

online | Vortrag der Gesundheitstechnischen Gesellschaft am 02. Dezember 2021.

Infektionsschutzgerechtes Lüften – Aussagekraft von Luftwechsel und Zuluftvolumenstrom

Martin Kriegel, Berlin

Einleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel, Leiter Hermann-Rietschel-Institut TUB, referierte am 02. Dezember vor 68 Mitgliedern und Gästen der Gesundheitstechnischen Gesellschaft zum Thema Lüftungstechnische Größen und ihrer Aussagekraft in Bezug auf infektionsschutzgerechtes Lüften. Der nachfolgende Beitrag liefert Antworten und fasst wichtige Erkenntnisse aus dem Vortrag zusammen.

Warum ist das Thema so relevant?

Es existieren verschiedene Empfehlungen, welche Lüftungstechnische Größe für die virusfreie Zuluft verwendet werden sollte, um das Infektionsrisiko in einem Raum über luftgetragene SARS-CoV-2 zu minimieren. So empfehlen viele eine Luftwechselrate von mindestens 4-6fach, d.h. 4-6mal die Stunde wird die Luft im Raum erneuert, andere gehen von einem absoluten Volumenstrom aus, der dem Raum zugeführt werden muss, um eine möglichst hohe Verdünnung und damit niedrige Konzentration an Viren in der Raumluft zu erreichen, weitere empfehlen den personenbezogenen Volumenstrom, d.h. einen Volumenstrom pro Person. Die Aussagekraft dieser drei Lüftungstechnischen Größen wurde im Vortrag in Bezug auf infektionsschutzgerechtes Lüften miteinander verglichen und die Bedeutung ihrer Aussagekraft eingeordnet. Auf weitere Lüftungstechnische Größen wird an dieser Stelle nicht eingegangen.

Ziel dieses Beitrags ist es, über die Bedeutung dieser drei Größen in Bezug auf infektionsschutzgerechtes Lüften aufzuklären. Dies auch, weil es in der Öffentlichkeit hierzu offensichtlich Unsicherheiten gibt in Bezug auf die Einordnung.

Grundlagen zu den Lüftungstechnischen Größen

Die erste betrachtete Größe ist der *Volumenstrom*. Das sind die Kubikmeter Luft, die dem Raum zugeführt werden pro Stunde. Der Zuluftvolumenstrom ist aus Kontinuitätsgründen immer gleich dem Abluftvolumenstrom. Wird einem Raum kontinuierlich Luft zugeführt und wird dieser Volumenstrom rechnerisch auf das Raumvolumen bezogen, erhält man eine zweite Größe, die *Luftwechsel(rate), oder auch Luftaustausch(rate) genannt wird*. Die Luftwechselrate gibt an, wie oft das Raumvolumen pro Stunde erneuert oder getauscht wird. Die dritte betrachtete Größe ist der *personenbezogene Volumenstrom*. Das ist der Volumenstrom, also die Kubikmeter pro Stunde und zusätzlich pro Person, die im Raum zugeführt werden.

Der Volumenstrom pro Person ist eine „menschliche“ Größe, denn wir „verbrauchten“ die Luft, benötigen Frischluft zum Atmen, produzieren unter anderem CO₂, einen Schadstoff, und benötigen immer neue frische Luft. In den Raum eingeführt wird also ein bestimmter Frischluftvolumenstrom pro Person, und damit wird CO₂ aus dem Raum abgeführt.

Einordnung Lüftungstechnischer Größen

Wir betrachten einen Beispielraum mit einer Grundfläche von 10m x 5m und einer Höhe von 3m. Das Raumvolumen beträgt demnach 150 Kubikmeter. Der Raum wird belüftet. Bei einem Volumenstrom von 150 Kubikmetern pro Stunde beträgt der Luftwechsel folglich 1. Also wird in diesem Raum die Luft einmal pro Stunde erneuert.

Bei angenommenen vier anwesenden Personen beträgt der personenbezogene Volumenstrom in diesem Raum 37,5 Kubikmeter pro Stunde und Person. Ist eine der vier Personen infiziert und alle kommen zum Startzeitpunkt der Betrachtung gleichzeitig in den belüfteten Raum, stellt sich in der zeitlichen Folge eine Konzentration ein, eine konstante Anzahl Erreger pro Kubikmeter Luft. Die Höhe der Konzentration hängt davon ab, wie viele Erreger die Person in den Raum einbringt und wieviel kontaminationsfreie Luft in den Raum hineingeführt wird.

Das Verhältnis von Virenkopien pro Sekunde, also die Emissionsrate Anzahl pro Zeit, die in den Raum eingebracht wird, ist die Quellstärke. Dem gegenüber steht der unbelastete Luftvolumenstrom, der mittels Lüftung eingeführt wird.

Nach einer gewissen Zeit stellt sich für die Anzahl der Viren pro Kubikmeter Raumluft ein konstanter Wert ein, der Raum ist aufkonzentriert.

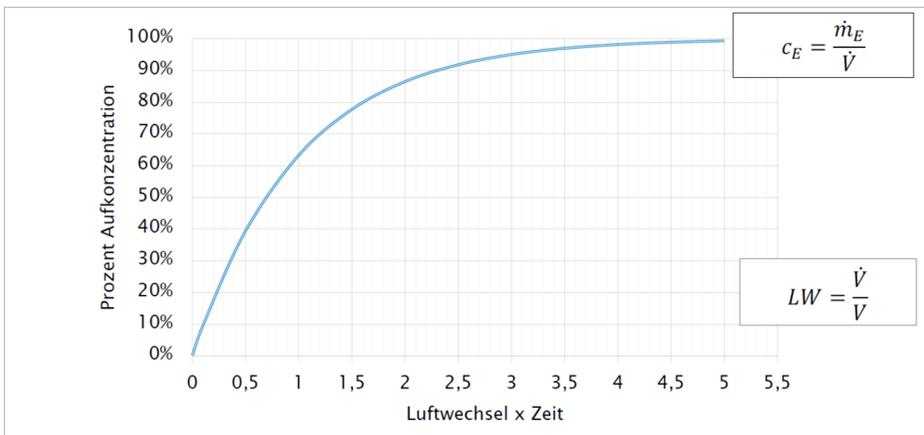


Abbildung 1: Konzentration (instationäre Betrachtung)

Diese Aufkonzentrierung lässt sich veranschaulichen mit Salz in einem Glas Wasser. Wird Salz in ein sauberes Glas mit Wasser geschüttet, steigt die Salzkonzentration

immer weiter an. Das Wasser würde immer salziger schmecken. Wird neben Salz und auch frisches Wasser in das Glas geschüttet, erreicht der Salzgehalt im Wasser nach einer gewissen Zeit einen konstanten Wert. Das Wasser würde mit zunehmender Zeit nicht mehr salziger schmecken, obwohl permanent Salz hinzugefügt wird. Das ebenfalls zugeführte frische Wasser begrenzt den Anstieg des Salzgehaltes.

Bezogen auf Beispiel-1 bedeutet das: Zum Zeitpunkt 0 fängt die eine infizierte Person an, Erreger in den Raum einzubringen. Im zeitlichen Verlauf konzentriert sich dieser Raum auf. Nach einer gewissen Zeit stellt sich ein Gleichgewicht ein von Quellstärke und zugeführter kontaminationsfreier Frischluft. Der Volumenstrom pro Raumvolumen, also die Luftwechselrate, multipliziert mit der Zeit gibt an, wann der Raum aufkonzentriert ist, wann die Konzentration das Gleichgewicht erreicht hat. Das Produkt aus Luftwechselrate und fortlaufender Zeit muss etwa 5 sein, bis das Gleichgewicht erreicht ist. Für den Luftwechsel 1 in Beispiel-1 würde es fünf Stunden dauern, bis die Konzentration erreicht ist, bei einem Luftwechsel 5 würde die Konzentration bereits nach einer Stunde erreicht.

Vergleichen wir nun zwei Räume; Raum-2 ist halb so groß wie Raum-1, ansonsten gelten in beiden Räumen die gleichen Bedingungen: Vier Personen sind jeweils im Raum, eine infizierte Person bedeutet dort die Quellstärke, der Volumenstrom beträgt 150 Kubikmeter pro Stunde. Volumenstrom, Anzahl der Personen und Quellstärke sind also gleich. Am Ende haben beide Räume die gleiche Konzentration. Wie schnell das allerdings passiert, hängt vom Luftwechsel ab, dem Volumenstrom pro Raumvolumen.

Der Luftwechsel im kleinen Raum ist doppelt so groß wie im großen Raum. Trägt man die virenbeladenen Partikel pro Kubikmeter Raumvolumen über der Zeit auf, dann erreicht der kleine Raum sehr schnell das Gleichgewicht, also das, was hier Quellstärke geteilt durch den Zuluftvolumenstrom bedeutet. Im großen Raum dauert es länger, bis das Gleichgewicht erreicht ist. Am Ende sind beide Konzentrationen identisch.

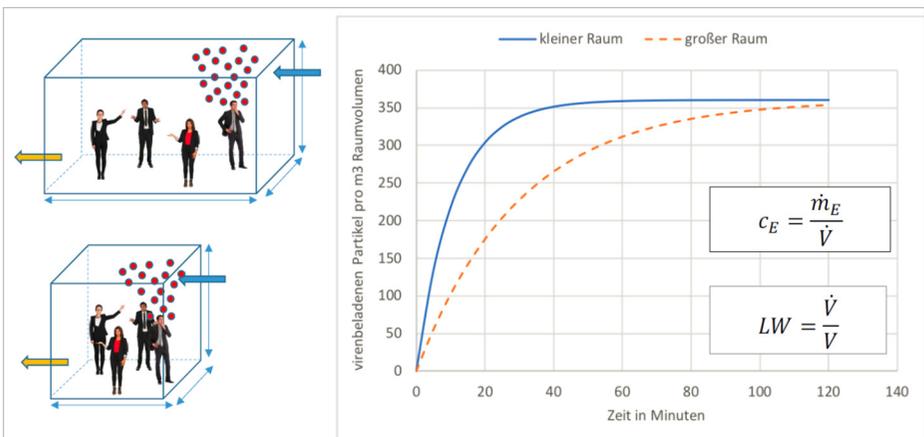


Abbildung 2: Luftwechsel(rate): Einfluss der Raumgröße

Wird der personenbezogene Volumenstrom betrachtet, so hängt die Konzentration auch von der Anzahl der Personen im Raum ab.

Im Beispiel beträgt der personenbezogene Volumenstrom 37,5 Kubikmeter pro Stunde und Person. Vier Personen sind im Raum. Dann sind es 150 Kubikmeter pro Stunde, die hier als Verdünnung wirken.

Soweit zu den Grundlagen dieser lufttechnischen Größen.

Zwischenfazit

Je größer der Volumenstrom, desto niedriger ist die Konzentration, also die Anzahl an Erregern in der Raumluft. Sie hängt allein ab von der Quellstärke (Virenemissionsrate) und von dem Volumenstrom.

Der Luftwechsel hat keine direkte Beziehung zur Konzentration an Erregern im Raum. Soll diese Größe Anwendung finden, so wird zusätzlich das Raumvolumen benötigt, damit der Volumenstrom und damit die Konzentration ausgerechnet werden kann.

Vergleicht man identische Raumgrößen, nimmt mit zunehmendem Luftwechsel auch die Konzentration an Erregern in der Raumluft ab, da der Volumenstrom ansteigt. Unterschiedlich große Räume lassen sich über den Luftwechsel schlecht bis gar nicht miteinander vergleichen. Der Luftwechsel gibt lediglich an, wie schnell der Raum im Gleichgewicht ist. Der Luftwechsel wird häufig angegeben im Sinne einer Mindestvorgabe: z.B. 4 oder 6-fachen Luftwechsel muss ein Raum haben, damit von infektionsschutzgerechtem Lüften gesprochen werden kann. Es wurde nachgewiesen: Diese Aussage kann so nicht stehen bleiben.

Der personenbezogene Volumenstrom ist eine feste Größe pro Person. Jede Person „verbraucht“ Luft. Pro Person muss Frischluft zugeführt werden. Je höher die Personenanzahl ist, desto größer wird der Gesamtvolumenstrom und desto geringer ist die Konzentration an Erregern im Raum. Für alle vorgenannten Aussagen gilt die Annahme, dass nur eine infizierte Person im Raum ist.

Zur Infektionswahrscheinlichkeit

Es ist am Ende die inhalierte Dosis an Viruskopien, die etwas über die Wahrscheinlichkeit einer Infektion aussagt und wahrscheinlich auch über die Schwere des Krankheitsverlaufs. Eine infizierte Person trägt eine gewisse Viruslast (Anzahl von Viruskopien pro Milliliter Sekret), die unter anderem vom Krankheitsverlauf abhängt. Diese werden von der infizierten Person in den Atemwegen aerosolisiert und beim Ausatmen in die Raumluft eingebracht. Das ist es, was wir am Ende inhalieren.

Je mehr virenbeladene Partikel eine Person inhaliert, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass diese Person sich infiziert.

Zwei Faktoren beeinflussen die Virenemissionsrate, also die Anzahl der Viruskopien, die in die Luft gelangen:

- Erstens die Höhe der Viruslast, die ein Mensch trägt.
Kurz vor bzw. mit Symptom-beginn ist die Viruslast am höchsten.
- Zweitens die Anzahl der in den Atemwegen produzierten Partikel.
Je nach Aktivität produziert die Person eine sehr unterschiedliche Anzahl von Partikeln. Das hängt davon ab, ob sie ruhig atmet, eine höhere Atemaktivität hat, ob sie spricht, laut spricht, singt, usw.

Das Dose-Response-Modell

Eine Möglichkeit zur Berechnung der Infektionswahrscheinlichkeit bietet das Dose-Response-Modell. Es beinhaltet am Ende auch die inhalierte Dosis (siehe Abbildung 3). P_{ind} ist die persönliche Infektionswahrscheinlichkeit, die individuelle Wahrscheinlichkeit oder das individuelle Risiko einer Person. Das hängt ab von dem N , der inhalierten Dosis, geteilt durch N_0 , der für eine Infektion notwendigen Anzahl Viruskopien. Dieses Verhältnis prägt die für eine Person individuelle Infektionswahrscheinlichkeit.

$P_{ind} = 1 - e^{(-N/N_0)}$ $N = C_V \cdot Q_b \cdot t$ $C_V = \frac{S_V}{\lambda_g \cdot V_R} \quad \left(c_E = \frac{\dot{m}_E}{V} \right)$ $\lambda_g = \lambda_{ACH} + \lambda_{in} + \lambda_{sed}$ $LW = \lambda_{ACH}$ $\dot{V} = \lambda_{ACH} \cdot V_R$	<p>P_{ind}: Individuelles Infektionsrisiko einer Person N: Inhalierte Dosis, virus copies (vc) N_0: notwendige Anzahl vc, um eine Infektion auszulösen C_V: Konzentration der vc in der Luft (Anzahl pro Kubikmeter) Q_b: Atemvolumenstrom t: Aufenthaltsdauer S_V: Virenemissionsrate (copies pro Stunde) λ_g: Gesamtabklingsrate durch Lüftung (ACH), Inaktivierung (in) & Sedimentation (sed) f_M: Faktor der Gesamteffizienz von Masken PAR_S: situationsbedingte Attack Rate</p> $P_{ind} = 1 - e^{\left(-\frac{S_V}{N_0 \cdot \lambda_g \cdot V_R} Q_b \cdot t \cdot f_M \right)}$ <p>Annahme: Das Individuelle Risiko = Prozentuale Risiko einer Gruppe (Attack Rate)</p> $PAR_S = P_{ind} \quad (PAR: Predicted Attack Rate)$
---	--

Abbildung 3: Das Dose-Response-Modell

Die Anzahl an Viren in der Raumluft, also die Konzentration, hängt von der Virenemissionsrate (S_V) und dem virenfreien Volumenstrom ab. Q_b ist der Atemvolumenstrom. Wenn eine Person viel atmet, dann atmet sie auch viele der sich in der Raumluft befindenden Partikel ein. t ist die Aufenthaltszeit. Je länger sich eine Person im Raum aufhält, desto mehr virenbeladene Partikel atmet sie ein, desto größer wird auch die inhalierte Dosis für diese Person. Es kann angenommen werden, dass das individuelle Risiko gleich dem prozentualen Risiko einer Gruppe von Personen ist. Beträgt das individuelle Risiko einer Person z.B. zehn Prozent, dann folgt daraus: Wenn sich eine Gruppe im Raum befindet, dann gilt auch für die Gruppe ein 10%iges Risiko. Bei 100 gesunden Personen zusammen mit einer infektiösen und 10%igem Risiko werden sich wahrscheinlich zehn Personen infizieren. Halten sich nur 10 gesunde Personen zusammen mit einer infektiösen im Raum bei 10%igem Risiko auf, dann infiziert sich wahrscheinlich nur eine Person.

Für das individuelle Risiko ist zwar eine prozentuale Angabe von Bedeutung, zur übergeordneten Beurteilung des Infektionsgeschehen erscheint die prozentuale Angabe jedoch nicht zweckmäßig.

Der situationsbedingte R-Wert

Die Anzahl der sich bei einem gemeinsamen Aufenthalt in einem Raum wahrscheinlich ansteckenden Personen ist laut Definition der situationsbedingte R-Wert. Das ist nichts anderes als die Anzahl der exponierten Personen multipliziert mit dem prozentualen Risiko der Gruppe. Und je mehr Personen zusammentreffen, desto kleiner muss auch das prozentuale Risiko sein.

Aus der Gleichung für das prozentuale Risiko lässt sich durch mathematische Umformungen und Vereinfachungen der situationsbedingte R-Wert aus der Virenkonzentration im Raum, dem Atemvolumenstrom der exponierten Personen, der Aufenthaltszeit und dem personenbezogenen Volumenstrom bestimmen.

$$R_S = \frac{S_V}{N_0} \cdot \frac{t}{q_{Pers}} \cdot Q_b \cdot f_M \quad (1)$$

Damit ist auch eine Verbindung zwischen dem situationsbedingten R-Wert und der CO₂-Konzentration im Raum hergestellt, da der personenbezogene Volumenstrom in direkter Verbindung mit dem CO₂-Gehalt in der Raumluft steht.

Fazit und Ausblick

Die **Luftwechselrate** ist eine irreführende Größe. Es existiert kein direkter Zusammenhang zwischen der Luftwechselrate und der Konzentration luftgetragener Erreger und damit auch nicht zur Infektionswahrscheinlichkeit. Der Luftwechsel ist in unterschiedlich großen Räumen bei gleich großem Volumenstrom im kleinen Raum größer und im großen Raum kleiner. Im großen Raum dauert es länger, bis die Endkonzentration erreicht wird, die dann im kleinen und großen Raum identisch ist. Ohne Kenntnis der Raumgröße kann kein direkter Zusammenhang zur Infektionswahrscheinlichkeit hergestellt werden.

Der **absolute Luftvolumenstrom** wirkt direkt auf die Konzentration luftgetragener Erreger und bildet damit auch eine direkte Verbindung zum Infektionsrisiko. Je höher er ist, desto niedriger ist die Konzentration und desto niedriger ist auch das prozentuale Risiko.

Der **personenbezogene Volumenstrom** ermöglicht einen Direktzusammenhang zum situationsbedingten R-Wert. Zur Beurteilung einer Innenraumsituation erscheint der situationsbedingte R-Wert sinnvoller, da direkt die Anzahl der sich wahrscheinlich ansteckenden Personen berechnet wird im Gegensatz zum prozentualen Risiko, das zur persönlichen Risikoabschätzung intuitiver ist.

Je länger die Aufenthaltszeit, desto weniger realistisch ist die praktische Realisierbarkeit und desto wichtiger wird die Kombination mit anderen Maßnahmen. Lüften hat, wie jede andere derzeit eingeführte Präventivmaßnahme, Grenzen hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, dass muss an dieser Stelle erwähnt werden.

Eigentlich geht es hier um klassische Konzepte für Reinraumtechnik: es gibt eine Last, es gibt ein Schutzziel, letztendlich lässt sich daraus ein perfektes Lüftungstechnisches Schutzkonzept entwickeln. Das ist in der Realität, im Alltag, so oft nicht möglich.

Wir kennen weder den Ort der infizierten Person, sie ist nicht statisch im Raum, noch die Virenlast, wir kennen auch den Aerosolpartikelaustritt nicht, alles ist variabel, individuell und unterschiedlich von Person zu Person.

Wir kennen auch nicht den genauen Ort der zu schützenden Person. Das alles ist dynamisch. Und dennoch können wir einen Beitrag mit der Lüftungstechnik leisten.

Der personenbezogene Luftvolumenstrom pro Stunde Aufenthaltszeit wäre eine empfehlenswerte Größe. Betrachtet man den situationsbedingten R-Wert und hält ihn möglichst klein, dann könnte man tatsächlich etwas zum Infektionsschutzziel aussagen.

Autor | Referent

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel, Leiter Hermann-Rietschel-Institut (HRI) TU Berlin.
<https://www.hri.tu-berlin.de>, kontakt@hri.tu-berlin.de

Copyright © 2022

Gesundheitstechnische Gesellschaft e.V. (GG) – Technisch-wissenschaftliche Vereinigung

Medien | Publikation

Der Vortrags-Mitschnitt ist abrufbar unter <https://www.ggberlin.de/video.htm> und bei Youtube im Kanal GG Berlin. Für Mitglieder steht die Präsentation als pdf bereit.

Den GG | Nachrichten Nr. 01, Januar 2022, beigelegt ist die neueste Publikation von TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, und Charité-Universitätsmedizin Berlin, Institut für Hygiene und Umweltmedizin: *Praktische Anwendung von vereinfachten Prognosemodellen zur Einschätzung des Infektionsrisikos über Aerosol bei SARS-CoV-2 und der Effektivität von nicht-medizinischen Präventivmaßnahmen*

IMPRESSUM

Herausgeber Gesundheitstechnische Gesellschaft e. V. (GG) – Technisch-wissenschaftliche Vereinigung

Vorsitzender Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Kriegel, Hermann-Rietschel-Institut, TU Berlin

Geschäftsstelle: Lotzestraße 26, 12205 Berlin, Fon +49(30) 81294527, www.ggberlin.de

Geschäftsführerin: Angelika Bopp, Assessorin d. HLA

Bezug Die GG | Nachrichten werden an Mitglieder im Rahmen ihrer Mitgliedschaft geliefert.
Der Bezugspreis ist im Jahresbeitrag enthalten.

Alle in den GG | Nachrichten enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der GG.

V.i.S.d.P.: Prof. Dr.-Ing. Matthias Kloas, planungsteam energie + bauen

Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht immer die Meinung der Redaktion wieder.