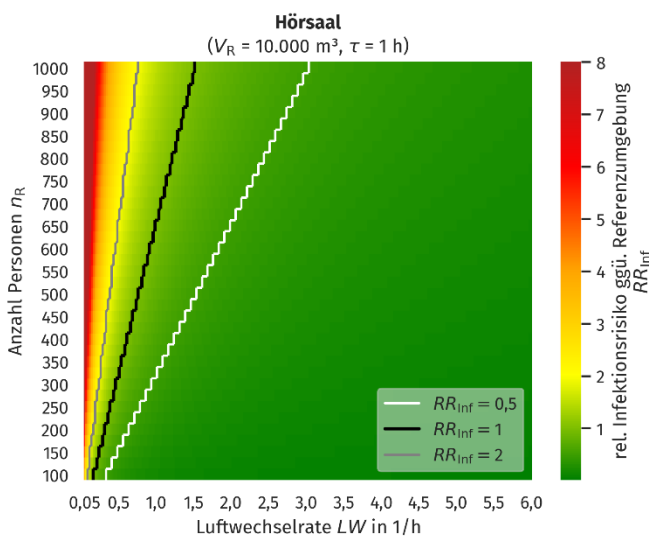
b) Vergleichsumgebung Turnhalle



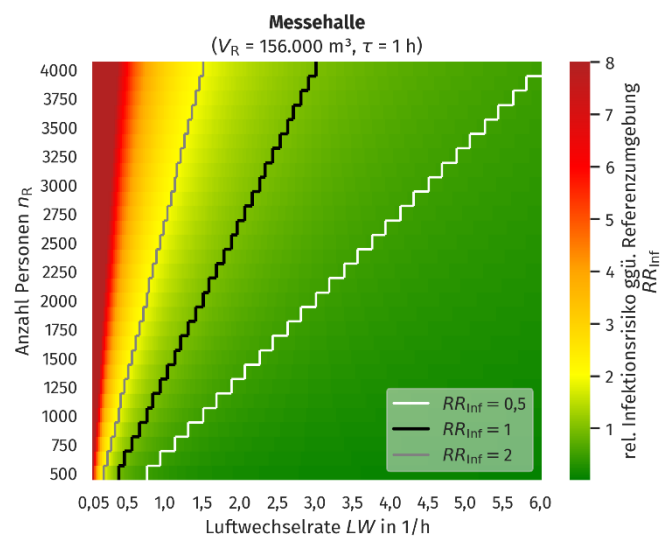
c) Vergleichsumgebung Mehrpersonenbüro



d) Vergleichsumgebung Großraumbüro



e) Vergleichsumgebung Hörsaal



f) Vergleichsumgebung Messehalle

Abbildung 3 – Relatives Infektionsrisiko verschiedener immobiler Vergleichsumgebungen gegenüber Referenzumgebung durch Aerosolpartikel

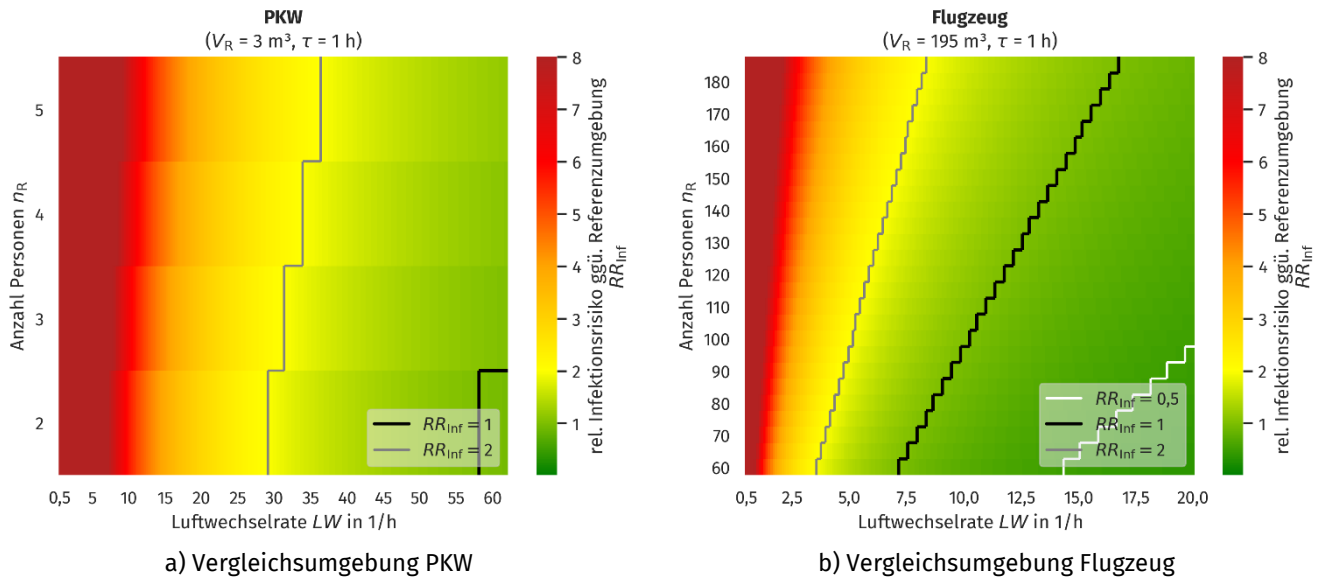


Abbildung 4 – Relatives Infektionsrisiko mobiler Vergleichsumgebungen gegenüber Referenzumgebung durch Aerosolpartikel

Eine vollständige Verdünnung der belasteten Aerosolpartikel ist nicht immer zu erwarten, sodass lokal höhere Konzentrationen an Aerosolpartikeln auftreten können. Allerdings wird in dieser ersten Analyse auch die Speicherkapazität des Raumvolumens vernachlässigt, obwohl für eine Luftwechselrate von 3 h^{-1} , 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 oder CFD-Simulationen durchzuführen.

Für den Vergleich unterschiedlicher Transportmittel werden ein PKW mit fünf Sitzplätzen sowie ein Flugzeug untersucht. Die Ergebnisse werden hier aufgrund der signifikant unterschiedlichen charakteristischen Luftwechselraten jeweils mit fallspezifischen Achsenskalierungen dargestellt, siehe Abbildung 4.

Wird im Falle des **PKW** davon ausgegangen, dass die das Fahrzeug führende Person sich im Gegensatz zu den mitfahrenden Personen nicht verhüllen darf und folglich keine MNB trägt, wären bei insgesamt zwei Personen im Fahrzeug etwa 58 Luftwechsel pro Stunde notwendig, um einem vergleichbaren Risiko

wie in der Referenzsituation ausgesetzt zu sein. Unter der Annahme einer für eine Fahrtgeschwindigkeit von etwa 115 km/h und Betrieb der Klimaanlage im Automatikmodus typischen Luftwechselrate von etwa 30 h^{-1} liegt das relative Infektionsrisiko bei etwa 1,9. Um dann bei gleichem relativem Infektionsrisiko eine Fahrt mit insgesamt fünf Personen anzutreten, wäre die Anzahl der Luftwechsel auf 37 h^{-1} zu erhöhen. Die hohen Werte 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 bei Vollbesetzung mit 180 Passagieren und 5 Crew-Mitgliedern rund 16,7 Luftwechsel pro Stunde für ein relatives Infektionsrisiko von 1 benötigt. Wäre nur jeder dritte Platz besetzt, würde sich für die 60 Fluggäste bei derselben Luftwechselrate das relative Infektionsrisiko um etwa 54 % auf etwa 0,46 verringern. Mit den als realistisch angenommenen Luftwechselraten zwischen 11 h^{-1} und 15 h^{-1} liegt das relative Infektionsrisiko im Falle von Maximalbesetzung bei etwa 1,52 beziehungsweise 1,11 für die Fluggäste. Für eine genauere Analyse muss untersucht werden, inwieweit der hohe Umluftanteil in einer Flugzeugkabine von Aerosolen befreit werden kann.

Üblicherweise werden jedoch hochwertige Filter eingesetzt, sodass eine Rückführung der Aerosolpartikel in die Kabine nicht zu erwarten ist. Außenluft kann insbesondere in höheren Flughöhen nur über die Triebwerke oder einen eigenen Kompressor bereitgestellt werden.

Die Betrachtung weiterer Szenarien kann mit dem kostenlos zur Verfügung gestellten Online-Tool RisiCo (<https://risico.eonerc.rwth-aachen.de>) durchgeführt werden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Parameter können in dem Tool für zwei Vergleichsumgebungen frei gewählt werden.

4.3 Bewertung unterschiedlicher Aktivitäten und Einsatz von Schutzmaßnahmen in Klassenräumen

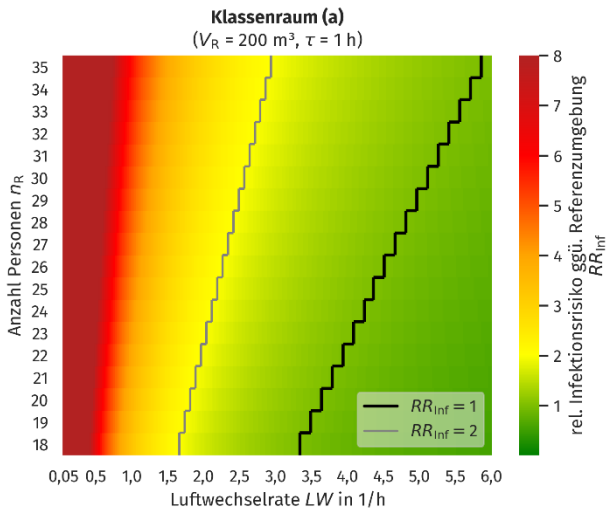
In diesem Abschnitt werden exemplarisch charakteristische Unterrichtssituationen in Klassenräumen betrachtet und der Einfluss des Tragens von MNB sowie des Einsatzes eines Luftreinigers beleuchtet. Tabelle 5 fasst Annahmen und Randbedingungen für alle Szenarien zusammen, wobei Raumvolumen, Aufenthaltszeit und Atemvolumenstrom für einen direkten Vergleich unverändert aus Tabelle 4 übernommen wurden. **Szenario (a)** entspricht somit dem Klassenraum aus Abbildung 3 und spiegelt mit einer einzelnen sprechenden Person eine typische Unterrichtsstunde mit Frontal- beziehungsweise Klassenunterricht ohne Nutzung von MNB wieder.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass durch das konsequente Tragen einer MNB während des Unterrichts gemäß **Szenario (b)** bei 25 anwesenden Personen die Luftwechselrate von etwa $4,4 \text{ h}^{-1}$ auf $2,2 \text{ h}^{-1}$ reduziert und der personenbezogene Luftvolumenstrom entsprechend halbiert werden kann, um ein Risiko von 1 zu erreichen. Bei maschineller Lüftung könnte durch die geringere Ventilator Drehzahl somit eine geminderte Geräuschentwicklung erreicht werden. Alternativ wird bei gleichbleibender Luftwechselrate das Infektionsrisiko halbiert, sodass nun auch bei mehrstündigem Unterricht eine Infektionsübertragung unwahrscheinlicher wird. In diesem Fall müssen bei natürlicher Lüftung für ein konstantes relatives Risiko die Fenster weniger häufig und eventuell kürzer geöffnet werden.

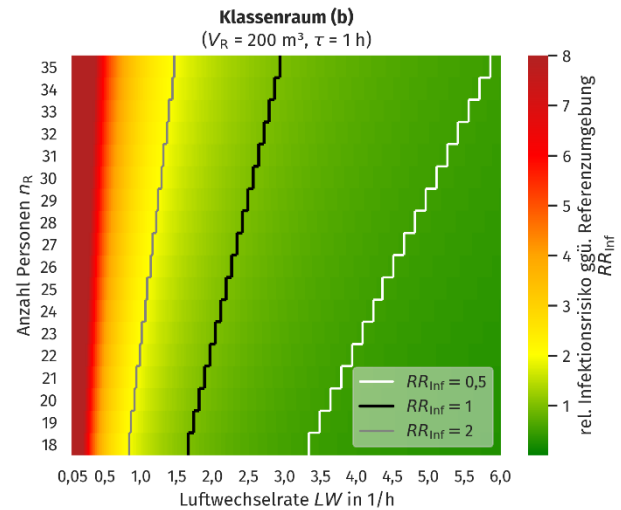
Szenario (c) entspricht einer Musikunterrichtsstunde, in der alle anwesenden Schüler gemeinsam singen und dementsprechend sprechaktiv sind. Der damit einhergehende deutlich höhere Ausstoß an Aerosolpartikeln führt zu einem signifikant gesteigerten relativen Infektionsrisiko, welches auch bei einem 6-fachen Luftwechsel pro Stunde und einer Belegung von nur 18 Personen bei 14,9 liegt. Hier muss von einer Übertragung der Viren ausgegangen werden, sodass Singen in Klassenräumen nicht empfohlen werden kann. Bei geringem Luftwechsel in unbelüfteten Räumen ($0,5 \text{ h}^{-1}$) ergeben sich extrem hohe Werte für das relative Risiko von 179 für 18 Personen und 348 für 35 Personen. Diese Ereignisse müssen nach dieser Studie konsequent vermieden werden und das Singen sollte nur im Außenbereich oder in sehr großen und gut belüfteten Räumen durchgeführt werden.

Die Szenarien (d) bis (f) beschreiben das Arbeiten in Gruppen, wobei exemplarisch davon ausgegangen wird, dass durchschnittlich jede dritte Person spricht. Verglichen mit dem Frontal- beziehungsweise Klassenunterricht (a) ergibt sich für Gruppenunterricht ohne das Tragen einer MNB gemäß **Szenario (d)** ein erhöhtes Infektionsrisiko: Während sich bei 25 anwesenden Personen und dem oben angenommenen personenbezogenen Zuluftvolumenstrom von $35 \text{ m}^3/\text{h}$ bereits ein etwa 2,1-faches relatives Infektionsrisiko ergibt, wäre hierfür bei Vollbesetzung mit 35 Personen eine außerhalb des Wertebereichs des Diagramms liegende Luftwechselrate von etwa $6,1 \text{ h}^{-1}$ notwendig. Bei natürlicher Lüftung müssen die Fenster in geringeren Abständen entsprechend länger beziehungsweise häufiger geöffnet werden.

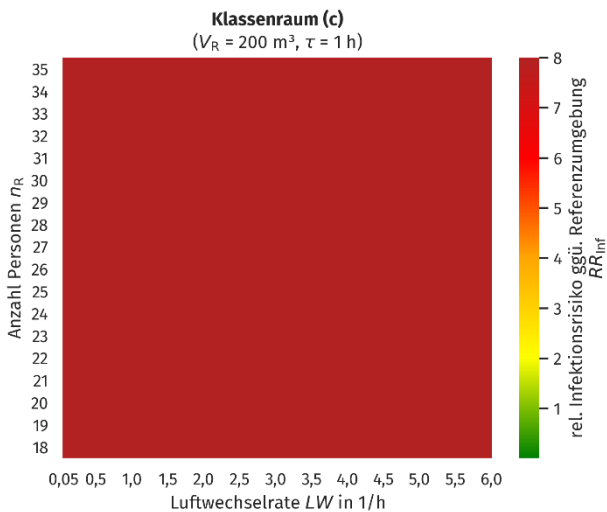
In **Szenario (e)** wird bei gegenüber Szenario (d) sonst unveränderten Randbedingungen davon ausgegangen, dass alle anwesenden Personen eine MNB tragen. Es ist zu erkennen, dass sich das relative Risiko bei gleicher Anzahl an Personen und bei gleichem Luftwechsel pro Stunde durch diese Maßnahme halbiert. Bei einer Luftwechselrate von etwa $4,4 \text{ h}^{-1}$, wie er im Referenzszenario definiert ist, ließe sich somit ein relatives Risiko von ungefähr 1 erreichen. Das



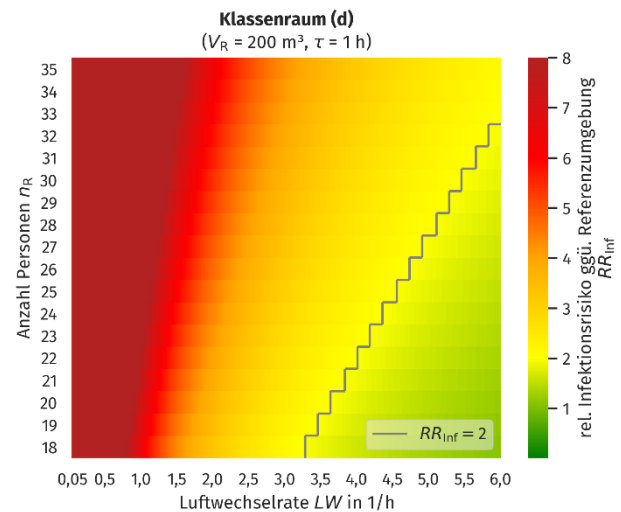
a) 1 Person sprechaktiv, ohne MNB, ohne Luftreiniger



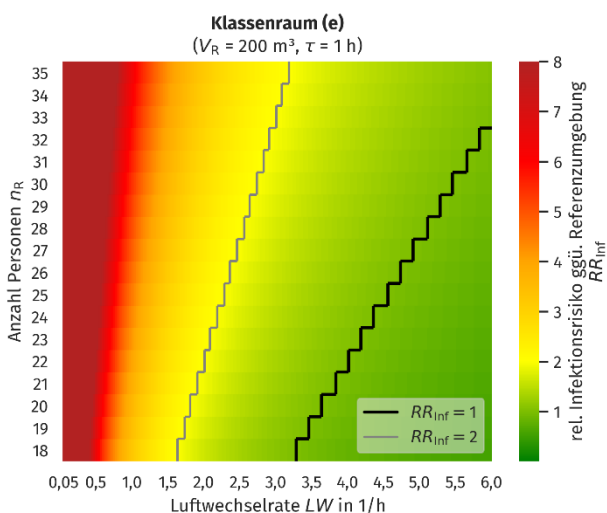
b) 1 Person sprechaktiv, mit MNB, ohne Luftreiniger



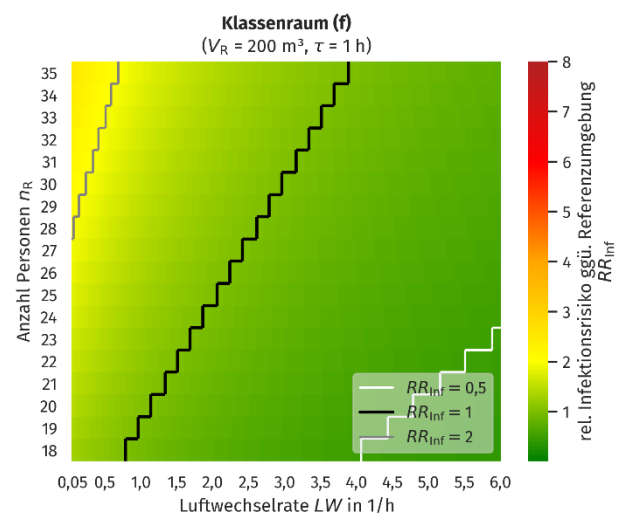
c) alle Personen sprechaktiv (Singen),
ohne MNB, ohne Luftreiniger



d) Jede dritte Person sprechaktiv (Gruppenarbeit),
ohne MNB, ohne Luftreiniger



e) Jede dritte Person sprechaktiv (Gruppenarbeit), mit MNB,
ohne Luftreiniger



f) Jede dritte Person sprechaktiv (Gruppenarbeit),
mit MNB, mit Luftreiniger (500 m³/h)

Abbildung 5 – Einfluss der Parameter auf relatives Infektionsrisiko im Klassenraum gegenüber Referenzsituation durch Aerosolpartikel

Tabelle 5 – Annahmen und Randbedingungen für den Vergleich verschiedener Unterrichtsszenarien

		Klassenraum					
		a	b	c	d	e	f
		Frontal- unterricht ohne MNB (Referenz)	Frontal- unterricht mit MNB	Singen/Musik- unterricht ohne MNB	Gruppen- arbeit ohne MNB	Gruppen- arbeit mit MNB	Gruppen- arbeit mit MNB und Luftreiniger
V_R	m^3				200		
LW	h^{-1}				bis 5		
$n_{R,max}$	-				35		
τ	h				1		
$\dot{V}_{LR,eff}$	m^3/h	0	0	0	0	0	500
Gruppe 1							
$n_{R,g1}$	-	1	1	100 %	33 %	33 %	33 %
$\dot{V}_{A,g1}$	m^3/h			0,54 (Sitzen)			
$\zeta_{Aerosol,g1}$	ml/m^3	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,06 (Singen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)
PR_{g1}		0	0,5	0	0	0,5	0,5
Gruppe 2							
$\dot{V}_{A,g2}$	m^3/h			0,54 (Sitzen)			
$\zeta_{Aerosol,g2}$	ml/m^3			0,0018 (Atmen)			
PR_{g2}	-	0	0,5	0	0	0,5	0,5

Tragen von MNB ist daher bei Gruppenarbeitsphasen immer empfehlenswert.

Wie schon in Szenarien (d) und (e) wird auch in **Szenario (f)** eine Gruppenarbeit betrachtet, wobei hier zusätzlich zum Tragen von MNB ein Luftreiniger eingesetzt wird. Für diesen Luftreiniger wird idealisiert angenommen, dass ein effektiver Luftvolumenstrom von $500 m^3/h$ vollständig von Aerosolpartikeln befreit wird und dass es zu keinem Kurzschlussvolumenstrom in Umfeld des Luftreinigers kommt. Unter diesen Voraussetzungen wird deutlich, dass durch diese kombinierten Maßnahmen das relative Risiko für eine Gruppenarbeitsphase weiter reduziert werden kann und bereits ein 3,9-facher Luftwechsel pro Stunde ausreicht, um auch bei einer Vollbesetzung mit 35 Personen ein relatives Risiko von 1 zu erzielen.

5. Die CO_2 -Konzentration als Indikator für die Raumlüftung

Oft können in der Praxis nur die maximalen CO_2 -Konzentrationen in der Raumluft gemessen werden. Daher soll überprüft werden, ob die CO_2 -Konzentrationen für die Bewertung des relativen Infektionsrisikos verwendet werden können. Damit könnte die Messung der CO_2 -Konzentration als ein Indikator für notwendige Lüftungsmaßnahmen dienen (Lüftungsampel). Auch hier wird zunächst vereinfachend ein stationärer Fall und anschließend das Intervalllüften anhand von Stoß- und Querlüftung genauer betrachtet. Das betrachtete Szenario entspricht im Folgenden wieder einem Klassenraum mit den Angaben aus Tabelle 6.

Tabelle 6 – Randbedingungen des betrachteten Klassenraums für eine CO₂-Grenzkonzentrationsberechnung bei gegebenem relativem Risiko

	Einheit	Klassenraum
V_R	m ³	200
$\dot{V}_A$	m ³ /h	0,54 (Sitzen)
$\dot{m}_{CO_2, \text{Produktion}}$	kg/Tag	1 (Sitzen)
$n_{R,g1}$	–	1
$\zeta_{\text{Aerosol},g1}$	ml/m ³	0,0096 (Sprechen)
$\zeta_{\text{Aerosol},g2}$	ml/m ³	0,0018 (Atmen)

5.1 Bestimmung der CO₂-Konzentration

Die CO₂-Massenkonzentration in der ideal durchmischten Raumluft kann durch Gleichung (24) beschrieben werden. Für eine leichte Tätigkeit im Sitzen kann mit dem entsprechenden Atemvolumenstrom von 0,54 m³/h aus Tabelle 3, einer CO₂-Konzentration in der menschlichen Atemluft von 4 % (www.co2online.de 2012) und der Dichte von CO₂ $\rho_{CO_2} = 1,98 \text{ kg/m}^3$ der durch eine Person emittierte CO₂-Massenstrom $\dot{m}_{CO_2, \text{Produktion}}$ auf ungefähr 1 kg/Tag abgeschätzt werden.

Die CO₂-Gaskonzentration in der Luft σ_{CO_2} kann nach Gleichung (25) aus dem Volumenanteil des Gasanteils bezogen auf das gesamte Gasvolumen berechnet werden. Mit Hilfe des idealen Gasgesetzes kann nach Gleichung (26) der direkte Zusammenhang zwischen Massenkonzentration und Gaskonzentration in ppm hergestellt werden. Somit lässt sich die CO₂-Bilanz in Abhängigkeit der Zu- und Abluftgaskonzentration sowie des CO₂-Quellterms des Menschen nach Gleichung (27) beschreiben.

Unter der Annahme eines stationären Zustands ($\frac{d\sigma_{CO_2}}{dt} = 0$) und der Annahme, dass die Abluftkonzentration $\sigma_{CO_2, \text{Abluft}}$ der CO₂-Konzentration der ideal durchmischten Raumluft entspricht, lässt sich die CO₂-Konzentration der Abluft nach Gleichung (28) berechnen.

Wird nun in Gleichung (21) das relative Risiko RR_{Inf} als konstant definiert und für den Zuluftvolumenstrom des Raums $V_R \cdot LW$ der Zusammenhang nach

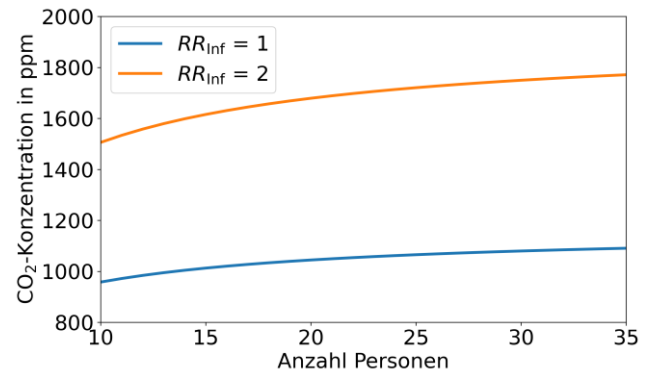


Abbildung 6 – CO₂-Abluftkonzentration in einem Klassenraum in Abhängigkeit der Personenanzahl bei einem relativen Risiko von 1 (blau) und 2 (orange)

Gleichung (29) eingesetzt, kann die CO₂-Abluftkonzentration als Funktion der Anzahl der anwesenden Personen und in Abhängigkeit der Parameter der betrachteten Umgebung berechnet werden.

Abbildung 6 zeigt für ein relatives Risiko von 1 und 2 die entsprechenden Grenzwerte der CO₂-Abluftkonzentration in einem Klassenraum mit einer sprechaktiven Person, wie für Fall (a) in Tabelle 5 angegeben. Es wird angenommen, dass die CO₂-Konzentration der Zuluft $\sigma_{CO_2, \text{Zuluft}} = 410 \text{ ppm}$ (Umweltbundesamt 2020a) beträgt und die Temperatur bei konstant 23 °C liegt. Die berechnete Grenzkonzentration für ein relatives Risiko von 1 beträgt bei 10 anwesenden Personen ungefähr 948 ppm und bei 35 Personen etwa 1096 ppm. Die Werte stimmen gut mit dem angegebenen Mittelwert von 1000 ppm für eine hygienisch unbedenkliche Luftqualität überein (Umweltbundesamt 2008). Bei einem relativen Risiko von 2 ergeben sich dagegen Leitwerte zwischen 1486 und 1783 ppm, welche als hygienisch auffällig eingestuft werden.

5.2 Instationäre Betrachtung unterschiedlicher Lüftungsarten am Beispiel eines Schultages

Im Folgenden werden die Aerosolpartikelbelastung sowie die damit verbundene CO₂-Konzentration unter Berücksichtigung des Raumvolumens und von Stoß- beziehungsweise Querlüftungsphasen und maschineller Belüftung instationär betrachtet. In diesem Fall können sowohl die Aufkonzentration von

Aerosolpartikeln in der Raumluft als auch eine zeitlich variable Lüftung oder Reinigung der Luft berechnet werden. Es wird angenommen, dass die Raumluft zu Beginn des Betrachtungszeitraums aerosolfrei vorliegt beziehungsweise, dass keine mit Viren belasteten Aerosolpartikel vorhanden sind. Des Weiteren wird die initiale CO₂-Konzentration der Raumluft wie in der stationären Betrachtung zu 410 ppm gesetzt. Als Referenzsituation wird wieder das in Tabelle 1 beschriebene, maschinell belüftete Klassenzimmer betrachtet.

Es werden vier verschiedene Lüftungsarten für das Klassenzimmer betrachtet (Tabelle 7). In den Szenarien (a) und (b) wird natürliche Infiltration mit regelmäßiger Fensterlüftung angenommen. Die Fensterlüftung wird gemäß der Empfehlung des UBA aus der Handreichung „Lüften in Schulen“ für die Wintermonate (alle 20 Minuten lüften für 3 bis 5 Minuten) durchgeführt (Umweltbundesamt 2020b).

In einem ersten Vergleich dazu wird der Fall des Klassenzimmers mit natürlicher Lüftung in Kombination mit regelmäßiger Fensterlüftung untersucht. Im Unterschied zur bisherigen Betrachtung ist dabei der zeitliche Verlauf maßgebend, weshalb die Rechnungen für die maschinell belüftete Referenzsituation und das Vergleichsszenario mit Intervallfensterlüftung hier nicht mehr stationär, sondern instationär durchgeführt werden. Dabei wird auf Basis der instationären Aerosolpartikelbilanz eine durchschnittliche Aerosolpartikelkonzentration in der Raumluft

berechnet, die als Basis für das relative Risiko genutzt wird. Die natürliche Infiltration wird in Form einer Luftwechselrate von 0,5 h⁻¹ berücksichtigt. Basierend auf den Studien von Erhard et al. wird für die Fensterlüftung eine Luftwechselrate von 6 h⁻¹ angenommen (Erhard et al. 2015). Es wurde die von Erhard et al. ermittelte Luftwechselrate für die vollständige Öffnung des Oberlichts und des Drehflügelfensters bei einer Temperaturdifferenz von 15 K zwischen Innen- und Außentemperatur auf das Raumvolumen des Klassenzimmers umgerechnet und angenommen, dass vier dieser Fenstertypen im Raum installiert sind. Das Intervall, in dem die regelmäßige Fensterlüftung vorgenommen wird, wird wieder auf 20 Minuten für eine Dauer von 5 Minuten festgelegt. (Umweltbundesamt 2020b).

In einem zweiten Szenario (b) wird erneut der Fall des Klassenzimmers mit natürlicher Lüftung in Kombination mit regelmäßiger Querlüftung (Intervalllüftung) untersucht. Die natürliche Infiltration wird wie zuvor in Form eines Luftwechsels von 0,5 h⁻¹ berücksichtigt. Für die Querlüftung werden allerdings eine Luftwechselrate von 20 h⁻¹ sowie eine Dauer von 5 Minuten verwendet. Der hohe Luftwechsel von 20 h⁻¹ basiert auf der Annahme einer Querlüftung mit geöffneten Fenstern und geöffneter Tür (Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz und Borsch-Laaks 2012).

$$V_R \cdot \frac{dX_{CO_2}}{dt} = \dot{m}_{CO_2,Zuluft} - \dot{m}_{CO_2,Abluft} + \dot{m}_{CO_2,Produktion} \cdot n_R \quad (24)$$

$$\sigma_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_R} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad (25)$$

$$\sigma_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{V_R} \cdot \frac{R \cdot T}{M_{CO_2} \cdot p} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad (26)$$

$$\frac{M_{CO_2} \cdot p}{R \cdot T \cdot 10^6 \text{ ppm}} \cdot V_R \cdot \frac{d\sigma_{CO_2}}{dt} = (\sigma_{CO_2,Zuluft} - \sigma_{CO_2,Abluft}) \cdot \dot{V}_R \cdot \frac{M_{CO_2} \cdot p}{R \cdot T \cdot 10^6 \text{ ppm}} + \dot{m}_{CO_2,Produktion} \cdot n_R \quad (27)$$

$$\sigma_{CO_2,Abluft} = \sigma_{CO_2,Zuluft} + \dot{m}_{CO_2,Produktion} \cdot n_R \cdot \frac{1}{\dot{V}_R} \cdot \frac{R \cdot T \cdot 10^6 \text{ ppm}}{M_{CO_2} \cdot p} \quad (28)$$

$$V_R \cdot LW = \dot{V}_R = \frac{\dot{m}_{CO_2,Produktion}}{(\sigma_{CO_2,Abluft} - \sigma_{CO_2,Zuluft})} \cdot \frac{n_R \cdot R \cdot T}{p \cdot M_{CO_2}} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad (29)$$

Tabelle 7 – Annahmen und typische Randbedingungen für Lüftungsszenarien in Klassenräumen

	Einheit	Klassenraum (a)	Klassenraum (b)	Klassenraum (c)	Klassenraum (d)
V_R	m^3	200	200	200	200
LW	h^{-1}	6 (UBA, Stoßlüftung)	20 (UBA, Querlüftung)	2,5	5
$\dot{V}_R$	m^3/h	1200	4000	500	1000
τ	h	6	6	6	6
$n_{R,max}$	-	25	25	25	25
$\dot{V}_{LR}$	m^3/h	0; 500	0; 500	0; 500	0; 500
Gruppe 1					
n_{g1}	-	1	1	1	1
$\dot{V}_{A,g1}$	m^3/h	0,78 (Stehen)	0,78 (Stehen)	0,78 (Stehen)	0,78 (Stehen)
$\zeta_{Aerosol,g1}$	ml/m^3	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)
PR_{g1}	-	0; 0,5	0; 0,5	0; 0,5	0; 0,5
Gruppe 2					
$\dot{V}_{A,g2}$	m^3/h	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)
$\zeta_{Aerosol,g2}$	ml/m^3	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)
PR_{g2}	-	0; 0,5	0; 0,5	0; 0,5	0; 0,5

Für die Szenarien (c) und (d) wird von kontinuierlicher maschineller Belüftung mit Volumenströmen von 500 m^3/h (c) und 1000 m^3/h (d) ausgegangen.

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse der instationären Berechnungen der CO_2 -Konzentrationsverläufe für die vier Szenarien (a), (b), (c) und (d) und die Referenzsituation mit maschineller Lüftung aus Tabelle 1 für eine exemplarische Schulstunde. Dabei wird davon ausgegangen, dass es sich um die erste Schulstunde des Tages in diesem Klassenraum handelt, sodass die CO_2 -Konzentration zu Beginn des Betrachtungszeitraums zu 410 ppm gesetzt werden kann. Für die Szenarien (a) und (b) sind die Stoß- beziehungsweise Querlüftungsphasen markiert.

Zu Beginn der Betrachtung steigen die CO_2 -Konzentrationen aufgrund des CO_2 -Eintrags durch die menschlichen Quellen kontinuierlich an. Maßgeblich für den Anstieg ist in diesen Fällen der Luftwechsel.

Die Szenarien (a) und (b) weisen den stärksten Anstieg auf, was auf die vergleichsweise geringe Luftwechselrate infolge natürlicher Infiltration zurückzuführen ist. Während der Stoß- und Querlüftungsphasen fallen die CO_2 -Konzentrationen aufgrund der erhöhten Luftwechselrate während der entsprechenden Phasen stark ab. Insgesamt führen die Lüftungsszenarien (a) und (b) zu einem charakteristischen „Sägezahn-Profil“ der CO_2 -Konzentration. In diesen Szenarien werden während der Schulstunde maximale CO_2 -Konzentrationen von etwa 1900 ppm (a) beziehungsweise 1570 ppm (b) erreicht. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass eine entsprechend längere Lüftungsphase vorzusehen ist, falls eine Luftwechselrate von 6 h^{-1} während der Fensterlüftung wegen nicht hinreichend öffentlicher Fenster oder zu geringer Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraum nicht erreicht werden kann.

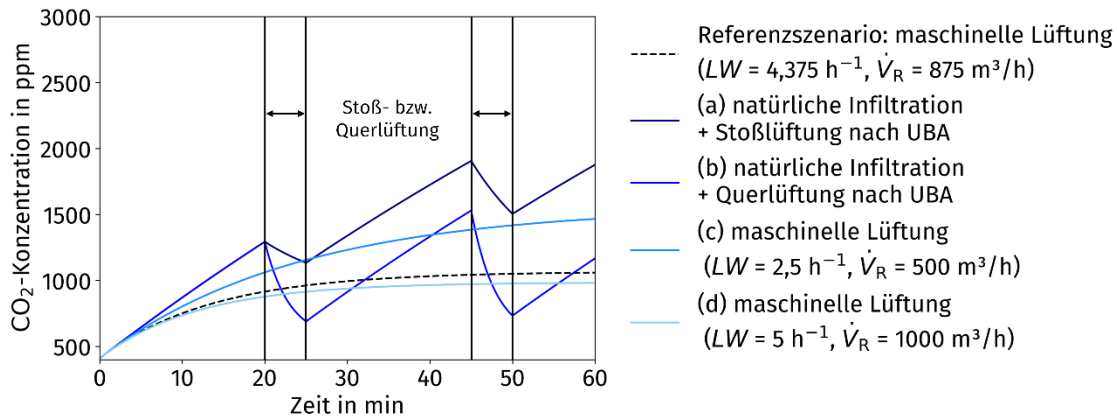


Abbildung 7 – CO₂-Konzentrationsverläufe der Szenarien (a), (b), (c) und (d) sowie des Referenzszenarios über 1 h

Die maschinelle Lüftung führt zu einem Abflachen der CO₂-Konzentration bis hin zu einer Gleichgewichtskonzentration. Nach einer Stunde ergeben sich somit CO₂-Konzentrationen von 1466 ppm (c) und 981 ppm (d) beziehungsweise 1059 ppm in der Referenzsituation.

Die fünf betrachteten Szenarien werden im Folgenden auf einen kompletten Schultag (6 h) erweitert. Zusätzlich zu den CO₂-Konzentrationen werden hier die relativen Risiken betrachtet. Basierend auf der instationären Aerosolkonzentration in Gleichung (9),

die durch die Ausatmung des Menschen verursacht wird, wird für diesen Zeitraum eine mittlere, auf die Referenzsituation bezogene, Aerosolpartikelbelastung der jeweiligen Fälle berechnet. Diese Aerosolpartikelbelastung der Luft wird im Folgenden als relative Aerosolbelastung bezeichnet.

Die über die 6 Stunden gemittelte atmungsverursachte Aerosolbelastung wird genutzt, um das mittlere relative Risiko für eine Aufenthaltszeit von einer Stunde nach Gleichung (21) zu berechnen. Dabei wird

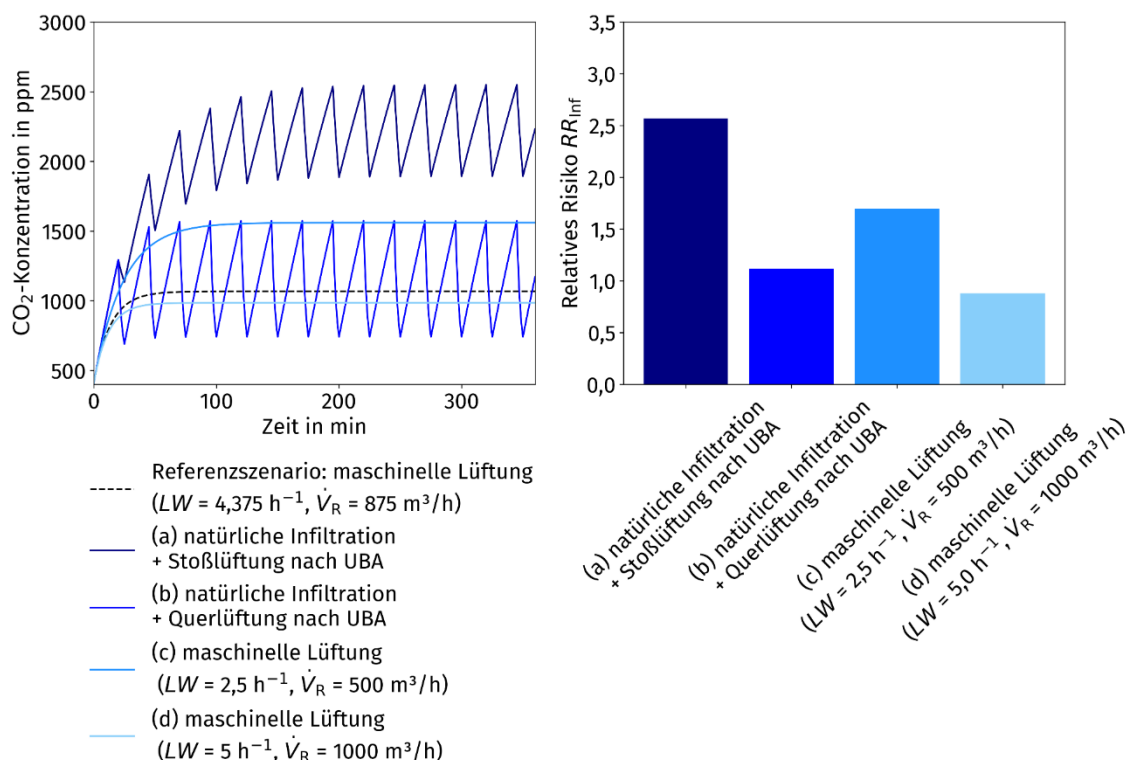


Abbildung 8 – CO₂-Konzentrationsverläufe und relative Risiken für die Szenarien (a) bis (d)

für die Referenzsituation ebenfalls die mittlere Aerosolbelastung basierend auf der instationären Aerosolpartikelbilanz angenommen. Auf der linken Seite in Abbildung 8 sind die CO_2 -Konzentrationsverläufe der fünf Szenarien über einen ganzen Schultag aufgetragen. Auf der rechten Seite sind die relativen Risiken der Szenarien (a), (b), (c) und (d) aufgetragen. Bei den CO_2 -Konzentrationsverläufen sollte beachtet werden, dass die Benutzung von MNB und Luftreinigern keinen Einfluss auf den CO_2 -Konzentrationsverlauf hat, sodass der aufgezeichnete Verlauf der jeweiligen Szenarien für jedes Unterszenario gültig ist.

Bei maschineller Belüftung in den Szenarien (c) und (d) stellt sich nach einer gewissen Zeit eine Gleichgewichtskonzentration von 1560 ppm (c) beziehungsweise 985 ppm (d) ein. Auch hier führt der erhöhte Volumenstrom durch die maschinelle Belüftung zu einer deutlichen Reduktion der Gleichgewichtskonzentration.

Im Folgenden werden weiterhin die Szenarien (a) bis (d) für einen Schultag mit einer Dauer von 6 Stunden betrachtet und jeweils die Konzentrationsverläufe der Aerosolpartikel sowie die relativen Risiken des

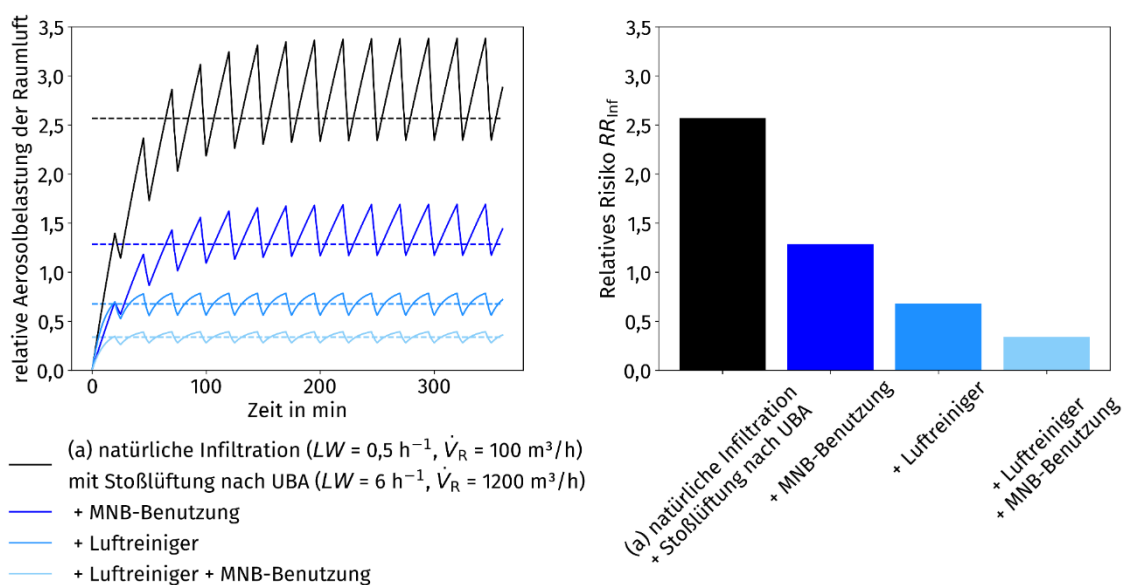


Abbildung 9 – Szenario (a) bei natürlicher Infiltration ($LW = 0,5 \text{ h}^{-1}$) mit Stoßlüftung alle 20 min à 5 min ($LW = 6 \text{ h}^{-1}$)

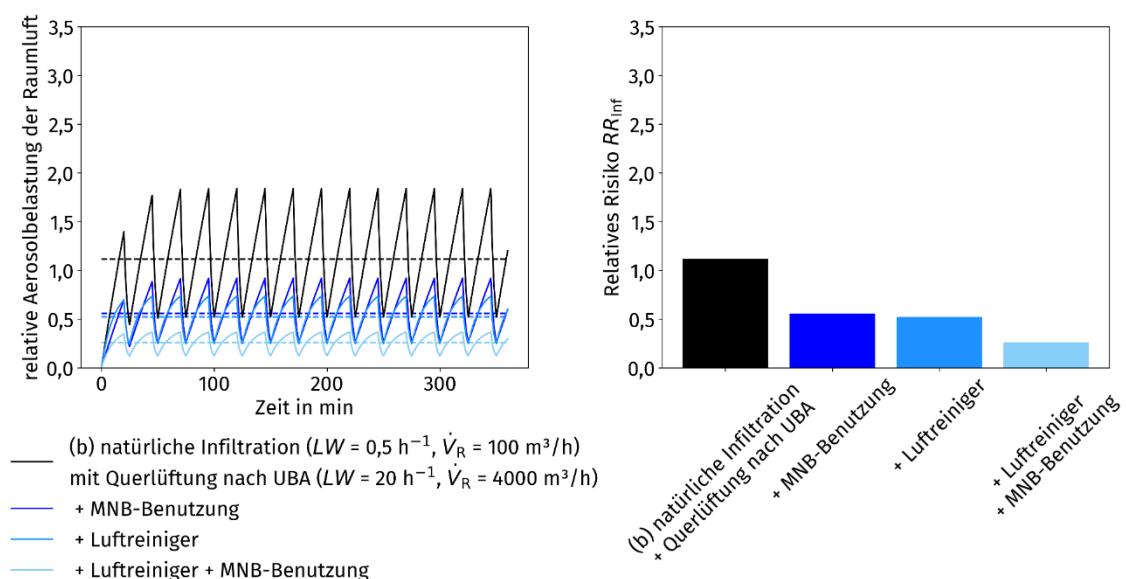


Abbildung 10 – Szenario (b) bei natürlicher Infiltration ($LW = 0,5 \text{ h}^{-1}$) mit Querlüftung alle 20 min à 5 min ($LW = 20 \text{ h}^{-1}$)

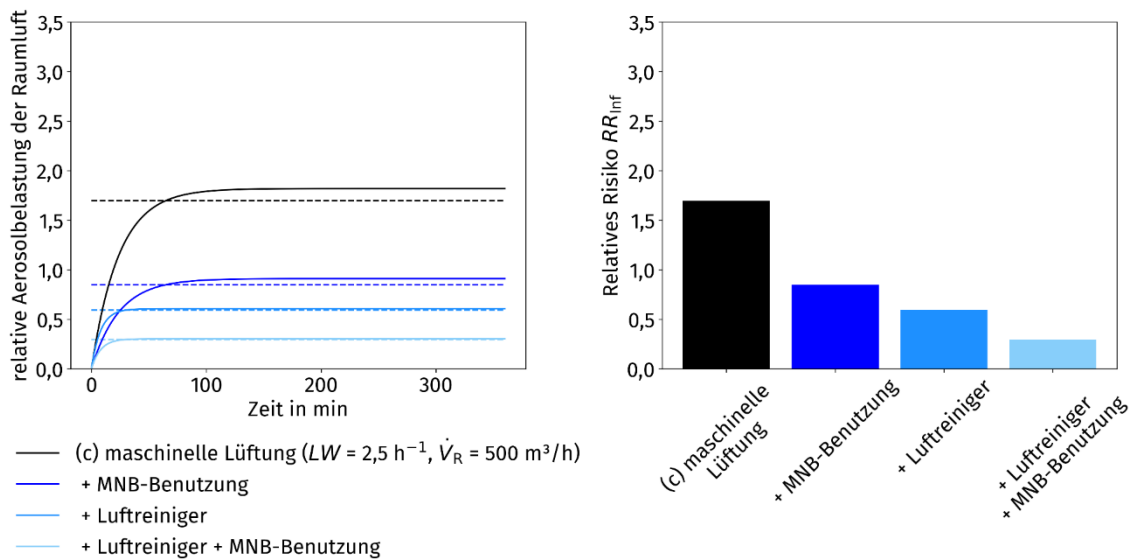


Abbildung 11 – Szenario (c) bei maschineller Belüftung ($LW = 2,5 \text{ h}^{-1}$)

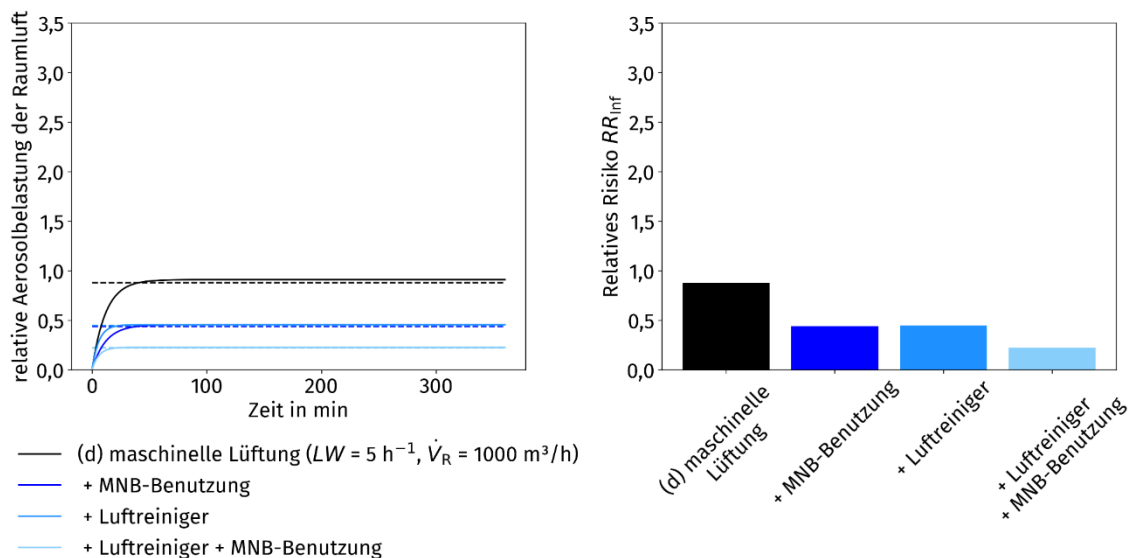


Abbildung 12 – Szenario (d) bei maschineller Belüftung ($LW = 5 \text{ h}^{-1}$)

Grundszenarios berechnet. Für die Risikobetrachtung wird die Intervalllüftung um ein Szenario erweitert, in dem alle Personen im Raum eine MNB tragen, ein Szenario mit einem Luftreiniger im Raum sowie eine Kombination aus beiden Maßnahmen. Für den Luftreiniger wird wieder angenommen, dass dieser einen vollständig von Aerosolpartikeln befreiten effektiven Volumenstrom von $500 \text{ m}^3/\text{h}$ bereitstellt.

Die MNB werden auch in diesem Beispiel mit einer Partikelrückhalterate PR von 50 % bezogen auf die ausgeatmeten Aerosolpartikel angenommen. Hierbei sei angemerkt, dass diese Maßnahmen keinen Einfluss auf die CO_2 -Konzentration haben, sodass die CO_2 -Konzentrationsverläufe dieser Szenarien denen

aus Abbildung 7 entsprechen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass sich bei dem Einsatz eines Luftreinigers ein von der Reinigungsleistung abhängiges Verhältnis zwischen dem relativen Risiko und der CO_2 -Konzentration ergibt. Die CO_2 -Konzentration muss daher in diesen Fällen gesondert bewertet werden. Hohe CO_2 -Konzentrationen führen allerdings auch bei Nutzung eines Luftreinigers zu deutlichen Beeinträchtigungen der anwesenden Personen.

Die Konzentrationsverläufe der virenbeladenen Aerosolpartikel nach Gleichung (16) sind in den linken Diagrammen in Abbildung 9 bis Abbildung 12 aufgetragen. Analog zu den CO_2 -Konzentrationsverläufen führt die Intervalllüftung zu einem „Sägezahn-

Profil“ der virenbeladenen Aerosolkonzentrationen und die maschinelle Belüftung zu einem Gleichgewichtswert. Die Benutzung von MNB und/oder der Einsatz von Luftreinigern führt in allen Fällen zu einer Reduktion der virenbeladenen Aerosolpartikel, da die hier angenommene Partikelrückhalterate PR von 50 % der MNB pauschal eine Halbierung der Aerosolpartikelanzahl bewirkt. Der Effekt des Luftreinigers auf die Aerosolpartikelkonzentration ist bei geringeren Luftwechselraten beziehungsweise Frischluftvolumenströmen (Szenarien (a) und (c)) stärker ausgeprägt als bei den Szenarien mit höheren Luftwechselraten beziehungsweise Frischluftvolumenströmen (Szenarien (b) und (d)). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass durch den Einsatz eines Luftreinigers eine absolute Erhöhung der Aerosolpartikelabscheidung auftritt, während das Tragen von MNB eine relative Verringerung der Aerosolquelle darstellt.

Die relativen Risiken verhalten sich in den Szenarien analog zu den Konzentrationsverläufen der virenbeladenen Aerosole. Unter den vier Szenarien ohne MNB und Luftreiniger besteht bei der Stoßlüftung (a) das höchste relative Risiko mit etwa 2,6. In dem Querlüftungsszenario ergibt sich ein relatives Risiko von 1,12. Durch die maschinelle Belüftung werden relative Risiken von rund 1,69 (c) beziehungsweise 0,88 (d) erreicht. Der Einsatz eines Luftreinigers in Szenario (a) führt zu einem geringeren relativen Risiko als das Tragen von MNB, während in den Szenarien (b), (c) und (d) das Tragen von MNB das Risiko mehr verringert als die Nutzung eines Luftreinigers. Die Benutzung beider Maßnahmen parallel führt zu den geringsten relativen Risiken. In Szenario (d) wird durch beide Maßnahmen das relative Risiko auf 0,22 abgesenkt.

Ausgehend von Szenario (a) wird deutlich, dass durch den Einsatz eines Luftreinigers ein besseres Ergebnis bezogen auf das relative Risiko erzielt wird als durch die Installation einer maschinellen Belüftung mit einem geringen Volumenstrom (c). Der Luftreiniger hat jedoch keinen Effekt auf die hohen CO_2 -Konzentration. Wird eine maschinelle Lüftung mit höherem Volumenstrom installiert beziehungsweise betrieben, führt dies sowohl zu einem geringeren relativen Risiko als auch zu einer deutlich verringerten CO_2 -Konzentration im Vergleich zur Benutzung eines

Luftreinigers in Szenario (a). Des Weiteren ist anzumerken, dass die Benutzung eines Luftreinigers in Szenario (a) nur zu einem marginal geringeren Risiko als die Benutzung von MNB führt.

Insgesamt zeigt diese Modellrechnung, dass die Benutzung von MNB in allen Szenarien zu einer ähnlichen Reduktion des relativen Risikos wie der Einsatz des hier beschriebenen Luftreinigers führt. Maschinelle Belüftung führt sowohl zu einer deutlichen Reduktion der CO_2 -Konzentration als auch zu einer deutlichen Reduktion des relativen Risikos im hier betrachteten Klassenraum.

6. Zusammenfassung

Auf Basis einer Literaturstudie sowie eines vereinfachten Berechnungsansatzes für die Bilanzierung eines Raums wurde ein Verfahren zur Ermittlung eines relativen Infektionsrisikos abgeleitet, mit dem eine beliebige Raumsituation mit einer Referenzsituation verglichen werden kann. Die Referenzsituation beschreibt einen Klassenraum mit maschineller Belüftung, ausgelegt nach dem heutigen Stand der Technik. Bei dieser Referenz handelt sich nicht um einen Raum, in dem eine absolute Sicherheit in Bezug auf Infektionen vorliegt. Allerdings wurde durch die Wahl der Raum- und Lüftungsparameter sichergestellt, dass sich in der Referenzsituation nach dem heutigen Stand des Wissens Infektionen über virentragende Aerosolpartikel nur beschränkt ausbreiten können. Das absolute Risiko dieser Referenzsituation wurde mit verschiedenen Ansätzen aus der Literatur ausgewertet. Obwohl die Werte eine erhebliche Streuung aufweisen, kann der Anwender die dokumentierten Werte als Basis einer eigenen Risikoabwägung verwenden. Die Bewertung des relativen Risikos wird durch diese unterschiedlichen Angaben zum absoluten Infektionsrisiko nicht beeinträchtigt.

Eine Auswertung des relativen Infektionsrisikos zeigt, dass Klassenräume bei einer Sanierung oder im Neubau zusätzlich zu offenbaren Fenstern prinzipiell mit einer ausreichend bemessenen maschinellen Lüftung ausgestattet werden sollten. Durch diese raumlufttechnischen Anlagen kann sichergestellt werden, dass die Konzentrationen von Aerosolpartikeln und allen anderen Verunreinigungen der Raumluft in einem akzeptablen Bereich bleiben. Können

kurzfristig keine raumlufttechnischen Anlagen nachgerüstet werden, ist im Rahmen der Pandemie auf eine strikte Einhaltung von Lüftungsregeln zu achten, die am besten durch den Einsatz einer CO₂-Messtechnik beziehungsweise einer Lüftungsampel überprüft wird. Das Tragen von MNB wird insbesondere bei Gruppenarbeiten dringend empfohlen, da durch die größere Sprechaktivität die Menge an freigesetzten Aerosolpartikeln deutlich erhöht wird.

Der Einsatz eines funktionstüchtigen Luftreinigers in Klassenräumen ist als zusätzliche Maßnahme empfehlenswert, da durch diese Technik das Infektionsrisiko weiter gesenkt werden kann. Allerdings ist ein Luftreiniger allein kein Ersatz für die Versorgung eines Klassenraums mit Außenluft. Aktivitäten mit sehr hohen Aerosolproduktionen, wie beispielsweise das gemeinsame Singen, sollten gänzlich unterlassen, in den Außenbereich verlegt oder nur kurzzeitig in großen Räumen durchgeführt werden. Genauere Betrachtungen können mit dem beschriebenen Berechnungsmodell angestellt werden.

In Sporthallen sind ebenfalls besondere Vorsichtsmaßnahmen erforderlich, da hier die Abgabe von Aerosolpartikeln pro Person besonders hoch ausfällt. Daher wird empfohlen, den Schulsport auch im Winter in den Außenbereich zu verlegen oder in kleinen Gruppen in gut belüfteten Hallen durchzuführen.

Große Hörsäle und Großraumbüros sind bei einer maschinellen Lüftung und den üblichen Luftwechselraten als weniger kritisch anzusehen. Diese Räume können insbesondere in Verbindung mit einer MNB auch unter den aktuellen Randbedingungen auf Basis des hier vorgestellten Berechnungsansatzes ohne ein deutlich erhöhtes Risiko genutzt werden. Auch hier kann im Einzelfall eine Berechnung des relativen Risikos gemäß den angegebenen Gleichungen erfolgen.

Bei der Bewertung von Transportmitteln wird deutlich, dass in einem PKW sehr hohe Luftwechselraten für geringe relativen Risiken notwendig sind. In einem Flugzeug können bei ausreichender Filtration der Umluft geringe relative Infektionsrisiken sichergestellt werden.

Danksagung

Der Beitrag wurde durch die Heinz Trox-Stiftung finanziell unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt ausschließlich bei den genannten Autoren.

Wir danken Alfred Trukenmüller⁵ und Christian Scherer⁶ für ihre vielfältigen Diskussionsbeiträge und ihre intensive sowie kritische Auswertung der Literatur.

⁵ Umweltbundesamt, Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung, Dessau-Roßlau

⁶ Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Valley

Literaturverzeichnis

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). 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.

Branch Pattern (2020): Facility Infection Risk Estimator v2.0. Branch Pattern. Online verfügbar unter <https://branchpattern.com/research/facility-infection-risk-estimator-v2-0/>, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) (Hg.) (2020): Hinweise des BfArM zur Verwendung von Mund–Nasen-Bedeckungen, medizinischen Gesichtsmasken sowie partikelfiltrierenden Halbmasken (FFP1, FFP2 und FFP3) im Zusammenhang mit dem Coronavirus (SARS-CoV-2 / Covid-19). Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM). Online verfügbar unter <https://www.bfarm.de/SharedDocs/Risikoinformationen/Medizinprodukte/DE/schutzmasken.html>, zuletzt aktualisiert am 12.11.2020, zuletzt geprüft am 04.12.2020.

Buonanno, G.; Morawska, L.; Stabile, L. (2020a): Quantitative assessment of the risk of airborne transmission of SARS-CoV-2 infection: prospective and retrospective applications. In: *Environment international* (145). DOI: 10.1101/2020.06.01.20118984.

Buonanno, G.; Stabile, L.; Morawska, L. (2020b): 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.

Burgholz, Tobias Maria; Müller, Dirk: CO2 levels in differently ventilated classrooms with regard to occupational ventilation behavior under spring and summer conditions. In: The 16th Conference of the International Society of Indoor Air Quality & Climate, Indoor Air 2020, 2020-11-01 - 2020-11-05, Seoul, South Korea, S. 1176–1181. Online verfügbar unter <https://publications.rwth-aachen.de/record/805262>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.

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.

CIRES (2020): COVID-19 Airborne Transmission Tool. Hg. v. Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado Boulder. Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences at the University of Colorado Boulder. Online verfügbar unter <https://cires.colorado.edu/news/covid-19-airborne-transmission-tool-available>, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Dabisch, Paul; Schuit, Michael; Herzog, Artemas; Beck, Katie; Wood, Stewart; Krause, Melissa et al. (2020): The influence of temperature, humidity, and simulated sunlight on the infectivity of SARS-CoV-2 in aerosols. In: *Aerosol Science and Technology*, S. 1–12. DOI: 10.1080/02786826.2020.1829536.

Dai, Hui; Zhao, Bin (2020): Association of the infection probability of COVID-19 with ventilation rates in confined spaces. In: *Build. Simul.*, S. 1–7. DOI: 10.1007/s12273-020-0703-5.

DIN 18032-1, 2014: DIN 18032-1:2014-11, Sporthallen_ - Hallen und Räume für Sport und Mehrzwecknutzung_ - Teil_1: Grundsätze für die Planung.

DIN EN ISO 16890-1, 2017-08: DIN EN ISO 16890-1:2017-08, Luftfilter für die allgemeine Raumluftechnik – Teil 1: Technische Bestimmungen, Anforderungen und Effizienzklassifizierungssystem, basierend auf dem Feinstaubabscheidegrad (ePM).

Dinklage, Fabian; Ehmann, Annick; Erdmann, Elena; Klack, Moritz; Mast, Maria; Stahnke, Julian et al. (2020): So schnell verbreitet sich das Coronavirus in Innenräumen. In: *Zeit Online* 2020, 26.11.2020. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/wissen/gesundheit/2020-11/coronavirus-aerosole-ansteckungsgefahr-infektion-hotspot-innenraeume>, zuletzt geprüft am 27.11.2020.

Drewnick, Frank; Pikmann, Julia; Fachinger, Friederike; Moormann, Lasse; Sprang, Fiona; Borrmann, Stephan (2020): Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks. In: *Aerosol Science and Technology*, S. 1–17. DOI: 10.1080/02786826.2020.1817846.

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.

DIN EN 15251, 2012-12: Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik.

Erhart, T.; Guerlich, D.; Schulze, T.; Eicker, U. (2015): Experimental Validation of Basic Natural Ventilation Air Flow Calculations for different Flow Path and Window Configurations. In: *Energy Procedia* 78, S. 2838–2843. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.644.

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.

Gesellschaft für Aerosolforschung e. V. (2020): Position paper of the Gesellschaft für Aerosolforschung on understanding the role of aerosol particles in SARS-CoV-2 infection.

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.

Hamner, Lea; Dubbel, Polly; Capron, Ian; Ross, Andy; Jordan, Amber; Lee, Jaxon et al. (2020): High SARS-CoV-2 Attack Rate Following Exposure at a Choir Practice - Skagit County, Washington, March 2020. In: *MMWR. Morbidity and mortality weekly report* 69 (19), S. 606–610. DOI: 10.15585/mmwr.mm6919e6.

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.

Hemmes, J. H.; Winkler, K. C.; Kool, S. M. (1960): Virus survival as a seasonal factor in influenza and poliomyelitis. In: *Nature* 188 (4748), S. 430–431. DOI: 10.1038/188430a0.

Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Borsch-Laaks, Robert (2012): Lüftung im Wohngebäude. Wissenswertes über den Luftwechsel und moderne Lüftungsmethoden. Ausgabe: 10/04, Überarb.: 11/12. Wiesbaden: Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Energiesparinformationen, 08).

Hosseini, Vahid (2020): SARS-CoV-2 Virulence: Interplay of Floating Virus-Laden Particles, Climate, and Humans. In: *Advanced biosystems* 4 (7), e2000105. DOI: 10.1002/adbi.202000105.

HRI, T. BerlinU (2020): COVID-19 Infektionsrisiko durch Aerosole. Hg. v. Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut. Online verfügbar unter <https://hri-pira.github.io/>, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Konda, Abhiteja; Prakash, Abhinav; Moss, Gregory A.; Schmoldt, Michael; Grant, Gregory D.; Guha, Supratik

(2020): Aerosol Filtration Efficiency of Common Fabrics Used in Respiratory Cloth Masks. In: *ACS nano* 14 (5), S. 6339–6347. DOI: 10.1021/acsnano.0c03252.

Kriegel, Martin; Buchholz, Udo; Gastmeier, Petra; Bischoff, Peter; Abdelgawad, Inas; Hartmann, Anne (2020): Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2.

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

Leffler, Christopher T.; Ing, Edsel; Lykins, Joseph D.; Hogan, Matthew C.; McKeown, Craig A.; Grzybowski, Andrzej (2020): Association of Country-wide Coronavirus Mortality with Demographics, Testing, Lockdowns, and Public Wearing of Masks. In: *The American journal of tropical medicine and hygiene* 103 (6), S. 2400–2411. DOI: 10.4269/ajtmh.20-1015.

Lelieveld, Jos; Helleis, Frank; Borrmann, Stephan; Cheng, Yafang; Drewnick, Frank; Haug, Gerald et al. (2020): Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments. In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (21). DOI: 10.3390/ijerph17218114.

Leung, Nancy H. L.; Chu, Daniel K. W.; Shiu, Eunice Y. C.; Chan, Kwok-Hung; McDevitt, James J.; Hau, Benien J. P. et al. (2020): Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. In: *Nature medicine* 26 (5), S. 676–680. DOI: 10.1038/s41591-020-0843-2.

Li, Yuguo; 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.

Liang, Mingming; Gao, Liang; Cheng, Ce; Zhou, Qin; Uy, John Patrick; Heiner, Kurt; Sun, Chenyu (2020): Efficacy of face mask in preventing respiratory virus transmission: A systematic review and meta-analysis. In: *Travel medicine and infectious disease* 36. DOI: 10.1016/j.tmaid.2020.101751.

Max Planck Institute for Chemistry (2020): COVID 19 Aerosol Transmission Risk Calculator. Hg. v. Max

Planck Institute for Chemistry. Online verfügbar unter <https://www.mpic.de/4747361/risk-calculator>, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Miller, Shelly L.; Nazaroff, William W.; Jimenez, Jose L.; Boerstra, Atze; Buonanno, Giorgio; Dancer, Stephanie J. et al. (2020): Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in the Skagit Valley Chorale superspreading event. In: *Indoor air*. DOI: 10.1111/ina.12751.

Mitze, Timo; Kosfeld, Reinhold; Rode, Johannes; Wälde, Klaus (2020): Face masks considerably reduce COVID-19 cases in Germany. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. DOI: 10.1073/pnas.2015954117.

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.

Mueller, Amy V.; Eden, Matthew J.; Oakes, Jessica M.; Bellini, Chiara; Fernandez, Loretta A. (2020): Quantitative Method for Comparative Assessment of Particle Removal Efficiency of Fabric Masks as Alternatives to Standard Surgical Masks for PPE. In: *Matter* 3 (3), S. 950–962. DOI: 10.1016/j.matt.2020.07.006.

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.

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.) (2020a): Antworten auf häufig gestellte Fragen zum Coronavirus SARS-CoV-2 / Krankheit COVID-19. Online verfügbar unter <https://www.rki.de/Shared-Docs/FAQ/NCOV2019/gesamt.html>, zuletzt aktualisiert am 03.07.2020, zuletzt geprüft am 07.08.2020.

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

Robert Koch-Institut (Hg.) (2020c): SARS-CoV-2 Steckbrief zur Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID-19). Online verfügbar unter https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html, zuletzt aktualisiert am 16.10.2020, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

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.

Schaffer, F. L.; Soergel, M. E.; Straube, D. C. (1976): Survival of airborne influenza virus: effects of propagating host, relative humidity, and composition of spray fluids. In: *Archives of virology* 51 (4), S. 263–273. DOI: 10.1007/BF01317930.

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.

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.

Umweltbundesamt (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumluftthygiene-Kommission des

Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 51 (11), S. 1358–1369. DOI: 10.1007/s00103-008-0707-2.

Umweltbundesamt (2020a): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. Kohlendioxid. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid->, zuletzt geprüft am 21.10.2020.

Umweltbundesamt (2020b): Lüften in Schulen. Empfehlungen des Umweltbundesamtes zu Luftaustausch und effizientem Lüften zur Reduzierung des Infektionsrisikos durch virushaltige Aerosole in Schulen. Unter Mitarbeit von H.-J. Moriske. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/umweltbundesamt_lueften_in_schulen__0.pdf, zuletzt geprüft am 18.12.2020.

VA Science (2020): COVID 19 Risk Calculator. Hg. v. VA Science. Online verfügbar unter <https://vue-covid-product.web.app/>, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

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.

Whiley, Harriet; Keerthirathne, Thilini Piushani; Nisar, Muhammad Atif; White, Mae A. F.; Ross, Kirstin E. (2020): Viral Filtration Efficiency of Fabric Masks Compared with Surgical and N95 Masks. In: *Pathogens (Basel, Switzerland)* 9 (9). DOI: 10.3390/pathogens9090762.

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.

www.co2online.de (2012): Wie viel CO₂ atmet der Mensch aus? Online verfügbar unter <https://www.co2online.de/service/klima-ora-ikel/beitrag/wie-viel-co2-atmet-der-mensch-aus-8518/>, zuletzt aktualisiert am 28.06.2019, zuletzt geprüft am 21.10.2020.

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.

Yang, Wan; Elankumaran, Subbiah; Marr, Linsey C. (2012): Relationship between humidity and influenza A viability in droplets and implications for influenza's seasonality. In: *PloS one* 7 (10). DOI: 10.1371/journal.pone.0046789.

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/NEJMoa032867.

Zangmeister, Christopher D.; Radney, James G.; Vicenzi, Edward P.; Weaver, Jamie L. (2020): Filtration Efficiencies of Nanoscale Aerosol by Cloth Mask Materials Used to Slow the Spread of SARS-CoV-2. In: *ACS nano* 14 (7), S. 9188–9200. DOI: 10.1021/acsnano.0c05025.