

## Luftqualität

# Einfluss der Lüftung auf den CO<sub>2</sub>- und den Aerosolpartikelgehalt in Räumen

Bedingt durch die Corona-Pandemie werden heute verstärkt Raumluftechnische (RLT) Anlagen und ergänzend sogenannte „Luftreiniger“ in Räumen eingesetzt. Bei RLT-Anlagen wird die mit Schadstoffen belastete Raumluft als Abluft abtransportiert und durch „Frischlufte“ (unbelastete Außenluft) ersetzt, während bei Luftreinigern im Umluftverfahren Keime gefiltert oder abgetötet werden. Gasförmige Bestandteile der Raumluft können jedoch systembedingt von Luftreinigern nicht beeinflusst werden. Insbesondere kann der CO<sub>2</sub>-Anteil in der Raumluft nur durch einen „Frischlufteaustausch“ reduziert werden.

TEXT: Christoph Kaup

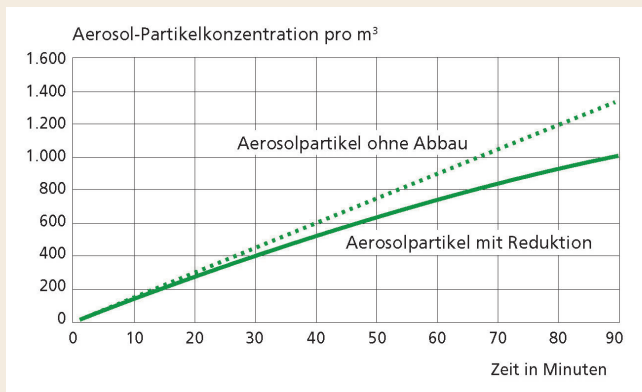
**M**oderne RLT-Anlagen werden häufig über den CO<sub>2</sub>-Anteil in der Raumluft geregelt, da er als Maß für die Personen-Belegung eines Raumes gilt. Dabei wird häufig der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf eine mögliche Infektionswahrscheinlichkeit und in Fachkreisen das Verhältnis des CO<sub>2</sub>-Anteils der Atemluft zur Aerosolbelastung des Raums ausgiebig diskutiert. Aktuell gilt die respiratorische Aufnahme als ein wesentlicher Übertragungsweg von SARS-CoV-2. Daher ist neben dem Tragen von Masken die Reduzierung infektiöser Aerosolpartikel in der Raumluft von wesentlicher Bedeutung für die Minderung der Infektionsgefahr.

Menschen erzeugen beim Sprechen und Atmen Aerosole. Darin können auch SARS-CoV-2-Viren enthalten sein. Raumluftechnische Anlagen können entscheidend dazu beitragen, die Konzentration an Aerosolen in Räumen zu reduzieren. Laut Messungen der Charité Berlin und des Hermann-Rietschel-Instituts (HRI) an der TU Berlin haben rund 50 bis 60 Prozent der vom Menschen erzeugten Aerosole eine Größe von 0,3 bis 0,5 µm, rund 25 bis 30 Prozent zwischen 0,5 und 1 µm, etwa 15 Prozent haben eine Größe von 1 bis 3 µm und nur noch ein bis zwei Prozent der Aerosole sind größer als 3 µm. Somit sind etwa 99 Prozent aller Aerosole kleiner als 3 µm<sup>1) 2)</sup>. Die Aerosolpartikel sind so klein und so leicht, dass diese „Tröpfchen“ nicht mehr zu Boden sinken, sondern schwebfähig bleiben. Die Viren können deshalb auch über große Distanzen übertragen werden, da sich Aerosolpartikel ähnlich ausbreiten wie Gase. Gerade in geschlossenen

Räumen besteht damit eine hohe Wahrscheinlichkeit einer aerogenen Übertragung von SARS-CoV-2. Laut der zitierten Studie werden beim Atmen üblicherweise pro Sekunde rund 50 Aerosolpartikel emittiert, beim Sprechen rund 200 Partikel. Dieser Wert kann beim Singen bis auf 1 000 bis 3 000 Partikel pro Sekunde ansteigen<sup>3)</sup>. Befinden sich im Raum eine oder mehrere infizierte Personen, so kann die Virenkonzentration hier ohne weitere Maßnahmen stetig ansteigen. Dies gilt umso mehr, je schlechter der Raum belüftet wird. Selbst durch Diffusionsvorgänge können sich Aerosole wie beispielsweise Zigarettenrauch in einigen Minuten im Raum verteilen. Ohne Verdünnungseffekt durch Lüftung würde sich die Konzentration an virenbelasteten Aerosolen im Raum sukzessive erhöhen. Andererseits verringert sich im geringen Maß die Konzentration an Aerosolen auch ohne jegliche Maßnahmen, indem sie durch den Kontakt mit Wänden, Decke, Fußboden oder sonstigen Gegenständen abgeschieden werden. Messungen am Institut für Luft- und Kältetechnik (ILK) in Dresden haben gezeigt, dass die Abklingrate ohne jegliche

## F U ß N O T E N

- 1) Mürbe, D.; Fleischer, M.; Lange, J.; Rotheudt, H.; Kriegel, M.: Erhöhung der Aerosolbildung beim professionellen Singen. Charité – Universitätsmedizin Berlin, Klinik für Audiologie und Phoniatrie, Berlin. Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, Berlin 2020.
- 2) Hartmann, A.; Lange, J.; Rotheudt, H.; Kriegel, M.: Emissionsrate und Partikelgröße von Bioaerosolen beim Atmen, Sprechen und Husten. Technische Universität Berlin, Hermann-Rietschel-Institut, Berlin 2020.
- 3) wie Fußnote 2.



**Bild 1:** Anstieg der Aerosolbelastung in einem Raum von 200 m³ ohne Lüftung mit einem SARS-CoV-2-Infizierten (50 infektiöse Aerosolpartikel pro Sekunde durch Atmung). Grafik: Howattherm

Maßnahmen im Prüfraum mit 200 m³ Raumvolumen nach einer initialen Aerosolimpfung bei 0,4 h<sup>-1</sup> lag<sup>4)</sup> (**Bild 1**, vergleiche Bild 5). Im Beispiel würde nach 90 Minuten eine Aerosolkonzentration von rund 1 000 potenziell infektiöser Partikel erreicht werden, wenn eine infizierte Person mit Maske durchschnittlich beim Atmen mit Sprechanteilen netto 50 Aerosolpartikel pro Sekunde an den Raum mit 200 m³ Raumvolumen abgibt (im Durchschnitt 100 Partikel pro Sekunde mit Maskenreduktionsfaktor 0,5 berechnet). Grundsätzlich bestehen zwei Möglichkeiten, diese Partikelkonzentration zu verringern:

1. durch die Abfuhr belasteter Raumluft und Erneuerung durch Zuführung von unbelasteter Außenluft als Zuluft, also eine Verdünnung der Aerosolpartikelast mit „Frischluft“.
2. durch die Nutzung von Umluft, die dann allerdings gefiltert werden muss, um die Aerosole mechanisch abzuscheiden. Alternativ könnte eine physikalische Desinfektion (zum Beispiel UV<sub>C</sub>-Bestrahlung) Viren im Umluftstrom unschädlich machen.

Die notwendige Lüftungsrate ( $Q_h$ ) ergibt sich aus der DIN EN 16798-1<sup>5)</sup> mit folgender Beziehung:

$$Q_h = G_h / (C_{h,i} - C_{h,o} / \varepsilon_v)$$

mit:

|                 |                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| $G_h$           | die Stofflast einer Verunreinigung [mg/s]     |
| $C_{h,i}$       | der Richtwert für eine Verunreinigung [mg/m³] |
| $C_{h,o}$       | Konzentration in der Zuluft [mg/m³]           |
| $\varepsilon_v$ | Lüftungseffektivität                          |

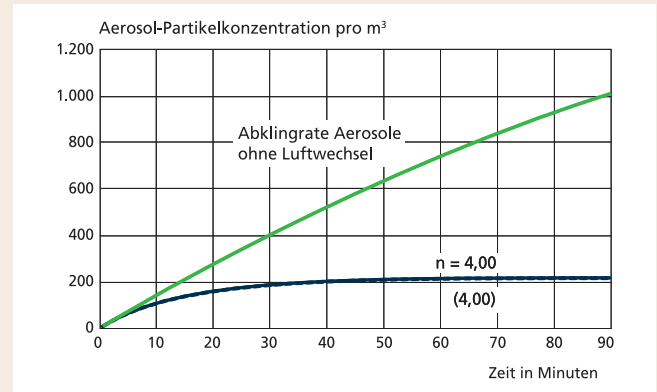
Die Lüftungseffektivität ( $\varepsilon_v$ ) berechnet sich nach der DIN EN 16798-3<sup>6)</sup> aus:

$$\varepsilon_v = (c_E - c_S) / (c_I - c_S)$$

wobei:

|       |                                                          |
|-------|----------------------------------------------------------|
| $c_E$ | Verunreinigungskonzentration Abluft [mg/m³]              |
| $c_S$ | Verunreinigungskonzentration Zuluft [mg/m³]              |
| $c_I$ | Verunreinigungskonzentration Raumluft (Atemzone) [mg/m³] |

Bei idealer Mischlüftung ist  $\varepsilon_v = 1$ . Bei einer Kurzschlussströmung ist  $\varepsilon_v < 1$  und bei einer Quelllüftung  $\varepsilon_v > 1$ .



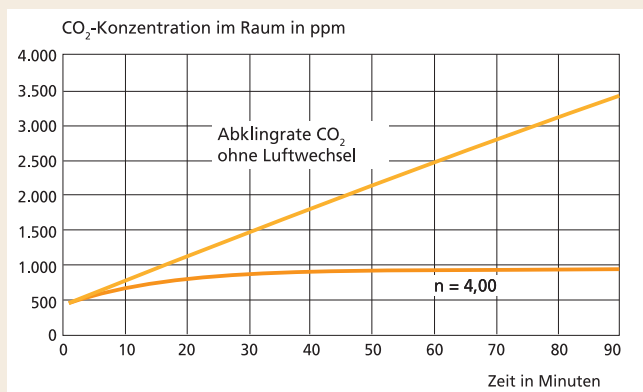
**Bild 2:** Aerosolpartikelbelastung in einem Raum von 200 m³ mit und ohne RLT (LW = 4 h<sup>-1</sup>). Grafik: Howattherm

Die Stofflast an Keimen ist abhängig von der Anzahl der infizierten Personen und deren Aktivitätsgrad (Atemfrequenz). Als besonders riskant hat man beispielsweise Situationen erkannt, in denen gesungen wird, zum Beispiel in Chören, aber auch, wenn in geschlossenen Räumen stärker geatmet wird, zum Beispiel im Fitnessstudio oder bei ausgelassenem Feiern mit lauter Musik und Tanzen.

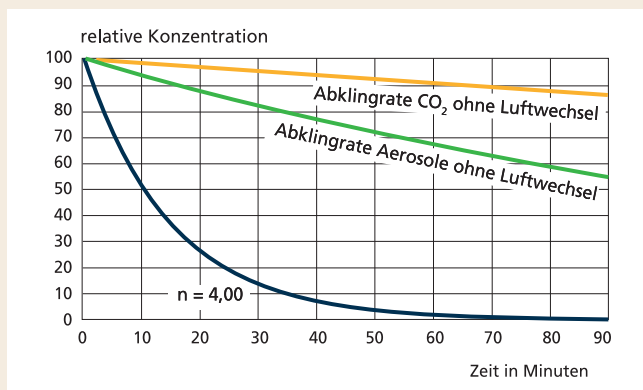
Ist die Stofflast schon schwierig zu definieren, so ist ein Grenz- oder Richtwert der Verunreinigung ( $C_{h,i}$ ) noch schwieriger zu bestimmen. Einzelne Viren, die in den Körper eindringen, kann ein gesundes Immunsystem in der Regel abwehren. Erst eine größere Anzahl an Viren überfordert das Immunsystem und führt zu einer Infektion<sup>7)</sup>. Ein pauschaler Richtwert (Grenzwert) für SARS-CoV-2 ist nicht allgemein möglich und individuell vom Immunsystem abhängig. Üblicherweise wird in der Literatur ein Wert von etwa 500 infektiösen Partikeln genannt, die notwendig sind, um eine Infektion auszulösen<sup>8)</sup>. Bei den heute anzutreffenden Mutationen des ursprünglichen Wildtyps dürfte aktuell diese Schwelle etwa um den Faktor 1,5 bis 2 niedriger liegen, die zudem individuell sehr unterschiedlich anzusetzen ist. Deshalb muss die Reduktion der Virenlast (Aerosolpartikelkonzentration) weiter forciert werden, um die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung zu verringern. Die Risikoreduktion und damit die Reduzierung der infektiösen inkorporierten Aerosolpartikel steht damit

#### F U ß N O T E N

- 4) Krause, R.; Heidenreich, R.: Technische Lösungen für Gebäude in Zeiten der Corona-Pandemie – Untersuchung eines Gerätes zur Reinigung der Luft in geschlossenen Räumen. Fachbericht ILK-B-31-21-4404, 25.02.2021.
- 5) DIN EN 16798-1:2019: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Beuth Verlag, Berlin 2019.
- 6) DIN EN 16798-3:2017: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme, Beuth Verlag, Berlin 2017.
- 7) Wölfel, R.; Corman, V.; Guggemos, W.; Seilmaier, M.; Zange, S.; Müller, M.; Niemeyer, D.; Jones, T.; Vollmar, P.; Rothe, C.; Hoelscher, M.; Bleicker, T.; Brünink, S.; Schneider, J.; Ehmman, R.; Zwirgmaier, K.; Drosten, C.; Wendtner, C: Virological assessment of hospitalized patients with COVID-2019, nature, 2020.
- 8) <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/2020.07.15.204339v1> (Popa, A. et al.: Mutational dynamics and transmission properties of SARS-CoV-2 superspreading events in Austria).



**Bild 3:** CO<sub>2</sub>-Entwicklung in einem Raum von 200 m<sup>3</sup> mit und ohne RLT (LW = 4 h<sup>-1</sup>). Grafik: Howatherm



**Bild 5:** Abklingkurven (Erholzeiten) für CO<sub>2</sub> (ohne Maßnahmen) mit  $n = 0,1 \text{ h}^{-1}$  (Fugenlüftung), Aerosolpartikelzerfall mit  $n = 0,4 \text{ h}^{-1}$  und mit RLT mit  $n = 4 \text{ h}^{-1}$ . Grafik: Howatherm

im Vordergrund des Interesses. Hierzu können raumlufttechnische Maßnahmen und das Tragen von Masken entscheidend beitragen.

## Verlauf der Aerosolpartikel- und CO<sub>2</sub>-Belastung beim Einsatz von RLT

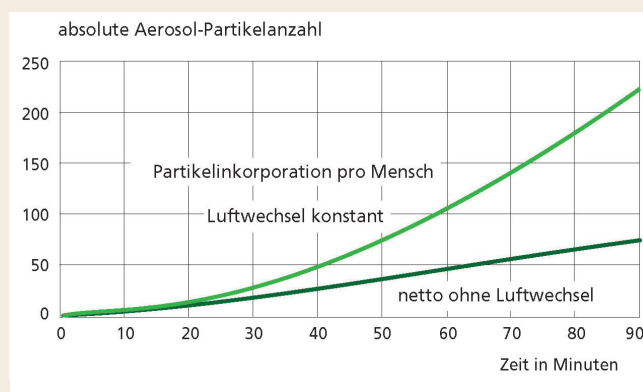
**Bild 2** verdeutlicht den Effekt der Lüftung. Es stellt die Wirkung eines üblichen Luftwechsels von  $LW = 4 \text{ h}^{-1}$  dar, wobei eine Lüftungseffektivität von  $\varepsilon_v = 1$  (Mischlüftung) angenommen wurde. Die Konzentrationsänderung  $c_t$  ergibt sich aus der folgenden Gleichung:

$$c_t = c_a + q / (n \cdot V) \cdot (1 - e^{-n \cdot t})$$

wobei:

|       |                                                                                      |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| $c_t$ | Konzentrationsverlauf über die Zeit $t$ [Partikel pro m <sup>3</sup> ]               |
| $c_a$ | Anfangskonzentration [Partikel pro m <sup>3</sup> ]                                  |
| $n$   | Luftwechselrate oder Luftreinigungsrate je h [h <sup>-1</sup> ]                      |
| $q$   | Abgabe von infektiösen Aerosolpartikeln der infizierten Person [Partikel pro Minute] |
| $V$   | Raumvolumen [m <sup>3</sup> ]                                                        |

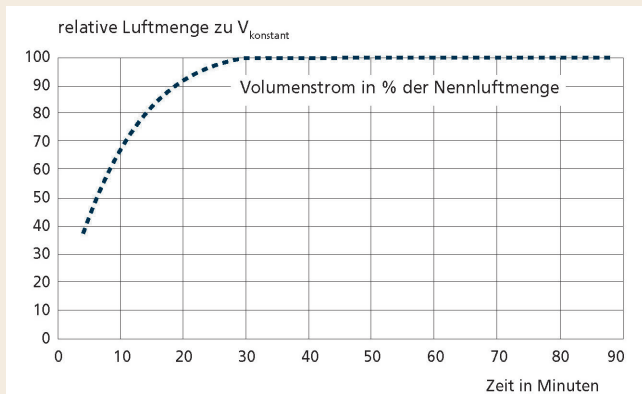
Die Konzentration von infektiösen Aerosolpartikeln steigt im Beispiel mit RLT bis zum Gleichgewichtszustand von etwa 220 Partikeln pro m<sup>3</sup> Raumvolumen an, wenn eine infizierte Per-



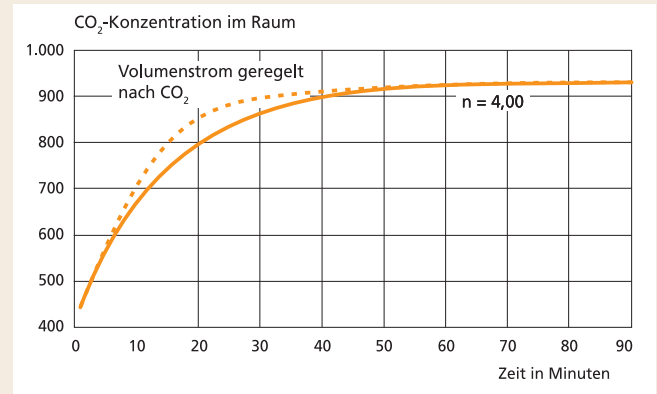
**Bild 4:** Inkorporierte Aerosolpartikel in einem Raum von 200 m<sup>3</sup> mit und ohne RLT-Anlage (LW = 4 h<sup>-1</sup>). Sowohl der Emittent als auch die anwesenden Aerosolpartikel inhalierenden Personen tragen Maske mit einem Reduktionsfaktor von 0,5. Grafik: Howatherm

son netto 50 Aerosolpartikel pro Sekunde durch Atmung an den Raum mit 200 m<sup>3</sup> Raumvolumen abgibt. Es wird deutlich, dass hierbei die virenfreie Luftmenge eine entscheidende Rolle für den erreichbaren Gleichgewichtszustand im Raum spielt.

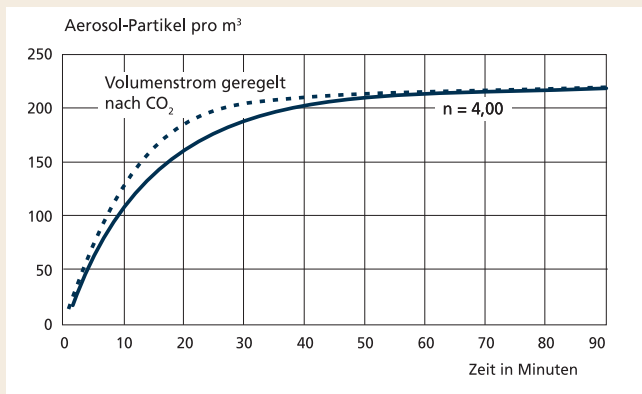
Hier ist auch sehr deutlich die Dynamik des realen Raumluftzustands im zeitlichen Verlauf zu erkennen. Anfänglich ist der Verdünnungseffekt der Lüftung gering, während im Laufe der Zeit der Unterschied zwischen der Situation mit und ohne Lüftung immer signifikanter wird. Während nach 30 Minuten eine Reduktion von 50 Prozent (Konzentration ohne RLT von rund 400 Partikel/m<sup>3</sup> und mit RLT von 200 Partikel/m<sup>3</sup>) erreicht wird, liegt nach 90 Minuten die Reduktion bei rund 80 Prozent (1.000 Partikel/m<sup>3</sup> ohne RLT zu rund 220 Partikel/m<sup>3</sup> mit RLT). Die Anfangsbelastung an infektiösen Aerosolpartikeln wurde im Beispiel mit Null angenommen (nicht vorbelasteter Raum). Analog verhält sich der Verlauf der CO<sub>2</sub>-Entwicklung im Raum. Menschen verstoffwechseln Sauerstoff zu CO<sub>2</sub> (rund 18 l/h CO<sub>2</sub> in Ruhe). Wären im Beispiel 24 Personen im Raum anwesend, würde sich die dargestellte Situation (**Bild 3**) einstellen. Bei einer Anfangskonzentration von 410 ppm (Außenluft Grundbelastung) würde im Raum ohne RLT nach 90 Minuten eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von rund 3.400 ppm herrschen, während sich mit einer Frischluft rate von  $LW = 4 \text{ h}^{-1}$  eine CO<sub>2</sub>-Konzentration im Gleichgewichtszustand bereits nach etwa einer Stunde von circa 930 ppm ergeben wird. In diesem Beispiel ergibt sich ein Frischluftvolumenstrom von 800 m<sup>3</sup>/h ( $200 \text{ m}^3 \times 4 \text{ h}^{-1}$ ) bezogen auf 24 Personen und damit eine Frischluft rate von 33,3 m<sup>3</sup>/h und Person. Würde hingegen nur eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von maximal 800 ppm toleriert werden, müsste die Luftwechselrate auf  $LW = 5,2$  angehoben werden. Dann würde der Frischluftanteil bei 43,3 m<sup>3</sup>/h und Person liegen. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum hängt also in erster Linie entscheidend von der Frischluftmenge pro Person ab. Da ein Mensch in Ruhe ein Atemvolumen von rund 0,5 l/Atemzug nutzt und eine Atemfrequenz von rund 15 bis 18 Atemzügen/Minute besitzt, ergibt sich ein Atemvolumenstrom pro Person von etwa 9 l/min<sup>9)</sup>. **Bild 4** zeigt den Anstieg der inhalieren Aerosolpartikel über die Zeit. Es wird ersichtlich, dass nach 90 Minuten im Beispiel ohne RLT absolut rund 230 Partikel eingeatmet würden, während mit RLT ( $LW = 4 \text{ h}^{-1}$ ) 74 Partikel inhalieren würden (-67,8 Prozent). Bild 4 zeigt zudem, dass auch die inhalieren Aerosolpartikelmenge im Vergleich der beiden Fälle entscheidend vom zeitlichen Verlauf abhängt. Nach etwas mehr als 20 Minuten würde mit RLT



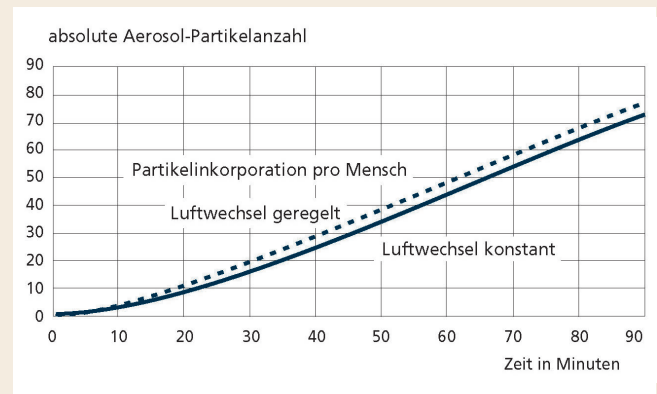
**Bild 6:** Volumenstrom über die Zeit mit CO<sub>2</sub>-Regelung bei voller Belegung. Grafik: Howatherm



**Bild 7:** CO<sub>2</sub>-Konzentration über die Zeit mit und ohne CO<sub>2</sub>-Regelung. Grafik: Howatherm



**Bild 8:** Aerosolpartikelkonzentration über die Zeit mit und ohne CO<sub>2</sub>-Regelung. Grafik: Howatherm



**Bild 9:** Inkorporierte Aerosolpartikel in einem Raum von 200 m<sup>3</sup> mit und ohne CO<sub>2</sub>-Regelung. Grafik: Howatherm

rund ein Drittel weniger Partikel eingeatmet werden, während nach rund 45 Minuten bereits rund 50 Prozent weniger Aerosolpartikel inhaliert worden wären. Würde der Partikelemitter keine Maske tragen, würde sich indes die Anzahl der emittierten Aerosolpartikel verdoppeln. Trügen auch die Nichtinfizierten keine Maske, würden diese Personen letztendlich etwa viermal so viele Aerosolpartikel einatmen. Im Beispiel wären dies ohne Masken 296 Partikel nach 90 Minuten gegenüber 74 Partikel mit Masken. Damit wird auch deutlich, dass die Raumluftechnik etwa die gleiche Größenordnung einer Risikominderung erreichen kann wie das *konsequente* Tragen von Masken.

## Abklingkurven (Erholzeitmessung)

Der zeitliche Verlauf des realen Geschehens (Bild 2 bis 4) belegt deutlich, dass die Verwendung von Abklingkurven mit einer initialen Partikelbelastung (**Bild 5**) nur eingeschränkt zur Beurteilung von Infektionswahrscheinlichkeiten taugt. Diese Art der Darstellung wird heute häufig zum Beispiel für die Beurteilung von Luftreinigern verwendet<sup>10) 11)</sup>. Die in Bild 5 dargestellten Reinigungsraten werden durch die Messung der Erholzeit nach der Aufgabe einer Anfangsbelastung bestimmt, während im realen Geschehen eine stetige Aerosolpartikelabgabe erfolgt, die mittels einer kontinuierlichen Verdünnung durch gereinigte Zuluft oder unbelastete Frischluft reduziert werden soll. Laut der Abklingkurve bei LW = 4 h<sup>-1</sup> wird eine 50 prozentige Reduktion der initialen Belastung bereits nach zehn Minuten erreicht, während unter

realen Bedingungen eine Reduktion der Raumbelastung von 50 Prozent erst nach 27 Minuten erreicht wird (vergleiche Bild 2 mit Bild 5). Auch suggeriert die Abklingkurve, dass eine Reduktion der Aerosolpartikel gegen Null möglich erscheint. Tatsächlich wird in der realen Anwendung ein Gleichgewichtszustand erreicht, der vom Raumvolumen und vom virenfreien Volumenstrom abhängig ist, der dem Raum zugeführt wird.

## Einfluss der CO<sub>2</sub>-Regelung auf die Aerosolpartikelbelastung

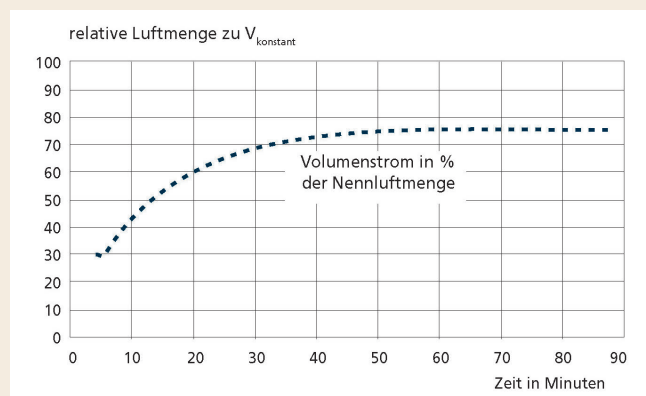
Moderne RLT-Anlagen werden heute meist mit CO<sub>2</sub>-Regelungen ausgestattet, um eine bedarfsgerechte Lüftung der Räume gewährleisten zu können. Mit dieser Maßnahme soll die Energieeffizienz der Anlagen sichergestellt werden. Als Beispiel soll eine CO<sub>2</sub>-Regelung betrachtet werden, die zwischen 30 und 100 Prozent der Nennluftmenge bedarfsgerecht in Abhängigkeit der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration (500 bis 900 ppm) dem Raum ►

### F U ß N O T E N

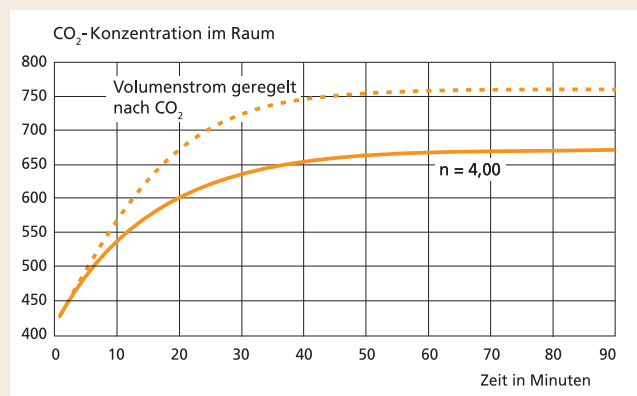
9) <https://www.onmeda.de/anatomie/lunge-atemvolumina-1395-5.html>

10) Kähler, C.; Fuchs, T.; Hain, R.: Können mobile Raumlufreiniger eine indirekte SARS-CoV-2 Infektionsgefahr durch Aerosole wirksam reduzieren? Universität der Bundeswehr München, Institut für Strömungsmechanik und Aerodynamik.

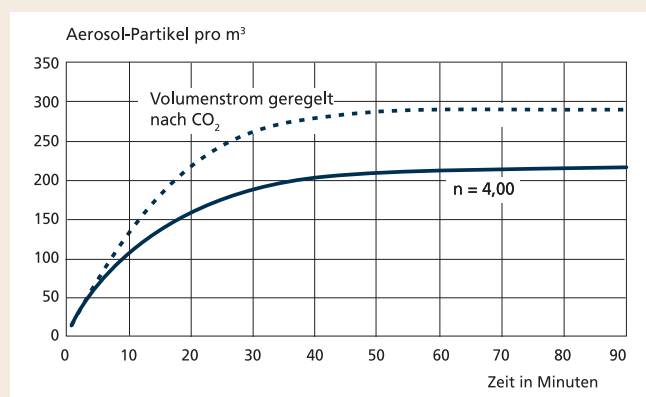
11) Kaup, C.: Ein Vergleich zwischen Feinfiltern und HEPA-Filtern, Abscheide- und Abklingverhalten von Aerosolpartikeln. HLH Bd. 72 (2021) Nr. 03, S. 40-44.



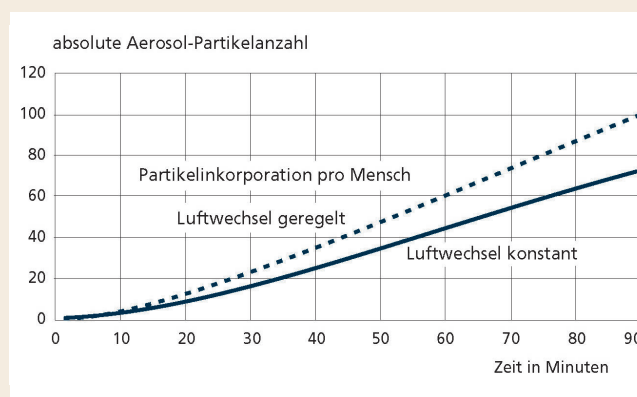
**Bild 10:** Volumenstrom über die Zeit bei halber Belegung. Grafik: Howatherm



**Bild 11:** CO<sub>2</sub>-Konzentration über die Zeit mit und ohne CO<sub>2</sub>-Regelung bei halber Belegung. Grafik: Howatherm



**Bild 12:** Aerosolpartikelkonzentration über die Zeit mit und ohne CO<sub>2</sub>-Regelung bei halber Belegung. Grafik: Howatherm



**Bild 13:** Inkorporierte Aerosolpartikel in einem Raum von 200 m<sup>3</sup> mit und ohne CO<sub>2</sub>-Regelung bei halber Belegung. Grafik: Howatherm

zur Verfügung stellt. Durch den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration würde der Volumenstrom stetig und proportional angehoben werden. Nach rund 30 Minuten wäre dann der maximale Volumenstrom von 100 Prozent bei voller Belegung (24 Personen) erreicht (**Bild 6**). Mit diesem Volumenstrom würde sich letztlich derselbe Beharrungszustand von etwa 930 ppm einstellen, der auch bei konstantem Volumenstrom erreicht worden wäre. Allerdings würde in der ersten Stunde die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Regelungsbetrieb schneller ansteigen (**Bild 7**). Auch die Aerosolpartikelkonzentration wird anfangs analog zur CO<sub>2</sub>-Konzentration schneller ansteigen, aber nach rund einer Stunde den gleichen Gleichgewichtszustand erreichen, der ohne CO<sub>2</sub>-Regelung erreicht worden wäre (**Bild 8**). Die inhalierte Partikelanzahl würde im Vergleich zur unregulierten Anlage ebenfalls steigen, da in Summe integral mehr Aerosolpartikel an den Raum abgegeben und von den Personen eingeatmet werden (**Bild 9**). Nach 90 Minuten würde der Anteil der inkorporierten Partikel um rund fünf Prozent gegenüber einer Anlage mit konstantem Volumenstrom steigen.

## Einfluss der CO<sub>2</sub>-Regelung auf die Aerosolpartikelbelastung bei halber Belegung

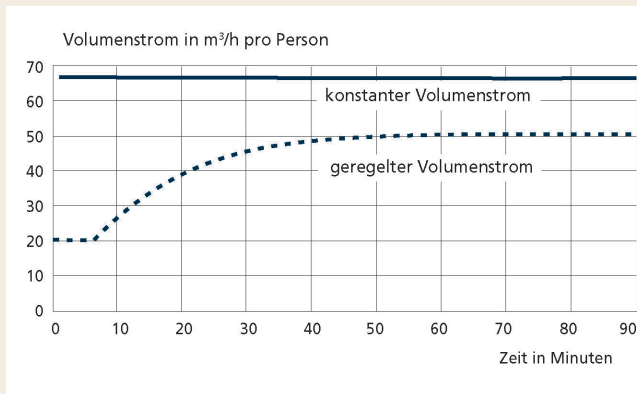
Wird der Raum nun nicht mit 24 Personen, sondern nur mit zwölf Personen belegt, wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum naturgemäß nur noch halb so schnell steigen. Hierdurch würden sich auf Basis der definierten CO<sub>2</sub>-Kennlinie im Laufe von 1,5 Stunden die in **Bild 10** dargestellten Volumenströme einstel-

len. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration würde zwar im Gleichgewichtszustand bei voller Luftmenge mit rund 670 ppm deutlich geringer ausfallen, als dies bei voller Belegung mit 930 ppm der Fall wäre, aber durch die aktive CO<sub>2</sub>-Regelung wird nicht mehr der volle Volumenstrom angefordert werden (**Bild 11**). Mit einem resultierenden Volumenstrom von rund 75 Prozent der Nennluftmenge würde sich im Raum im geregelten Betrieb tatsächlich eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von rund 760 ppm einstellen, die zwar wesentlich über der CO<sub>2</sub>-Konzentration von 670 ppm bei voller Luftmenge liegt, aber deutlich unterhalb der 930 ppm bei voller Belegung. Analog ändert sich die Aerosolpartikelkonzentration im Raum, wenn angenommen wird, dass sich nach wie vor eine infizierte Person im Raum befindet (**Bild 12**).

Die inhalierte absolute Aerosolpartikelanzahl würde letztlich durch die CO<sub>2</sub>-Regelung im Beispiel von 74 auf 100 Partikel steigen, wenn sowohl die infektiöse Person als auch alle anderen Personen Masken mit einem Reduktionsfaktor von 50 Prozent tragen (**Bild 13**).

Es wird aber auch durch dieses Berechnungsbeispiel deutlich, dass die Festlegung eines Frischluftvolumenstroms pro Person alleine nicht ausreichend ist, um eine Risikoabschätzung im Hinblick auf das Infektionsrisiko durch Aerosolpartikel durchführen zu können, wenn davon ausgegangen wird, dass sich bei den aktuellen Inzidenzen maximal ein Infizierter im Raum befindet. Bei einer angenommenen Inzidenz von 100 Infizierten pro 100 000 Einwohner würde sich die Wahrscheinlichkeit, einen Infizierten bei insgesamt zwölf Personen im Raum anzutreffen, von 1,19 Prozent ergeben<sup>12)</sup>. Bei voller Belegung läge die Wahr-





**Bild 14:** Frischluftmenge pro Person bei halber Belegung.  
Grafik: Howatherm

scheinlichkeit, einen Infizierten anzutreffen, bei 2,37 Prozent. Aus diesem Grund beziehen sich die hier durchgeführten Betrachtungen auf maximal einen Infizierten im Raum, sowohl für die Voll- als auch für die Teilbelegung.

Im Beispiel werden bei halber Personenbelegung rund 50 m³/h Frischluft pro Person zugeführt (**Bild 14**), während bei voller Belegung „nur“ 33,3 m³/h pro Person zugeführt werden. Trotzdem erhöht sich die Anzahl der inkorporierten Partikel bei halber Belegung im Beispiel um 35 Prozent.

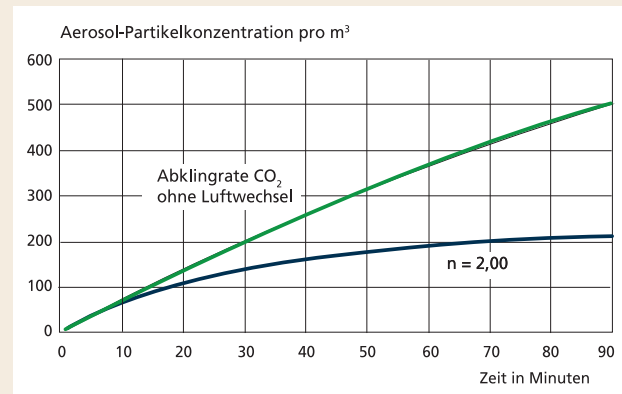
## Einfluss der Raumgröße auf die Aerosolpartikelbelastung

Neben der Anzahl der sich im Raum aufhaltenden Personen spielt die Raumgröße eine nicht zu vernachlässigende Rolle bei der Bestimmung der Aerosolpartikelkonzentration, wenn davon ausgegangen wird, dass sich maximal ein Infizierter im Raum befindet. Hätte der Raum im Beispiel anstatt 200 m³ Raumvolumen ein Volumen von 400 m³ und würde der gleiche Volumenstrom von 800 m³/h genutzt werden, ergäbe sich eine Luftwechselrate von  $LW = 2 \text{ h}^{-1}$  (**Bild 15**). Mit diesem Volumenstrom ergäbe sich letztendlich die gleiche Konzentration an Aerosolpartikeln im Raum (vergleiche Bild 2). Bei gleicher Luftwechselrate von  $LW = 4 \text{ h}^{-1}$  würde sich die halbe Konzentration im Gleichgewichtszustand von rund 110 Partikeln pro m³ Raumvolumen ergeben. Letztendlich könnte neben einer personenbezogenen Luftmenge die Definition einer Luftwechselrate mit Bezug zur Raumgröße (Referenzvolumen) angewendet werden, die zum Beispiel bei  $LW = 4 \text{ h}^{-1}$  liegen könnte, die auf ein Raumvolumen von 200 m³ bezogen ist. Bei 100 m³ und äquivalenter Personenbelegungsdichte ergäbe dies eine Luftwechselrate von  $LW = 8 \text{ h}^{-1}$ .

Bei 800 m³ Raumvolumen ergäbe sich dann  $LW = 1 \text{ h}^{-1}$ , wobei bei Werten unter  $LW = 3 \text{ h}^{-1}$  die Gefahr besteht, dass stabile Raumluftströmungen nicht mehr zu gewährleisten sind.

## Schlussfolgerung

Das Risiko einer Infektion hängt von der Menge an inhalierten Aerosolpartikeln ab. RLT-Anlagen können deren Konzentration bedeutend reduzieren. Mit der  $\text{CO}_2$ -Konzentration steht eine Messgröße zur Verfügung, welche die menschliche Aktivität im Raum (Stoffwechsel) anzeigen kann. Allerdings sagt die  $\text{CO}_2$ -Konzentration nichts über die Anzahl infektiöser Aerosolpartikel im Raum aus, da diese von der Anzahl der infizierten



**Bild 15:** Aerosolbelastung in einem Raum von 400 m³ mit und ohne RLT ( $LW = 2 \text{ h}^{-1}$ ). Grafik: Howatherm

Personen und deren Aktivitätsgrad abhängig ist. Da das Verhältnis der Aerosolpartikelproduktion zur  $\text{CO}_2$ -Produktion variabel und nicht konstant ist, kann die  $\text{CO}_2$ -Regelung zu einer Risikoerhöhung gegenüber der unregelmäßigen RLT-Anlage führen, da die Anzahl der inkorporierten Aerosolpartikel unabhängig vom  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Raumluft steigen kann. Dies trifft insbesondere im Teillastfall zu, während bei voller Belegung die Risikoerhöhung einer  $\text{CO}_2$ -Regelung üblicherweise gering ist.

Um das Risiko weiter zu reduzieren, könnte die Absenkung des maximalen  $\text{CO}_2$ -Sollwertes (im Beispiel von 900 ppm auf 700 ppm) empfohlen werden, damit die niedrigste Belegung adäquat berücksichtigt wird. Alternativ könnte die  $\text{CO}_2$ -Regelung während einer Pandemie auch komplett deaktiviert werden. Allerdings wird mit einer adaptierten  $\text{CO}_2$ -Regelung eine Verringerung der Infektionswahrscheinlichkeit erreicht und die Energieeffizienz nicht völlig außer Acht gelassen.

An den Beispielen wird aber auch deutlich, dass es nicht zielführend ist, den benötigten Volumenstrom nur auf die Anzahl der Personen zu beziehen, da üblicherweise immer nur mit einer infizierten Person im Raum zu rechnen ist. Diese Annahme trifft allerdings nicht auf sehr große Räume wie beispielsweise Veranstaltungshallen zu, in denen sich sehr viele Menschen aufhalten. Insbesondere die Luftreinigungs- oder Luftwechselraten spielen bei der Aerosolkonzentration im Raum daher ebenfalls eine entscheidende Rolle. Diese könnten mit Bezug auf die Raumgröße definiert werden. Nach dieser Pandemie werden wir eine Diskussion beginnen müssen, wie die beiden Zielgrößen, nämlich Hygiene und Qualität der Raumluft und die Energieeffizienz zukünftig gewichtet werden sollen.

## F U ß N O T E

- 12) Müller, D.; Rewitz, K.; Derwein, D.; Burgholz, T. M.; Schweiker, M.; Bardey, J.; Tappler, P.: Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage), White Paper, RWTH-EBC 2021-002, Aachen 2021, DOI: 10.18154/RWTH-2021-02417.



**Prof. Dr.-Ing.  
Christoph Kaup**

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld und Geschäftsführender Gesellschafter der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.  
Foto: Nikola Krieger