

SARS-CoV-2-Aerosolpartikel: Inhalierte Dosen im Vergleich zwischen gar nicht, mäßig, gut und sehr gut belüfteten Räumen

Einleitung

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass Severe Acute Respiratory Syndrome Corona Virus 2 (SARS-CoV-2) in der Luft gefunden werden kann.¹⁻³ Virenbeladene Aerosolpartikel stellen daher einen Übertragungsweg für SARS-CoV-2 dar.⁴

Für das Infektionsrisiko durch Aerosolpartikel in geschlossenen Räumen ist die eingeatmete Dosis entscheidend. Je mehr Aerosolpartikel eingeatmet werden, umso höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass auf ihnen Viren transportiert werden und umso mehr Viren werden eingeatmet. Die Definition einer kritischen Virenmenge ist nicht Ziel dieser Untersuchung und aktuell noch mit großer Unsicherheit behaftet.⁵

Dabei hängt die eingeatmete Dosis an Aerosolpartikeln von vier hauptsächlichen Einflussfaktoren ab:

- ▶ Quellstärke (Emissionsrate = Anzahl emittierter Aerosolpartikel pro Zeit^{6,7})
- ▶ Atemaktivität (Quelle und Empfänger)
- ▶ Aerosolpartikelkonzentration im Raum (Anzahl virenbeladener Partikel pro m³ Raumluft)
- ▶ Aufenthaltsdauer im Raum (gemeinsamer Aufenthalt von gesunden und mindestens einer infizierten Person in einem Innenraum)

Ziel

Je länger sich eine mit SARS-CoV-2 infizierte Person mit einer/mehreren gesunden Person/en in einem Raum aufhält umso mehr Aerosolpartikel atmet sie aus und die gesunden Personen ein. Im Folgenden soll die Aufenthaltsdauer im Raum in Abhängigkeit von der Frischluftzufuhr untersucht werden, bis genauso viele virenbeladene Aerosolpartikel eingeatmet wurden, wie in einem unbelüfteten Raum. Dabei findet ein Vergleich für densel-

ben Raum statt, wenn z. B. ein zusätzliches Umluftreinigungsgerät aufgestellt wird. Die Quellstärke sowie die Atemaktivität bleiben daher gleich und werden nicht näher betrachtet.

Methoden und Szenarien

Als Referenzszenario (Basis) wird ein Raum betrachtet, der **gar nicht** belüftet ist. Die Personen betreten den Raum gemeinsam und halten sich **eine Stunde** lang darin auf.

Da sich Aerosolpartikel durch thermische und erzwungene Kräfte, wie z. B. die durch ein Lüftungsgerät induzierte Strömung, sehr schnell im Raum ausbreiten, wird vereinfacht angenommen, dass sich stets unmittelbar eine homogene Konzentration einstellt.⁸ In der Realität ist dies nicht gegeben, was für den hier angestellten Vergleich jedoch unbedeutend ist. Die in der Raumluft schwebenden virenbeladenen Aerosolpartikel werden von den gesunden Personen permanent eingeatmet.

Neben dem Referenzszenario (keine Luftwechselrate) werden fünf weitere Szenarien mit derselben Personenanzahl und Aktivität, aber unterschiedlichen Luftwechselraten betrachtet. Berücksichtigt werden dabei:

- ▶ schlecht belüftet: 1 1/h (die Luft im Raum wird alle 60 min ausgetauscht)
- ▶ mäßig belüftet: 2 1/h (die Luft im Raum wird alle 30 min ausgetauscht)
- ▶ gut belüftet: 4 1/h (die Luft im Raum wird alle 15 min ausgetauscht)
- ▶ sehr gut belüftet: 6 1/h (die Luft im Raum wird alle 10 min ausgetauscht)
- ▶ extrem gut belüftet: 8 1/h (die Luft im Raum wird alle 7,5 min ausgetauscht).

Ergebnisse

Im Referenzszenario steigt die Konzentration an virenbeladenen Aerosolpartikeln mit fortlaufender Zeit gleichmäßig an.

Die [Abbildung 1](#) stellt den Konzentrationsverlauf prozentual und die [Abbildung 2](#) die über die Zeit eingeatmete prozentuale Menge an virenbeladenen

Aerosolpartikeln dar. Die Darstellung ist relativ (prozentual) gewählt, um eine von der tatsächlichen Quellstärke und der absoluten Konzentration in der Raumluft unabhängige Größe zu erhalten.

Wird der Raum nun gelüftet oder in einer anderen Art mit virenfreier Luft (z. B. Einsatz von Umluftfiltergeräten) beaufschlagt, so steigt die Konzentra-

prozentuale Aerosolkonzentration

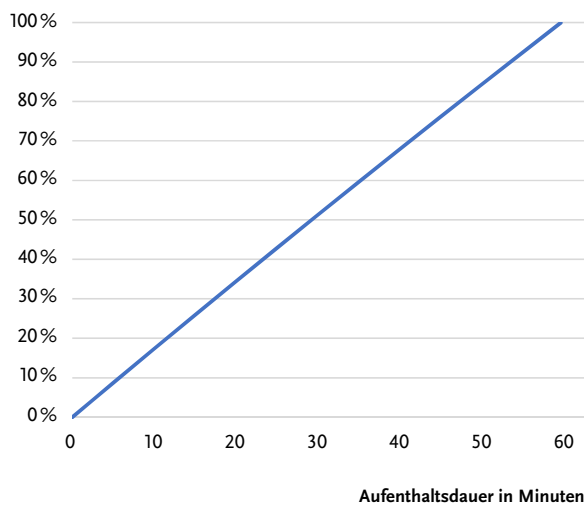


Abb. 1 | Relative virenbeladene Aerosolpartikelkonzentration zur Basis nach 60 Minuten in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit ohne Zufuhr von virenfreier Luft

prozentuale Aerosolkonzentration

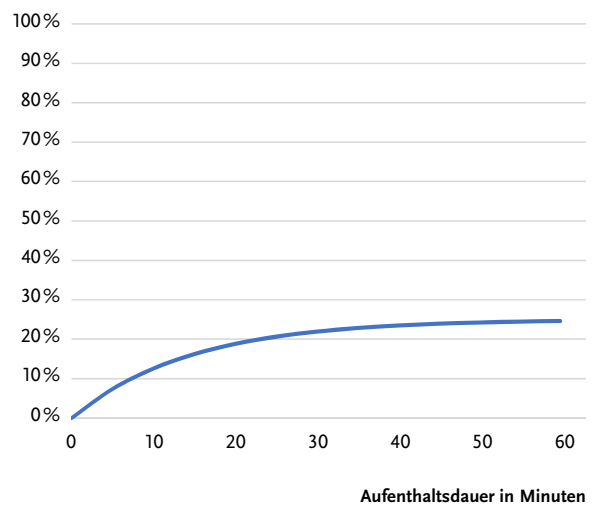


Abb. 3 | Relative eingeatmete Menge an virenbeladenen Aerosolpartikeln in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit bei einer 4-fachen Luftwechselrate

prozentuale Dosis

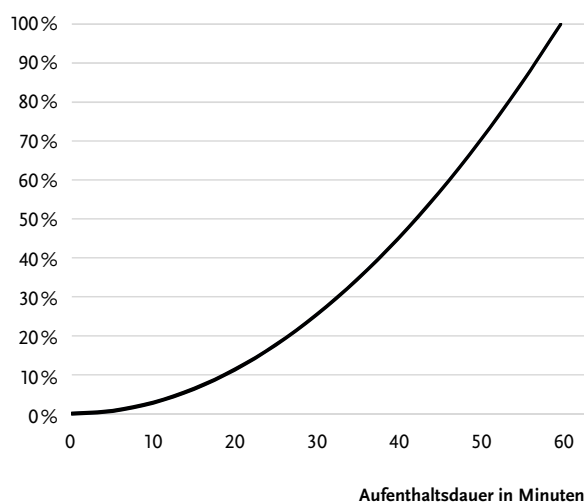


Abb. 2 | Relative eingeatmete Menge an virenbeladenen Aerosolpartikeln zur Basis nach 60 Minuten in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit ohne Zufuhr von virenfreier Luft

prozentuale Dosis

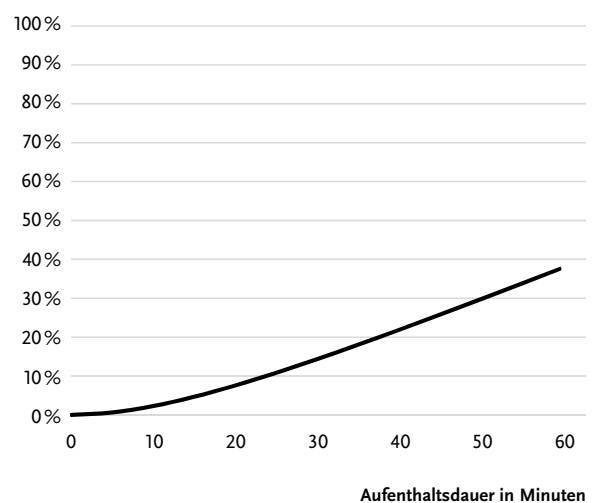


Abb. 4 | Relative eingeatmete Menge an virenbeladenen Aerosolpartikeln in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit bei einer 4-fachen Luftwechselrate

tion an virenbeladenen Aerosolpartikeln nicht stetig an, sondern wird nach oben hin begrenzt. Es stellt sich ein stabiler Zustand ein – die Konzentration an virenbeladenen Aerosolpartikeln bleibt konstant, siehe exemplarisch [Abbildung 3](#) für eine 4-fache Luftwechselrate. Während sich die gesunden Personen gemeinsam mit der infizierten Person im Raum aufhalten, atmen sie die in der Luft schwebenden virenbeladenen Aerosolpartikel ein. Zu Beginn, wenn die Personen den Raum betreten, werden virenbeladenen Aerosolpartikel in der zu Anfang sauberen Luft angereichert. Sobald die Konzentration an virenbeladenen Aerosolpartikeln im Raum einen konstanten Wert erreicht hat und sich damit ein Gleichgewicht zwischen Partikelquelle Mensch und Partikelsenke (zugeführte saubere und gleichzeitig abgeführte verunreinigte Luft) eingestellt hat, steigt die Anzahl inhalierter Partikel linear mit fortlaufender Zeit an (s. [Abb. 4](#)). In der Raumluft befinden sich zwar weniger virenbeladene Aerosolpartikel, aber nach einer von der Luftwechselrate abhängigen Zeit hätten die Personen dieselbe Menge (Dosis) eingeatmet im Vergleich zu einem einstündigen Aufenthalt in einem ungelüfteten Raum.

Raum/Gebäude	Luftwechselrate in 1/h
Wohngebäude	0,5 bis 2
Klassenzimmer	4 bis 6
Büros	4 bis 8
Verkaufsräume	4 bis 8
Operationssaal	6 bis 100

Tab. 1 | Von Normen und Richtlinien empfohlene Luftwechselraten exemplarischer Räume. Tatsächliche Werte weichen regelhaft nach unten hin ab.

Die [Abbildung 5](#) stellt den Verlauf der inhalierten Dosis für verschiedene Luftwechselraten dar. Gar keine (0-fache) Luftwechselrate bedeutet, dass der Raum gar nicht belüftet wird. Es ist zu erkennen, dass es bei höheren Luftwechselraten länger dauert, bis dieselbe Menge an virenbeladenen Aerosolpartikeln eingeatmet wird. Ebenso gilt, dass bei gleicher Aufenthaltszeit in einem besser belüfteten Raum weniger virenbeladene Aerosolpartikel eingeatmet werden als in einem unbelüfteten Raum.

Zur Einordnung der Luftwechselrate sind in [Tabelle 1](#) die von einschlägigen Normen und Richtlinien empfohlenen Werte für unterschiedliche Nutzun-

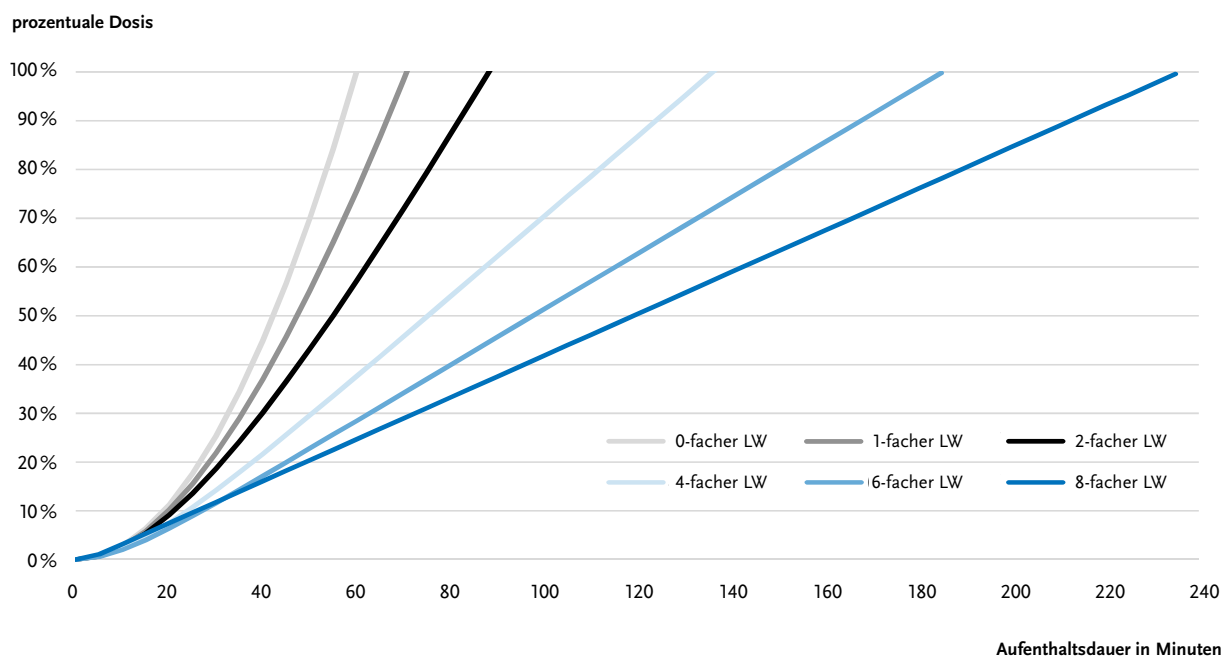


Abb. 5 | Relative eingeatmete Menge an virenbeladenen Aerosolpartikeln in Abhängigkeit der Aufenthaltszeit bei unterschiedlichen Luftwechselraten (LW) (0- bis 8-fach)

gen darstellt. In der Praxis werden diese Werte regelhaft unterschritten, insbesondere bei manuell über Fenster gelüfteten Räumen.

Eine Luftwechselrate von 4 1/h bis 6 1/h in einem Klassenzimmer bedeutet, dass die Luft alle 10 bis 15 min ausgetauscht wird.

Zusammenfassung und Diskussion

Anhand einer einfachen Bilanz kann gezeigt werden, dass die Aufenthaltsdauer in Innenräumen von entscheidender Bedeutung für die Dosis (Menge eingeatmeter virenbeladener Aerosolpartikel) ist. Die Kombination von regelmäßigem Lüften und Verkürzung der gemeinsamen Aufenthaltszeit in geschlossenen Räumen ist daher entscheidend für die Verringerung der Menge der eingeatmeten virenbeladenen Aerosolpartikel. Bei hohen Luftwechselraten (**8-fach**) ist im Vergleich zu einer Aufenthaltsdauer von einer Stunde in einem nicht gelüfteten Raum dieselbe Dosis nach **etwa 240 Minuten** erreicht. Bei 6-facher Luftwechselrate sind es etwa 180 Minuten, bei einer 4-fachen Luftwechselrate sind es 140 Minuten, bei einer 2-fachen Luftwechselrate 90 Minuten und bei einer 1-fachen Luftwechselrate sind es gerade mal 75 Minuten, also nur 1,25 mal so lange, bis zum Erreichen derselben Dosis im Vergleich zu einem ungelüfteten Raum mit einer Stunde Aufenthalt.

Es zeigt sich, dass hohe Lüftungsraten zu einer Reduktion der Viruskonzentration im Raum führen, aber in jedem Fall die Aufenthaltszeiten zu beachten sind. Für gelüftete Räume kann ein ganz einfacher Zusammenhang aufgestellt werden: Wird die Aufenthaltszeit halbiert, halbiert sich die eingeatmete Menge virenbeladener Aerosolpartikel und andersherum.

Aus vorstehendem Vergleich kann *kein* Infektionsrisiko abgeleitet werden. Es geht hier ausschließlich um die Bedeutung der Aufenthaltsdauer in Kombination mit der Zufuhr von virenfreier Luft in Bezug auf die eingeatmete Dosis, wenn außer der Lüftung (einschließlich Umluftreinigungsgerät) die sonstigen Bedingungen gleichbleiben. Es kann auch nicht abgeleitet werden, dass eine bestimmte Luftwechselrate oder eine maximale Aufenthalts-

dauer zu empfehlen ist. Zur Bestimmung von absoluten Zahlen, Konzentrationen und Mengen sind neben der Luftwechselrate und der Aufenthaltszeit die Emissionsrate (Sprechen, Schreien, Singen unterscheiden sich), die Atemaktivität und das Rauminvolumen zu berücksichtigen. Zur Ermittlung des Infektionsrisikos sind noch weitere virenspezifische Eigenschaften von grundlegender Bedeutung. Auch das kontinuierliche Tragen enganliegender Masken würde die absolute emittierte bzw. eingeatmete Menge u. U. erheblich reduzieren.⁵

Real beeinflussen viele Größen das Ausbreitungsverhalten von respiratorischen Aerosolpartikeln, so dass sie sich nicht homogen im Raum verteilen. Vielmehr entstehen lokale Konzentrationsunterschiede, die nicht selten größer als 100 % sind.⁸ Damit ist die eingeatmete Menge auch vom jeweiligen Standpunkt der Personen abhängig. Eine Vorhersage der Flugbahnen ist in der Regel nur durch eine örtlich (dreidimensional) und zeitlich (instationäre) aufgelöste Berechnung (numerische Strömungssimulationen) oder aufwendige Experimente möglich. Die für den Vergleich herangezogene einfache Bilanzierung ist Stand der Technik und als valide anzusehen.

Die Untersuchung weist dabei zwei Limitationen bzw. Einschränkungen auf. Zum einen wurde nur die Situation betrachtet, wenn alle Personen gleichzeitig den Raum betreten und zum anderen werden keine absoluten Aussagen über das Infektionsrisiko gemacht, da dafür Informationen zu Viruseigenschaften von SARS-CoV-2-beladenen Aerosolpartikeln berücksichtigt werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich jedoch sagen, dass die Zeit, bis eine gewisse Menge an mit SARS-CoV-2 beladenen Aerosolpartikeln eingeatmet wurde, wesentlich von der Lüftung des Raumes abhängt. Auch in einem sehr gut gelüfteten Raum wird dieselbe Menge wie in einem nicht gelüfteten Raum erreicht, wenn die Aufenthaltsdauer lang genug ist. Es ist daher zu empfehlen, die gemeinsame Aufenthaltszeit mehrerer Personen in Innenräumen so kurz wie unbedingt nötig zu halten.

Literatur

- 1 J. L. Santarpia, D. N. Rivera, V. Herrera, M. J. Morwitzer, H. Creager, G. W. Santarpia, K. K. Crown, D. M. Brett-Major, E. Schnaubelt, M. J. Broadhurst, J. V. Lawler, S. P. Reid und J. J. Lowe: „Transmission Potential of SARS-CoV-2 in Viral Shedding Observed at the University of Nebraska Medical Center“, medRxiv, 2020.
- 2 P. Y. Chia, K. K. Coleman, T. Y. K., S. W. X. Ong, M. Gum, S. K. Lau, S. Sutjipto, H. P. Lee, T. T. Son, B. E. Young, D. K. Milton, G. C. Gray, S. Schuster, T. Barkhan, P. P. De, S. Vasoo, M. Chan, B. S. P. Ang, B. H. Tan, Y.-S. Leo, O. T. Ng, M. S. Y. Wong und K. Marimuthu: „Detection of Air and Surface Contamination by Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 1 (SARS-CoV-2) in Hospital Rooms of Infected Patients“, medRxiv, 2020.
- 3 J. A. Lednický, M. Lauzardo, Z. H. Fan, A. Jutla, T. B. Tilly, M. Gangwar, M. Usmani, S. N. Shankar, K. Mhoamed, A. Eiguren-Fernandez, C. J. Stephenson, M. M. Alam, M. A. Elbadry, J. C. Loeb, K. Subramaniam, T. B. Waltzek, K. Cherabuddi, J. G. Morris Jr. und C.-Y. Wu: „Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients“, International Journal of Infectious Diseases, pp. 476-482, 2020.
- 4 S. Miller, W. Nazaroff, J. Jimenez, A. N'Boerstra, G. Buonanno, S. Dancer, J. Kurnitski, L. Marr, L. Morawska und C. Noakes: „Transmission of SARS-CoV-2 by inhalation of respiratory aerosol in Skagit Valley Chorale superspreading event“, Indoor Air Journal, pp. 314-323, 2021.
- 5 J. Lelieveld, F. Helleis, S. Borrmann, Y. Cheng, F. Drewnick, G. Haug, T. Klimach, J. Sciare, H. Su und U. Pöschl: „Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments“, International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020.
- 6 M. Alsved, A. Matamis, R. Bohlin, M. Richter, P.-E. Bengtsson, C.-J. Fraenkel, P. Medstrand und J. Löndahl: „Exhaled respiratory particles during singing and talking“, Aerosol Science and Technology, pp. 1245-1248, 2020.
- 7 F. K. A. Gregson, N. A. Watson, C. M. Orton, A. E. Haddrell, L. P. McCarthy, T. J. R. Finnie, N. Gent, G. C. Donaldson, P. L. Shah, J. D. Calder, B. R. Bzdek, D. Costello und J. P. Reid: „Comparing Aerosol Concentrations and Particle Size Distributions Generated by Singing, Speaking and Breathing“, Aerosol Science and Technology, 2021.
- 8 E. Mundt, H. M. Mathisen, P. V. Nielsen und A. Moser: Ventilation Effectiveness, REHVA Guidebook, 2004.

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel | Anne Hartmann

Hermann-Rietschel-Institut, FG Energie, Komfort und Gesundheit in Gebäuden, TU Berlin

Korrespondenz: kontakt@hri.tu-berlin.de

Vorgeschlagene Zitierweise

Kriegel M, Hartmann A: SARS-CoV-2-Aerosolpartikel: Inhalierte Dosen im Vergleich zwischen gar nicht, mäßig, gut und sehr gut belüfteten Räumen

Epid Bull 2021;18:30-34 | DOI 10.25646/8394

Interessenkonflikt

Alle Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenkonflikt besteht.