

Empfehlung zum erforderlichen Luftwechsel in Schulen, Großraumbüros, Hörsälen und Turnhallen zur Reduzierung eines aerosolgebundenen Infektionsrisikos

^{1,2}Dirk Müller, ¹Kai Rewitz, ¹Dennis Derwein, ²Tobias Maria Burgholz, ³Marcel Schweiker, ²Janine Bardey, ⁴Peter Tappler

¹ Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC), 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, *Empfehlung zum erforderlichen Luftwechsel in Schulen, Großraumbüros, Hörsälen und Turnhallen zur Reduzierung eines aerosolgebundenen Infektionsrisikos*, White Paper, RWTH-EBC 2020-004, Aachen, 2020, DOI: [10.18154/RWTH-2020-10366](https://doi.org/10.18154/RWTH-2020-10366)

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

Empfehlung zum erforderlichen Luftwechsel in Schulen, Großraumbüros, Hörsälen und Turnhallen zur Reduzierung eines aerosolgebundenen Infektionsrisikos

^{1,2} Dirk Müller, ¹ Kai Rewitz, ¹ Dennis Derwein,
² Tobias Maria Burgholz, ³ Marcel Schweiker,
² Janine Bardey, ⁴ Peter Tappler

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

² Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Aachen

³ Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, 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 einen Mund-Nasen-Schutz (MNS) 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 eines MNS ebenfalls wesentlich vermindert. Beide Übertragungswege werden durch den Einsatz raumlufttechnischer 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 2020b), 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.

2. Relative Bewertung des Infektionsrisikos

Da es aktuell noch keine ausreichend sichere Methode gibt, um ein absolutes aerosolgebundenes Infektionsrisiko für beliebige Umgebungen vorherzusagen, wird in diesem Beitrag ein bereits beschriebener Ansatz genutzt, mit dem ein relatives Infektionsrisiko durch einen Virustransport über Aerosolpartikel in unterschiedlichen Räumen und Nutzungen gegenüber einer Referenzumgebung berechnet werden kann. Abweichend von der ersten Veröffentlichung zum relativen Infektionsrisiko (Müller et al. 2020) wird hier eine neue Referenzumgebung gewählt, für die in der Literatur eine Abschätzung des absoluten Infektionsrisikos angegeben wird. Damit kann über diesen Ansatz eine beliebige Umgebung mit einer Referenzumgebung verglichen werden, für die ein absolutes Infektionsrisiko angegeben werden kann.

Auf Basis des aktuellen Verhältnisses aus den an COVID-19 erkrankten Personen und der Gesamtbevölkerung in Deutschland wird für die jeweilige Raumbelegung die Wahrscheinlichkeit modelliert, mit der eine infizierte Person im Raum anwesend ist. Mit dieser Wahrscheinlichkeit und auf Basis raumspezifischer Parameter sowie einer hypothetischen Rate an infektiösen Aerosolpartikeln, die eine infizierte Person an die Raumluft abgibt, wird ein Modell für die Gleichgewichtskonzentration an infektiösen Aerosolpartikeln in der Raumluft aufgestellt. Die Raumluft wird in der Studie von Müller et al. (Müller et al. 2020) vereinfacht als ideal durchmischt angesehen und die Dämpfung des Konzentrationsanstiegs durch das Raumvolumen wird vernachlässigt, da immer nur die stationären Endkonzentrationen ausgewertet werden. Dadurch ergibt sich eine konservative Abschätzung der eingeatmeten Aerosolpartikelanzahl. Das absolute Infektionsrisiko wird dabei näherungsweise linear abhängig von der Anzahl der eingeatmeten, infektiösen Aerosolpartikel mit einem hypothetischen Infektionsparameter modelliert. Durch den Bezug des absoluten Infektionsrisikos eines beliebigen Raums auf das absolute Risiko in einer Referenzumgebung kann der schwer quantifizierbare Infek-

tionsparameter aus dem Modell entfernt werden, sodass ausschließlich technische Parameter des Raums sowie die Raumbelegung und die das aktuelle Infektionsgeschehen beschreibende statistische Größe berücksichtigt werden müssen.

Im Folgenden wird zunächst eine Erweiterung dieses Ansatzes um den Einfluss unterschiedlicher körperlicher Aktivitäten und Sprechaktivitäten sowie der Verwendung eines MNS beziehungsweise eines Luftreinigers beschrieben. Zudem werden für die Referenzumgebung zwei Änderungen vorgenommen: Erstens wird als Referenzumgebung anstatt einer Wohnung ein Klassenraum einer Schule betrachtet. Zweitens wird der Betrachtungszeitraum der Referenzumgebung auf eine Stunde festgelegt. Die Änderungen der Referenzumgebung bieten den bereits genannten Vorteil, dass für diesen Fall in der Literatur eine Abschätzung des absoluten Infektionsrisikos vorliegt. Weiterhin entspricht die neue Referenzumgebung einem Klassenraum mit einer marktüblichen maschinellen Lüftungsanlage, für die ein definierter Luftwechsel angegeben werden kann. Der Betrachtungszeitraum von einer Stunde entspricht einer Unterrichtseinheit inklusive einer Pausenzeit.

Die hier vorgestellte Untersuchung vergleicht somit die in einem einstündigen Szenario inhalierte Dosis respiratorischer Aerosolpartikel mit der Dosis in der Referenzsituation einer Schulstunde in einem nach dem Stand der Technik belüfteten Klassenraum. Die hier angesetzte Referenzsituation „Schulstunde“ ist gekennzeichnet durch ein Raumvolumen von 200 m^3 , eine Luftwechselrate von $4,4 \text{ h}^{-1}$, eine Dauer von 60 Minuten und die Anwesenheit von 25 Personen, die sitzen und von denen eine Person aktiv spricht. Der resultierende Volumenstrom entspricht einem spezifischen Zuluftvolumenstrom von $35 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Person, welcher auf dem empfohlenen personen- und flächenbezogenen Luftstrom der Kategorie II nach DIN EN 15251 basiert (DIN EN 15251). Diese Referenzsituation definiert ein relatives Risiko von 1 und wird im Folgenden mit Untersuchungen zu einem absoluten Infektionsrisiko für SARS-CoV-2 in Verbindung gebracht.

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 (Lelieveld et al. 2020; Miller et al. 2020; Buonanno et al. 2020a). Buonanno et al. betrachten in 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.

Da die getroffenen Annahmen bezüglich Luftvolumenstrom und Anzahl aktiver Sprecher der hier gewählten Referenzsituation sehr nahekommen, 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 je vier Schulstunden mit 25 Anwesenden das Risiko einer weiteren infizierten Person. Auf Basis von Buonanno et al. lässt sich vereinfacht eine um den Faktor 25

Tabelle 1 – Annahmen für die Referenzumgebung eines typischen Klassenraums mit maschineller Lüftung

	Parameter	Wert
Grundfläche in m ²	A_{ref}	66,7
Raumhöhe in m	h_{ref}	3
Luftwechsel in h ⁻¹	LW_{ref}	4,4
Anzahl anwesender Personen	$n_{\text{R,ref}}$	25
Aufenthaltsdauer in h	τ_{ref}	1
Wahrscheinlichkeit, mindestens einer infizierten Person zu begegnen	$P_{\text{KPR,ref}}$	0,03
Atemvolumenstrom in m ³ /h	$\dot{V}_{\text{A,ref}}$	0,54
Emittierte Aerosolmenge ohne Sprechaktivität in ml/m ³	$\dot{n}_{\text{Aerosol,ref}}$	0,0018
Anzahl der sprechaktiven Personen	$n_{\text{R,Aktiv,ref}}$	1
Emittierte Aerosolmenge mit Sprechaktivität in ml/m ³	$\dot{n}_{\text{Aerosol,Aktiv,ref}}$	0,0096

geringere bzw. den Faktor 4 höhere Emissionsrate bei Anwesenheit einer schwach infektiösen beziehungsweise stark emittierenden Person im Vergleich zur durchschnittlich emittierenden Person annehmen. Daraus resultiert bei Anwesenheit einer stark emittierenden Person eine sekundäre Infektion in jeder einzelnen Schulstunde, bei Anwesenheit einer schwach infektiösen Person je 100 Schulstunden.

Dieser Wert muss in Relation zur Wahrscheinlichkeit gesehen werden, dass im Unterricht überhaupt eine infizierte Person anwesend ist. Die Wahrscheinlichkeit P_{KPR} bei n_{Inf} Infizierten in einer Gesamtpopulation n_{p} mindestens einen Infizierten in einer Gruppe mit n_{r} Personen in einem Raum zu treffen, liegt auf Basis der Gleichung von (Consileon Business Consultancy GmbH 2020; Tabarrok 2020) bei dem aktuellen Infektionsgeschehen (ungefähr 100.000 Infizierte) und der gewählten Referenzsituation bei 0,03 (entspricht 3,0 %). Zur Berechnung dieser Wahrscheinlichkeit wird für Deutschland von 83 Mio. Einwohnern und 100.000 infizierten Personen ausgegangen, die sich aus der Anzahl aller registrierten Fälle abzüglich der bereits genesenen und verstorbenen Personen orientiert (Robert Koch-Institut 2020a). Die Wahrscheinlichkeit eine infizierte Person anzutreffen und sich bei dieser Person zu infizieren wird durch die Multiplikation der Einzelwahrscheinlichkeiten beschrieben und beträgt 0,0003 (entspricht 0,03 %).

3. Erweiterung des Ansatzes

Die von Müller et al. aufgestellte Berechnungsgleichung des relativen Infektionsrisikos RR_{Inf} wird gemäß Gleichung (1) um zusätzliche Parameter erweitert. Diese beinhalten das Verhältnis der Atemvolumenströme \dot{V}_A in Abhängigkeit unterschiedlicher Aktivitäten, das Verhältnis mittlerer emittierter Aerosolmengen $\bar{n}_{Aerosol}$ in Abhängigkeit der Sprechaktivität (Sprechanteile und -lautstärken), siehe Gleichung (2), das Verhältnis einer Reduktion der emittierten Aerosolpartikel aufgrund der Filterwirkung PR eines MNS und des Einflusses eines Volumenstroms \dot{V}_{LR} , welcher über einen Luftreiniger zur Verfügung gestellt werden kann.

$$(1) \quad RR_{Inf} = \frac{A_{ref} \cdot h_{ref} \cdot LW_{ref}}{V \cdot LW + \dot{V}_{LR}} \cdot \frac{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{Inf}}{n_p}\right)^{n_R}\right)}{\left(1 - \left(1 - \frac{n_{Inf}}{n_p}\right)^{n_{R,ref}}\right)} \cdot \frac{\tau}{\tau_{ref}} \cdot \frac{\dot{V}_A}{\dot{V}_{A,ref}} \cdot \frac{\bar{n}_{Aerosol}}{\bar{n}_{Aerosol,ref}} \cdot \frac{(1 - PR)}{(1 - PR_{ref})}$$

$$(2) \quad \frac{\bar{n}_{Aerosol}}{\bar{n}_{Aerosol,ref}} = \frac{\left(\dot{n}_{Aerosol,Aktiv} \cdot n_{R,Aktiv} + \dot{n}_{Aerosol,Passiv} \cdot (n_R - n_{R,Aktiv})\right) \cdot n_{R,ref}}{\left(\dot{n}_{Aerosol,Aktiv,ref} \cdot n_{R,Aktiv,ref} + \dot{n}_{Aerosol,Passiv,ref} \cdot (n_{R,ref} - n_{R,Aktiv,ref})\right) \cdot n_R}$$

Die verschiedenen Sprechaktivitäten werden über eine Differenzierung der mittleren ausgeatmeten Aerosolmengen zwischen Referenz- und Vergleichsumgebung berücksichtigt, da zwischen der Stillarbeit in einer Bibliothek, einem Kinobesuch oder der Arbeit in einem Callcenter signifikante Unterschiede in Bezug auf die jeweilige Aerosolexposition zu erwarten sind. Dabei wird zwischen der Anzahl der sprechaktiven und der nicht sprechaktiven Personen im Raum unterschieden. Die erhöhte Abgabe von Aerosolpartikeln infolge bestimmter respiratorischer Aktivitäten konnte im Zusammen-

hang einer Chorprobe nachgewiesen werden, so dass dieser Infektionsweg mitbetrachtet werden muss (Hamner et al. 2020; Miller et al. 2020). Auf die Bedeutung von Aerosolpartikeln bei einer Infektionsübertragung wird auch in der experimentellen Untersuchung von (Asadi et al. 2019) hingewiesen. Tabelle 2 beinhaltet die in der Literatur angegebenen Werte der Atemvolumenströme in Abhängigkeit der Aktivität und die emittierten Aerosolmengen in Abhängigkeit der Sprechaktivität (Buonanno et al. 2020b).

Eine präventive Maßnahme, die das Eintragen von Aerosolpartikeln in die Raumluft vermindern kann, ist das Tragen von MNS. Die Filterwirkung, die abhängig von Tröpfchengröße und Material beschrieben werden kann (Zangmeister et al. 2020; Whiley et al. 2020), wird in dieser Studie vereinfacht durch einen größenunabhängigen Faktor von $PR = 0,5$

dargestellt. Der gewählte Wert bildet eine konservative Abschätzung innerhalb der bisher gemessenen Filtereffizienz im getragenen Zustand von 15 MNS aus Stoff unterschiedlicher Passformen (MW 71,2 %, SD 17,6, Min 28 %, Max 99 %) (Müller et al. 2020) beziehungsweise der erfassten signifikanten Reduktion der Viruslast (Leung et al. 2020). Dieser Wertebereich wird durch Studien unterstützt, die das Infektionsrisiko mit und ohne MNS in der Bevölkerung untersuchen und Effekte wie eine viermal geringere Mortalität abhängig von einer höheren Nutzungszeit von MNS in der Öffentlichkeit (Leffler et al. 2020) und einer Re-

Tabelle 2 – Übersicht über Atemvolumenströme und Aerosolmengen

Aktivität	Atemvolumenstrom in m ³ /h	Sprechaktivität	Aerosolmenge 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
Leichte körperliche Anstrengung (2,8 met)	1,38		
Moderate körperliche Anstrengung (4,8 met)	2,35		
Schwere körperliche Anstrengung (6,7 met)	3,30		

duktion von Infektionen von 47 % bis 80 % (Liang et al. 2020) darstellen. 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 ein MNS nicht immer bestimmungsgerecht getragen wird. Das Tragen von Visieren hat wahrscheinlich keinen Einfluss auf die Abgabe von Aerosolpartikeln, da die Strömung nur umgelenkt wird und kleinere Partikel aufgrund der 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 Einfluss.

4. Unterschiedliche Raumparameter und Nutzungen

Um das relative Infektionsrisiko gegenüber einem Aufenthalt in beschriebenen Referenzumgebung zu bewerten, werden nachfolgend Randbedingungen für verschiedene belüftete Vergleichsumgebungen definiert (Tabelle 3). 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, allerdings sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die in Normen und Richtlinien angegebenen Werte oftmals nicht den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechen. Hier ist 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 -Konzentration ein guter Indikator für den personenbezogenen Luftvolumenstrom ist. Alle hier genannten Werte für Luftwech-

sel, Aufenthaltszeiten und Belegungen 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 weder MNS getragen werden noch ein spezieller Luftreiniger eingesetzt wird.

Das Raumvolumen des hier betrachteten **Klassenraums** entspricht mit 200 m^3 genau dem Wert der angesetzten Referenzumgebung. Dieser angesetzte Wert stammt aus einer in Frühjahr und Sommer 2019 von der Heinz Trox Wissenschafts gGmbH durchgeführten Feldstudie zur Luftqualität und Akustik in Schulen in NRW. 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 für durchschnittlich 27 Sitzplätze. Die Werte der Feldstudie decken sich mit Untersuchungen der Unfallkasse NRW (Neumann und Buxtrup 2014). Je nach Kurszusammensetzung und Klassenverband sind bei der Belegung größere Schwankungen möglich. Die im Rahmen der durchgeführten Feldstudie erfassten maschinellen Lüftungsgeräte hatten Nennvolumenströme von bis zu $850 \text{ m}^3/\text{h}$, die wegen der erhöhten Strömungsgeräusche während des Unterrichts allerdings nicht mit der höchsten Gebläsestufe betrieben werden konnten. Entsprechend können bei den Klassenräumen Luftwechselraten kleiner als 4 h^{-1} als realistisch angenommen werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei einem klassischen Frontalunterricht immer nur eine Person redet.

Stellvertretend für einen typischen Arbeitsplatz wird eine Büroumgebung betrachtet. Als **Großraumbüro** gelten 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 die Annahme getroffen, dass ungefähr 25 % der anwesenden Personen gleichzeitig reden.

Als weitere Nichtwohngebäude werden ein Hörsaal sowie eine Sporthalle herangezogen. Für einen exemplarischen großen **Hörsaal** mit einer Bestuhlung für etwa 1.000 Personen wird eine Grundfläche von 935 m² und ein Volumen von etwa 10.000 m³ angenommen. Bei Hörsälen der RWTH Aachen werden typischerweise 3 bis 3,5 Luftwechsel pro Stunde eingestellt. Es wird wie bei der Schule davon ausgegangen, dass idealerweise immer nur eine Person spricht während alle anderen aufmerksam zuhören.

Mit einer **Sporthalle** wird eine zweite Umgebung mit großem Raumvolumen betrachtet. Die angenommene Vergleichsumgebung ist an eine Einzelhalle nach DIN 18032-1 angelehnt (DIN 18032-1). Mit Seitenlängen von 15 m und 27 m sowie einer mittleren lichten Höhe von etwa 5,5 m ergeben sich eine Brutto-Grundfläche von 405 m² und ein Luftvolumen von etwa 2.230 m³. Die angegebenen Luftwechsel entsprechen mit einem Luftvolumenstrom von 60 m³/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. Der Atemvolumenstrom wird für schwere Aktivitäten bzw.

Tabelle 3 – Annahmen und typische Randbedingungen für Vergleichsumgebungen

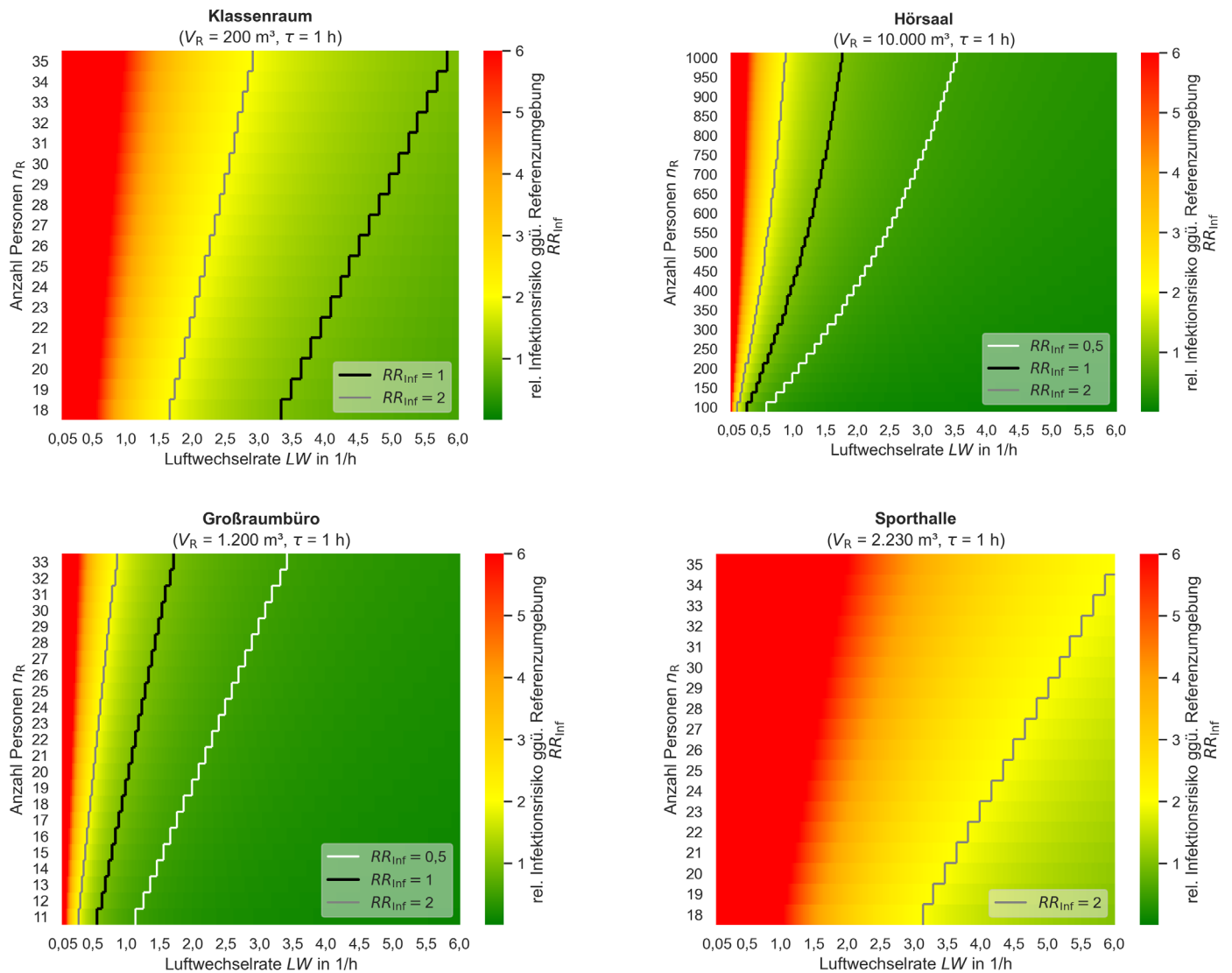
		Klassenraum	Großraumbüro	Großer Hörsaal	Turnhalle (Einzelhalle nach DIN 18032-1)
V	m ³	200	1.200	10.000	2.230
LW	h ⁻¹	bis 4	bis 4	bis 3,5	bis 2,5
$n_{R,max}$	-	35	33	1000	35
τ	h	1	1	1	1
\dot{V}_A	m ³ /h	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	0,54 (Sitzen)	3,3 (Schwere Aktivität)
$\dot{n}_{Aerosol,Aktiv}$	ml/m ³	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,06 (Laut sprechen)
$n_{R,Aktiv}$	-	1	25 % der Anwesenden	1	10 % der Anwesenden
$\dot{n}_{Aerosol,Passiv}$	ml/m ³	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)	0,0018 (Atmen)

schwere sportliche Betätigungen zu 3,3 m³/h angenommen. Zudem wird abgeschätzt, dass ungefähr 10 % der Anwesenden durchgängig laut rufen, um miteinander zu kommunizieren.

5. Vergleich des relativen Infektionsrisikos in unterschiedlichen Umgebungen

Im Folgenden wird das Infektionsrisiko für die verschiedenen Räume unter variablen Randbedingungen relativ zum als Referenzumgebung angenommenen Klassenraum grafisch dargestellt. In den nachstehenden Diagrammen ist die Anzahl der Personen über der Luftwechselrate aufgetragen, wobei das relative Infektionsrisiko entsprechend einer um die Farbe Orange erweiterten Ampel farblich angegeben ist. Um das Vergleichen verschiedener Szenarien anhand der Farben zu ermöglichen, wurden für alle Umgebungen in Abbildungen 1 und 2 dieselben Luftwechsel- und Risikoachsen gewählt. Gelb entspricht dabei einem doppelten, Rot einem mindestens sechsfachen relativen Infektionsrisiko. Die den Farbverläufen überlagerten Linien geben zur einfacheren Orientierung die Grenzen des halben, gleichen und doppelten Infektionsrisikos gegenüber der Referenzumgebung an. Es sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Visualisierungen, die basierend auf allen genannten Vereinfachungen über Gleichungen (1) und (2) berechneten Werte darstellen, nur für die jeweils exemplarisch angenommenen Raumvolumina und Aufenthaltsdauern gelten. Auf den Einfluss letztgenannter Größen wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen.

Abbildung 1 – Relatives Infektionsrisiko verschiedener Vergleichsumgebungen gegenüber Referenzumgebung durch Aerosolpartikel



Klassenräume sind wegen ihrer mitunter hohen Belegungsdichten und langen Nutzungsdauern als besonders kritisch anzusehen. Würde von einem halben Luftwechsel pro Stunde ausgegangen, der bei ungünstigen Außenbedingungen und einer unzureichend genutzten Fensterlüftung durchaus realistisch ist, ergäbe sich bei angenommener Maximalbesetzung mit 35 anwesenden Personen ein fast 12-fach so hohes Infektionsrisiko wie in der Referenzumgebung. Selbst bei einer sehr geringen Belegung von 18 Personen ist für ein relatives Risiko von 1 ein 3,3-facher Luftwechsel pro Stunde und somit ein Volumenstrom von $660 \text{ m}^3/\text{h}$ notwendig. Ein Volumenstrom in dieser Größenordnung kann ganzjährig am zuverlässigsten von einer raumlufttechnischen Anlage bereitgestellt werden. Dabei

muss das verursachte Geräusch des Geräts so gering sein, dass die Lernumgebung nicht negativ beeinflusst wird. Eine Fensterlüftung kann insbesondere im Winter nur durch die strikte Einhaltung von Lüftungsregeln einen verlässlichen Luftwechsel garantieren. Eine Messung der CO_2 -Konzentration ist in diesem Fall zur Überprüfung des Lüftungserfolgs anzuraten, da der Luftwechsel in diesem Fall von der Außentemperatur und den Windverhältnissen abhängt. Während der Lüftungsphasen treten bei geringen Außentemperaturen deutliche Einschränkungen des thermischen Komforts auf. Bei lauter Außenumgebung kann der Unterrichtsbetrieb durch das Öffnen der Fenster zusätzlich nachteilig beeinträchtigt werden.

Im Falle eines großen **Hörsaals** reicht bei Vollbesetzung ein 1,8-facher Luftwechsel pro Stunde aus, um ein relatives Infektionsrisiko von 1 zu erreichen. Auch geringere Belegungsdichten mit einem Zehntel der Maximalbesetzung werden dargestellt, um eine typische Prüfungssituation oder weniger zahlreich besuchte Veranstaltungen berücksichtigen zu können. Obwohl die flächenbezogene Personendichte nicht unähnlich der eines Klassenraums ist, steht jeder Person eine deutlich größere vertikale Luftsäule zur Verfügung. Vorlesungen können auf Basis dieser Analyse in diesen Räumen auch bei einer hohen Belegungsdichte durchgeführt werden. Sollte 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 eines MNS zu empfehlen, um eine Übertragung von Viren durch Tröpfchen zu unterbinden. Kleine Hörsäle für Seminare und ähnliche Veranstaltungen können wie Klassenräume behandelt werden.

In **Großraumbüros** machen sich die in der ASR A1.2 bemessenen Verkehrsflächen deutlich bemerkbar, da dort selbst bei der angenommenen Vollbesetzung von 33 Personen Luftwechselraten in Höhe von $1,7 \text{ h}^{-1}$ um ein relatives Risiko von 1 zu erreichen. Die im Diagramm minimal berücksichtigte Anzahl an Personen entspricht mit 11 Personen einem Drittel der möglichen Maximalbesetzung. Für diese geringfügigere Besetzung wird bei gleicher Luftwechselrate ein relatives Risiko von 0,3 erreicht. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass die Nutzung dieses Bürotyps in vielen Fällen und insbesondere bei Verwendung eines MNS möglich ist.

In der **Sporthalle** kann nur im Fall der kleinsten berechneten Besetzung von 18 Personen und einer Luftwechselrate von 6 h^{-1} ein relatives Risiko von ungefähr 1 erreicht werden. Dieser Wert liegt allerdings knapp außerhalb des Diagramms. Dieser Unterschied zu den anderen Raumtypen kommt vor allem durch die schwere körperliche Anstrengung und die hohe Sprechaktivität zustande. Wird die Halle dennoch mit einer Maximalbesetzung von

35 Sport treibenden Personen und einem Volumenstrom von $60 \text{ m}^3/\text{h}$ pro Sportler genutzt (DIN 18032-1), was einer Luftwechselrate von etwa 1 h^{-1} entspricht, wird ein fast 12-faches relatives Risiko erreicht. Sport sollte daher im Außenbereich oder nur mit deutlich reduzierter Personenzahl in Sporthallen durchgeführt werden.

6. Bewertung unterschiedlicher Aktivitäten in Klassenräumen und einem Einsatz von Schutzmaßnahmen

Im Folgenden werden charakteristische Unterrichtssituationen in Klassenräumen betrachtet und der Einfluss des Tragens von MNS sowie des Einsatzes eines Luftreinigers beleuchtet. Tabelle 4 fasst Annahmen und Randbedingungen für alle Szenarien zusammen, wobei Raumvolumen, Aufenthaltszeit und Atemvolumenstrom für einen direkten Vergleich unverändert aus Tabelle 3 übernommen wurden. Szenario (a) entspricht somit dem Klassenraum aus Abbildung 1 und spiegelt mit einer einzelnen sprechenden Person eine typische Unterrichtsstunde mit Frontal- bzw. Klassenunterricht ohne Nutzung eines MNS wider.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass durch das konsequente Tragen eines MNS während des Unterrichts gemäß Szenario (b) bei 25 anwesenden Personen die Luftwechselrate von $4,4 \text{ h}^{-1}$ auf $2,2 \text{ h}^{-1}$ reduziert werden kann. Alternativ wird bei gleichbleibender Luftwechselrate das Infektionsrisiko gesenkt, so dass nun auch bei einem mehrstündigen Unterricht eine Infektionsübertragung unwahrscheinlicher wird. Bei natürlicher Lüftung müssen für ein konstantes relatives Risiko die Fenster weniger häufig und eventuell kürzer geöffnet werden, bei maschineller Lüftung kann durch die geringere Ventilator Drehzahl eine geminderte Geräuschentwicklung erreicht werden.

Szenario (c) beschreibt das Arbeiten in Gruppen, wobei exemplarisch von neun gleichzeitig sprechenden Personen ausgegangen wird. Verglichen mit dem Frontalunterricht (a) ergibt sich für den Gruppenunterricht ohne das Tragen eines MNS ein erhöhtes Infektionsrisiko: Während sich bei

Tabelle 4 – Annahmen und typische Randbedingungen für Vergleichsumgebungen

		Klassen- raum (a)	Klassen- raum (b)	Klassen- raum (c)	Klassen- raum (d)	Klassen- raum (e)	Klassen- raum (f)
V	m^3	200					
LW	h^{-1}	bis 4					
$n_{R,max}$	-	35					
τ	h	1					
\dot{V}_A	m^3/h	0,54 (Sitzen)					
$\dot{n}_{Aerosol,Sprechaktiv}$	ml/m^3	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)	0,06 (Singen)	0,0096 (Sprechen)	0,0096 (Sprechen)
$n_{Sprechaktiv}$	-	1	1	9	alle	9	9
$\dot{n}_{Aerosol}$	ml/m^3	0,0018 (Atmen)					
PR	-	0	0,5	0	0	0,5	0,5
\dot{V}_{LR}	m^3/h	0	0	0	0	0	500

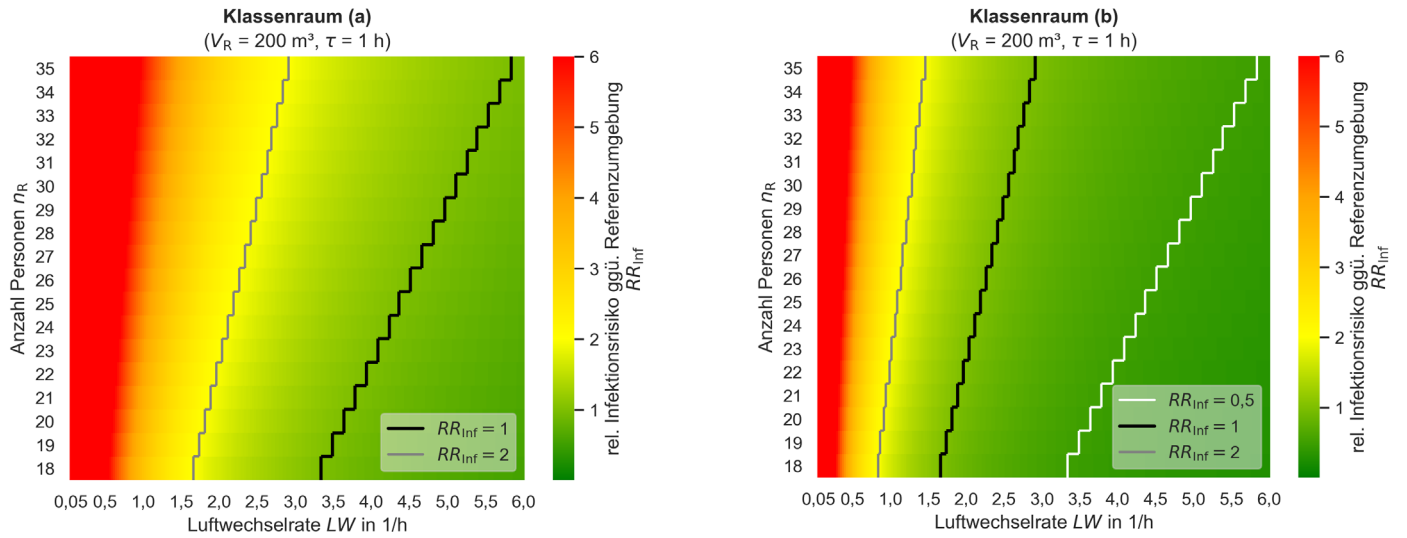
25 anwesenden Personen und dem oben angenommenen personenbezogenen Zuluftvolumenstrom von $35 m^3/h$ bereits ein etwa doppeltes relatives Infektionsrisiko ergibt, wären hierfür bei Vollbesetzung mit 35 Personen bereits 5,5 Luftwechsel pro Stunde notwendig. Bei natürlicher Lüftung müssen die Fenster in geringeren Abständen länger geöffnet werden.

Szenario (d) 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 Risiko, welches auch bei einem 6-fachen Luftwechsel pro Stunde und einer Belegung von nur 18 Personen bei ungefähr 15 liegt. Hier muss von einer Übertragung der Viren ausgegangen werden, so dass Singen in Klassenräumen nicht empfohlen werden kann. Bei geringem Luftwechsel in unbelüfteten Räumen ($0,5 h^{-1}$) ergeben sich extrem hohe relative Risiken von 180 für 18 Personen und 346 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.

In Szenario (e) wird wie in Szenario (c) eine Gruppenarbeit im Klassenraum betrachtet, bei der neun Personen aktiv reden. Allerdings wird davon ausgegangen, dass alle anwesenden Personen einen MNS 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 einem Luftwechsel von etwa 4,4 pro Stunde, wie er im Referenzszenario definiert ist, ließe sich somit ein relatives Risiko von ungefähr 1,1 erreichen. Das Tragen von MNS ist daher bei einer Gruppenarbeitsphase immer empfehlenswert.

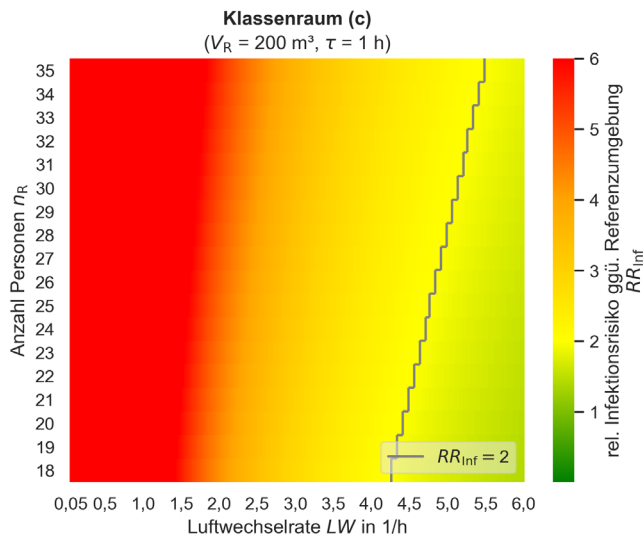
In Szenario (f) wird wie in Szenario (e) ebenfalls eine Gruppenarbeit mit neun sprechaktiven Personen betrachtet, bei der zusätzlich zum MNS ein Luftreiniger genutzt wird. Für den Luftreiniger wird idealisiert angenommen, dass ein Luftvolumenstrom von $500 m^3/h$ vollständig von Aerosolpartikeln befreit 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-facher Luftwechsel pro Stunde ausreicht, um auch bei einer Vollbesetzung mit 35 Personen ein relatives Risiko von 1 zu erzielen.

Abbildung 2 – Einfluss der Parameter auf relatives Infektionsrisiko im Klassenraum gegenüber Referenzsituation durch Aerosolpartikel

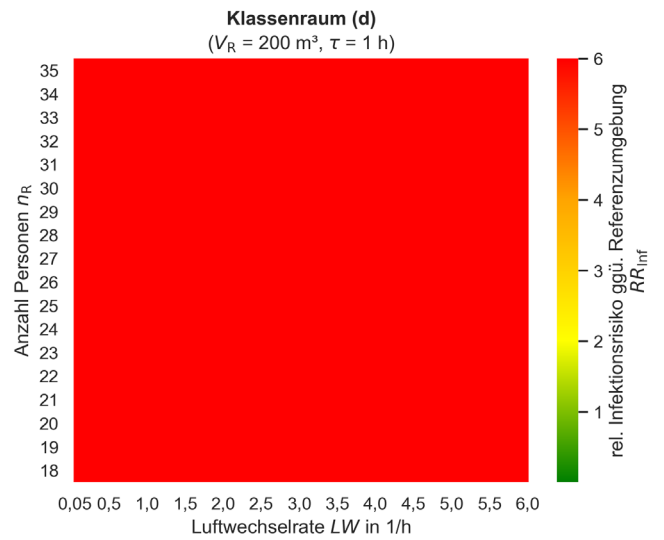


a. 1 Person sprechaktiv, ohne MNS, ohne Luftreiniger

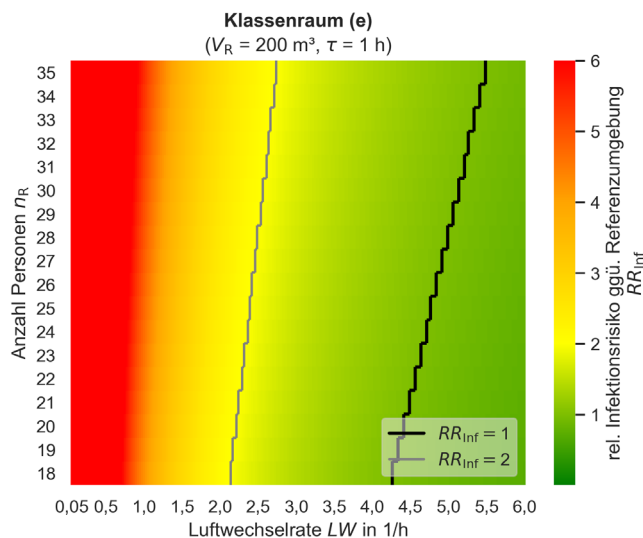
b. 1 Person sprechaktiv, mit MNS, ohne Luftreiniger



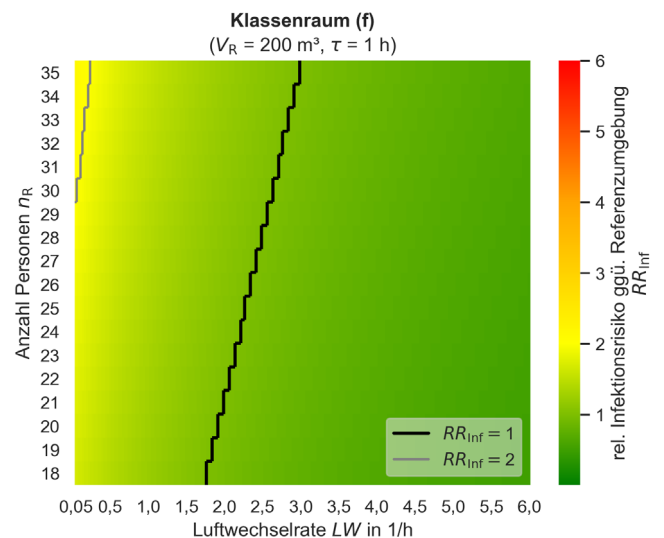
c. 9 Personen sprechaktiv (Gruppenarbeit), ohne MNS, ohne Luftreiniger



d. Alle Personen sprechaktiv (Singen), ohne MNS, ohne Luftreiniger



e. 9 Personen sprechaktiv (Gruppenarbeit), mit MNS, ohne Luftreiniger



f. 9 Personen sprechaktiv (Gruppenarbeit), mit MNS, mit Luftreiniger (500 m³/h)

7. Die CO₂-Konzentration als Indikator für die Raumlüftung

Im Folgenden werden maximale CO₂-Konzentrationen in der Raumlüftung für einen gegebenen Wert des relativen Infektionsrisikos als Indikator für notwendige Lüftungsmaßnahmen angegeben. Auch hier wird zunächst vereinfachend ein stationärer Fall und anschließend das Stoß- oder Intervalllüften genauer betrachtet. Das betrachtete Szenario entspricht im Folgenden wieder einem Klassenraum mit den Angaben aus Tabelle 5.

Tabelle 5 – Randbedingungen des betrachteten Raums für eine CO₂-Grenzkonzentrationsberechnung bei gegebenen relativen Risiko

Klassenraum		
V	m ³	200
\dot{V}_A	m ³ /h	0,54 (Sitzen)
$\dot{m}_{CO_2,Produktion}$	kg/Tag	1 (Sitzen)
$\dot{n}_{Aerosol,Aktiv}$	ml/m ³	0,0096 (Sprechen)
$n_{R,Aktiv}$	-	1
$\dot{n}_{Aerosol,Passiv}$	ml/m ³	0,0018 (Atmen)

Im stationären Fall entspricht der abgeführte CO₂-Massenstrom der Summe des im Raum freigesetzten CO₂-Massenstroms durch die anwesenden Personen und dem CO₂-Massenstrom der Zuluft entsprechend Gleichung (3). Für eine leichte Tätigkeit im Sitzen kann mit dem entsprechenden Atemvolumenstrom von 0,54 m³/h aus Tabelle 2, 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 $\dot{m}_{CO_2,Produktion}$ auf ungefähr 1 kg/Tag abgeschätzt werden.

$$(3) \quad \dot{m}_{CO_2,Abluft} = \dot{m}_{CO_2,Zuluft} + \dot{m}_{CO_2,Produktion} \cdot n_R$$

Die CO₂-Gaskonzentration in der Luft σ_{CO_2} kann nach Gleichung (4) aus dem Volumenanteil des Gasanteils bezogen auf das gesamte Gasvolumen berechnet werden.

$$(4) \quad \sigma_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{Luft}} \cdot 10^6 \text{ ppm}$$

Mit Hilfe des idealen Gasgesetzes kann nach Gleichung (5) der direkte Zusammenhang zwischen Massenstrom und σ_{CO_2} im Volumenstrom hergestellt werden.

$$\dot{m}_{CO_2} = \frac{\sigma_{CO_2}}{10^6 \text{ ppm}} \cdot \frac{\dot{V}_{Luft} \cdot p \cdot M_{CO_2}}{R \cdot T} \quad (5)$$

Somit lässt sich die Gleichgewichtskonzentration in der Abluft nach Gleichung (6) beschreiben.

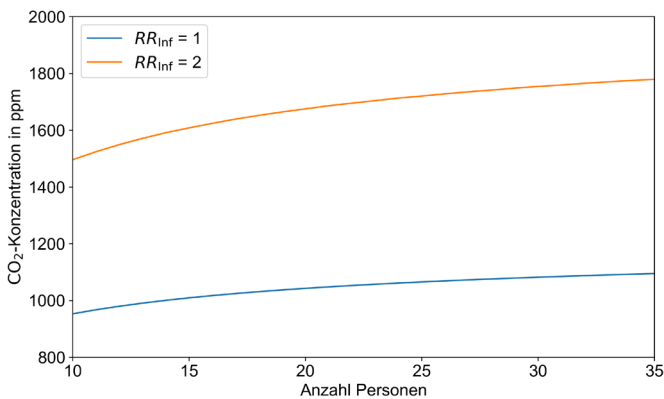
$$\sigma_{CO_2,Abluft} = \sigma_{CO_2,Zuluft} + \frac{\dot{m}_{CO_2,Produktion}}{\dot{V}_{Zuluft}} \cdot \frac{n_R \cdot R \cdot T}{p \cdot M_{CO_2}} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad (6)$$

Wird nun in Gleichung (1) das relative Risiko RR_{Inf} als konstant definiert und für den Zuluftvolumenstrom des Raums $V \cdot LW$ der Zusammenhang nach Gleichung (7) eingesetzt, kann die CO₂-Abluftkonzentration als Funktion der Anzahl der anwesenden Personen und in Abhängigkeit der Parameter der betrachteten Umgebung berechnet werden.

$$V \cdot LW = \dot{V}_{Zuluft} = \frac{\dot{m}_{CO_2,Produktion}}{(\sigma_{CO_2,Abluft} - \sigma_{CO_2,Zuluft})} \cdot \frac{n_R \cdot R \cdot T}{p \cdot M_{CO_2}} \cdot 10^6 \text{ ppm} \quad (7)$$

Abbildung 3 zeigt für ein relatives Risiko von 1 und 2 die entsprechenden Grenzwerte der CO₂-Abluftkonzentration in einem Klassenraum mit einer sprechaktiven Person wie in Fall a) aus Tabelle 4 beschrieben. Es wird angenommen, dass die CO₂-Konzentration der Zuluft $\sigma_{CO_2,Zuluft} = 410 \text{ ppm}$ (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 960 ppm und bei 35 Personen ungefähr 1090 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 1500 und 1770 ppm, welche als hygienisch auffällig eingestuft werden.

Abbildung 3 – CO₂-Abluftkonzentration in einem Klassenraum in Abhängigkeit der Personenanzahl bei einem relativen Risiko von 1 (blau) und 2 (orange)



8. Die CO₂-Konzentration als Indikator für die Raumlüftung – Stoß- und Querlüftung (instationär)

Im Folgenden werden die Aerosolpartikelbelastung sowie die damit verbundene CO₂-Konzentration der Raumluft unter Berücksichtigung des Rauminvolumens und von Stoß- bzw. Intervalllüftungsphasen betrachtet. In diesem Fall können sowohl die Aufkonzentration von Aerosolpartikeln in der Raumluft als auch eine zeitlich variable Lüftung oder Reinigung der Luft erfasst 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 instationäres Referenzszenario wird wieder das in Tabelle 1 beschriebene, maschinell belüftete Klassenzimmer betrachtet. 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 das maschinell belüftete Referenzszenario und das Vergleichsszenario mit Intervallfensterlüftung hier nicht mehr stationär, sondern instationär durchgeführt werden. 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 (Erhart et al. 2015). Es wurde die von Erhart et al. ermittelte Luftwechselrate für die vollständige Öffnung des Oberlichts und des Drehflügel Fensters 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 werden. Das Intervall, in dem die regelmäßige Fensterlüftung vorgenommen wird, wird auf 20 Minuten für eine Dauer von 5 Minuten festgelegt. Diese Lüftungsstrategie entspricht der Empfehlung des UBA aus der Handreichung „Lüften in Schulen“ für die Wintermonate (alle 20 Minuten lüften für 3 bis 5 Minuten) (Umweltbundesamt 2020b). Sollte eine Luftwechselrate von 6 h⁻¹ in der Fensterlüftungsphase nicht erreicht werden, da die Temperaturdifferenz zwischen Außen- und Innenraum zu gering ist oder die Fenster nicht ausreichend geöffnet werden können, ist eine längere Lüftungsphase vorzusehen.

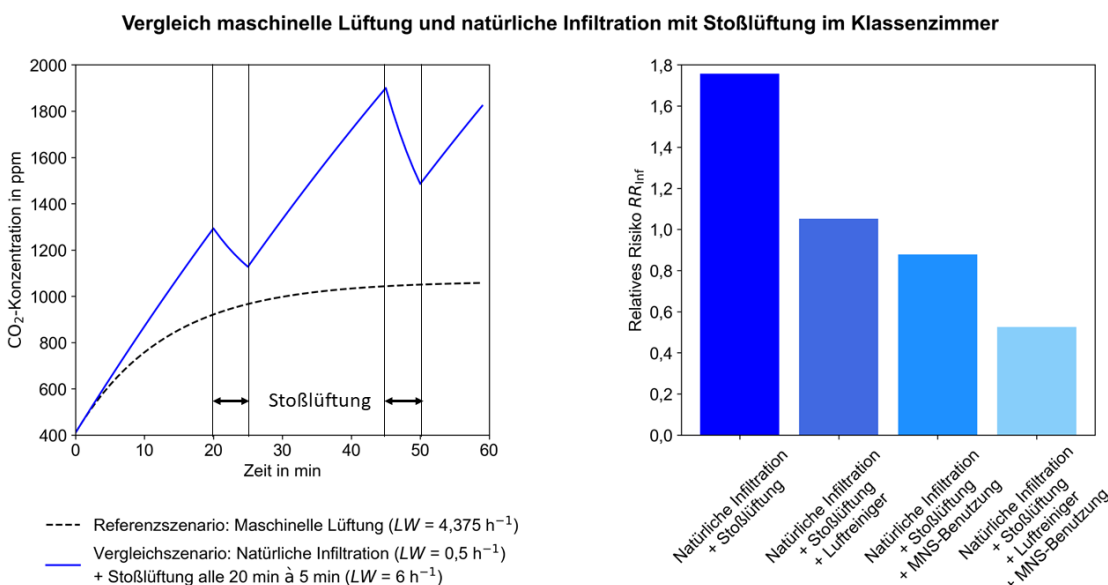
Die Verläufe der CO₂-Konzentration des instationären Referenzszenarios mit kontinuierlicher maschineller Lüftung sowie des Szenarios mit Intervallfensterlüftung sind auf der linken Seite von Abbildung 4 aufgetragen. Für den instationären Referenzfall wird nach einer Stunde eine CO₂-Konzentration von 1097 ppm erreicht. Die CO₂-Konzentration für das Szenario mit Intervalllüftung zeigt zu Beginn einen stärkeren Anstieg als das instationäre Referenzszenario, was durch den verringerten Luftwechsel verursacht wird. Die Stoßlüftung führt während dieses Vorgangs zu einer deutlichen Reduktion der CO₂-Konzentration. Insgesamt stellt sich bei Intervalllüftung ein charakteristisches „Sägezahn-Profil“ des CO₂-Konzentrationsverlaufes ein. In diesem Szenario wird eine maximale CO₂-Konzentration von 1900 ppm erreicht. Das relative Risiko im Vergleich zum instationären Szenario mit maschineller Lüftung beträgt hier 1,76.

Für die Risikobetrachtung wird das Szenario der Intervalllüftung erweitert um ein Szenario mit einem Luftreiniger im Raum, um ein Szenario, in dem alle Personen im Raum einen MNS tragen, sowie um ein Szenario, in dem beides vorliegt.

Für den Luftreiniger wird wieder angenommen, dass dieser 500 m³/h vollständig von Aerosolpartikeln befreite Raumluft bereitstellt. Der MNS wird 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 CO₂-Konzentration haben, sodass die CO₂-Konzentrationsverläufe dieser Szenarien dem des Intervalllüftungsszenarios entsprechen. Grundsätzlich ist zu beachten, dass sich bei dem Einsatz eines Luftreinigers ein von der Reinigungsleistung abhängiges Verhältnis zwischen dem relativen Risiko und der CO₂-Konzentration ergibt. Die CO₂-Konzentration muss daher in diesen Fällen gesondert bewertet werden. Hohe CO₂-Konzentration führen dabei allerdings auch bei der Nutzung eines Luftreinigers zu deutlichen Beeinträchtigungen der Personen.

Die aus diesen Szenarien resultierenden relativen Risiken bezogen auf den instationären Referenzfall sind in dem Balkendiagramm auf der rechten Seite von Abbildung 4 dargestellt. Wie bereits erwähnt wurde das Intervalllüftungsszenario so ausgelegt, dass der Empfehlung des UBA für Lüften entspricht. Durch den Einsatz eines Luftreinigers kann das relative Risiko auf 1,05 abgesenkt werden. Die

Abbildung 4 – Vergleich der CO₂-Konzentrationen für das Referenzszenario und das Intervalllüftungsszenario (LW = 6 h⁻¹) bei instationärer Betrachtung (links); Vergleich der relativen Risiken bei instationärer Betrachtung (rechts)



Benutzung von MNS führt zu einer Reduktion des relativen Risikos um 50 % in beiden betrachteten Fällen.

Beginnt nach 60 Minuten eine zweite Unterrichtseinheit, werden deutlich höhere CO₂-Konzentrationen erreicht, da nicht mehr bei einer Außenluftkonzentration von 410 ppm im Raum initialisiert werden kann. Diese einfache Analyse macht deutlich, dass eine ausreichende Lüftung über gekippte Fenster sehr aufwendig ist.

In einem zweiten Vergleich wird erneut der Fall des Klassenzimmers mit natürlicher Lüftung in Kombination mit regelmäßiger Stoßlüftung (Intervalllüftung) untersucht. Die natürliche Infiltration wird wie zuvor in Form eines Luftwechsels von 0,5 h⁻¹ berücksichtigt. Für die Stoßlüftung wird allerdings ein Luftwechsel von 20 h⁻¹ sowie eine Dauer von 5 Minuten angenommen. 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).

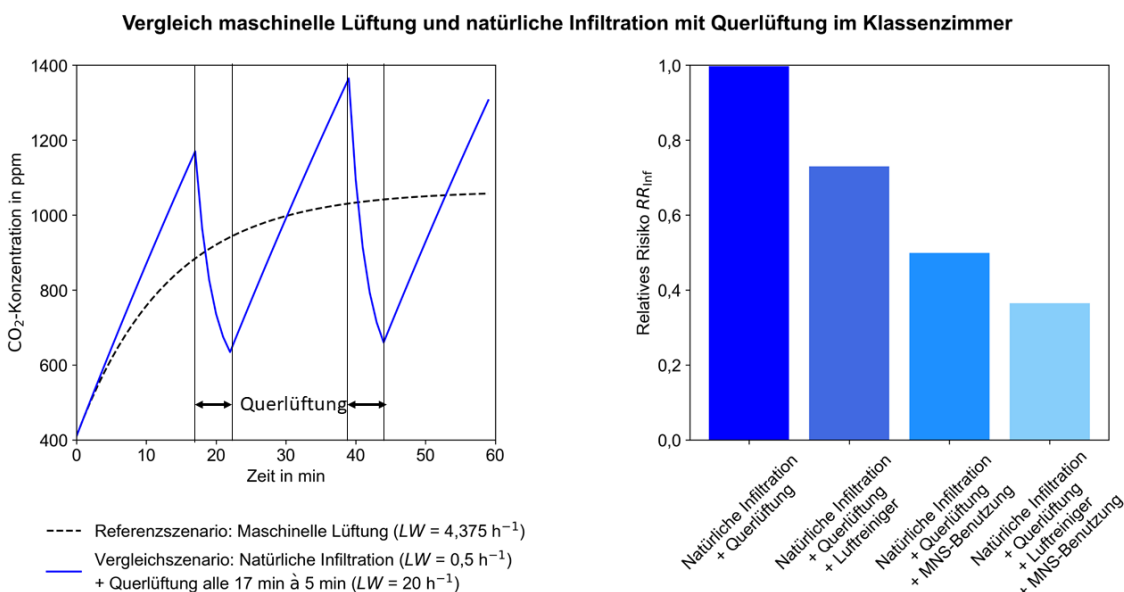
Das Intervall, in dem die regelmäßige Querlüftung vorgenommen wird, wird iterativ so bestimmt, dass nach einer Dauer von einer Stunde im Vergleich zum instationären Referenzszenario ein relatives

Risiko von 1 erreicht wird. Für diesen Fall ist eine Stoßlüftung alle 17 Minuten notwendig. Diese Lüftungsstrategie ist ebenfalls vergleichbar mit der Empfehlung des UBA aus der Handreichung „Lüften in Schulen“ für die Wintermonate (alle 20 Minuten Lüften für 3–5 Minuten) (Umweltbundesamt 2020c). Nach der Lüftungsphase sollte sich eine CO₂-Konzentration von 600 bis 650 ppm einstellen, um ein relatives Risiko von 1 zu erreichen.

Die Verläufe der CO₂-Konzentration des instationären Referenzszenarios, sowie des Szenarios mit Intervalllüftung ist auf der linken Seite von Abbildung 5 aufgetragen. Für den instationären Referenzfall wird nach einer Stunde eine CO₂-Konzentration von 1097 ppm erreicht. Die CO₂-Konzentration für das Intervalllüftungs-Szenario zeigt zu Beginn einen stärkeren Anstieg als das instationäre Referenzszenario, was durch den verringerten Luftwechsel verursacht wird. Die Stoßlüftung führt während dieses Vorgangs zu einer deutlichen Reduktion der CO₂-Konzentration. Insgesamt führt die Intervalllüftung zu einem charakteristischen „Sägezahn-Profil“ des CO₂-Konzentrations-Verlaufes. In diesem Szenario wird eine maximale CO₂-Konzentration von 1365 ppm erreicht.

Für die Risikobetrachtung wird das Szenario der Intervalllüftung wie beim ersten Vergleich mit der Stoßlüftung um ein Szenario mit einem Luftreiniger im Raum, um ein Szenario in dem alle Personen im Raum einen MNS tragen sowie um ein Szenario in dem beides vorliegt, erweitert. Für den Luftreiniger wird angenommen, dass dieser einen effektiven Frischluftvolumenstrom von 500 m³/h liefert. Der MNS wird mit einer Partikelrückhalterate *PR* von 50 % bezogen auf die ausgeatmeten Aerosolpartikel angenommen. Auch hier ist anzumerken, dass diese Maßnahmen keinen Einfluss auf die CO₂-Konzentration haben, sodass die CO₂-Konzentrationsverläufe dieser Szenarien dem des Intervalllüftungsszenarios entspricht. Die aus diesen Szenarien resultierenden relativen Risiken bezogen auf den instationären Referenzfall sind in dem Balkendiagramm auf der rechten Seite von Abbildung 5 dargestellt. Wie bereits erwähnt, wurde das Intervalllüftungsszenario so ausgelegt, dass ein relatives Risiko von 1 erreicht wird. Durch die Installation eines Luftreinigers kann das relative Risiko auf 0,73 abgesenkt werden. Die Benutzung von MNS führt zu einer Reduktion des relativen Risikos um 50 % in beiden betrachteten Fällen.

Abbildung 5 – Vergleich der CO₂-Konzentrationen für das Referenzszenario und das Intervalllüftungsszenario ($LW = 20 \text{ h}^{-1}$) bei instationärer Betrachtung (links); Vergleich der relativen Risiken bei instationärer Betrachtung (rechts)



9. Zusammenfassung

Auf Basis einer Literaturstudie sowie eines vereinfachten Berechnungsansatzes für die Bilanzierung eines Raums wurde ein Verfahren zur Ermittlung eines relativen Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren 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 Referenzumgebung 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 Referenzumgebung nach dem heutigen Stand des Wissens Infektionen über virentragende Aerosolpartikel nur beschränkt ausbreiten können.

Klassenräume sollten bei einer Sanierung oder im Neubau zusätzlich zu offenbaren Fenstern prinzipiell mit einer ausreichend bemessenen maschinellen Lüftung ausgestattet werden. Durch diese raumlufttechnischen Anlagen kann sichergestellt werden, dass die Konzentrationen von Aerosolpartikeln und alle 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 von CO₂-Messtechnik beziehungsweise Lüftungsampeln überprüft wird. Das Tragen eines MNS wird insbesondere bei Gruppenarbeiten dringend empfohlen, da durch die höhere 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 zusätzlich gesenkt werden kann. Allerdings ist ein Luftreiniger 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 einem MNS 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.

Danksagung

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

Wir danken ⁵Alfred Trukenmüller und ⁶Christian Scherer für ihre vielen 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.

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

Buonanno, G.; 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: 10.1016/j.envint.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.

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

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

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 15251, 2012-12: Eingangsparemeter für

das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden – Raumluftqualität, 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.

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.

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).

Leffler, Christopher T.; Ing, Edsel B.; 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. Update August 4, 2020.

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: medRxiv : the preprint server for health sciences, 2020.09.22.20199489. DOI: 10.1101/2020.09.22.20199489.

Leung, Nancy H. L.; Chu, Daniel K. W.; Shiu, Eunice Y. C.; Chan, Kwok-Hung; McDevitt, James J.; Hau, Benjamin 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.

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.

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.

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.

Müller, Dirk; Rewitz, Kai; Derwein, Dennis; Burgholz, Tobias Maria (2020): Vereinfachte Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen. DOI: 10.18154/RWTH-2020-08332.

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.

Robert Koch-Institut (Hg.) (2020a): 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.) (2020b): 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.

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

Umweltbundesamt (2008): Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft. Mitteilungen der Ad-hoc-Arbeitsgruppe Innenraumrichtwerte der Innenraumlufthygiene-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_.pdf, zuletzt geprüft am 22.10.2020.

Umweltbundesamt (Hg.) (2020c): Lüften in Schulen. Empfehlungen des Umweltbundesamtes zu

Luftaustausch und effizientem Lüften zur Reduzierung des Infektionsrisikos durch virushaltige Aerosole in Schulen. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2546/dokumente/umweltbundesamt_lueften_in_schulen_.pdf, zuletzt geprüft am 16.10.2020.

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.

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

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.