

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Gesundheit



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Forschungsbericht

Nahfeldexposition respiratorischer Partikel anhand statistischer Auswertung um eine emittierende Person im Innenraum

Ruben Makris*¹, Eugen Lichtner¹ und Martin Kriegel¹

¹ Hermann-Rietschel-Institut, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany

* *r.makris@tu-berlin.de*

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-12773>

ABSTRACT

Luft gilt als ein relevanter Übertragungsweg für SARS-CoV-2 [1]. Die Viren werden dabei auf respiratorischen Aerosolpartikeln transportiert. Diese Untersuchung zeigt den Zusammenhang zwischen der lokalen Konzentration von erregertagenden Aerosolpartikeln und dem radialen Abstand zu einer emittierenden Person. Zu diesem Zweck wurden mehrere numerische Untersuchungen (CFD) statistisch ausgewertet und ein Validierungsexperiment durchgeführt. Die Simulationen beinhalten verschiedene Positionen der emittierenden Person bei unterschiedlichen Lüftungsstrategien. Durch die statistische Auswertung der räumlichen Aerosolpartikelverteilung wurde die mögliche Exposition gegenüber erhöhten Aerosolpartikelkonzentrationen ermittelt.

Risikobewertungsmodelle gehen in der Regel von einer idealen Mischlüftung aus,

bei der die Partikelkonzentration in jedem Raumpunkt gleich groß ist. Diese Studie zeigt, wie groß die lokalen Abweichungen von dieser idealisierten Annahme sein können und zeigt einen ersten Zusammenhang zwischen Höhe der Konzentration und des Abstands vom Emitter. Im Vergleich zur idealen Durchmischung zeigt sich bei Mischlüftung in einem Abstand von 1,5 m eine 25 prozentige Wahrscheinlichkeit, die doppelte Menge an Aerosolpartikeln einzuatmen als im Fernfeld. Bei diesem Abstand besteht ein Risiko von 5 %, mehr als dem 5-fachen des angenommenen Wertes ausgesetzt zu sein. Für die Mischlüftungsfälle liegt die Wahrscheinlichkeit in einem Abstand von 1,5 m mehr Aerosolpartikel einzuatmen, als bei der idealen Mischlüftung angenommen, bei 55 %. Bei den Quelllüftungsfällen beträgt sie hingegen weniger als 25 %. Die experimentell ermittelten Messwerte stimmen gut mit den Simulationsergebnissen überein.

EINLEITUNG

Während der SARS-CoV-2-Pandemie wurden Präventivmaßnahmen eingeführt, wie die Einhaltung eines räumlichen Abstands von 1,5 m zu anderen Personen. Der vorgeschlagene Abstand basiert allerdings auf der Tröpfchenübertragung. Mittlerweile hat sich die Übertragbarkeit des Virus über Aerosolpartikel als dominant herausgestellt [1]. Viren können an Aerosolpartikeln anhaftend Wege von mehreren Metern zurücklegen und sich stundenlang in der Luft aufhalten. Ihre Ausbreitung wird von der Luftströmung dominiert. So entstehen Gebiete, die eine höhere Erregerlast als andere haben [2].

Die Untersuchung soll zum Einen zeigen, dass das vermehrte Infektionsgeschehen im Nahbereich der infektiösen Person als Ursache die erhöhten Aerosolpartikelkonzentrationen in diesem Bereich hat und zum Anderen einen ersten funktionellen Zusammenhang zwischen Abstand zur infektiösen Person und der Aerosolpartikelkonzentrationen aufzeigen.

Modelle, welche das Infektionsrisiko vorhersagen, gehen von einer homogenen Verteilung der Aerosolpartikel über das gesamte Raumvolumen aus. Diese analytische homogene Konzentration ($c_{ex,analyt}$) lässt sich bei bekannter Emissionsquellstärke mittels des Zu-/Abluftvolumenstroms (beide sind gleich groß: $\dot{V}_{in} = \dot{V}_{ex}$), und der Massen- bzw. Stoffbilanz berechnen (siehe Gleichung 1). Dabei ist c_{in} die Erregerkonzentration in der Zuluft (in den Untersuchungen gleich 0), \dot{V}_{in} der Zuluftvolumenstrom, \dot{V}_{breath} der Atemvolumenstrom der erregeremittierenden Person, $c_{pathogen}$ die Konzentration des Erregers im Atemvolumenstrom und \dot{V}_{ex} der Abluftvolumenstrom.

$$c_{ex,analyt} = \frac{c_{in} \cdot \dot{V}_{in} + c_{pathogen} \cdot \dot{V}_{breath}}{\dot{V}_{ex}} \quad (1)$$

Es wird eine örtliche Bewertungsgröße entsprechend [3] eingeführt, um die lokale Schadstoffabfuhr (hier Virenabfuhr) zu beschreiben.

Die lokale Lüftungswirksamkeit (local air quality index) in einem Punkt ε_p^c beschreibt die Fähigkeit des Lüftungssystems, Schadstoffe in diesem Punkt abzuführen. Die Definition kann Gleichung 2 entnommen werden. Die Konzentration in der Zuluft wird hier vernachlässigt, da diese in den Untersuchungen gleich 0 ist.

$$\varepsilon_p^c = \frac{\text{Schadstoffkonzentration in der Abluft } c_{ex}}{\text{Schadstoffkonzentration an einem Punkt } c_p} \quad (2)$$

Der Kehrwert der Lüftungswirksamkeit in Gleichung 3 beschreibt den Stoffbelastungsgrad (VDI 2262 Blatt 3:2011-06) im übertragenen Sinne hier der Virenbelastungsgrad. Wird für c_{ex} die bilanzielle Konzentration $c_{ex,analyt}$ angenommen, so stellt der Virenbelastungsgrad das Verhältnis zur idealen Mischlüftung dar.

$$\mu_p^c = \frac{1}{\varepsilon_p^c} = \frac{c_p}{c_{ex}} \quad (3)$$

Bei idealer Mischlüftung nimmt der Virenbelastungsgrad den Wert 1 an. Werte unter oder über 1 bedeuten, dass die örtliche Virenbelastung niedriger oder höher als bei vollständiger Durchmischung ist.

METHODEN

In den bereits publizierten Untersuchungen von Lichtner und Kriegel in [4] wurde die Wirksamkeit von unterschiedlichen

Lüftungsmaßnahmen in einem Klassenzimmer hinsichtlich der Senkung der Erreger-Exposition mittels numerischer Strömungssimulation (CFD) untersucht. Es wurde ein Klassenraum simuliert, in dem die Position eines infizierten Schülers in 5 Fällen variiert (in Abbildung 1 rot hervorgehoben). Bei dem nachgebildeten Raum handelt es sich um einen Klassenraum mit typischen Dimensionen (8.57 m x 7 m x 3 m). In dem Raum befinden sich eine Lehrkraft und entweder 24 oder 12 (halbe Belegung) Schüler*innen. Der Luftvolumenstrom beträgt in sämtlichen Fällen $1000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, was einer Luftwechselrate von $5,56 \text{ h}^{-1}$ entspricht. Die anfängliche Erregerkonzentration im Raum und in der Zuluft ist null. Eine Person atmet erregerbeladene luftgetragene Partikel aus.

Die Luftzufuhr erfolgt entweder über vier gleichmäßig verteilte Drallluftdurchlässe an der Decke oder über ein Lüftungsgerät im hinteren Teil des Klassenzimmers. In den Fällen mit einem mobilen Umluftfiltergerät (Abbildung 2) wird keine Frischluft zugeführt, Partikel werden als Näherung zu 100 % gefiltert, was etwa einem HEPA-H-14-Filter entspricht. Abbildung 3 zeigt den Quellluftfall DV-B-2.

Eine detaillierte Beschreibung der durchgeführten Simulationen ist in [4] veröffentlicht.

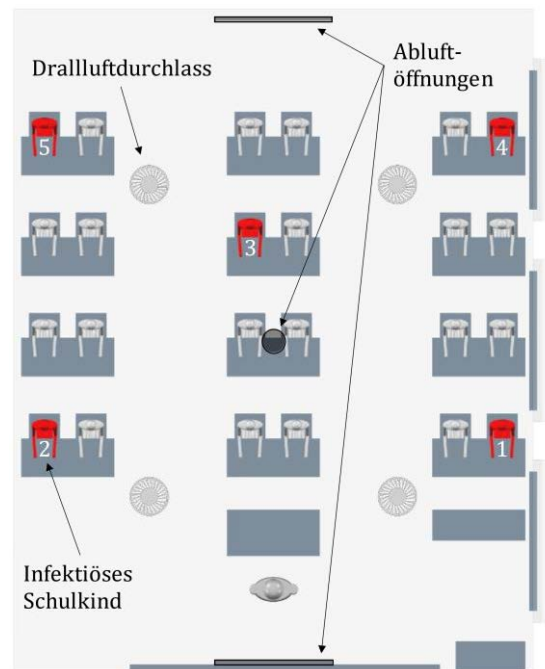


Abbildung 1: Klassenzimmer, Fall MV-A-1, Positionen der emittierenden Person sind rot hervorgehoben

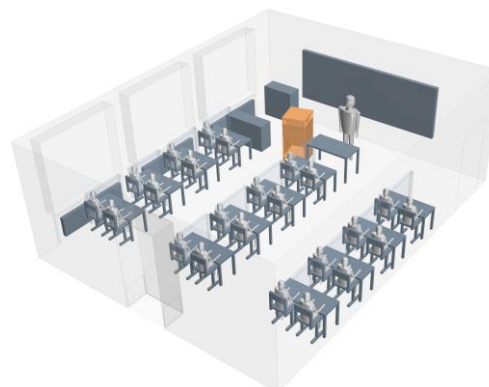


Abbildung 2: Klassenzimmer, Fall MV-B-1b

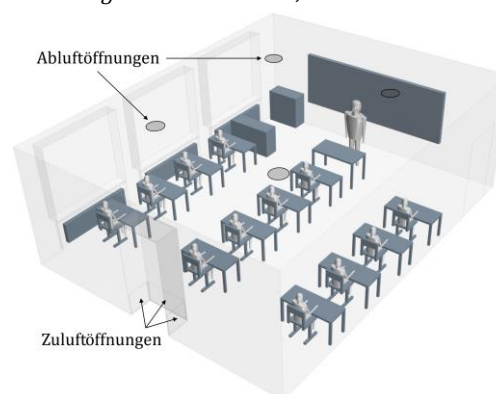


Abbildung 3: Klassenzimmer, Fall DV-B-2

Tabelle 1. Fälle

Fall	Zuluft	Abluft	Umluftanteil	Trennwände	Belegung
MV-A-1	Decke, 4x	Decke, 3x	0 %	nein	voll
MV-B-1a	Luftreini-ger, oben	Luftreini-ger, unten	100 %	nein	voll
MV-B-1b	Luftreini-ger, oben	Luftreini-ger, unten	100 %	ja	voll
DV-A-1	Lüf-tungs-gerät, unten	Lüf-tungs-gerät, oben	0 %	nein	voll
DV-A-2	Lüf-tungs-gerät, unten	Lüf-tungs-gerät, oben	0 %	nein	halb
DV-B-1	Lüf-tungs-gerät, unten	Decke, 4x	0 %	nein	voll
DV-B-2	Lüf-tungs-gerät, unten	Decke, 4x	0 %	nein	halb

Die Mischlüftungsfälle, inklusive den Fällen mit Umluftfiltergerät, wiesen allesamt eine ähnliche mittlere Lüftungswirksamkeit auf. Bei den Quelläuftungsfällen war diese signifikant höher. Die Ergebnisse in [4] haben zudem gezeigt, dass die Konzentrationsverteilung im Raum und damit die potentiell eingeatmete Dosis sehr unterschiedlich ausfällt. Ferner traten erhöhte Erregerkonzentrationen häufig in der Nähe der infektiösen Person auf.

Die gewonnenen Ergebnisse aus den Strömungssimulationen in [4] wurden für eine statistische Auswertung verwendet, um diese Aussagen zu quantifizieren. Dabei wurden die auftretenden Wahrscheinlichkeiten von Erregerkonzentrationen in definierten Abständen zum Emittenten ermittelt. Es wurde die horizontale Schnittebene betrachtet, welche sich auf Höhe des Mundes befindet. Auf dieser Ebene wird ein

Raster definiert. Die Punkte des Rasters dienen als Stichproben für die Erregerkonzentration. Das Raster beinhaltet 50 Punkte pro m in beide Raumrichtungen. Die Erregerkonzentrationen an den Punkten wurden durch Interpolation der Werte auf dem Berechnungsgitter der CFD-Simulation bestimmt.

Es wurden 10 cm breite Kreisinge mit zunehmendem Abstand zur emittierenden Person definiert, in welchen die Häufigkeit von auftretenden Konzentrationen ausgewertet wurde. Der Winkel der Punkte zum Emittenten wird in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Für die statistische Auswertung wurden jeweils die Mischlüftungsfälle und die Quelläuftungsfälle mit sämtlichen Emitter-Positionen zusammengefasst.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Häufigkeit der sich einstellenden Erregerkonzentrationen in Abhängigkeit zur Distanz zum Emittenten. Die lokale Erregerkonzentration c_p wird mit der analytischen Erregerkonzentration der Abluft $c_{ex,analyt}$ normiert, was den Virenbelastungsgrad beschreibt.

Der hellgrau hinterlegte Bereich zeigt die Werte zwischen dem 5. und 95. Perzentil. Die niedrigsten und höchsten 5 % der Werte sind in dieser Abbildung folglich nicht abgebildet. Der dunkelgrau hinterlegte Bereich beinhaltet Werte zwischen dem 25. und 75. Perzentil, also das untere und obere Quartil, in welchen 50 % der gesamten Werte liegen. Die schwarze Linie beschreibt den Medianwert. Die experimentellen Werte stammen aus einem Vali-

dierungsversuch mit ähnlichen Raumdimensionen und Randbedingungen (Mischlüftungsfall). Sie wurden durch Partikelzählungen ermittelt und zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Simulationen. Sie liegen fast gänzlich im unteren und oberen Quartil.

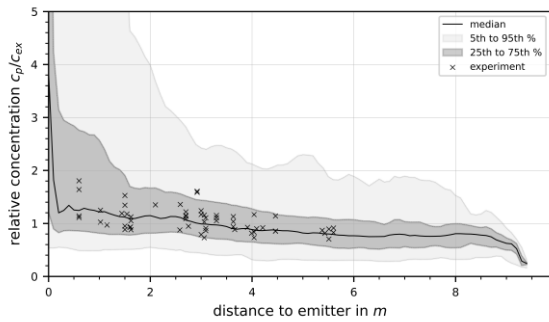


Abbildung 4: Häufigkeiten des Stoffbelastungsgrades bezogen auf den Abstand zum Emittenten der Mischlüftungsfälle mit experimentellen Werten

Abbildung 5 zeigt den Verlauf der Quelllüftungsfälle. Hierbei ist der deutlich flachere Verlauf der Medianwerte auffällig. Auch das untere und obere Quartil (dunkelgrau hinterlegt) liegen bereits ab 1 m Entfernung unter 1.

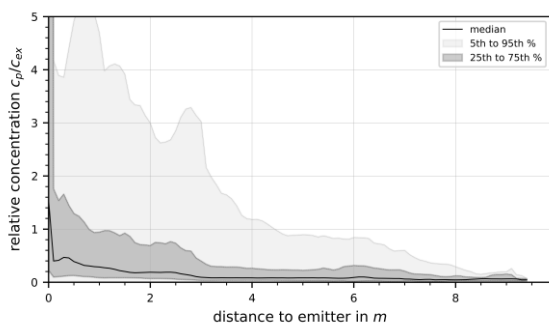


Abbildung 5: Häufigkeiten des Stoffbelastungsgrades bezogen auf den Abstand zum Emittenten der Quelllüftungsfälle

Abbildung 6 zeigt in den entsprechenden Abständen zum Emittenten die Wahrscheinlichkeiten für eine schlechtere Luftqualität als bei idealer Mischlüftung, also $c_p/c_{ex} > 1$. Es wird der Verlauf für die Misch- und Quelllüftungsfälle dargestellt. Für Mischlüftung wurde ein linearer und

für Quelllüftung ein exponentieller Zusammenhang angenommen. In einem Abstand von 1,5 m beträgt das Risiko ca. 55 %, mehr Aerosolpartikel einzuatmen als dies entsprechend analytischer Bilanz zu erwarten wäre, während das Risiko bei den Quelllüftungsfällen bei ca. 25 % liegt. Bei einer Entfernung von 4 m liegt das Risiko für Mischlüftung bei 40 % und für Quelllüftung bei unter 10 %.

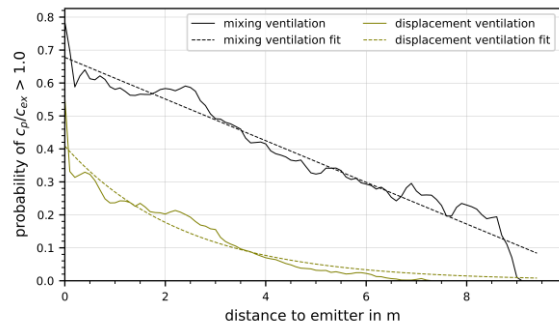


Abbildung 6: Wahrscheinlichkeit für eine schlechtere Luftqualität als bei idealer Mischlüftung

Abbildung 7 und Abbildung 8 stellen für die beiden Lüftungsarten verschiedene Wahrscheinlichkeiten dar, entsprechenden Mindestkonzentrationen ausgesetzt zu sein. In 1,5 m Abstand zum Emittenten besteht für Mischlüftung ein Risiko von 25 % der doppelten Erregerkonzentration oder mehr ($\mu_p^c \geq 2$) im Vergleich zum idealen Mischlüftungsfall ausgesetzt zu sein. Das Risiko für die 3-fache Konzentration beträgt immerhin noch 10 %. Mit einem 5 prozentigen Risiko wären die betroffenen Personen einer rund fünf Mal so hohen Erregerkonzentration ausgesetzt, als dies entsprechend der theoretischen Bilanz zu erwarten wäre. Im Gegensatz dazu liegt bei den Quelllüftungsfällen die Wahrscheinlichkeit für einen Virenbelastungsgrad von 1 oder kleiner bereits in 1 m Entfernung bei 75 %.

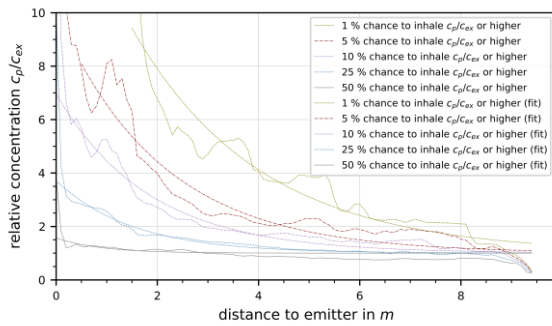


Abbildung 7: Unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten, mindestens c_p/c_{ex} in entsprechender Entfernung ausgesetzt zu sein (Mischlüftungsfälle)

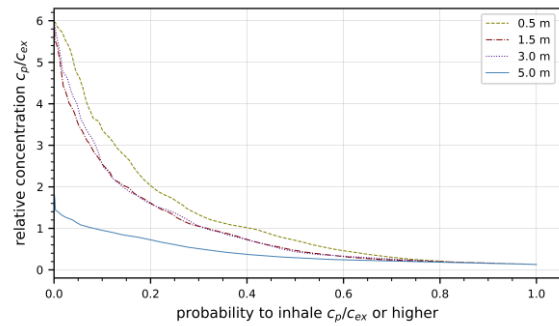


Abbildung 10: Häufigkeitsverteilung der normierten Erregerkonzentration in verschiedenen Abständen (Quelllüftungsfälle)

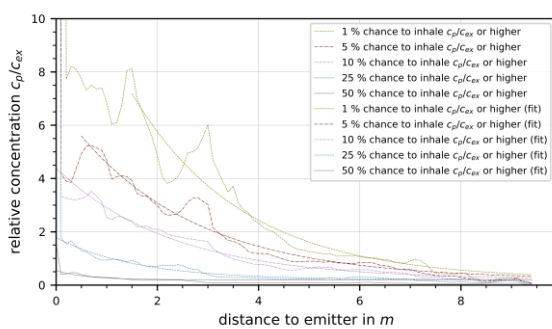


Abbildung 8: Verschiedene Wahrscheinlichkeiten, mindestens c_p/c_{ex} in entsprechender Entfernung ausgesetzt zu sein (Quelllüftungsfälle)

Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen für die beiden Lüftungsarten die Häufigkeitsverteilung der Erregerkonzentration in unterschiedlichen Abständen. Dabei werden nur die Punkte berücksichtigt, welche sich in dem entsprechenden Abstandsbereich befinden. Für die Entfernung 1,5 m sind beispielsweise die Punkte mit den Abständen $1,45 \text{ m} \leq r < 1,55 \text{ m}$ relevant.

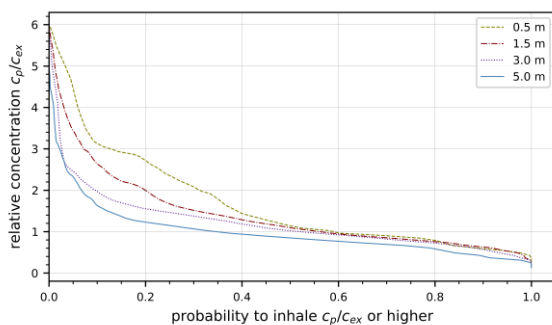


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der normierten Erregerkonzentration in verschiedenen Abständen (Mischlüftungsfälle)

FAZIT

Es wurde die räumliche Verteilung der virenbeladenden Aerosolpartikel für Misch- und Quelllüftungsfälle anhand eines Beispielraumes charakterisiert. Diese ist relevant für die Ermittlung des Gefährdungspotentials durch das Einatmen erregerbeladener Partikel.

Bei idealer Mischlüftung besteht im Nahfeld der erregere-mittierenden Person ein hohes Risiko, das Vielfache der Erregerkonzentration einzuatmen. Dieses Ergebnis unterstützt die Auffassung, dass die Übertragung durch Aerosolpartikel einen erheblichen Anteil am Infektionsgeschehen hat. Dadurch lässt sich eine erhöhte Ansteckungsrate im Nahbereich erklären, welche bei Ausbrüchen festgestellt wurde. Trotzdem sind Personen außerhalb des direkten Umfelds weiterhin von einer möglichen Infektion betroffen. Gerade bei langen Expositionszeiten und der damit verbundenen hohen inhalierten Dosis [5] wird eine Infektion auch im Fernfeld sehr wahrscheinlich.

Die aktuelle Untersuchung bezieht sich auf ein typisches Klassenzimmer. In zukünftigen Studien werden Parameteranalysen durchgeführt, welche signifikante Einfluss-

größen wie Raumdimensionen, Lüftungsraten und Belegungsdichten einbeziehen. Zudem werden weitere Validierungsexperimente sowohl zu Mischlüftungs- als auch zu Quelllüftungsszenarien durchgeführt.

Die Studienergebnisse können als Ausgangspunkt dienen, Modelle für die Bewertung des Infektionsrisikos um eine lokale Komponente zu erweitern, welche die Verteilung der Erregerkonzentration im Raum berücksichtigt.

DANKSAGUNG

Die Untersuchung wurde in Rahmen des Forschungsprojekts „NaFEx - Nah- und Fernfeld Exposition mit aerogenen Viren“ durchgeführt, gefördert durch das Bundesministerium für Gesundheit“.

Weiterer Dank gilt den Kolleginnen Claudia Kopic und Lakshmishree Venu gopal für die Planung und Durchführung des Experimentes.

QUELLEN

- [1] T. Greenhalgh, J. L. Jimenez, K. A. Prather, Z. Tufekci, D. Fisman, und R. Schooley, „Ten scientific reasons in support of airborne transmission of SARS-CoV-2“, *The Lancet*, Bd. 397, Nr. 10285, S. 1603–1605, Mai 2021, doi: 10.1016/S0140-6736(21)00869-2.
- [2] M. Kriegel, U. Buchholz, P. Gastmeier, P. Bischoff, I. Abdelgawad, und A. Hartmann, „Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2“, *medRxiv*, S. 2020.10.08.20209106, Jan. 2020, doi: 10.1101/2020.10.08.20209106.
- [3] H. M. Mathisen, P. V. Nielsen, A. Moser, und E. Mundt, *Ventilation effectiveness*. Brussels: Rehva, Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, 2004.

- [4] E. Lichtner und M. Kriegel, „Luftgetragene Erreger und Luftqualität in Innenräumen am Beispiel eines Klassenzimmers - Verteilung der Erreger und Bewertung der Lüftungseffektivität“, Aug. 2021, doi: 10.14279/DEPOSITONCE-12326.2.
- [5] M. Kriegel und A. Hartmann, „SARS-CoV-2-Aerosolpartikel: Inhalierte Dosen im Vergleich zwischen gar nicht, mäßig, gut und sehr gut belüfteten Räumen“, Mai 2021, doi: 10.25646/8394.