

Risikobewertung von virenbeladenen Aerosolen anhand der CO₂-Konzentration

Autoren: Anne Hartmann, Martin Kriegel
Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut

DOI: <http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10361.3>

Version 3: 18.08.2020

Einleitung

Jede Person gibt u.a. beim Atmen permanent CO₂ und Aerosole ab. Aerosole stehen zunehmend im Verdacht Überträger von SARS-CoV-2 zu sein [1]. CO₂-Konzentrationen in Räumen lassen sich mit relativ geringem Aufwand bestimmen und aufbauend auf dem Zusammenhang zwischen der CO₂- und der Aerosolkonzentration in Räumen werden analytische Betrachtungen dargestellt, die aus einer gemessenen CO₂-Konzentration auf eine wahrscheinliche Aerosolkonzentration schließen lassen.

Hintergrund und Methoden

Neben der CO₂- und Aerosolquelle Mensch spielen auch andere Quellen und Senken in Innenräumen eine Rolle. Eine Übersicht über die entscheidenden Quellen und Senken gibt Abbildung 1. Neben der Quelle Mensch ($\dot{V}_{Q,P}$), können Aerosole und Kohlendioxid auch über die Zuluft (\dot{V}_{ZU}, c_{ZU}) oder durch Geräte ($\dot{V}_{Q,R}$) in den Raum gelangen (z.B. Drucker). Als Senken sind die Abluft (\dot{V}_{ab}, c_{ab}), die Sedimentation ($\dot{V}_{S,Pa}$) sowie bei Viren auch das Absterben ($\dot{V}_{i,V}$) entscheidend.

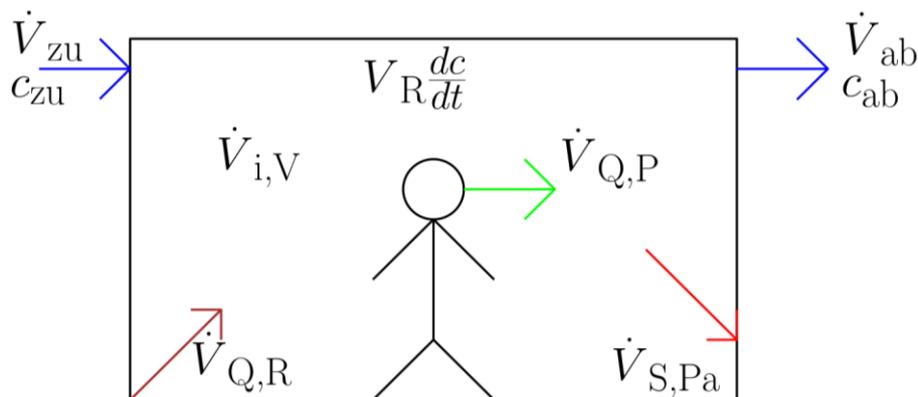


Abbildung 1: Übersicht über Quellen und Senken für CO₂ und Aerosole in Innenräumen

Mit Hilfe dieser Quellen und Senken kann die Bilanzgleichung nach Gleichung (1) aufgestellt werden.

$$\dot{V}_{ZU} \cdot c_{ZU} + \dot{V}_{Q,P} + \dot{V}_{Q,R} - \dot{V}_{S,Pa} - \dot{V}_{i,V} - \dot{V}_{ab} \cdot c_{ab} = V_R \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

mit:

\dot{V}_{ZU} ...Volumenstrom Zuluft in m³/h

c_{ZU} ...Konzentration des Schadstoffes in der Zuluft

$\dot{V}_{Q,P}$...Volumenstrom der Schadstoffquelle Person

$\dot{V}_{Q,R}$...Volumenstrom der Schadstoffquelle Raum

$\dot{V}_{S,Pa}$...Volumenstrom der Schadstoffsenke Partikel/Aerosole

$\dot{V}_{i,V}$...Volumenstrom der Schadstoffsenke Viren

\dot{V}_{ab} ...Volumenstrom Abluft
 c_{ab} ...Konzentration des Schadstoffes in der Abluft
 V_R ...Raumvolumen in m³
 c ...Konzentration
 t ...Zeit

Für eine Betrachtung der CO₂-Konzentration haben lediglich die Zuluftmenge (\dot{V}_{zu}) sowie – konzentration (c_{zu}), die Abluftmenge (\dot{V}_{ab}) und -konzentration (c_{ab}) sowie die Quelle Mensch ($\dot{V}_{Q,P}$) einen Einfluss auf die Konzentration im Raum. Zusätzlich wird für die Konzentrationen jeweils die Differenz zur Außenluft genommen, sodass bei reinem Außenluftbetrieb der Zuluftanteil entfällt. Gleichung (1) kann somit vereinfacht und integriert werden, sodass sich Gleichung (2) ergibt.

$$\Delta c_{ab,CO_2}(t) = \Delta c_{0,CO_2} \cdot e^{-nt} + \frac{\dot{V}_{Q,CO_2}}{\dot{V}} (1 - e^{-nt}) \quad (2)$$

mit:

$\Delta c_{ab,CO_2}(t)$...Konzentration CO₂ zum Zeitpunkt t in der Abluft über der Außenluftkonzentration in ppm

$\Delta c_{0,CO_2}(t)$...Konzentration CO₂ zum Zeitpunkt t=0h in der Abluft über der Außenluftkonzentration in ppm

\dot{V}_{Q,CO_2} ...CO₂-Quelle in m³/h

\dot{V} ...Zuluftvolumenstrom = Abluftvolumenstrom in m³/h

n ...Luftwechsel in 1/h

t ...Zeit in h

Es muss dabei beachtet werden, dass die Konzentration an einzelnen Punkten im Raum erheblich von diesem Wert abweichen kann. Dies wird über die Lüftungswirksamkeit (Gleichung (3)) berücksichtigt.

$$\varepsilon_{Oz}^c = \frac{\Delta c_{exh}}{\Delta c_{Oz}} \quad (3)$$

ε_{Oz}^c ...Lüftungswirksamkeit in der Aufenthaltszone

Δc_{exh} ...Schadstoffkonzentration über der Außenluftkonzentration in der Abluft

Δc_{Oz} ...Schadstoffkonzentration über der Außenluftkonzentration in der Aufenthaltszone

Bei einer idealen Mischlüftung ist die Konzentration an allen Punkten im Raum gleich und die Lüftungswirksamkeit somit $\varepsilon_{Oz}^c = 1,0$.

Für das Aufstellen der Gleichung für virenbeladene Aerosole müssen zunächst Annahmen getroffen werden. Die Sedimentation wird als Produkt aus der Partikelanzahl in der Luft und einem Anteil sedimentierender Partikel gebildet (Gleichung (4)).

$$\dot{V}_{S,Pa} = \Delta c_{Partikel} \cdot V_R \cdot SR \quad (4)$$

mit:

$\dot{V}_{S,Pa}$...Volumenstrom der Schadstoffsenke Partikel/Aerosole in Partikel/s

$\Delta c_{Partikel}$...Partikelkonzentration in 1/m³

V_R ...Raumvolumen in m³

SR ... Sedimentationsrate Partikel/s

Die Aerosolquelle Raum soll in den nachfolgenden Betrachtungen nicht berücksichtigt werden. Ein Wiedereintrag von Viren von Oberflächen in die Luft ist von untergeordneter Bedeutung. Auch Partikel von der Bekleidung sowie von Hautschuppen spielen für die Virenübertragung eine untergeordnete Rolle. Für die Quelle Mensch ergibt sich damit folgende Gleichung (5).

$$\dot{V}_{Q,P} = f \cdot ((s)(1 - e) + (1 - s)) \cdot \dot{V}_{Q,Partikel,Mund/Nase} \quad (5)$$

mit:

$\dot{V}_{Q,P}$...Volumenstrom der Schadstoffquelle Mensch in Partikel/s

f ... Anzahl der infizierten Personen in Raum

s ...Anteil der Personen, die einen Mund-Nase-Schutz tragen

e ...Effizienz des Mund-Nase-Schutzes

$\dot{V}_{Q,Partikel,Mund/Nase}$...Quellstärke des Menschen durch Mund und Nase in Partikel/s

Gleichung (1) ergibt sich dann zu Gleichung (6).

$$\dot{V}_{zu} \cdot c_{zu} + f \cdot ((s)(1 - e) + (1 - s)) \cdot \dot{V}_{Q,Partikel,Mund/Nase} - \Delta c_{Partikel} \cdot V_R \cdot SR - \dot{V}_{i,V} - \dot{V}_{ab} \cdot c_{ab} = V_R \frac{dc}{dt} \quad (6)$$

Auflösen von Gleichung (6) und einsetzen in Gleichung (3) ergibt dann Gleichung (7).

$$\begin{aligned} \Delta c_{Partikel,AZ}(t) &= \\ &= \frac{f \cdot ((s)(1 - e) + (1 - s)) \cdot \dot{V}_{Q,Partikel,Mund/Nase} - \dot{V}_{i,V}}{\dot{V} \cdot \varepsilon_{Oz,Partikel}^c} \\ &+ \frac{1}{\varepsilon_{Oz,Partikel}^c} \left(\frac{-f \cdot ((s)(1 - e) + (1 - s)) \cdot \dot{V}_{Q,Partikel,Mund/Nase} + \dot{V}_{i,V}}{\dot{V}} \right) e^{-(nt-SR)} \end{aligned} \quad (7)$$

Eine Kombination von Gleichung (2) und (7) mittels einer linearen Gleichung unter den Randbedingungen $t = 0h$: $\frac{\Delta c_{0,Partikel,AZ}(t=0h)}{\varepsilon} = \frac{\Delta c_{0,Partikel}}{\varepsilon}$, $\Delta c_{ab,CO2}(t = 0h) = \Delta c_{0,CO2}$ ergibt Gleichung (8).

$$\begin{aligned} \Delta c_{Partikel,AZ} &= \\ &= \left(\frac{(f \cdot ((s)(1 - e) + (1 - s)) \cdot \dot{V}_{Q,Partikel,Mund/Nase} - \dot{V}_{i,V}) \cdot (1 - e^{-(n-SR)t})}{\varepsilon_{Partikel} \cdot (\dot{V}_{Q,CO2} - \dot{V} \Delta c_{0,CO2}) \cdot (1 - e^{-nt})} \right. \\ &\left. - \frac{\dot{V} \Delta c_{0,Partikel} \cdot (1 - e^{-(n-SR)t})}{\varepsilon_{Partikel} \cdot (\dot{V}_{Q,CO2} - \dot{V} \Delta c_{0,CO2}) \cdot (1 - e^{-nt})} \right) \cdot (\Delta c_{CO2}(t) - \Delta c_{0,CO2}) + \frac{\Delta c_{0,Partikel}}{\varepsilon_{Partikel}} \end{aligned} \quad (8)$$

Für kurze Nutzungszeiten kann Gleichung (8) wie in Gleichung (9) ersichtlich vereinfacht werden.

Kurze Nutzungszeit ($\dot{V}_{i,V} = 0 \text{ V/s}$, $SR = 0$):

$$\begin{aligned} & \Delta c_{\text{Partikel,AZ}} \\ &= \left(\frac{(f \cdot ((s)(1 - e) + (1 - s)) \cdot \dot{V}_{Q,\text{Partikel,Mund/Nase}} - \dot{V} \Delta c_{0,\text{Partikel}})}{\varepsilon_{\text{Partikel}} \cdot (\dot{V}_{Q,\text{CO}_2} - \dot{V} \Delta c_{0,\text{CO}_2})} \right) \quad (9) \\ & \cdot (\Delta c_{\text{CO}_2}(t) - \Delta c_{0,\text{CO}_2}) + \frac{\Delta c_{0,\text{Partikel}}}{\varepsilon_{\text{Partikel}}} \end{aligned}$$

Ergebnisse

Anwendungsbeispiel 1:

In Abbildung 2 ist der Verlauf der CO₂-Konzentration sowie der Aerosolkonzentration in einem Klassenzimmer dargestellt. Folgende Randbedingungen werden für diese Berechnung verwendet:

- 25 Personen (Kinder 10 Jahre)
- Raumvolumen ($V_R = 180 \text{ m}^3$)
- Nutzungsdauer 2 Schulstunden (45 min) sowie 15min Pause in der alle Personen den Raum verlassen
- Überwiegend Atmen ($\dot{V}_{Q,\text{Partikel,Mund/Nase}} = 140 \frac{\text{Partikel}}{\text{s}}$ [2], $\dot{V}_{Q,\text{CO}_2} = 11,2 \text{ l/h}$)
- ideale Mischlüftung ($\varepsilon_{\text{Partikel}} = 1$)
- 1 Infizierte Person, keine Masken ($f = 1$, $s = 0$)
- Absterben der Viren orientiert sich an Influenza-Viren [3]
- Sedimentationsrate orientiert sich an Messungen des HRI

Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass auf jedem Aerosol ein Virus transportiert wird [4]. Zum Zeitpunkt $t=0\text{h}$ betritt eine infizierte Person zusammen mit allen anderen Personen den Raum. Für die gegebene Nutzungsdauer von zwei Schulstunden ist nahezu kein Einfluss der Sedimentation sowie des Absterbens der Viren zu erkennen. Für die nachfolgenden Betrachtungen werden Sedimentation sowie Absterben von Viren daher vernachlässigt.

Während für CO₂ die aktuelle Konzentration als kritisch zu bewerten ist, ist für Viren die Dosis entscheidend. Es bleibt allerdings zu beachten, dass eine kurzzeitige hohe Virenkonzentration ebenfalls kritischer zu bewerten ist als eine längerfristige niedrige Konzentration.

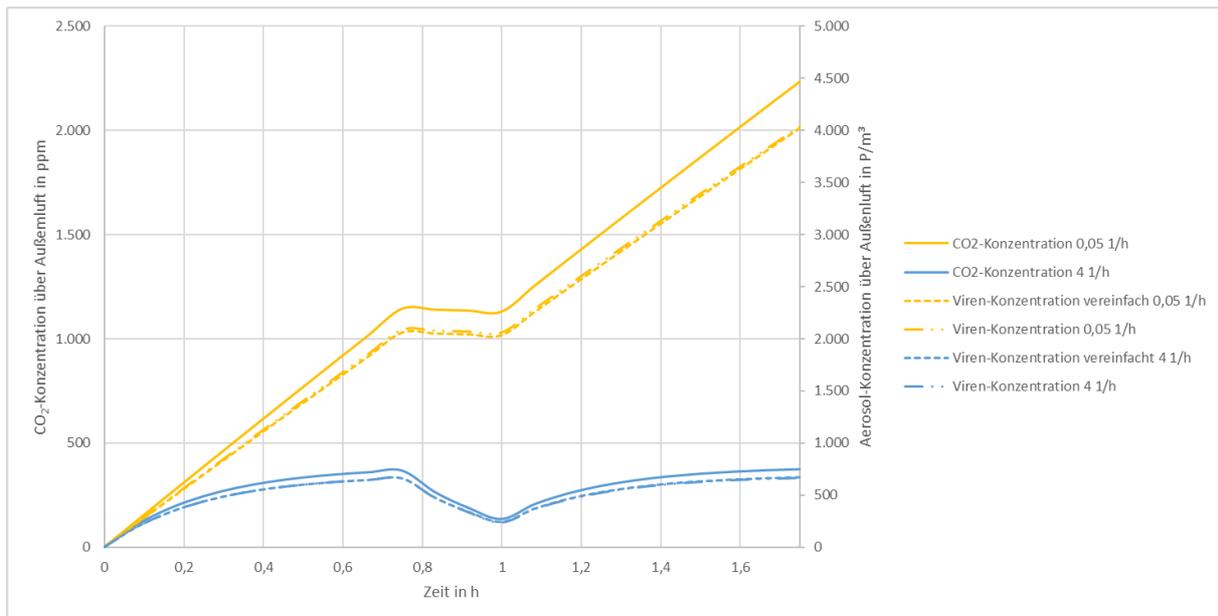


Abbildung 2: Verlauf der CO₂-Konzentration in einem Klassenzimmer während 2 Schulstunden mit Pause (linke Achse) sowie Konzentration der Aerosole (rechte Achse)

Anwendungsbeispiel 2:

Die nachfolgenden Betrachtungen dienen einer einfachen Anwendbarkeit und für die Formulierung von Handlungsempfehlungen. Dafür werden die genauen komplexeren Zusammenhänge simplifiziert.

Es wird eine kritische Grenzkonzentration von $c_{grenz} = 3.000$ Viren definiert, die eine Person einatmen darf [5]. Nach dem Erreichen dieser Dosis wird ein Verlassen des Raumes empfohlen.

Es wird im Weiteren folgendes Szenario zu Grunde gelegt. Eine infizierte Person hält sich über längere Zeit allein in einem Raum auf. Sowohl die CO₂-Konzentration also auch die Aerosolkonzentration haben einen stationären Zustand erreicht. Eine weitere Person (nicht-infiziert) betritt den Raum zum Zeitpunkt $t=0h$. Je nach personenbezogenem Volumenstrom kann sich die Person nun eine gewisse Zeit im Raum aufhalten, bevor sie $c_{grenz} = 3.000$ Viren eingeatmet hat.

Für die Bestimmung des personenbezogenen Volumenstroms wird DIN EN 16798-1 [6] zu Grunde gelegt. In Tabelle 1 sind die entsprechenden Volumenströme dargestellt. Die Einhaltung der jeweiligen Volumenströme kann mittels einer Lüftungsampel auf CO₂-Basis kontrolliert werden.

Tabelle 1: Außenluftbedarf nach DIN EN 16798-1 [6] (genutzte Werte fett gedruckt)

	CO ₂ -Konzentrationszuwachs gegenüber Außenluft (450 ppm) in ppm	Volumenstrom in m ³ /(hPer) (schadstoffarmes Gebäude, 10m ² pro Person)	Volumenstrom zur Einhaltung der CO ₂ -Konzentration in m ³ /(hPer)	Ampelfarbe
IDA 1	350	72	43	grün
IDA 2	550	32,2	27	grün
IDA 3	1050	18,4	14	gelb
IDA 4	1550	14,4	10	rot

Für die Berechnung der maximalen Aufenthaltszeit wird Gleichung (10) verwendet.

$$t_{max} = \frac{c_{grenz} \cdot \dot{V}_{Zu}}{\dot{V}_{Q,Partikel} \cdot \dot{V}_{inhal}} \cdot n_{Personen} \quad (10)$$

mit:

t_{max} ... maximale Aufenthaltszeit in h

c_{grenz} ...zulässige Dosis an Viren $c_{grenz} = 3.000$ Viren

\dot{V}_{Zu} ... personenbezogener Außenluftvolumenstrom in m³/(h·Per)

$\dot{V}_{Q,Partikel}$... Partikelemission durch die infizierte Person in Partikel/s

\dot{V}_{inhal} ... eingeatmeter Luftvolumenstrom in m³/h

$n_{Personen}$...Anzahl der Personen im Raum

Der eingeatmete Luftvolumenstrom variiert dabei je nach Aktivitätsgrad und kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Atemluftbedarf bei verschiedenen Aktivitäten

Tätigkeit	Aktivitätsgrad	Atemluftbedarf in m ³ /h
Lesen oder Schreiben	I	0,375
Sehr leichte körperliche Tätigkeit im Stehen oder Sitzen	II	0,575
Körperliche Tätigkeit	III	0,75

Für ein Büro- oder Schulumfeld wird nachfolgend Aktivitätsgrad I verwendet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 3 dargestellt. Dem Diagramm liegt die Annahme zugrunde, dass die infizierte Person die einzige Person im Raum ist. Für jede weitere Person, die den Raum betritt und nicht infiziert ist, kann die maximale Aufenthaltszeit mit der Personenanzahl multipliziert werden, da angenommen wird, dass der Luftvolumenstrom so geregelt wird, dass die CO₂-Konzentration konstant bleibt.

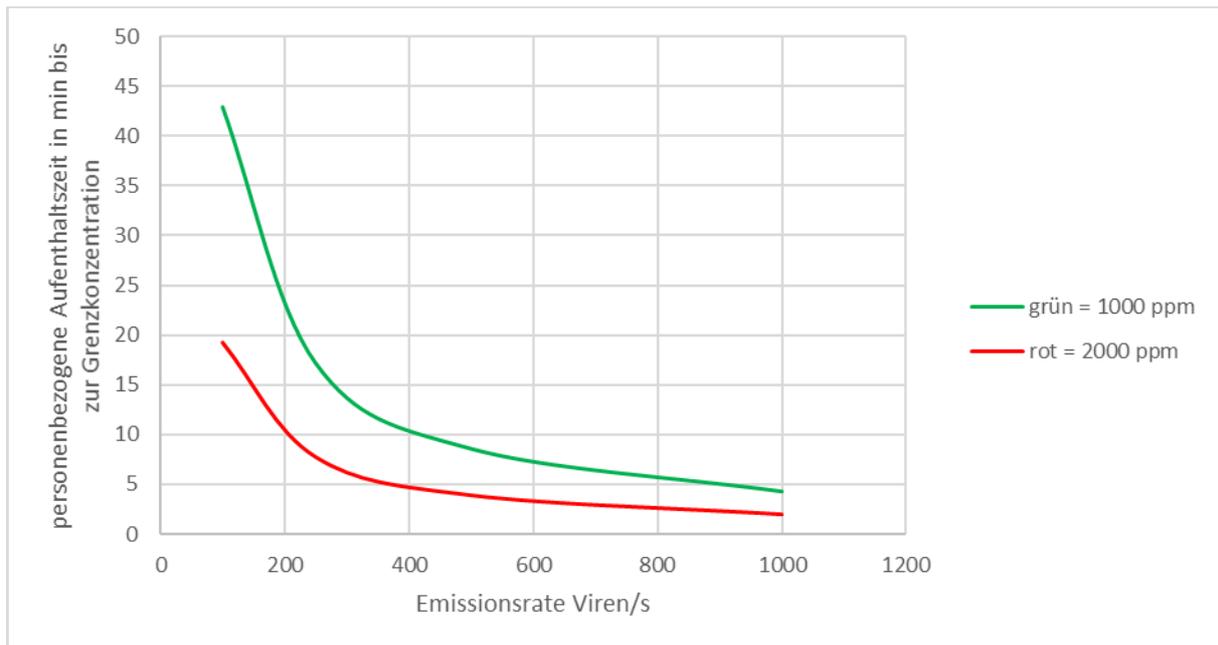


Abbildung 3: maximale Aufenthaltsdauer einer Person in einem Raum mit einer infizierten Person

Eine infizierte Person kann sich demnach atmend ($\dot{V}_{Q,Partikel} = 140 \text{ Viren/s}$ [2]) in einem Raum mit einer grünen Lüftungsampel etwas mehr als 30 Minuten aufhalten, bevor sie 3.000 Viren eingeatmet hat. Allerdings ist diese Person ja bereits infiziert, sodass es sich hierbei um einen theoretischen Grenzfall handelt. Eine weitere Person, die den Raum betritt, würde zu einer Erhöhung des Außenluftvolumenstroms und damit einer Verlängerung der Aufenthaltsdauer auf 60 min führen. Für einen geringeren Volumenstrom (rote Lüftungsampel) haben die beiden Personen bereits nach etwa 30 min die Grenzkonzentration an Viren eingeatmet.

Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchungen haben gezeigt, dass CO_2 ein guter Indikator für die Funktionsfähigkeit der Lüftungsanlage und den vorhandenen Außenluftvolumenstrom darstellt. Das Absterben der Viren sowie Sedimentation spielen bei Aerosolen und den verhältnismäßig kurzen Aufenthaltsdauern bis zum Erreichen der Grenzkonzentration eine untergeordnete Rolle.

Mit einem hohen Luftwechsel können sowohl niedrige CO_2 -Konzentrationen als auch niedrige Aerosolkonzentration erreicht werden (Abbildung 2). Je niedriger die Aerosolkonzentration, umso niedriger ist auch die Dosis an Aerosolen, die eine im Raum befindliche Person einatmet und daher auch das Infektionsrisiko.

Eine Anwendung der Untersuchungen auf bekannte Grenzkonzentrationen von CO_2 (Tabelle 1) in Innenräumen wird zur Bestimmung von maximalen Aufenthaltsdauern in Innenräumen genutzt (Abbildung 3). Für diese Untersuchung werden verschiedene Vereinfachungen angestellt, die bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden sollten. Zunächst wird von einer konstanten CO_2 - und Aerosolkonzentration im Raum ausgegangen. Dies führt beim Betreten einer weiteren Person dazu, dass das Risiko zunächst unterschätzt wird, da der Volumenstrom zwar relativ schnell hochfahren wird, aber die Konzentration sich langsamer abbaut. Bei allen Betrachtungen wird allerdings davon ausgegangen, dass eine kurzzeitige hohe Dosis genauso kritisch zu bewerten ist, wie eine

längere niedrigere Dosis und es werden Sedimentation sowie Absterben von Viren vernachlässigt. Die gewonnenen Ergebnisse können mit den getätigten Annahmen (Grenzkonzentration Viren, ein Virus pro Aerosol) eine erste Näherung darstellen für das Aufstellen von Handlungsempfehlungen.

Literatur:

[1] Robert-Koch-Institut (2020): SARS-CoV-2 Steckbrief zur Coronavirus-Krankheit-2019 (COVID-19),

https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html#doc13776792bodyText1, letzter Zugriff: 30.06.2020, 16:00Uhr

[2] Hartmann, A., Lange, J., Rotheudt, H., Kriegel, M. (2020): Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. In: Preprint. DOI:

<http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-10332>

[3] Noti, J.D., Blachere, F. M., McMillen, C. M., Lindsley, W. G., Kashon, M. L., Slaughter, D. R., Beezhold, D. H. (2013): High Humidity Leads to Loss of Infectious Influenza Virus from Simulated Coughs. In: PLOS One 8 (2)

[4] Wölfel, R., Corman, V. M., Guggemos, W., Seilmaier, M., Zange, S., Müller, M. A., Niemeyer, D., Jones, T.C., Vollmar, P., Rothe, C., Hoelscher, M., Bleicker, T., Brünink, S., Schneider, J., Ehrmann, R., Zwirgmaier, K., Drosten, C., Wendtner, C. (2020): Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019. In: Nature 581, p. 465-469,

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2196-x>

[5] Nikitin N, Petrova E, Trifonova E, and Karpova O: Influenza virus aerosols in the air and their infectiousness. Adv Virol. 2014;2014. doi: <https://doi.org/10.1155/2014/859090>

[6] DIN EN 16798-1: 2015-07; Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden – Teil 1:

Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der

Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; – Module M1-6; Deutsche und Englische Fassung prEN 16798-1:2015