Vergleich der inhalierten Dosis von virenbeladenen Aerosolpartikeln in Klassenzimmern bei verschiedenen Lüftungsarten zur Einordnung in die Definition „Enge Kontaktperson“ gemäß Robert-Koch-Institut

Autoren: Anne Hartmann[1], Martin Kriegel[1]
[1] Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut

DOI: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-12665

Abstract:
Basierend auf einer Studie von Lichtner und Kriegel [1] wird die inhalierte Menge an potentiell virenbeladenen Aerosolpartikeln in einem Klassenzimmer für verschiedene Situationen berechnet und verglichen. Des Weiteren wird die äquivalente Aufenthaltszeit bestimmt nach der genauso viele potentiell virenbeladene Aerosolpartikel eingeatmet wurden, wie gemäß der Definition einer engen Kontaktperson des RKI [2].
Es zeigt sich, dass die Position der Personen, die an einem Schultag mehr potentiell virenbeladene Aerosolpartikel einatmen als enge Kontaktperson nach RKI-Definition [2], nicht zwingend im unmittelbaren Umfeld der infektiösen Person liegt. Da die Position der infektiösen Person erst nach einem Ausbruch bekannt wird, wenn überhaupt, sollten weitere Maßnahmen wie Masken tragen und Abstand halten unabhängig der Lüftungsart weiter durchgeführt werden.

Einleitung:

Typische Lüftungsarten in Aufenthaltsräumen sind Fensterlüftung und maschinelle Belüftung. Die Lüftungsform unterscheidet sich jeweils in Misch- und Quelllüftung. In einer Studie von Lichtner und Kriegel [1] wurde gezeigt, dass in maschinell belüfteten Klassenzimmern[1] lokal sehr unterschiedliche Partikelkonzentrationen auftreten können. Dabei spielt neben der vom Gerät geförderten Luftmenge auch die Lüftungsform (Mischlüftung, Quelllüftung, Umluftfiltergerät) und die Position der Partikelquelle (der infektiösen Person) eine entscheidende Rolle.
Eine Mischlüftung tritt dann auf, wenn unbelastete Luft mit einer relativ hohen Geschwindigkeit in den Raum eingebracht wird und sich dann mit der sich im Raum befindenden Luft vermischt. Eine vorhandene Verunreinigung der Raumluft wird dabei durch die hinzuströmende saubere Luft verdünnt, dann in einer geringeren Konzentration im Raum verteilt und schließlich aus dem Raum abgeführt [3].
Zur Erzeugung einer Quelllüftung hingegen wird die Luft mit einem geringen Impuls, aber mit einer leichten Untertemperatur (Lufttemperatur der Zuluft < Lufttemperatur der Raumluft) in den Raum eingebracht. Die Luft bildet dann eine Art Frischluftsee am Boden. An Personen (oder anderen Wärmequellen) wird die Luft erwärmt, steigt nach oben und wird dort aus dem Raum entfernt. Es kommt somit deutlich weniger zu einer Vermischung der Zuluft mit der Raumluft und der daraus resultierenden Verteilung von Schadstoffen im Raum [3].
In Räumen, die über Fenster gelüftet werden, verteilen sich die Aerosolpartikel während geöffneter Fenster in kalter Jahreszeit ähnlich der Quelllüftung und bei geschlossenen Fenstern ähnlich der Mischlüftung, da die Personen durch ihre Wärmeabgabe einen relativ großen Auftriebsvolumenstrom erzeugen. Allerdings findet bei geschlossenen Fenster keine Abfuhr von belasteter Luft statt. Die Fensterlüftung ist nicht Gegenstand der weiteren Betrachtung. Es ist jedoch davon auszugehen, dass durch Fensterlüftung im zeitlichen Mittel weniger und nicht kontinuierlich unbelastete Luft zugeführt und belastete abgeführt wird. Die Ergebnisse sind demnach nicht eindeutig mit den Fällen einer konstanten Luftzuführung zu vergleichen.

[1] Die Luft in maschinell belüfteten Klassenzimmern wird mit Hilfe von Ventilatoren in den Raum transportiert bzw. mit dessen Hilfe im Raum bewegt.

Darüber hinaus wurde von Kriegel und Hartmann [4] aufgezeigt, dass mit zunehmender Expositionsdauer selbst bei sehr gut belüfteten Räumen es dazu kommen kann, dass eine relativ hohe Dosis an potentiell virenbeladenen Aerosolpartikeln eingeatmet werden.
Das Robert-Koch-Institut (RKI) gibt Empfehlungen zur Kontaktpersonen-Nachverfolgung und definiert hierfür „enge Kontaktpersonen". Eine solche Person soll demnach ein hohes Risiko einer Ansteckung mit Covid-19 unterliegen. Befindet sich eine Person in einem Raum mit wahrscheinlich hoher Konzentration infektiöser Aerosolpartikel unabhängig vom Abstand länger als 10 Minuten, so gilt diese Person als „enge Kontaktperson" und sollte nachverfolgt werden. Da für diesen Fall keine weiteren Angaben zur Konzentration an infektiösen Aerosolpartikeln abgeleitet werden können, wurden die anderen beiden kritischen Situationen (Gespräch und Flugreise) analysiert. Basierend auf der Definition wurde die inhalierte Dosis potentiell virenbeladener Aerosolpartikel bei einem direkten Gespräch ohne Maske von 5 min im Abstand von 1 m (als ein Fall für eine direkte Unterhaltung) sowie bei einem Flug von 5 h in einem Flugzeug mit einem Luftwechsel von 21 1/h[2] ermittelt und als Referenzfall im Folgenden verwendet.
Nachfolgend werden verschiedene ventilatorgestützte Lüftungssysteme hinsichtlich ihrer Effizienz verglichen, die inhalierte Dosis an potentiell virenbeladenen Aerosolpartikeln unter die kritische Dosis für die Definition einer „engen Kontaktperson" zu senken. Neben herkömmlichen Lüftungssystemen, bei denen die Luft durch eine Lüftungsanlage zur Verfügung gestellt wird, werden auch die Möglichkeiten von Umluftfiltergeräten aufgezeigt.

Grundlagen und Methoden

Lichtner und Kriegel [1] haben den Luftqualitätsindex in einem Klassenzimmer mit 24 Schülerinnen und Schülern sowie einer Lehrkraft bestimmt. Der Luftqualitätsindex beschreibt dabei das Verhältnis der Aerosolpartikelkonzentration in der Abluft zur Aerosolpartikelkonzentration im Atembereich. Dabei wurden 8 Varianten der Lüftung/Belegung bei einem konstanten Zuluftvolumenstrom von 1000 m³/h unterschieden (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: untersuchte Fälle der maschinellen Lüftung verkürzt nach Lichtner und Kriegel [1]

Lüftung	Trennwände*	Belegung
Mischlüftung	Nein	Voll
Luftreiniger , Mischlüftung, 100% Umluft	Nein	Voll
Luftreiniger, Mischlüftung, 100% Umluft	Ja	Voll
Abluft Lüftungsgerät oben, Quelllüftung	Nein	Voll
Abluft Lüftungsgerät oben, Quelllüftung	Nein	Halb
Abluft Decke, Quelllüftung	Nein	Voll
Abluft Decke, Quelllüftung	Nein	Halb
* mit/ohne Acrylglasscheiben als Trennscheibe zwischen zwei benachbarten Schülerinnen/Schülern		

Zusätzlich wurden fünf Positionen der infizierten Person im Raum betrachtet (siehe Abbildung 2).

Aufbauend auf den Berechnungen des Luftqualitätsindex (ε_c^b) nach Lichtner und Kriegel [1] können Aussagen über die lokale Konzentration der von der infektiösen Person abgegebenen Partikel und die von den einzelnen Personen inhalierten Dosen getroffen werden. Die lokale Partikelkonzentration unterscheidet sich dabei von der mittleren Konzentration basierend auf Gleichung (1).

$$c_{Atemluft} = \frac{c_{mittel}}{\varepsilon_c^b} \qquad \textbf{(1)}$$

[2] Der Luftwechsel gibt an, wie viel Luft pro Stunde einem Raum zugeführt wird. Ist das Raumvolumen 100 m³ groß und es werden 1000 m³ Luft pro Stunde dem Raum zugeführt, dann beträgt der Luftwechsel 10 1/h.

Eine Veranschaulichung der Bedeutung des Luftqualitätsindex ist in Abbildung 1 zu erkennen. Ein Luftqualitätsindex von 1 bedeutet dabei, dass die Konzentration in der Abluft der Konzentration im Atembereich entspricht (gelb). Ein Wert über 1, bedeutet dann eine niedrigere Aerosolpartikelkonzentration im Atembereich als in der Abluft (grün) und ein Wert unter 1 eine höhere Aerosolpartikelkonzentration (rot).

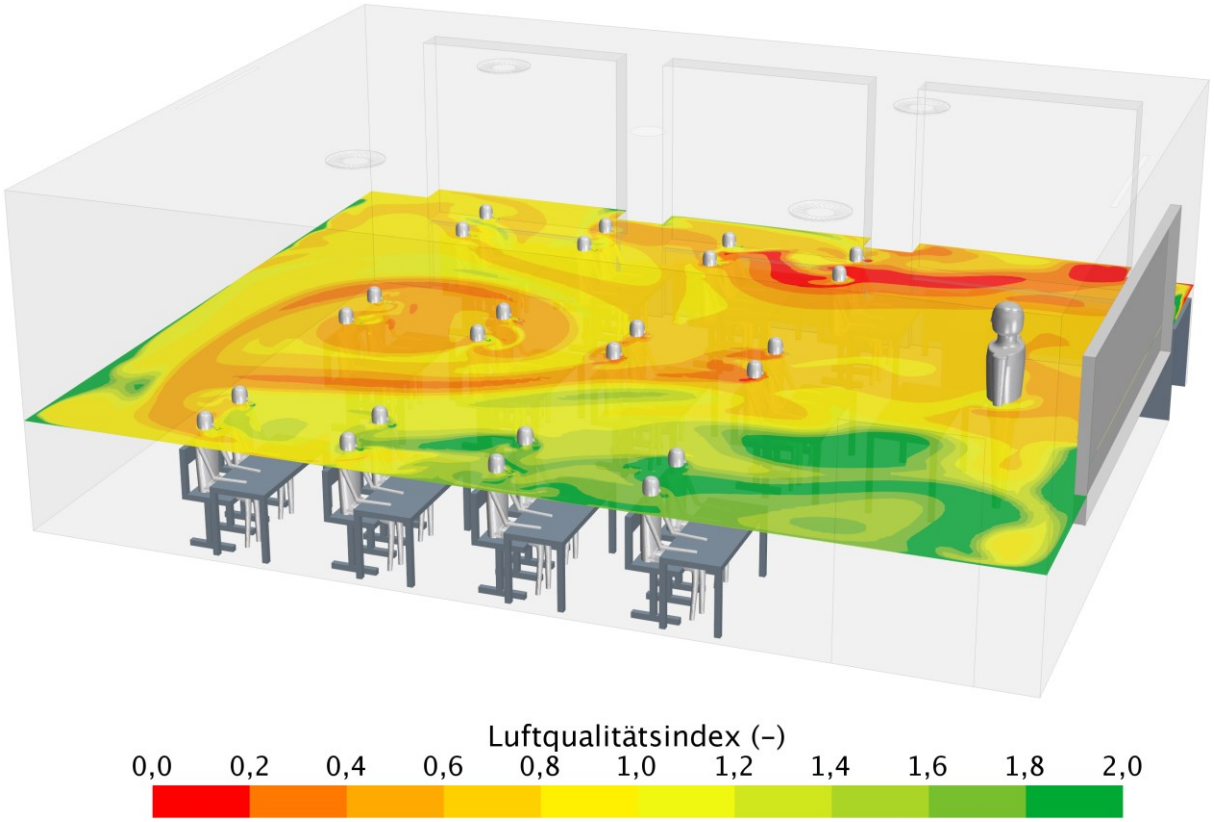


Abbildung 1: ***Lokaler Luftqualitätsindex 1 m über dem Boden, Mischlüftung, Position des infektiösen Schulkinds 1 nach Lichtner und Kriegel*** **[1]**

In Abhängigkeit von der Aktivität und damit einhergehend abgegebenen Partikelmenge atmen die Personen daher mehr oder weniger potentiell virenbeladene Partikel einer infektiösen Person ein, weshalb, wie bei Kriegel und Hartmann [4], der relative Vergleich inhalierter Dosen in verschiedenen Situationen an dieser Stelle im Vordergrund stehen soll. Es wird dafür jeweils von einem gemeinsamen Aufenthalt in Innenräumen von einem Schultag (3 Doppelstunden á 90 min), also insgesamt 270 min ausgegangen. Als Vergleichswert dient die Menge der inhalierten Aerosolpartikel in einer Situation nach der Definition einer engen Kontaktperson des RKI [2]. Die absolut abgegebene Partikelmenge ist in einem relativen Vergleich nicht von Bedeutung. Ebenso wenig spielt die persönliche Schutzausrüstung eine entscheidende Rolle, wenn davon ausgegangen wird, dass sie im Vergleichsszenario und im betrachteten Szenario gleich ist, also z.B. in beiden Fällen Masken getragen werden. Weicht die persönliche Schutzausrüstung vom Referenzfall (RKI-Definition einer engen Kontaktperson [2] ohne Maske) ab, kann dies durch die Maskeneffizienz direkt berücksichtigt werden.
Mit zunehmender Aufenthaltszeit steigt die Menge der eingeatmeten potentiell virenbeladenen Aerosolpartikel an. Es wird daher ebenfalls ermittelt, nach welcher Zeit dieselbe Menge potentiell virenbeladener Aerosolpartikel eingeatmet wurde, wie im Fall der engen Kontaktperson nach RKI-Definition [2].

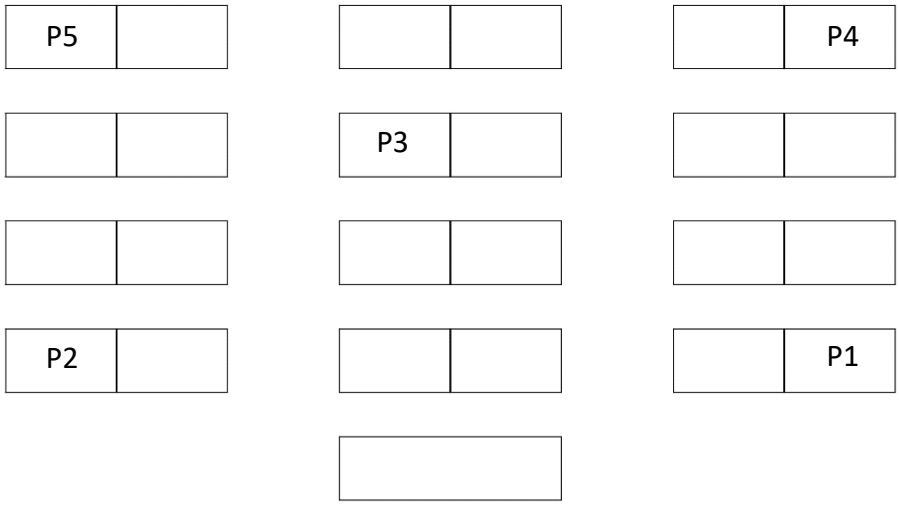


Abbildung 2: Positionen (P1-P5) der infektiösen Person nach Lichtner und Kriegel [1]

Ergebnisse

In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind beispielhaft die Ergebnisse für den Fall mit Umluftfiltergerät (100% Umluft, HEPA 14 Filter, Viren-Abscheidegrad nahe 100 %) ohne Trennwände für die infektiöse Person an Position 3 (leeres Feld, im hinteren Teil des Klassenzimmers in der mittleren Reihe) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass im Fall des betrachteten Umluftfiltergeräts an einem Schultag die meisten Schüler genauso viele oder mehr potentiell virenbeladene Partikel (siehe Abbildung 3, Maximum: 2,07 mal so viele Partikel) einatmen wie im Fall der engen Kontaktperson nach RKI-Definition [2]. Im Mittel atmen die Schüler etwa genauso viele Partikel ein (1,12 mal so viele). Wird jetzt z.B. das Tragen von Masken (z.B. OP-Masken, Effizienz 30%) berücksichtigt, werden jeweils nur 70% der Partikel eingeatmet. Der Maximalwert liegt dann bei 1,45 und der Mittelwert bei 0,78. Nur noch 6 Schülerinnen und Schüler atmen dann mehr potentiell virenbeladene Partikel ein als eine enge Kontaktperson nach RKI-Definition [2]. Eine Auswahl an kritischen Fällen, der in [1] betrachteten Situationen sind im Anhang (Abbildung 5, Abbildung 7, Abbildung 9, Abbildung 11, Abbildung 13 und Abbildung 15) zu finden. Grün bedeutet dabei, das weniger als 0,8-mal so viele Partikel eingeatmet werden, wie von einer engen Kontaktperson nach RKI-Definition [2] und rot, dass mehr als 1,2-mal so viele Partikel wie im Referenzfall eingeatmet werden. Masken sind in den Abbildungen nicht berücksichtigt. Es zeigt sich, dass die Plätze mit einer hohen Konzentration an potentiell virenbeladenen Partikeln im gesamten Klassenzimmer oder im Umfeld der Person zu finden sind. Eine eindeutige Tendenz kann dabei nicht abgeleitet werden.
Weitere Fälle sind in der Ergänzung zu finden.

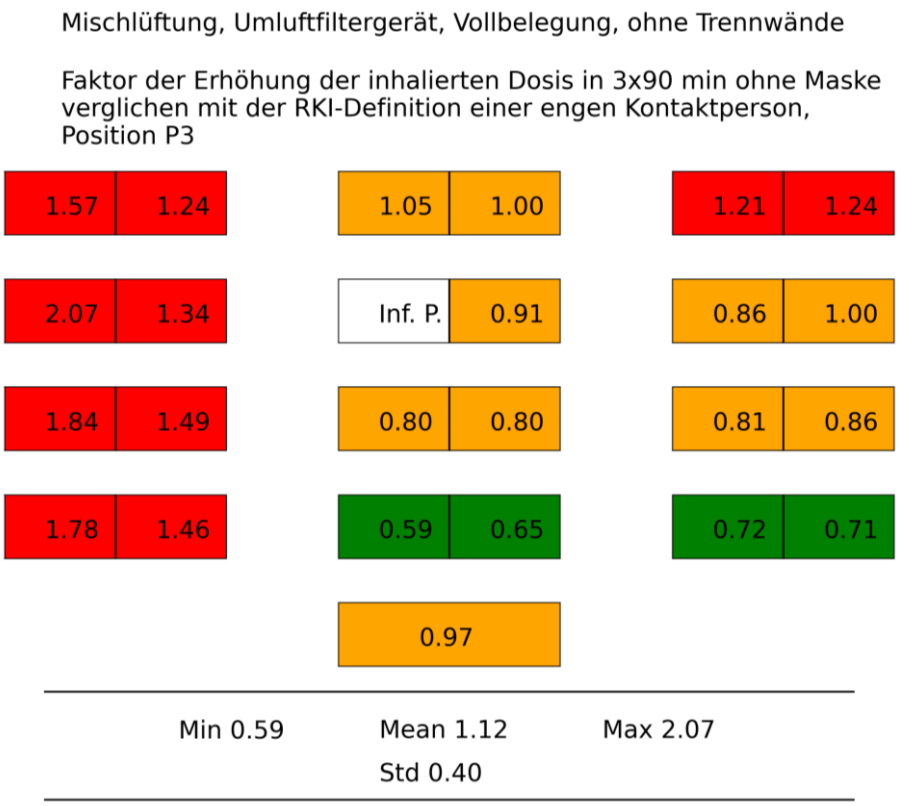


Abbildung 3: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] **einer engen Kontaktperson, Umluftfiltergerät (100% Umluft, ohne Fensterlüftung) ohne Trennwände, Position 3**

In Abbildung 4 ist die Aufenthaltszeit bis zur Inhalation der gleichen Menge an Partikel wie bei einer engen Kontaktperson nach RKI-Definition [2] dargestellt. Für die linke Reihe (von der Lehrkraft aus betrachtet) sowie einige Schülerinnen am hinteren Ende des Raumes sind die Aufenthaltszeiten geringer als der angenommene Schultag (270 min).
Bei Verwendung von Masken (Maskeneffizienz 70 %) kann die Aufenthaltszeit um etwa 42 % verlängert werden. Für 6 Schülerinnen und Schüler (in der linken Reihe) liegt die Aufenthaltszeit weiterhin unter der angenommenen Dauer eines Schultages (270 min).
Weitere Berechnungen der maximalen Aufenthaltszeit sind im Anhang (Abbildung 6, Abbildung 8, Abbildung 10, Abbildung 12, Abbildung 14 und Abbildung 16) sowie im Ergänzungsmaterial zu finden. Eine rote Farbe bedeutet dabei, dass die Aufenthaltszeit bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie nach RKI-Definition eines engen Kontaktes [2] kürzer als eine Doppelstunde (90 min) ist, während eine grüne Farbe bedeutet, dass es länger als ein Schultag von 3 x 90 min ist.

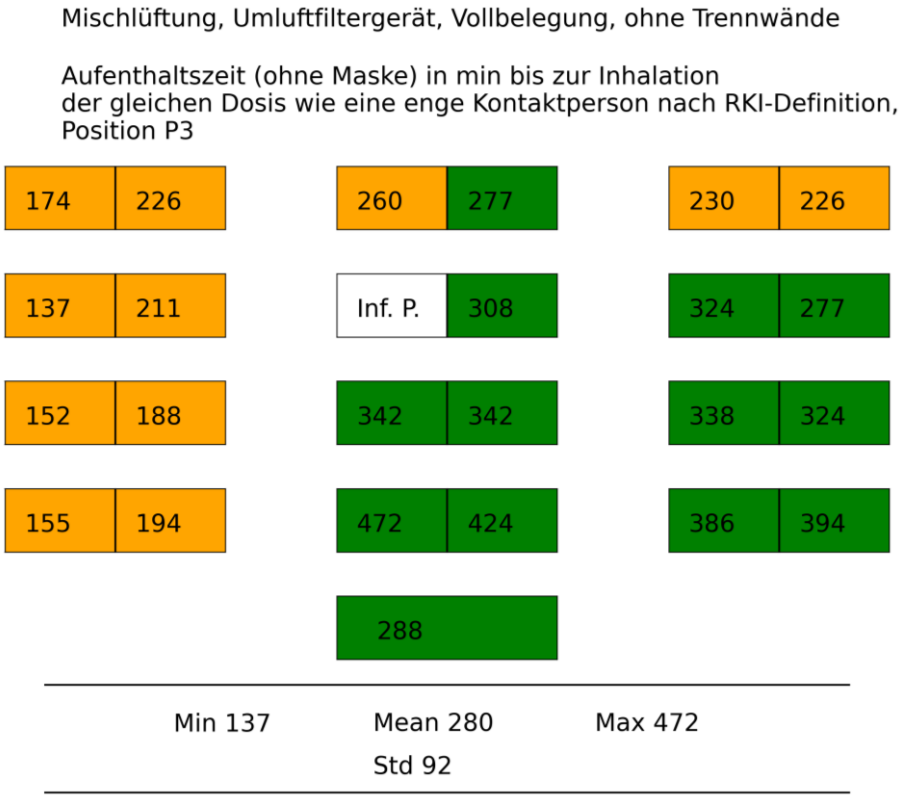


Abbildung 4: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie in eine enge Kontaktperson nach RKI-Definition [2]**, Mischlüftung, Umluftfiltergerät (100% Umluft, ohne Fensterlüftung) ohne Trennwände, Position 3**

Diskussion

Aus den Abbildungen wird deutlich, dass die inhalierte Dosis an einem Schultag in den Klassenzimmern mit Mischlüftung bzw. Umluftfiltergerät lokal sehr unterschiedlich ist. Sie übersteigt regelmäßig die eingeatmete Menge einer engen Kontaktperson nach RKI-Definition [2]. Allerdings betrifft dies in den wenigsten Fällen nur den direkten Banknachbarn/Banknachbarin, sondern häufig auch die angrenzenden Reihen und weiter entfernt sitzende Personen. Im Fall von Quelllüftung sind in den meisten Fällen nur das nahe Umfeld der infektiösen Person betroffen nicht aber weiter entfernt sitzende Personen. Dabei ist das nahe Umfeld deutlich größer als ein 1,5 m Radius. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Position der infektiösen Person im Raum einen signifikanten Einfluss auf die Verteilung der potentiell virenbeladenen Aerosolpartikel im Raum hat. Diese ist jedoch im Vorfeld nicht bekannt, weshalb weitere Schutzmaßnahmen, z.B. das Tragen von Masken und die Verkürzung von Aufenthaltszeiten nicht vernachlässigt werden sollten. Abschließend sollte bedacht werden, dass in dem durchgeführten Vergleich keine Personenbewegungen stattgefunden haben. In Realität sind die Sitznachbarn wechselnd, die Tischanordnungen in verschieden genutzten Räumlichkeiten unterschiedlich. Das alles führt zu einer unübersichtlichen Situation, so dass für Quarantäneanordnungen die gemeinsame Aufenthaltszeit mit der infizierten Person entscheidend ist und nicht der Ort der Person. Es kann selbst bei guter Belüftung der Räumlichkeiten davon ausgegangen werden, dass nach drei Stunden gemeinsamen Aufenthalts jeder der Anwesenden betroffen sein könnte.

Literatur:

[1] E. Lichtner und M. Kriegel, „Luftgetragene Erreger und Luftqualität in Innenräumen am Beispiel eines Klassenzimmers - Verteilung der Erreger und Bewertung der Lüftungseffektivität," Preprint, DOI: http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-12326.2, 2021.

[2] Robert Koch Institut, „Kontaktpersonen-Nachverfolgung (KP-N) bei SARS-CoV-2-Infektionen," 15 09 2021. [Online]. Available: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Kontaktperson/Management.html. [Zugriff am 15 11 2021].

[3] E.-R. Schramek, Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, München: Oldenbourg Industrieverlag München, 2020.

[4] M. Kriegel und A. Hartmann, „SARS-CoV-2-Aerosolpartikel: Inhalierte Dosen im Vergleich zwischen gar nicht, mäßig, gut und sehr gut belüfteten Räumen," *RKI Epidemiologisches Bulletin 18,* pp. 30:34, DOI: 10.25646/8394.2, 2021.

Abbildung ausgewählter Szenarien der betrachteten Lüftungssysteme

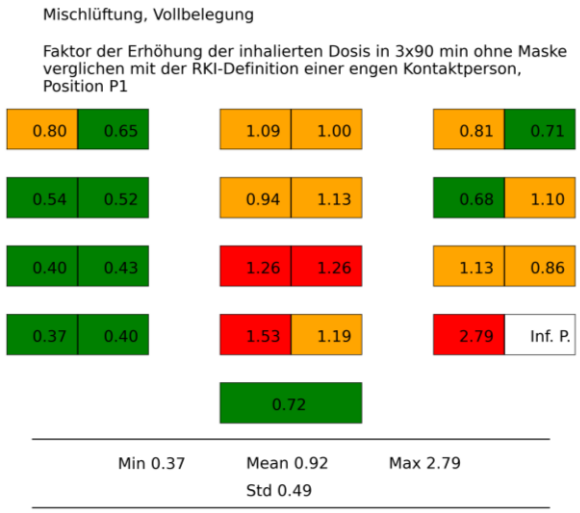


Abbildung 5: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] einer engen Kontaktperson, Mischlüftung, Position 1

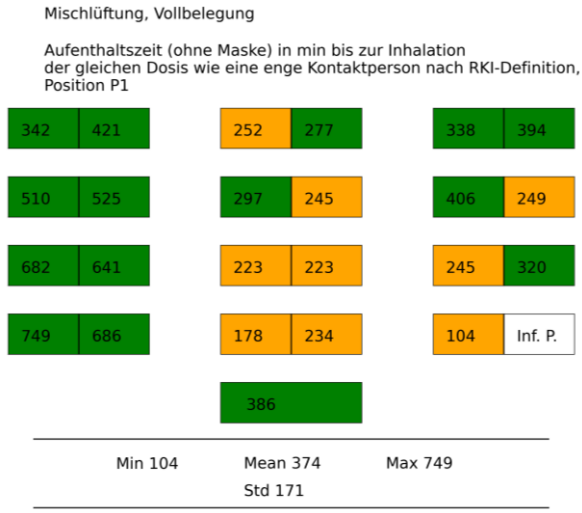


Abbildung 6: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Mischlüftung, Position 1

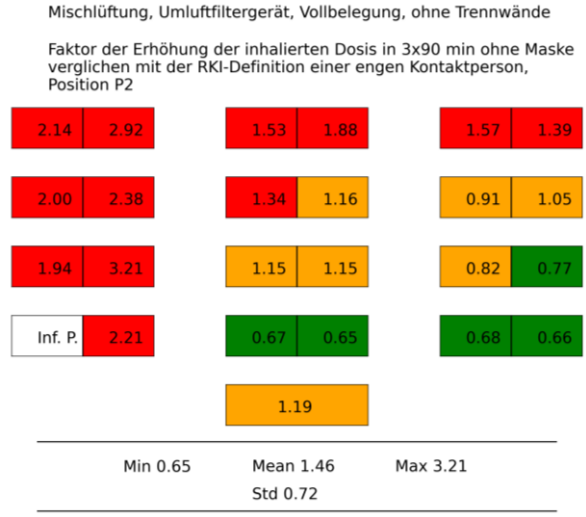


Abbildung 7: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] einer engen Kontaktperson, Mischlüftung, Umluftfiltergerät (100% Umluft) ohne Trennwände, Position 2

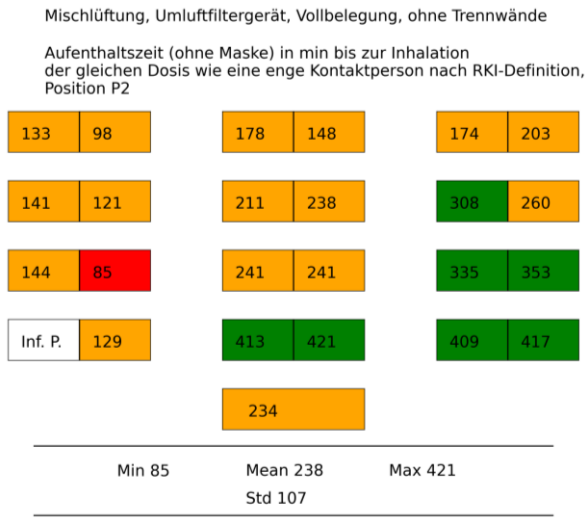


Abbildung 8: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Mischlüftung, Umluftfiltergerät (100% Umluft) ohne Trennwände, Position 2

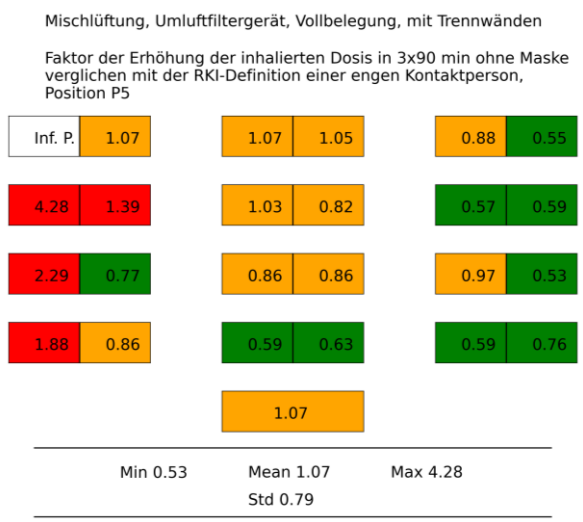


Abbildung 9: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] einer engen Kontaktperson, Mischlüftung, Umluftfiltergerät (100% Umluft) mit Trennwänden, Position 5

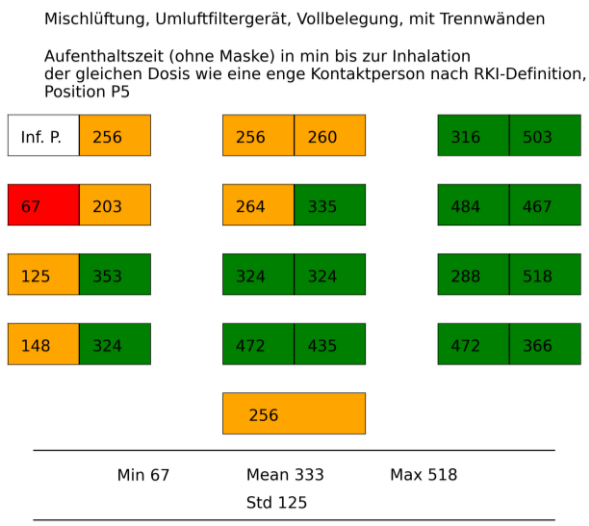


Abbildung 10: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Umluftfiltergerät (100% Umluft) mit Trennwänden, Position 5

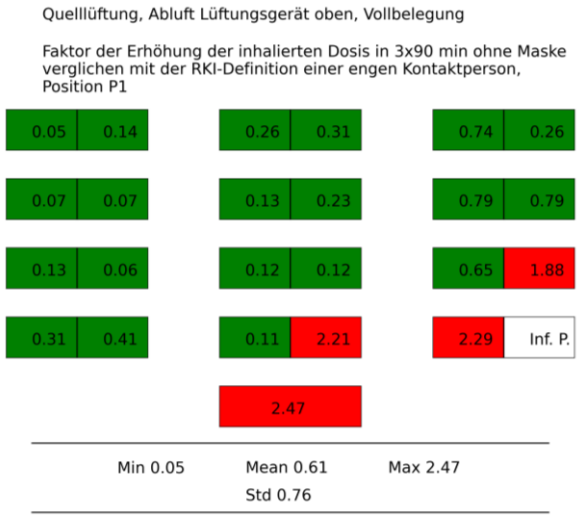


Abbildung 11: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] einer engen Kontaktperson, Quelllüftung, Abluft Lüftungsgerät oben, Vollbelegung, Position 1

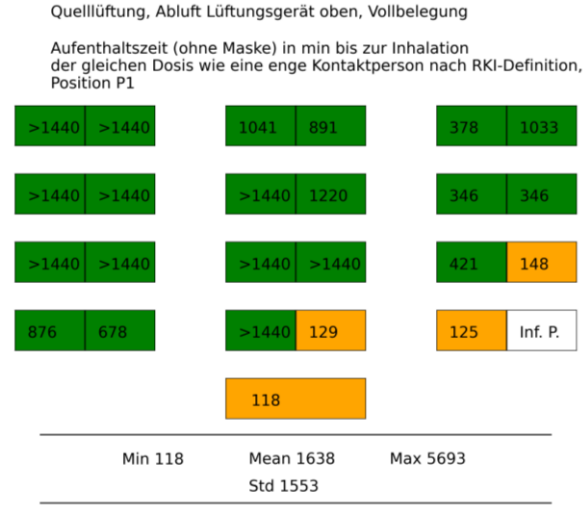
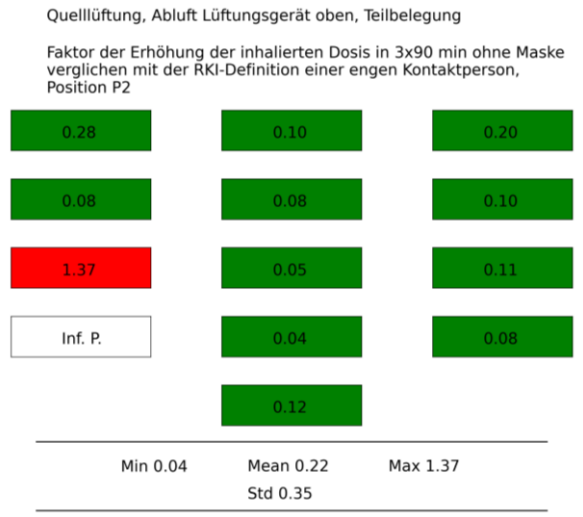


Abbildung 12: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Quelllüftung, Abluft Lüftungsgerät oben, Vollbelegung, Position 1



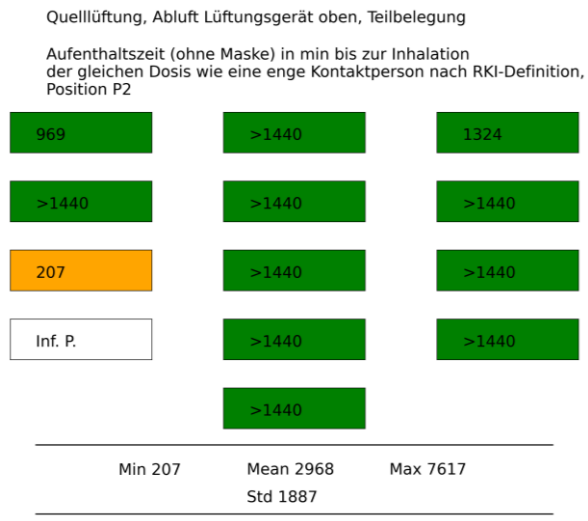


Abbildung 13: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition einer engen Kontaktperson [2], Abluft Lüftungsgerät oben, Quelllüftung halbe Belegung, Position 2

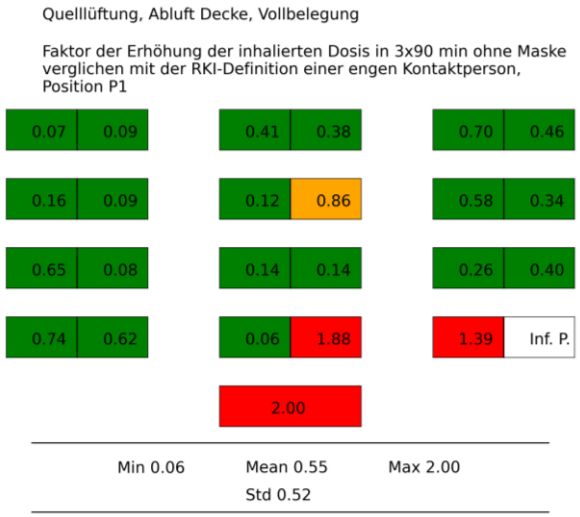


Abbildung 14: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Abluft Lüftungsgerät oben, Quelllüftung, halbe Belegung, Position 2

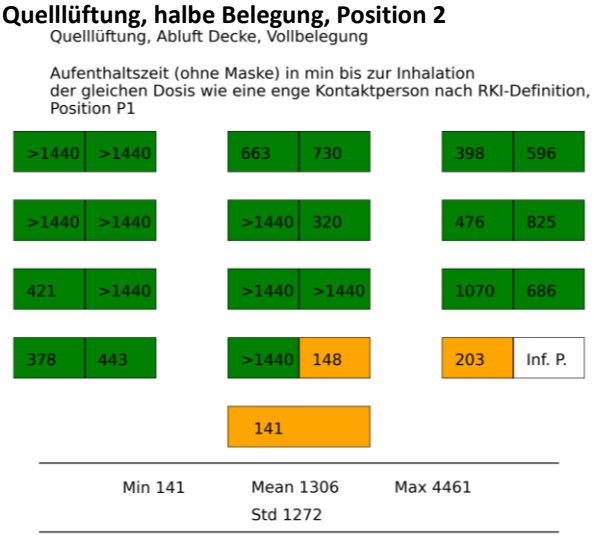


Abbildung 15: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] einer engen Kontaktperson, Quelllüftung, Abluft Decke, Vollbelegung, Position 1

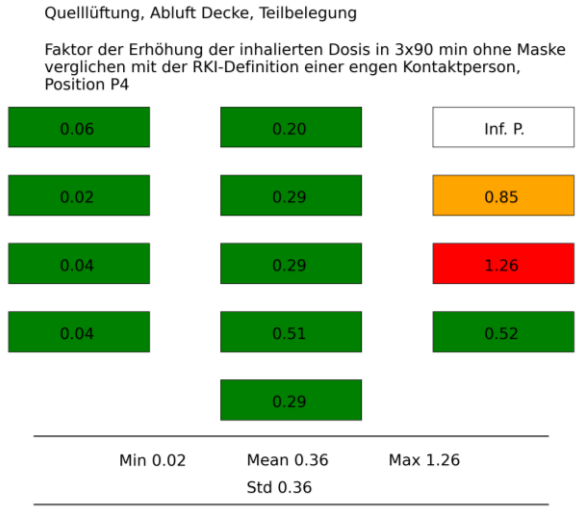


Abbildung 16: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Quelllüftung, Abluft Decke, Vollbelegung, Position 1

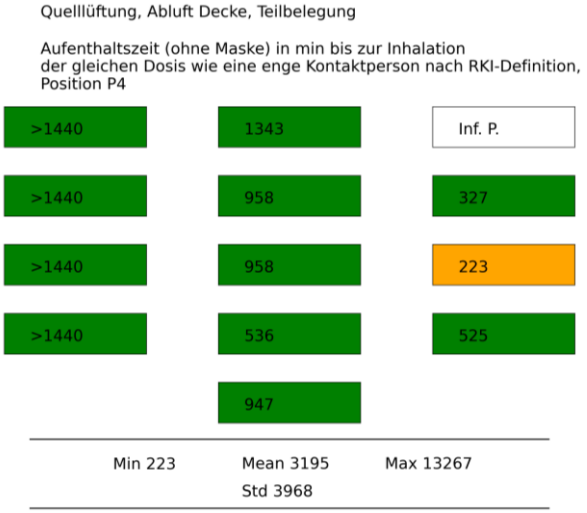


Abbildung 17: Faktor der Erhöhung der inhalierten Dosis verglichen mit der RKI-Definition [2] einer engen Kontaktperson, Quelllüftung, Abluft Decke, Teilbelegung, Position 4

Abbildung 18: Aufenthaltszeit in min bis zur Inhalation der gleichen Dosis wie eine enge Kontaktperson nach RKI Definition [2], Quelllüftung, Abluft Decke, Teilbelegung, Position 4