

Anzahl der mit SARS-CoV-2 beladenen Partikel in der Raumluft und deren eingeatmete Menge, sowie die Bewertung des Infektionsrisikos, sich darüber mit Covid-19 anzustecken

Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel, 24.10.2020
Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut

DOI: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10655>

An einem vereinfachten Beispiel soll erklärt werden, wie sich die Anzahl der virenbeladenen Partikel im Raum mit zunehmender Aufenthaltsdauer einer infizierten Person verändert. Zusätzlich wird die Menge an virenbeladenen Partikeln dargestellt, die weitere gesunde Personen einatmen, wenn sie sich ebenfalls im Raum aufhalten. Am Ende wird das sich daraus ergebende Infektionsrisiko vorausgesagt.

Zur Darstellung der wesentlichen Einflüsse, werden zwei verschieden große Räume betrachtet:

- a. Kleiner Raum: Grundfläche 60 m² mit einer Raumhöhe von 3 m.
- b. Großer Raum: Grundfläche 100 m² mit einer Raumhöhe von 5 m.

In beiden Fällen treten jeweils eine infizierte Person und zusätzlich 24 gesunde Personen in einen virenfreien Raum ein. Durch die eine infizierte Person werden permanent über die Atemwege virenbeladene Partikel (in unserem Beispiel 100 Partikel pro Sekunde) in die Raumluft eingebracht, anlehnend an [1]. Vereinfacht wird angenommen, dass sich diese unmittelbar im gesamten Raum verteilen (real dauert es ein paar Minuten und hängt von vielen weiteren Faktoren ab).

Die Berechnungen basieren auf einfachen physikalischen Bilanzgleichungen, die anerkannter Stand der Technik sind und in [2] nachgelesen werden können.

1. Fall: keine virenfreie Luft wird dem Raum zugeführt

(z.B. alle Fenster geschlossen oder keine saubere Luftzufuhr durch ein Gerät)

Der Verlauf der Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Abbildung 2 zeigt die Anzahl der eingeatmeten Partikel.

Wird nicht gelüftet oder anderweitig virenfreie Luft zugeführt, steigt die Anzahl der Viren in der Luft immer weiter an. Die Anzahl der eingeatmeten Viren nimmt sogar exponentiell mit der Aufenthaltsdauer zu. Weiterhin ist ersichtlich, dass ein größeres Raumvolumen sich positiv auf die Anzahl der eingeatmeten virenbeladenen Partikel auswirkt.

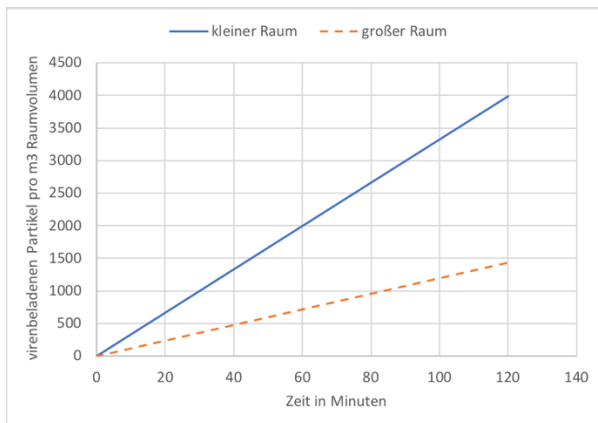


Abbildung 1: Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft bei fehlender Belüftung

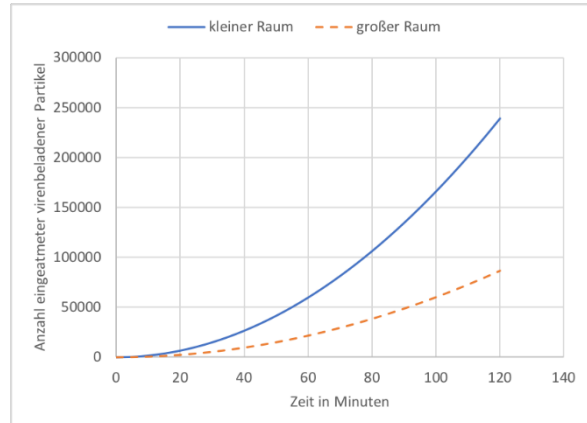


Abbildung 2: Anzahl eingeatmeter virenbeladener Partikel bei fehlender Belüftung

2. Fall: Es werden 1.000 m³ pro Stunde virenfreie Luft dem Raum zugeführt und in derselben Größenordnung das sich einstellende Gemisch (virenhaltige Raumluft) aus dem Raum abgeführt

(dies entspricht einem gut gelüfteten Raum für die 25 Personen mit einem resultierenden CO₂ Wert von ca. 1.000 ppm oder einem Umluftfiltergerät mit 1000 m³ pro Stunde Luftdurchsatz)

Der Verlauf der Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Abbildung 4 zeigt die Anzahl der eingeatmeten Partikel.

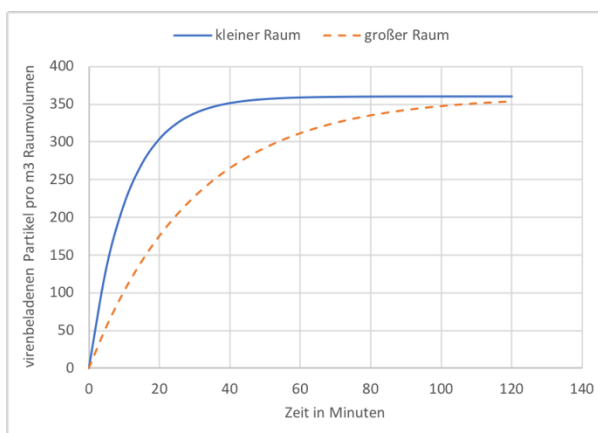


Abbildung 3: Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft bei 1000 m³/h Frischluftzufuhr

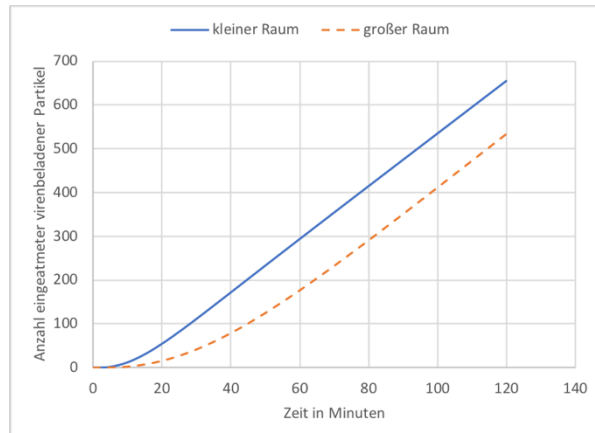


Abbildung 4: Anzahl eingeatmeter virenbeladener Partikel bei 1000 m³/h Frischluftzufuhr

Mit der Zufuhr von virenfreier Luft (Frischluft oder gefilterte Luft; in diesem Fall jeweils 1.000 m³ pro Stunde) kann der Anstieg der Partikelanzahl begrenzt werden. Nach etwa 40 Minuten beim kleinen Raum und nach etwa 120 Minuten beim großen Raum bleibt die Anzahl der Viren in der Luft jeweils gleich bei 350 Partikeln pro Kubikmeter Raumvolumen. Wie schnell die Konzentration ansteigt, hängt von der Raumgröße und der zugeführten Luftmenge ab (hier jeweils 1.000 m³ pro Stunde). Mit zunehmender Aufenthaltsdauer nimmt in beiden Fällen auch die Anzahl der eingeatmeten Viren stetig zu. Ein größerer Raum wirkt sich positiv auf die Anzahl der eingeatmeten virenbeladenen Partikel aus, obwohl die Luftwechselrate für den größeren Raum kleiner ist. (Definition: Luftwechselrate = zugeführte Luftmenge / Raumvolumen). Die Luftwechselrate für den kleinen Raum ist somit 5,5 fach, für den großen Raum ist sie 2 fach.

3. Fall: Es werden 1.500 m³ pro Stunde virenfreie Luft zugeführt

(dies entspricht einem sehr gut gelüfteten Raum für die 25 Personen mit einem resultierenden CO₂ Wert von ca. 800 ppm oder einem Umluftfiltergerät mit 1.500 m³ pro Stunde Luftdurchsatz)

Der Verlauf der Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Abbildung 6 zeigt die Anzahl der eingeatmeten Partikel.

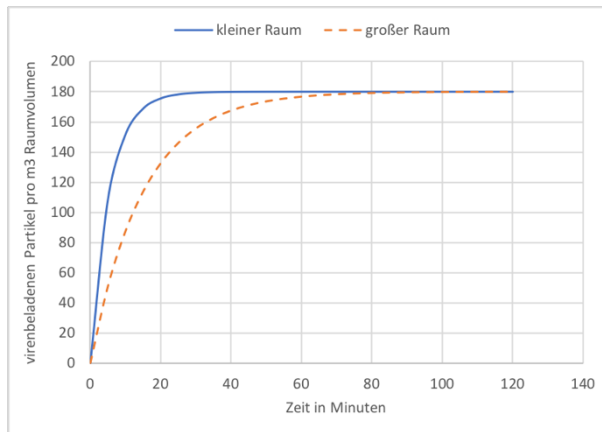


Abbildung 5: Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft bei 1500 m³/h Frischluftzufuhr

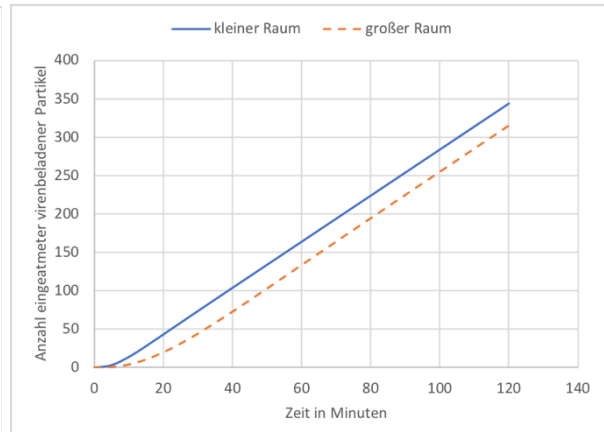


Abbildung 6: Anzahl eingeatmeter virenbeladener Partikel bei 1500 m³/h Frischluftzufuhr

Mit der Zufuhr von mehr virenfreier Luft (in diesem Fall 1.500 m³ pro Stunde) kann der Anstieg der Partikelanzahl weiter begrenzt werden. Nach etwa 30 Minuten beim kleinen Raum und nach etwa 80 Minuten beim großen Raum bleibt die Anzahl der Viren in der Luft gleich bei 180 Partikel pro Kubikmeter Raumvolumen. Wie schnell der die Konzentration ansteigt, hängt von der Raumgröße und der zugeführten Luftmenge ab (hier 1.500 m³ pro Stunde). Mit zunehmender Aufenthaltsdauer nimmt auch in beiden Fällen die Anzahl der eingeatmeten Viren stetig zu. Ein größerer Raum wirkt sich positiv auf die Anzahl der eingeatmeten virenbeladenen Partikel ein, obwohl die Luftwechselrate für den größeren Raum kleiner ist. Die Luftwechselrate für den kleinen Raum ist 8,3 fach, für den großen Raum ist sie 3 fach.

Vergleich der Fälle:

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen den Vergleich der 3 betrachteten Fälle nur für den kleinen Raum bezüglich der Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft und der Anzahl der davon eingeatmeten. In den Abbildungen wurde ein 4. Fall mit dargestellt, bei dem die zugeführte virenfreie Luftmenge 500 m³ pro Stunde beträgt und hier als „mäßig belüftet“ bezeichnet wird.

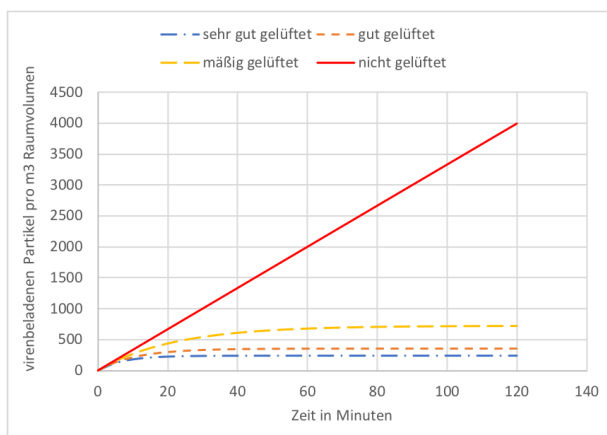


Abbildung 7: Vergleich zwischen der Anzahl der virenbeladenen Partikel in der Raumluft bei vier verschiedene Lüftungssituationen

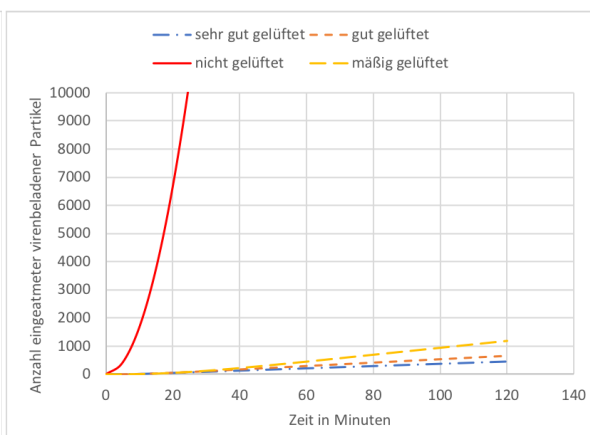


Abbildung 8: Vergleich zwischen der Anzahl eingeatmeter virenbeladener Partikel bei vier verschiedene Lüftungssituationen

Den Abbildungen 7 und 8 kann entnommen werden, dass Zufuhr von virenfreier Luft einen deutlichen Effekt auf die virenbeladene Partikelanzahl im Raum und auf die eingeatmeten virenbeladenen Partikel hat. Je mehr dieser Zuluft hineinkommt und damit virenhaltige Luft abtransportiert wird, desto geringer wird die Anzahl der virenbeladenen Partikel im Raum und der eingeatmeten virenbeladenen Partikel. Es ist ebenfalls zu erkennen, dass mit steigender Zuluftmenge die Konzentration virenbeladener Partikel sowie die Menge an eingeatmeten virenbeladenen Partikeln sinkt. Allerdings ist weiter erkennbar, dass für eine weitere Reduktion jeweils deutlich mehr Frischluft benötigt wird.

Die reine virenbeladene Partikelanzahl ist nicht ausreichend zur Bewertung eines Infektionsrisikos. SARS-CoV-2 Viren haben in der Luft eine Halbwertszeit von etwa einer Stunde und sind nach 3-5 Stunden inaktiv. In Abhängigkeit ihrer Verweilzeit in der Raumluft sinkt die Vitalität. Gleichzeitig werden permanent durch die infizierte Person virenbeladene Partikel neu eingebracht.

Das Infektionsrisiko sich mit SARS-CoV -2 über Aerosole anzustecken, kann über das in [3] veröffentlichte Berechnungsmodell vorausgesagt werden. Als Infektionsrisiko ist hier das individuelle Risiko zu verstehen, dass jede gesunde Person trägt. In unserem Beispiel halten sich 24 gesunde Personen auf. Bei 10 % Infektionsrisiko bedeutet dies, dass es sehr wahrscheinlich ist, dass sich zwei anstecken werden, vielleicht sogar drei.

Das Ergebnis für den betrachteten kleinen Raum mit den vier unterschiedlichen Lüftungssituationen ist der Abbildung 9 zu entnehmen.

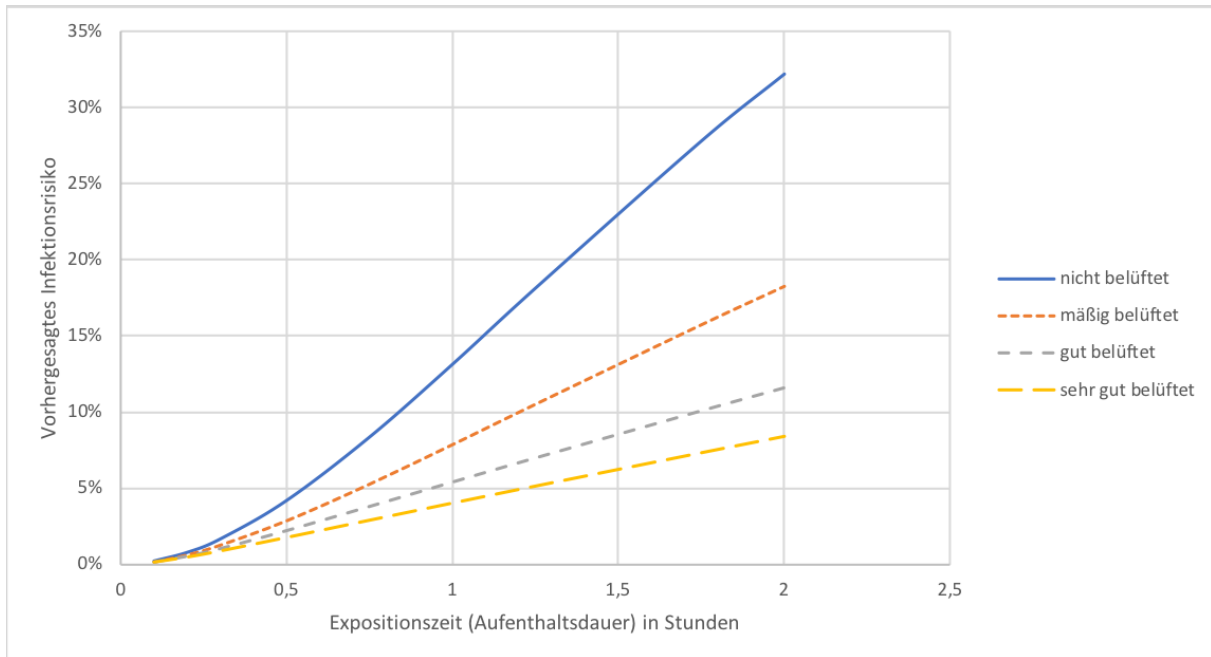


Abbildung 9: Vorausgesagtes Infektionsrisiko über virenbeladene Aerosole nach [2].

Wird Abbildung 8 gemeinsam mit Abbildung 9 betrachtet, so ist ersichtlich, dass der Effekt der Virenstabilität einen großen Einfluss auf das Infektionsrisiko hat. Bei niedriger zugeführter Luftmenge erhöht sich zwar die Anzahl in der Raumluft, auf der anderen Seite nimmt die Vitalität jedoch ab, da die Viren lange in der Luft verweilen. Im Gegensatz dazu ist die Virenanzahl bei hoher zugeführter Luftmenge geringer, aber die verbleibenden Viren sind vitaler.

Zusammenfassung:

Zugeführte virenfreie Luft und damit die Abfuhr virenhaltiger Luft aus dem Raum trägt zur Minderung des Infektionsrisikos bei. Je höher die Zuluftmenge ist, desto größer ist der Effekt. Mit zunehmender Zuluftmenge wird die Auswirkung jedoch immer schwächer („die letzten Prozent sind immer die schwierigsten“). Soll für eine gegebene Raumgröße ein bestimmtes Infektionsrisiko nicht überschritten werden, so ist eine Zuluftmenge in Abhängigkeit der Aufenthaltsdauer von Personen in den Räumlichkeiten zu wählen. Hierfür bietet sich das Diagramm aus [2] an, siehe Abbildung 10.

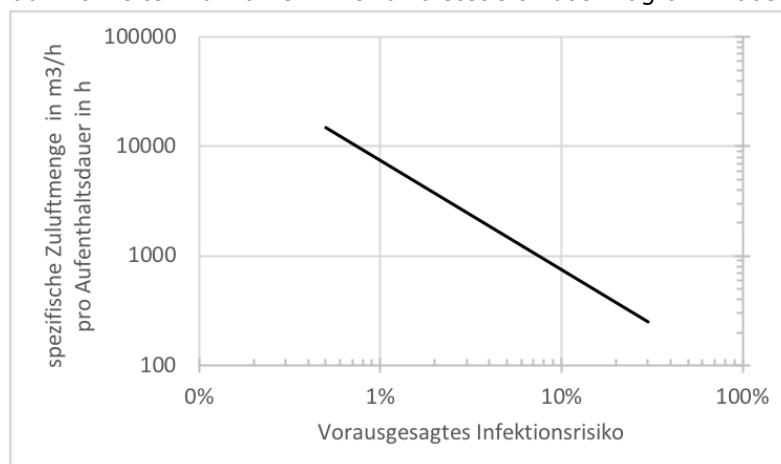


Abbildung 10: Benötigte zugeführte virenfreie Luftmenge pro Stunde Aufenthalt (spezifische Zuluftmenge) für ein einzuhaltendes vorausgesagtes Infektionsrisiko über virenbeladene Aerosole nach [3].

Mit der Gleichung 1 aus [3] kann die benötigte spezifische virenfreie Luftmenge Q_{sp} (Frischlufte oder gefilterte Luft) berechnet werden, um ein vorher definiertes Infektionsrisiko über eine definierte Aufenthaltsdauer einzuhalten. Auf Gleichung 1 basiert die Abbildung 10.

$$Q_{sp} = 75 \cdot \frac{1}{PIRA}$$

Gleichung 1

Beispielberechnung zu Gleichung 1: Bei den o.g. 24 gesunden Personen zusammen mit der einen infizierten sollte das Infektionsrisiko maximal 4,2 % betragen, damit sich maximal eine weitere Person ansteckt. Halten sich die Personen eine Stunde gemeinsam in einem Raum auf, so müsste die zugeführte virenfreie Luftmenge ca. 1.790 m³/h betragen. Halten sich die infizierte Person gemeinsam mit den gesunden Personen vier Stunden in einem Raum auf, so müsste die Zuluftmenge ca. 7140 m³/h sein.

Damit wird ein weiterer bisher wenig beachteter Einfluss auf das Infektionsrisiko beleuchtet. Die gemeinsame Aufenthaltsdauer von infizierten mit gesunden Personen in Räumen. Der Zusammenhang ist direktproportional, siehe auch Abbildung 9.

Abschließend wird noch klargestellt: Eine Dimensionierung der benötigten Zuluftmenge nach einer festen Luftwechselrate ist ungeeignet, da dies für kleine Räume zu niedrigen Zuluftmengen und für große Räume zu hohen Luftmengen führt, ohne direkte Verbindung zu den eingeatmeten virenbeladenen Partikeln und ohne direkte Verbindung zu dem Infektionsrisiko. Die Luftwechselrate (oft als Luftwechsel bezeichnet) ist eine irreführende Bezeichnung. Die Zuluftmenge gemeinsam mit der Quellstärke (virenbeladene Partikel pro Zeiteinheit, z.B. Sekunde, die von einer infizierten Person permanent abgegeben werden) bildet das Mischungsverhältnis und damit die Anzahl der virenbeladenen Partikel pro Kubikmeter Raumvolumen, auch als Konzentration bezeichnet.

Literaturquellen:

[1] Hartmann, K; Lange, J; Rotheudt, J; Kriegel, M; *Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten*, DOI: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10332>

[2] Fitzner, K; *Rietschel Band 2: Raumluft- und Raumkühltechnik*, ISBN 978-3-540-57011-016

[3] Kriegel, M; Buchholz, U; Gastmeier, P; Bischoff, P; Abdelgawad, I; Hartmann, A; *Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2*; DOI: 10.1101/2020.10.08.20209106, Preprint