

## Potential raumluftechnischer Maßnahmen zur Senkung des Infektionsrisikos

Autoren:

- *Dr. Volkhard Nobis, Energy Systems Engineering*
- *Rupert Mack, Weiss Klimatechnik GmbH*



### Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Einleitung</b> .....	<b>3</b>
<b>Der Ausbreitungsweg</b> .....	<b>3</b>
<b>Lüftungssysteme</b> .....	<b>5</b>
<b>Verdrängungsströmung</b> .....	<b>5</b>
<b>Umluftreiniger</b> .....	<b>7</b>
<b>Mischlüftungssysteme</b> .....	<b>10</b>
<b>Schichtlüftung</b> .....	<b>10</b>
<b>Infektionsrisiko</b> .....	<b>12</b>
<b>Ausblick</b> .....	<b>17</b>
<b>Literatur</b> .....	<b>18</b>

### **Zusammenfassung**

Die weltweite Ausbreitung der COVID-19 Pandemie konnte trotz erheblicher Anstrengungen und Einschränkungen nicht aufgehalten werden. Ein Grund, in dem sich Experten weitestgehend einig sind, ist die Fähigkeit des Virus vom Wirt zum Neinfizierten durch die Luft zu gelangen. Die Vielzahl der Viren, mit luftgetragenen Partikeln reisend, folgt der Luftströmung nahezu trägheitsfrei.

Die einfach formulierte Forderung zum Schutz vor Infektionen in Versammlungsstätten lautet daher:

- *Unterbindung der Strömung vom Infizierten zu anderen Raumnutzern*

Diese Publikation analysiert das Potential von Lüftungstechnologien zur Senkung des Infektionsrisikos in Versammlungsstätten, beispielsweise Klassenräume.

Neben der Analyse, inwieweit verschiedene Raumlüftungslösungen auf die Gestaltung der Raumströmung Einfluss zu nehmen im Stande sind, wird das Infektionsrisiko in Anlehnung an den Wissensstand durch eine instationäre Berechnung für den Beginn und die folgenden Stunden der Raumnutzung ausgewiesen und damit die Lüftungslösungen verglichen.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die instationäre Betrachtung der ersten Stunden der Raumnutzung ein deutlich niedrigeres Infektionsrisiko ausweist als jene stationäre Abschätzung des Beharrungszustandes. Erwartungsgemäß steigt das Infektionsrisiko schlecht oder nicht belüfteter Räume schnell an. Eine zunehmende Raumgröße und ein zunehmender Luftaustausch helfen das Risiko zu verringern. Einzig die sachgerecht betriebene und geregelte Verdrängungs- oder Schichtlüftung sind in der Lage das Infektionsrisiko nahezu auszuschließen. Während die Verdrängungsströmung durch den erforderlichen technologischen Aufwand und die Luftvolumenströme eine Nachrüstung wenig attraktiv erscheinen lässt, sind nachrüstbare Schichtlüftungssysteme denkbar. Anders als bei der Verdrängungsströmung setzt die Schutzwirkung von Schichtluftsystemen im Aufenthaltsbereich bei adäquat besetzten Räumen aber erst nach ca. 6 min vollumfänglich ein.

Mischlüftungssysteme und Umluftreiniger können das Infektionsrisiko reduzieren helfen. Ein ergänzendes zyklisches freies Stoß- oder Querlüften ist für diese Systeme ergänzend dennoch anzuraten. Speziell die Umluftreiniger können die Raumlüftung nur eingeschränkt beeinflussen. Mit zunehmendem Luftvolumenstrom der Umluftreiniger sinkt einerseits das generelle Infektionsrisiko, andererseits steigt das Infektionsrisiko der Raumnachbarn zum Infizierten erheblich an. Grund hierfür sind turbulenzbedingte Strömungsschlieren, die zeitweise hohe Virenkonzentrationen direkt zum Nachbarn befördern. Als beste Position zum Betrieb, besonders bei volumenstromgeringen Umluftreinigern, ist die nahe der Raumdecke anzusehen.

Als Fazit kann für Mischlüftungssysteme, millionenfach als Stand der Technik installiert, deren Unzulänglichkeit zum Ausschluss eines Infektionsrisikos gezogen werden. Ein Umdenken der anzusetzenden Lüftungslösungen bei ohnehin anstehenden energetischen Sanierungen gestattet Räume in Zukunft so zu gestalten, dass von deren Raumluft nahezu kein Infektionsrisiko ausgeht.

## Einleitung

Institutionen wie die Weltgesundheitsorganisation (WHO) und das Weltwirtschaftsforum (WEF) führten lange vor dem Auftreten von COVID-19 in ihren jährlich erscheinenden Übersichten<sup>i</sup> der größten gegenwärtigen globalen Gefahren unter anderen die der Pandemie auf. Seit nunmehr über einem Jahr steht die Weltgemeinschaft der Ausbreitung von COVID-19 trotz erheblicher Anstrengungen hilflos gegenüber. Mehrere Millionen Tote sind an oder mit COVID-19 verstorben. Nicht auszudenken, wäre die Mortalität noch höher als gegenwärtig zu beobachten. Zweifel an dem Gefahrenpotential, besonders bei derart vielen Infizierten und den damit möglichen Wirten neuer mutierender Viruskopien, dürften nach den Erfahrungen jedes Einzelnen seltener geworden sein.

## Der Ausbreitungsweg

Trotz zahlreicher Eindämmungsmaßnahmen hat sich das Virus weltweit verbreiten können. Virologen und Gesundheitsämter mussten sich zunächst der Frage des Ausbreitungsweges stellen. Entgegen einer teils kontroversen Meinung unter Experten belegen jüngste Auswertungen wissenschaftlicher Abhandlungen und daraus abgeleiteter Ergebnisse<sup>ii</sup>, dass die Übertragung über die Luft in Innenräumen ein wichtiger Faktor ist.

Eine besondere Bedeutung wird in diesem Zusammenhang den Aerosolen beigemessen. Sie entstehen beim Atmen, Sprechen und in besonders großer Zahl beim Singen. Da davon auszugehen ist, dass symptomatische Menschen in Quarantäne verbleiben wird der Infektionsweg des Hustens hier nicht weiter betrachtet.

Während nun die schweren Flüssigkeitstropfen und großen Aerosole absinken und Oberflächen im Nahfeld benetzen, verdunstet die Häufung der feinen Aerosole um einen Durchmesser von 1  $\mu\text{m}$  herum innerhalb von Millisekunden. Die größten der Luftströmung noch näherungsweise folgenden Partikel von bis zu 10  $\mu\text{m}$  Durchmesser verdunsten innerhalb einer Sekunde<sup>iii/ iv/ v</sup>. Übrig bleiben gewichtsreduzierte Partikel, unter Umständen beladen mit Infektionserregern, und damit ideal der Luftströmung folgend. In Kombination mit der Lebensfähigkeit<sup>vi</sup> eines Großteils der COVID-19 Viren von mindestens 3 h in der Raumluft wird deutlich, dass die zentrale Fragestellung in Zusammenhang mit dem Ziel der Senkung des Infektionsrisikos in Innenräumen die sichere Fortführung der virenbelasteten Luft ist. Die Auseinandersetzung mit der Strömungsführung ist somit zwingend.

- *Die zentrale Frage zur Senkung des Infektionsrisikos in Räumen ist die der geeigneten Strömungsführung*

Bislang gehen die meisten wissenschaftlichen Betrachtungen von einer isotropen Durchmischung in Innenräumen aus. Diese Raumströmung entspricht der idealen

Mischlüftung. Die Strömungsform der Mischlüftung ist die am häufigsten anzutreffende Strömungsform in Innenräumen und aus der Perspektive des Infektionsrisikos mit die ungünstigste Raumströmung.

Je höher der Wärmeeintrag in einen Raum ausfällt, z.B. durch die Raumnutzer oder Heizkörper, desto mehr gewinnt der strömungsbestimmende Einfluss der Thermik. In diesem Zusammenhang erleichtert die Einführung eines Parameters  $\kappa$  zur Charakterisierung der statistischen Korrelation von wärme- und impulsbasierten Strömungsrichtungen das Verständnis und die Abschätzung des Infektionsrisikos. Bei der idealen Mischlüftung kommen alle Strömungsrichtungen gleichermaßen vor. Dieser Grenzfall soll durch  $\kappa = 0$  definiert werden. Sind die Vektoren kinetischer und thermischer Strömungsenergie ideal gleichgerichtet, soll  $\kappa = 1$  gelten. Sind die Vektoren kinetischer und thermischer Strömungsenergie ideal entgegengerichtet, soll  $\kappa = -1$  gelten.

- Thermik gegenläufig zur Strömungsrichtung  $\kappa = -1$
- Ideale Mischlüftung, isotrope Strömung  $\kappa = 0$
- Thermik gleichgerichtet zur Strömungsrichtung  $\kappa = 1$

In realen Raumluftrömungen wird sich  $\kappa$  zwischen  $0 < \kappa < 1$  einstellen.

Trivial zur Senkung des Infektionsrisikos ist die Forderung der Unterbindung des Strömungsweges vom Infizierten zum Schutzbedürftigen. Es wird bereits hier deutlich, dass eine Durchmischung im Raum ( $\kappa \rightarrow 0$ ) diese triviale Forderung nicht erfüllen kann. Wirken Thermik und kinetisch aufgeprägte Strömung entgegen führt dies in erster Linie zu erhöhter Turbulenz und damit zur Vermischung. In diesem Fall ( $\kappa \rightarrow -1$ ) kann die Schutzforderung nur durch eine starke kinetisch geprägte Verdrängungsströmung erfüllt werden.

Neben der Richtung der die Strömung gestaltenden Kräfte ist deren Größenordnung zur Bewertung und/ oder Gestaltung der Raumströmung von maßgeblicher Bedeutung. In der Raumluftechnik wird in diesem Zusammenhang zur Beschreibung des Verhältnisses dieser Einflüsse die dimensionslose *Archimedes* - Kennzahl<sup>vii</sup> eingesetzt.

**Formel 1**

$$\text{Archimedes-Zahl } Ar = \frac{\text{Schwerkraft}}{\text{Trägheitskraft}} \equiv \frac{\text{freie Konvektion}}{\text{erzwungene Konvektion}} = \left( \frac{v_{\text{Thermik}}}{v_{\text{mechanisch}}} \right)^2$$

Es ist üblich die Definition der Archimedes – Zahl an die zu bewertende Aufgabe anzupassen, beispielsweise zur Bewertung einer Verdrängungsströmung oder der von runden oder ebenen Luftstrahlen wie etwa von Umluftreinigern. Im vorliegenden Fall beziehen sich die Geschwindigkeiten auf die Raumgrundfläche  $A_R$ .

Die Archimedes – Zahl kann durch ein Korrekturglied  $(1-\varepsilon)^2$  mit  $\varepsilon$  als Verhältnis der Flächenreduktion durch Mobiliar oder Personen in Bezug zur Gesamtfläche eine Korrektur erfahren.

$$Ar = \frac{2 \cdot g \cdot H \cdot \Delta T}{\left(\frac{\dot{V}_e}{A_R}\right)^2 \cdot T_R} \cdot (1 - \varepsilon)^2$$

mit

$g$	:	Erdbeschleunigung $\left[\frac{m}{s^2}\right]$
$H$	:	Raumhöhe [m]
$\Delta T$	:	Temperaturdifferenz Abluft.- Zulufttemperatur [K]
$\dot{V}_e$	:	mechanisch bewegter Volumenstrom $\left[\frac{m^3}{s}\right]$
$A_R$	:	Raumfläche [m <sup>2</sup> ]
$T_R$	:	Ablufttemperatur [K]
$\varepsilon$	:	Verhältnis der Flächenreduktion - zur Gesamtfläche

**Formel 2**

Mit der obigen Definition der Archimedes Zahl sollen verschiedene gängige Strömungsmaßnahmen - die Verdrängungsströmung, der mischlüftungsbasierte Umluftreinigungsgeräteinsatz und die Schichtlüftung - in ihrem Einfluss auf die Raumströmung und damit das Infektionsrisiko abgeschätzt werden.

## Lüftungssysteme

### Verdrängungsströmung

Das sichere Fortführen von Infektionserregern ohne Gefährdung des Nachbarn ist nur durch senkrechten Abtransport möglich. Für die Stabilität der Verdrängungsströmung ist die Ausrichtung entgegen ( $\kappa = -1$ ) oder mit ( $\kappa = 1$ ) der Thermik von entscheidender Bedeutung.

Nach Regenscheit aus einer Arbeit von Linke erhält man im Heizfall gerade noch stabile Bedingungen bei den folgenden Archimedes – Zahlen<sup>viii</sup>:

- Verdrängungsströmung mit der Schwerkraft entgegen der Thermik  $Ar < 92$
- Verdrängungsströmung entgegen der Schwerkraft mit der Thermik  $Ar < 720$

Die wesentliche Heizlast und damit die näherungsweise für die Thermik anzusetzende Temperaturdifferenz  $\Delta T$  hängen, beispielsweise bei besetzten Klassenräumen, von der Personenanzahl und dem Luftwechsel, also dem personenspezifischen Luftvolumenstrom

ab. Je niedriger der spezifische Volumenstrom ausfällt - Transmissionsverluste fallen bei neueren Gebäudestandards kaum ins Gewicht - desto höher ist die Temperaturerhöhung zwischen Zuluft und Abluft.

Als Beispiel wird ein besetzter Klassenraum mit sitzender Tätigkeit angesetzt. Die Wärmeabgabe für diesen Aktivitätsgrad liegt<sup>ix</sup> in etwa sensibel bei 95W und latent bei 25W. Die personenbedingte Temperaturerhöhung unter Berücksichtigung der Feuchtezunahme der Luft bei beispielhaft angesetzten 160m<sup>3</sup>/h/Person beträgt in etwa  $\Delta T(160\text{m}^3/\text{h}/\text{Person}) \approx 1,8\text{K}$ . Der Raum soll eine Höhe von 3m haben und auf 22°C temperiert sein. Die Flächenreduktion durch die Personen und Tische soll unberücksichtigt bleiben, da um die Emissionsquelle des Kopfes kaum Strömungsbehinderungen wirken ( $\epsilon=0$ ).

Durch Umformen der Formel 2 ist die repräsentative Raumlufgeschwindigkeit bzw. der erforderliche Raumlufwechsel des Strömungsfalls zu berechnen. Im Folgenden wird der benötigte Luftwechsel exemplarisch für die mit und entgegen der Thermik gerichteten Strömung bestimmt.

*Strömung mit der Thermik ( $\kappa = 1$ )*

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot \Delta T}{Ar \cdot T_R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 1,8}{2 \cdot 360 \cdot (22 + 273,15)}} \left[ \frac{\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{K}}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \right] = 0,022 \text{ m/s}$$

$$\text{Erforderlicher Luftwechsel: } n = \frac{v_e}{H} \cdot 3600 = \frac{0,022 \text{ m/s}}{3 \text{ m}} \cdot 3600 \text{ s/h} = 26,4 \frac{1}{\text{h}}$$

*Strömung entgegen der Thermik ( $\kappa = -1$ )*

$$v_e = \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot H \cdot \Delta T}{Ar \cdot T_R}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 1,8}{2 \cdot 46 \cdot (22 + 273,15)}} \left[ \frac{\text{m} \cdot \text{m} \cdot \text{K}}{\text{s}^2 \cdot \text{K}} \right] = 0,062 \text{ m/s}$$

$$\text{Erforderlicher Luftwechsel: } n = \frac{v_e}{H} \cdot 3600 = \frac{0,062 \text{ m/s}}{3 \text{ m}} \cdot 3600 \text{ s/h} = 74,4 \frac{1}{\text{h}}$$

*Fazit Verdrängungsströmung*

Als Fazit der Betrachtung der Verdrängungsströmung kann die gegen die Thermik gerichtete Strömungsführung als unpraktikabel ausgeschlossen werden. Auch ist die horizontal geführte Verdrängungsströmung nicht ideal. Im letzten Fall sind Nachbarn eines Infizierten einem Risiko ausgesetzt, im ersten Fall ist der erforderliche Luftvolumenstrom unverhältnismäßig hoch. Die Verdrängungsströmung in Überlagerung mit der Thermik benötigt hingegen deutlich niedrigere Luftwechsel als jene Entgegengerichtete. Mit Optimierung des Thermik- und Trägheitskräfteverhältnisses der aufsteigenden Verdrängung können praxistaugliche Luftwechsel erzielt werden.

### *Umluftreiniger*

Eine häufig beworbene Praxis zur Senkung des Infektionsrisikos ist der Einsatz von Umluftreinigern. Diese saugen Raumluft an, entfernen oder töten je nach eingesetztem Verfahren bestenfalls nahezu alle Infektionserreger und blasen daraufhin die kontaminationsfreie Luft zurück in den Raum. Diese Publikation geht zur Vereinfachung von einer vollständigen Reinigungsleistung der Geräte (100%) aus. Grundlegend ist festzustellen, dass Umluftreiniger auf dem Prinzip der Mischlüftung basieren. Je idealer die Mischlüftung ausfällt ( $\kappa \rightarrow 0$ ) desto weniger entscheidend fallen die räumliche Positionierung und der Ausblasvektor der Geräte ins Gewicht. Allerdings wird mit zunehmendem Wärmeintrag, z. B. durch eine höhere Raumbelastung oder dem Heizkörperbetrieb bei hohen Transmissionsverlusten, der Einfluss der Thermik dominant. In diesem Fall weicht die Raumströmung von der idealen Mischlüftung ab, eine Temperaturschichtung mit gegen- oder mitlaufenden Einblasvektoren ( $-1 < \kappa < 1$ ) stellt sich ein.

Die oben eingeführte Archimedes – Zahl, einerseits auf die mechanische Raumlüftung und andererseits auf die Umluftreiniger angewandt, hilft die Einflüsse von Strömungskinetik und Thermik, beispielsweise durch Personen im Raum, der erzwungenen Konvektion der mechanischen Lüftung und der Umluftgeräte auf die Raumströmung zu bewerten. Große Archimedes – Zahlen deuten auf eine Dominanz des thermikbasierten Auftriebes hin.

Luftreiniger sind in einem sehr breiten Spektrum der Luftvolumenströme zu finden.

Als Beispiel soll ein großer Luftreiniger-Volumenstrom in der Höhe von 2.200 m<sup>3</sup>/h zur Berechnung der Archimedes – Zahl herangezogen werden. Die Raumsituation soll der bereits definierten Auftriebssituation entsprechen. Eine volle Raumbelastung und damit Wärmeeinkopplung wird angenommen. Der Raum soll eine Bruttofläche von 60 m<sup>2</sup> aufweisen. Der minimal zulässige hygienische Luftwechsel beträgt 20 m<sup>3</sup>/h/Person. Das Gebäude soll einem modernen energetischen Standard genügen, Transmissionsverluste werden daher vernachlässigt. Die Temperaturerhöhung des hygienischen Luftwechsels von der Zuluft zur Abluft beträgt unter Anwendung der Energie- und Stoffbilanz unter diesen skizzierten Randbedingungen in etwa  $\Delta T = 14\text{K}$ .

Die Archimedes – Zahl kann in dieser Betrachtung zweifach angewandt werden. Zum einen für die Abschätzung des strömungsprägenden Einflusses des Umluftgerätes, zum anderen für den Einfluss der Lüftungstechnik zur Sicherstellung des hygienischen Luftwechsels.

$$\text{Luftreiniger: } Ar = \frac{2 \cdot g \cdot H \cdot \Delta T}{\left(\frac{\dot{V}_e}{A_R}\right)^2 \cdot T_R} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 3 \cdot 14}{\left(\frac{2200}{3600 \cdot 60}\right)^2 \cdot 295,15} \left[ \frac{\frac{m}{s^2} \cdot m \cdot K \cdot s^2}{\left(\frac{m^3}{s} / m^2\right)^2 \cdot K} \right]$$

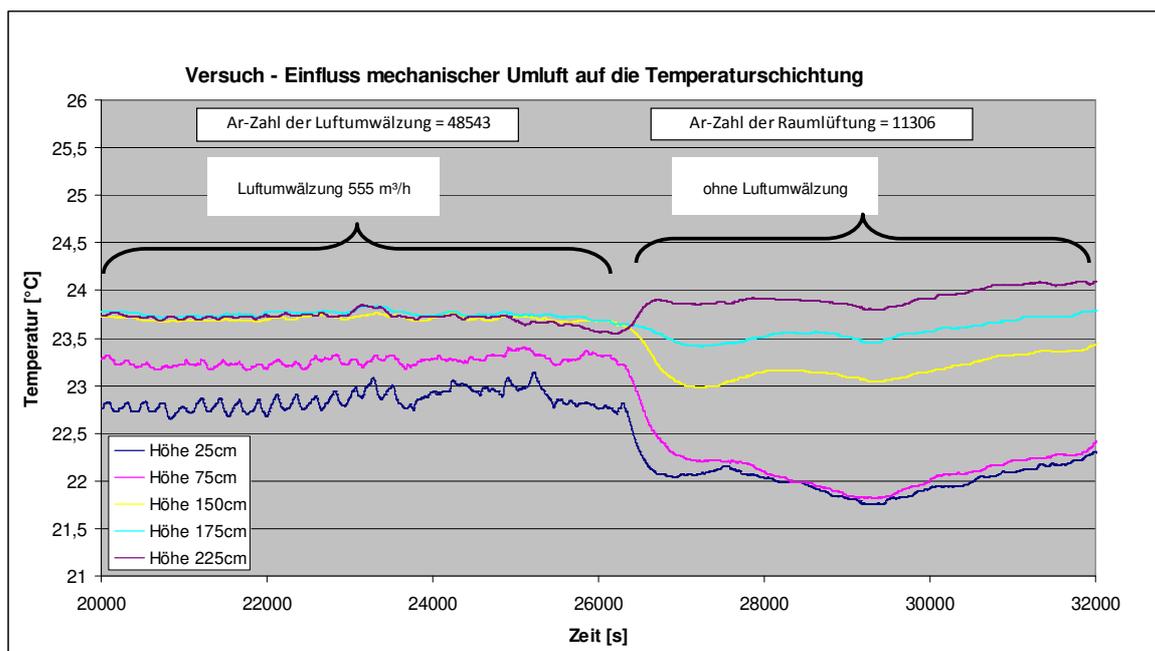
$$Ar \approx 26.913$$

Die für den Luftreiniger resultierende hohe Archimedes – Zahl von  $Ar = 26.913$  deutet darauf hin, dass die Umluftreiniger in der beschriebenen Strömungssituation nur bedingt Einfluss

auf die Raumströmung nehmen können. Bei kleineren Umluftvolumenströmen ist der Einfluss der Geräte auf die Raumströmung demzufolge noch geringer.

Auch der zweite Einfluss der mechanischen oder natürlichen Ventilation auf die Raumströmung, die Raumlüftung mit einer Archimedes-Zahl von 11.306 ordnet sich der Dominanz der Thermik unter.

Das Ergebnis wird durch den nachfolgend dargestellten Versuch gestützt, bei dem trotz eines sehr hohen Luftwechsels und damit niedrigen  $\Delta T$  der Umluftvolumenstrom der Luftreiniger die Temperaturschichtung zwar zu reduzieren, aber nicht aufzulösen vermag (siehe die linken Temperaturverläufe in Abbildung 1). Rechter Hand des Diagramms sind die Verläufe der sich einstellenden Temperaturschichtung ohne punktuelle Luftumwälzung zu sehen.

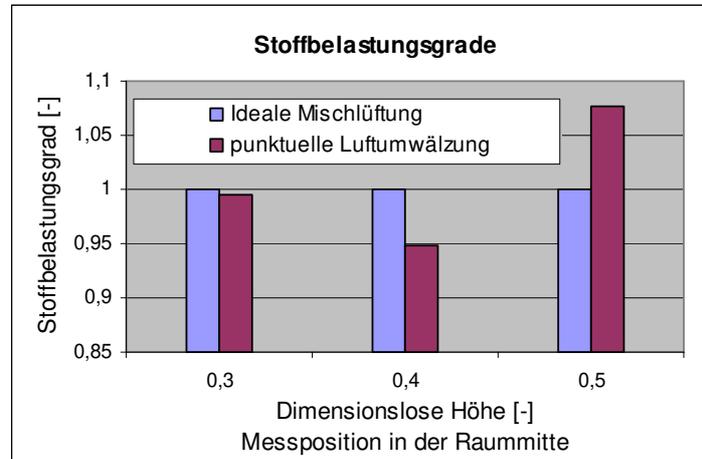


**Abbildung 1: Einfluss des Umluftimpulses, beispielsweise eines Luftreinigers, auf die Temperaturschichtung**

**Randbedingungen: Luftwechsel 115 m<sup>3</sup>/h/Personendummy, Raumgröße 44 m<sup>2</sup>, Höhe 3m, 10 Dummies, sensibler Wärmeeintrag 120 W/Dummy, Temperaturdifferenz Abluft-Zuluft (3 K) unter Berücksichtigung von Transmissionsverlusten, mittlere Raumlufttemperatur 296,3K. Bodennahe Aufstellung**

Parallel zu den örtlichen Temperaturen im beschriebenen Versuch zur Bewertung des Einflusses der Umluftreiniger wurden Stoffbelastungsgrade und damit indirekt das örtliche Infektionsrisiko gemessen. Die Stoffbelastungsgrade wurden durch Messung von N<sub>2</sub>O als luftfremdes Tracergases ermittelt. Dieses der Luft folgende Tracergas fand seine Freisetzung am Emittenten.

Mit lokaler Luftumwälzung analog der von Umluftreinigern stieg im Versuch auf Kopfhöhe (1,5m) das Infektionsrisiko beim Nachbarn der Emissionsquelle im Vergleich zur idealen Mischlüftung ( $\kappa = 1$ ) an. In Richtung Boden hingegen sanken auf 0,9m und 1,2m die Stoffbelastungsgrade, siehe Abbildung 2. Das Ergebnis stützt die Aussage, dass gelegentlich auftretende Strömungen vom Emittenten zum Nachbarn erhöhte Stoffbelastungsgrade und damit ein erhöhtes Infektionsrisiko verursachen können.



**Abbildung 2: gemittelte Stoffbelastungsgrade, Raumhöhe 3m, während der punktuellen Luftumwälzung (beispielsweise Umluftreiniger), siehe Abbildung 1**

Der oben referierte Stoffbelastungsgrad  $\varphi$  ist dabei definiert als die Anzahlkonzentration luftfremder, der Luft trägheitsfrei folgender Stoffe im Untersuchungsfall  $\Psi_{\text{Messung}}$  in Bezug zur Konzentration, die sich bei der idealen Mischlüftung  $\Psi_{\text{Mischlüftung}}$  ergeben würde ( $\kappa = 0$ ).

$$\varphi = \frac{\Psi_{\text{Messung}}}{\Psi_{\text{Mischlüftung}}}$$

#### *Fazit Umluftreiniger*

Umluftreiniger können bei Teil- oder Vollbelegung des Raums die Temperaturschichtung und damit die Aufkonzentration von Viren in den oberen Schichten nicht verhindern. Besonders die Effektivität leistungsschwacher Umluftreiniger ist in diesem Zusammenhang maßgeblich von deren Position im Raum abhängig. Eine Aufstellung mit dem Ziel eines effektiven Betriebes muss bei hohen Archimedes – Zahlen deckennah im Bereich der höchsten Virenkonzentrationen erfolgen. Durch die bodennah wirkende Massenerhaltung am Fuß der Auftriebsplumes entstehen mit oder ohne Zutun der Umluftreiniger Raumluftwalzen, die Luft in die Aufenthaltszone rückbefördern.

Wie die folgenden Betrachtungen des Infektionsrisikos aufzeigen, können Umluftreiniger in Kombination mit realen Mischluftstromströmungen ( $-1 < \kappa < 1$ ) keine virenfreie Luft herstellen. Sehr wohl sind Virenkonzentrationen und damit das Infektionsrisiko zu senken. In Abhängigkeit des Umluftvolumenstroms geben die erreichbaren physikalischen Stoffbelastungsgrade oder exemplarisch auch Virenkonzentrationen Aufschluss über die Leistungsgrenzen von Umluftreinigungsgeräten.

### *Mischlüftungssysteme*

Mischlüftungssysteme mit einem 100% Außenluftanteil oder dekontaminiertem Umluftanteil sind näherungsweise mit der Wirkweise der Umluftreiniger zu vergleichen. Eine virenfreie Luft ist mit dieser Strömungsform aufgrund der physikalisch unvermeidbaren Aufkonzentration bis zum Erreichen der Beharrung nicht zu erzielen. Sehr wohl ist mit zunehmendem Luftwechsel die Luftbelastung zu reduzieren.

Die Bewertung des raumluftprägenden Einflusses im Vergleich zur Thermik erfolgt analog der beschriebenen Vorgehensweise bei Umluftreinigungsgeräten. Gleichmaßen ist auch bei Mischlüftungssystemen das Erreichen der isotropen Strömung ( $\kappa \rightarrow 0$ ) im Wesentlichen vom Luftwechsel abhängig.

Auf Mischlüftungssysteme mit einem nicht dekontaminiertem Umluftanteil zur Erhöhung der Strömungskinetik und damit Reduzierung des thermischen Einflusses wird nicht eingegangen, da solche Systeme nachweislich zum Infektionsgeschehen beitragen.

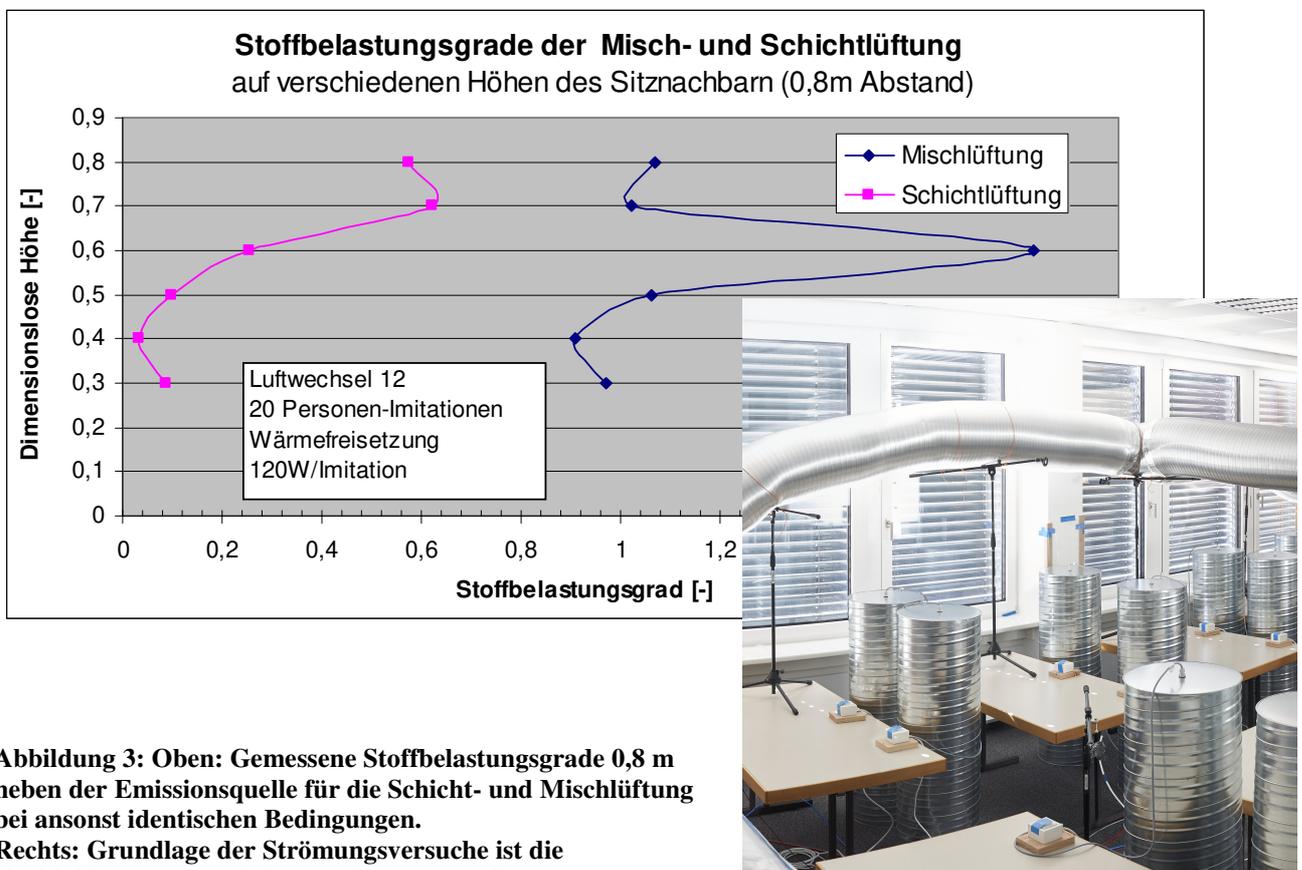
### *Schichtlüftung*

Eine besondere Form der Raumluftströmung ist die Schicht- oder auch Quelllüftung. Durch bodennahe Nachführung von unkontaminierter Luft unterstützt die Schichtlüftung die Thermik und verhindert bei sachgemäßer Regelung das Ausbilden von Raumluftwalzen und damit die Rückführung belasteter Luft aus den oberen Temperaturschichten. Die Strömungsführung ist ähnlich der aufwärtsgerichteten Verdrängungsströmung mit der Thermik ( $\kappa \rightarrow 1$ ) gleichgerichtet, mit dem Unterschied, dass die Schichtlüftung bodennah punktuell und nicht breitflächig einzubringen ist und der erforderliche Luftwechsel in erster Linie nicht der Verdrängung, sondern der Kompensation der Auftriebsvolumenströme genügen muss. Während die Strömungsführung der Schichtlüftung wesentlich flexibler als die der Verdrängungsströmung ausfällt, ist das Ausregeln des notwendigen Kompensationsvolumenstroms, der wiederum Einfluss auf die Temperaturanhebung des Luftwechsels nimmt, im Sinne der Luftreinhaltung im Aufenthaltsbereich und der Begrenzung des erforderlichen Volumenstroms deutlich komplexer und obendrein abhängig von der Raumnutzung.

Gelingt die Regelung sind deutlich niedrigere Stoffbelastungsgrade und damit Infektionsrisiken im Aufenthaltsbereich im Vergleich mit der Mischlüftung zu erzielen. Im Vergleich zur Verdrängungsströmung erfordert die Schichtlüftung in der Regel dazu geringere Volumenströme. Geringere Volumenströme und die flexiblere Strömungsführung gestatten der Schichtlüftung eine einfachere Nachrüstbarkeit als der Verdrängungsströmung.

Die nachfolgende Abbildung 3 zeigt gemessene Stoffbelastungsgrade im Raumströmungsversuch der Misch- und der Schichtlüftung. Der Versuchsaufbau entspricht dem Abbildung 1 und Abbildung 2 zugrunde liegenden Aufbau mit dem Unterschied der vollen Raumbelastung und abweichender Luftvolumenströme.

Der Verlauf des Stoffbelastungsgrades bei der Mischlüftung liegt erwartungsgemäß bei ca. 1. Aufgrund der Nähe der Messstelle (Nachbarposition, 0,8m zum Infizierten) zum Emittenten verursachen Strömungsturbulenzen der Mischlüftung Schlieren, die zeitweise die Exposition des Nachbarn auf dessen Kopfhöhe erheblich verschlechtern und so im Mittel zu einem Stoffbelastungsgrad auf Kopfhöhe deutlich oberhalb 1 führen. Der Nachbar ist daher einem erheblich höherem Infektionsrisiko als weiter entfernte Raumnutzer ausgesetzt. Die Schichtlüftung erreicht im Vergleich zur Mischlüftung besonders im Aufenthaltsbereich in etwa 10-fach niedrigere Belastungsgrade und damit ein 10-fach niedrigeres Infektionsrisiko.



**Abbildung 3: Oben: Gemessene Stoffbelastungsgrade 0,8 m neben der Emissionsquelle für die Schicht- und Mischlüftung bei ansonst identischen Bedingungen. Rechts: Grundlage der Strömungsversuche ist die Nachbildung einer teil- bzw. vollbesetzten Klasse**

#### *Fazit Schichtlüftung*

Die sachgerecht geregelte Schichtlüftung senkt erheblich das Infektionsrisiko im Aufenthaltsbereich und erfordert dazu einen kleineren Luftwechsel als die Verdrängungsströmung. Die reduzierten Stoffbelastungsgrade im Vergleich zur Mischlüftung sind bereits beim Tischnachbarn zu messen. Durch die flexiblere Luftführung ist die Schichtlüftung eher einer Nachrüstung zugänglich.

## Infektionsrisiko

In den bisherigen Ausführungen wurden das Infektionsrisiko und der Stoffbelastungsgrad in Beziehung gebracht. Eine Reihe von Autoren<sup>1</sup> haben sich aufgemacht das Infektionsrisiko der idealen Mischlüftung abzuschätzen. Die getroffenen Abschätzungen basieren auf einer Vielzahl von Publikationen und Beobachtungen und sind dennoch aufgrund des unvollständigen Wissenstandes zum Infektionsweg von COVID 19 aktuell als Hilfsmittel zum Verständnis zu betrachten. Die zitierte Publikation betrachtet den Fall der stationären Beharrung, sowohl in Bezug zur Anreicherung der Raumluft als auch in Bezug auf das Absterben der Viren. Gerade aber zu Beginn der Raumnutzung ist die spezifische Virenbelastung niedrig und steigt mit zunehmender Raumsättigung bei einer Mischlüftung erst an. Je größer der Raum und je niedriger der Luftwechsel desto höher ist der Einfluss der Virensterblichkeit. In der hier angestellten instationären Betrachtung wird der exponentielle Ansatz zur Berechnung der Virenlebensdauer über die Emissionszeit aufintegriert und eine zeitlich abhängige Überlebensrate der Viren auf die Raumkonzentration angewandt. Besonders zu beachten ist dabei, dass mit Erreichen des Luftwechselzeitraums von einer kontinuierlichen Auffrischung der Viren im Raum und damit einer konstanten Überlebensrate ausgegangen wird.

Die folgende Tabelle zeigt exemplarisch für einen Raumnutzungszeitraum von 6h den Vergleich der Risiken im Fall der stationären mit der von den Autoren angestellten instationären Berechnung. Je kürzer der betrachtete Raumnutzungszeitraum ist, umso größer fällt die zu beobachtende Differenz der Raumvirenanzahl zwischen der stationären und der zeitlich diskreten Berechnung aus. Demzufolge fällt auch die Abweichung des Infektionsrisikos zwischen den Berechnungsweisen bei kurzen Zeiträumen größer als bei längeren Raumaufenthaltszeiten aus.

---

<sup>1</sup> Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments  
International Journal of Environmental Research and Public Health 17(21), published: 2020-11-03

<i>Raumvolumen 360m<sup>3</sup>, 24 Raumnutzer über 6 [h], normal infiziös (kein Superspreader), Anteil des Sprechens 10 [%], Atemvolumen 7,8 [l/min], Luftwechsel 0,35[1/h]</i>		
	Stationäre Betrachtung	Instationäre Betrachtung
Risiko einer Person aus der Gruppe zu erkranken	53,4 [%]	27,2[%]
Abweichung	96,3%	

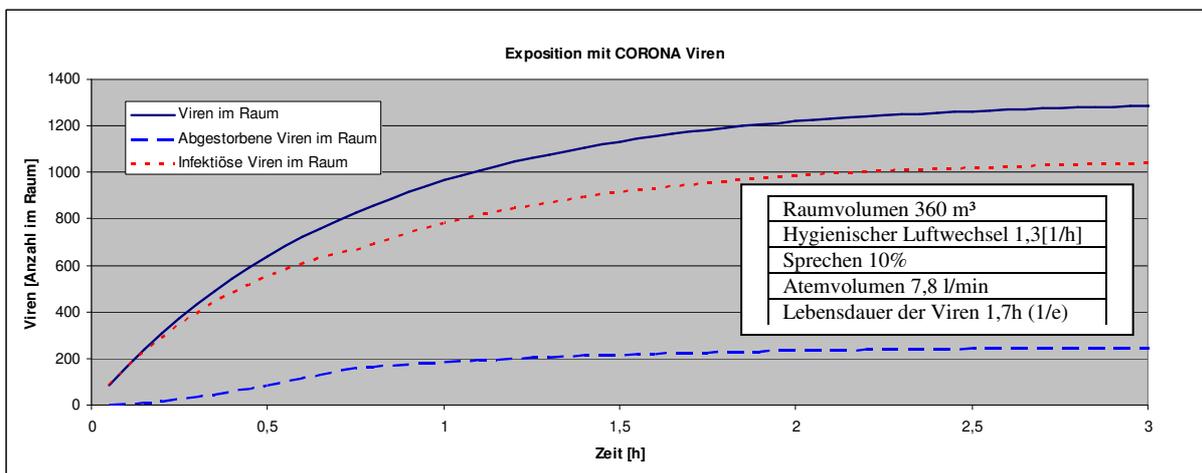
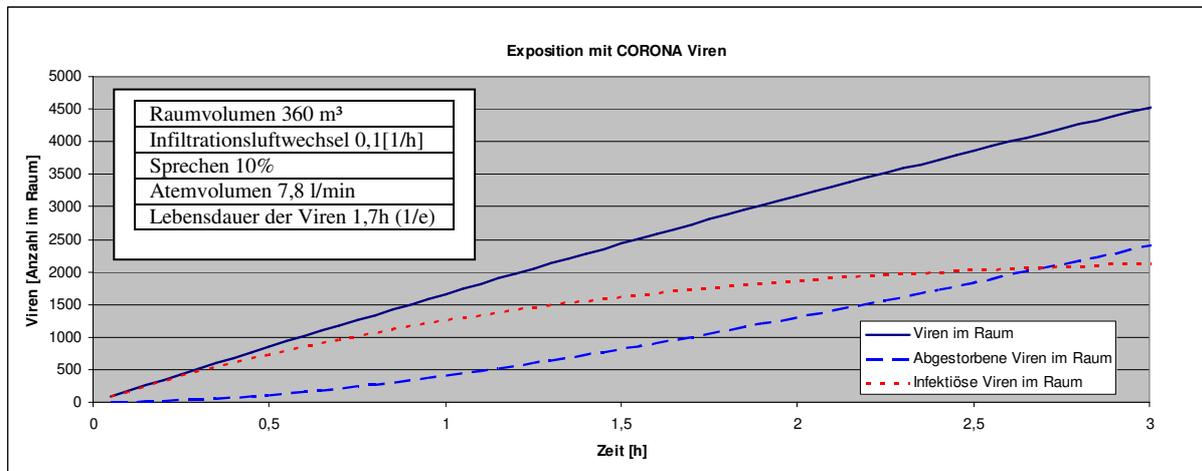
<i>Raumvolumen 360m<sup>3</sup>, 24 Raumnutzer über 6 [h], normal infiziös (kein Superspreader), Anteil des Sprechens 10 [%], Atemvolumen 7,8 [l/min], Luftwechsel 2[1/h]</i>		
	Stationäre Betrachtung	Instationäre Betrachtung
Risiko einer Person aus der Gruppe zu erkranken	24,2 [%]	13,4 [%]
Abweichung	80,6%	

**Tabelle 1: Infektionsrisiken zweier Luftwechsellraten unter Annahme der Beharrung (stationärer Ansatz) im Vergleich mit der zeitlich abhängigen Betrachtung eines jüngst genutzten Raums**

Die folgenden Abbildungen zeigen die instationäre Beladung der Raumluft mit COVID-19 Viren bei Anwesenheit eines Infizierten sowie das exponentielle Absterben der Viren unter Berücksichtigung von Raumvolumen, Luftwechsel und Strömungsführung. Die getroffenen Annahmen der angestellten Berechnungen entsprechen denen der zitierten Publikation mit Ausnahme der konservativen Annahme des Atemminutenvolumenstroms in der Größenordnung von 7,8 l/min für Emittent und Nichtinfizierte.

Das obere der beiden Diagramme zeigt den nahezu nicht belüfteten Raum, wie er häufig in Schulen in der Winterzeit anzutreffen ist. Die Virenkonzentration steigt nahezu linear an. Dem linearen Anstieg folgt mit Verzug die Summe der abgestorbenen Viren, während die verbleibenden infektiösen Viren nach einigen Stunden den maximalen Grenzwert der Beharrung erreichen.

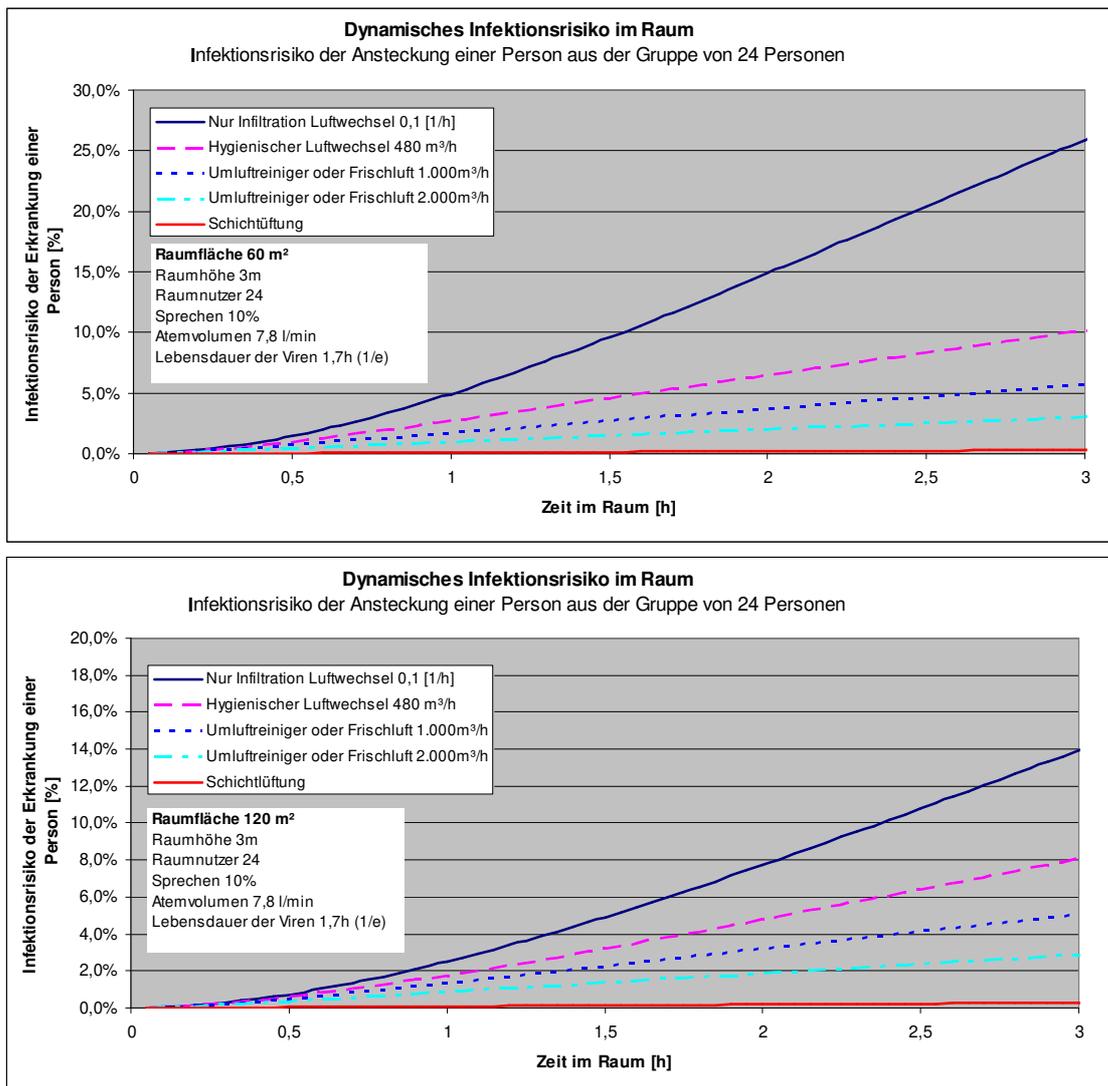
Das untere Diagramm zeigt hingegen eine nach dem Stand der Technik ausgeführte Mischlüftung. Auch in diesem Raum steigt die Virenanzahl im Raum über die Zeit, erreicht früher die Beharrung, die sich auf niedrigerem Niveau einfindet. Gleichermaßen ist das Niveau der infektiösen Virenanzahl deutlich niedriger als bei einem Raum ohne mechanische Lüftungsanlage.



**Abbildung 4:** Exemplarische Verläufe der Raumvirenanzahl aufgetragen über der Zeit bei fortdauernder Emission eines normal Infizierten (kein Superspreader), unterteilt in die absolute Anzahl der Raumviren, sowie die der abgestorben und der lebenden Viren. Die Strömungsform entspricht der idealen Mischlüftung. Der obige Verlauf repräsentiert den geschlossenen, nur per Infiltration (Luftwechsel 0,1[1/h]) belüfteten Raum, wie er beispielsweise entsprechender der Lüftungsempfehlung des Umweltbundesamtes 20 min analog vorkommt. Die untere Abbildung entspricht dem Stand der Lüftungstechnik und damit der Mehrheit aller mechanischen Lüftungsanlagen, bei dem über Mischluftsysteme der notwendige hygienische Luftwechsel sichergestellt wird.

Durch Aufintegration der eingeatmeten Viren unter Beachtung der Ablagerungswahrscheinlichkeit, ggf. auch eines Schutzmaskenabscheidegrades, erhält man die Expositions-dosis und damit das Infektionsrisiko, welches mit zunehmender Raumnutzungszeit steigt (siehe Abbildung 5). Die folgenden Betrachtungen fokussieren das Infektionsrisiko speziell zu Beginn der Raumnutzung und der sich anschließenden Raumnutzungsstunden. Gerade diese Stunden stellen den für die Ansteckung gewichtigsten Zeitraum, da mit regelmäßigen Pausen und Stoß- oder Querlüften die Raumkonzentrationen nahezu auf Null rückzuführen sind.

Die folgenden Diagramme beinhalten das im Rahmen dieser Ausarbeitung berechnete Infektionsrisiko innerhalb von Räumen mit 60 und 120 m<sup>2</sup> Grundfläche, belegt mit 24 Personen. Betrachtet werden die Lüftungssituationen „Freies Lüften“, Umluftreiner oder Frischluftsysteme mit 1.000 bzw. 2.000 m<sup>3</sup>/h sowie eine Schichtlüftung mit ebenfalls 2.000 m<sup>3</sup>/h. Das Infektionsrisiko wird zu dem Zeitpunkt ausgewiesen, bis zu dem die Nutzer sich im Raum unter den angegebenen Bedingungen aufhielten.



**Abbildung 5: Verlauf des Infektionsrisikos einer Person aus der Gruppe zu erkranken, aufgetragen über der Aufenthaltszeit für unterschiedliche Lüftungssituationen und Räume**

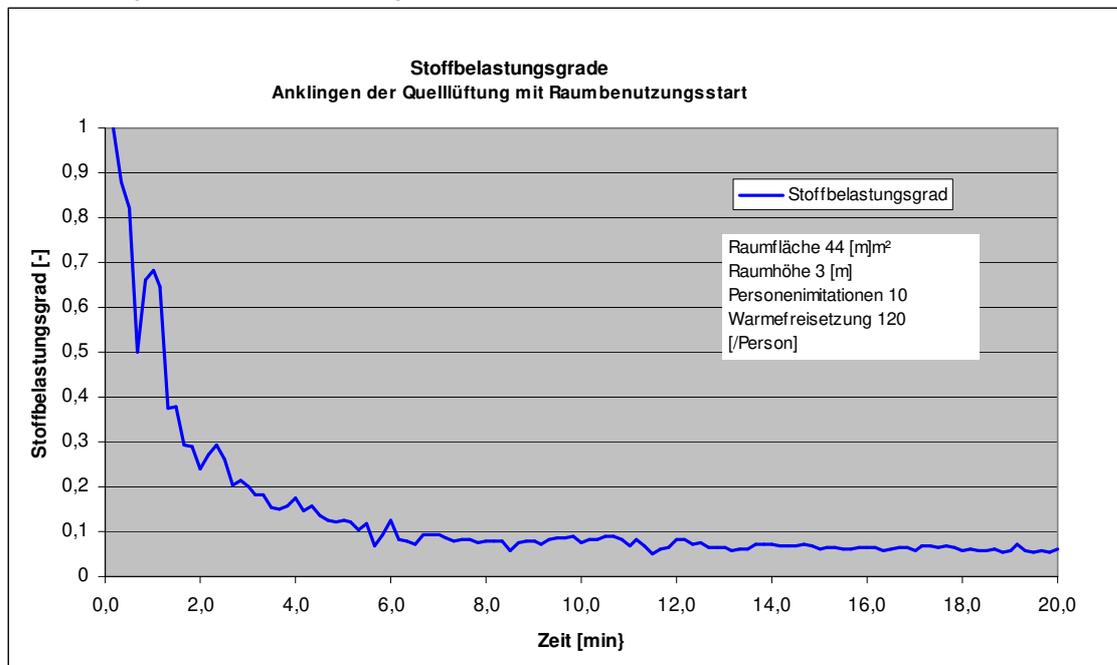
Auffällig bei geschlossenen Fenstern und Abwesenheit einer Lüftungsmaßnahme (lediglich Infiltration) ist der starke Anstieg (blaue Linien) des Infektionsrisikos. Nach 20 Minuten, der Empfehlung des Umweltbundesamtes, erreicht das Infektionsrisiko für den kleinen Raum 0,76% und für den großen Raum 0,4%. Die Bedeutung des sehr regelmäßigen Stoß- oder

Querlüftens wird durch diese Ergebnisse unterstrichen. Alle Lüftungsmaßnahmen, ob auf Frischluft oder auf gereinigter Luft basierend, reduzieren das Infektionsrisiko erheblich. Größere Luftwechsel sind vorteilhaft. Lediglich die Schichtlüftung erreicht im dargestellten Zeitraum von 3h im Aufenthaltsbereich Sitzender mit 0,3% Infektionsrisiken im Promillebereich.

Bei allen Lüftungsvarianten mit Ausnahme der Verdrängungs- und Schichtlüftung ist das regelmäßige Stoß- bzw. Querlüften in den Pausen zu empfehlen.

Während die Mischlüftungssysteme ventilatorgestützt einen mehr oder weniger gewichtigen Einfluss auf die Raumströmung ( $-1 < \kappa < 1$ ) ausüben, ist bei der Schichtlüftung die Thermik Antrieb zur Ausbildung der Temperaturschichtung. Während also bei Mischlüftungssystemen die prägende Raumströmung auch in Abwesenheit der Raumnutzer aufzufinden ist, stellt sich die Temperaturschichtung der Schichtlüftung erst mit Anwesenheit der Raumnutzer und damit der Wärmequellen ein. Es stellt sich daher die Frage, wie lange die Strömung zur Ausbildung der schützenden Temperaturschichtung mit Belegung des Raums benötigt?

Aufschluss über die Dauer der Ausbildung einer wirksamen Schichtlüftung liefert das im Rahmen dieser Arbeit aus dem Strömungsversuch generierte folgende Diagramm. Nach 6 Minuten sind Stoffbelastungsgrade und damit das Infektionsrisiko des Sitznachbarn in 0,8 m Entfernung auf ein Zehntel abgesunken.



**Abbildung 6: Absinken der Stoffbelastungsgrade mit Anwesenheit der Raumnutzer und Ausbildung der Temperaturschichtung. Nach ca. 6 Minuten sind die Stoffbelastungen und damit das Infektionsrisiko im Bereich Sitzender auf ein Zehntel abgesunken.**

In Zeiten aktiven Infektionsschutzes kann aus Abbildung 6 das Abnehmen der Partikelschutzmasken bei fachlich korrekt geregelter Schichtlüftung erst nach 6 Minuten der Raumbelastung bei mindestens 50% Raumauslastung empfohlen werden.

### Ausblick

Lohnenswert erscheint im Licht dieser Veröffentlichung die Untersuchung der Korrelation der Archimedes – Zahl mit der Misch- bzw. Schichtlüftungsqualität ( $\kappa$ ). Diese Untersuchung kann beispielsweise Aufschluss über die Größe und Positionierung der Umluftreiniger liefern und durch Anwendung der Archimedes – Zahl die Planung solcher Lösungen quantitativ unterstützen.

Schichtluftsysteme machen sich die gleichgerichteten Strömungsvektore ( $\kappa \rightarrow 1$ ) von Thermik und mechanischer Ventilation bzw. die impulsarme Zuluftführung zu Nutze. Zur Bewertung von Raumströmungen und Einflüssen auf das Infektionsrisiko wird die Einführung einer adaptierten Archimedes – Zahl analog Formel 2, die neben dem Verhältnis der Kräfte deren Ausrichtung zueinander berücksichtigt, vorgeschlagen.

### Formel 3

$$Ar_{\text{Quellluftführung}} = \frac{2 \cdot g \cdot H \cdot \Delta T + \kappa \cdot v_e^2}{v_e^2 \cdot T_R}$$

Bei gleichgerichteter Strömung ( $\kappa \rightarrow 1$ ) verstärkt sich der Auftriebseffekt. Bei gegenteiliger Strömung sinkt die modifizierte Archimedes – Zahl. Zukünftige Untersuchungen können basierend hierauf korrelierende Aussagen zu Schichtungsstabilitäten und erreichbaren Stoffbelastungsgraden verschiedener Betriebskonfigurationen aufzeigen und damit helfen Lüftungen mit dem Ziel der Luftreinhaltung zu optimieren.

## Literatur

<sup>i</sup> The Global Risks Report 2020, WORD ECONOMIC FORUM

<sup>ii</sup> Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments  
Author(s): Lelieveld, Jos; Helleis, Frank; Borrmann, Stephan; Cheng, Yafang; Drewnick, Frank; Haug, Gerald; Klimach, Thomas; Sciare, Jean; Su, Hang; Pöschl, Ulrich Publication Date: 2020-11-03, International Journal of Environmental Research and Public Health 17(21)

<sup>iii</sup> Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness.  
Authors(s) Asadi, S.; Wexler, A.S.; Cappa, C.D.; Santiago Barreda, S.; Bouvier, N.M.; Ristenpart, W.D. Sci. Rep. 2019, 9, 2348.

<sup>iv</sup> Airborne transmission of COVID-19. Borak, J. Occup. Med. 2020, 70, 297–299.

<sup>v</sup> Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors.  
Vuorinen, V.; Aarnio, M.; Alava, M.; Alopaeus, V.; Atanasova, N.; Auvinen, M.; Balasubramanian, N.; Bordbar, H.; Erasto, P.; Grande, R.; et al. Saf. Sci. 2020, 130.

<sup>vi</sup> Aerosol and surface stability of SARS-CoV-2 as compared with SARS-CoV-1  
Van Doremalen, N.; Bushmaker, T.; Morris, D.H.; Holbrook, M.G.; Gamble, A.; Williamson, B.N.; Tamin, A.; Harcourt, J.L.; Thornburg, N.J.; Gerber, S.I.; et al. N. Engl. J. Med. 2020, 382, 1564–1567.

<sup>vii</sup> Regenscheit, B: Ges.Ing. 6/70. S. 172/77 und Ki Extra Nr.12 (1981)  
Presser, K.H.: Ges.-Ing. 6/89. S. 286/307

<sup>viii</sup> Zitat aus dem Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 03/04, Seite 1235

<sup>ix</sup> VDI 2078