

Update der App „CO₂-Timer“ mit neuer Infektionsschutzversion

H. D. Neumann, I. Thullner, M. Protsch, S. Peters

ZUSAMMENFASSUNG Gemäß der Arbeitsstättenverordnung muss in Räumen ausreichend „gesundheitlich zuträgliche Atemluft“ vorhanden sein. Dies gilt insbesondere in Zeiten von Epidemien wie in der derzeit herrschenden SARS-CoV-2-Pandemie. Die bestehende CO₂-App wurde daher überarbeitet und den neuen Infektionsschutzanforderungen angepasst. Ferner wurden Informationen zum infektionsschutzgerechten Lüften eingefügt. Darüber hinaus wurden weitere Verbesserungen vorgenommen, wie die Berechnung der Lüftungszeitpunkte bezogen auf die Sommer- und Winterzeit anstatt auf Halbjahreszeiträume, was eine gleichmäßigere Verteilung der Datenbasis auf die Zeiträume ermöglichte. Weitere Auswertungen zeigten, dass eine gute Luftqualität sich auch bei Kipplüftung mit relativ kleinen Kipplüftungsflächen realisieren lässt und dass die mit der App berechneten CO₂-Konzentrationsanstiege in Räumen mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Der CO₂-Timer ist somit eine gute Alternative zu CO₂-Messungen in Räumen.

CO₂ timer app updated for infection control

ABSTRACT The German Ordinance on workplaces requires indoor areas to have sufficient healthy breathing air. This applies in particular during epidemics, such as the current SARS-CoV-2 pandemic. The existing CO₂ app was therefore modified and adapted to the new requirements for infection control. Further information was added on methods of ventilation in the interests of infection control. Other improvements were also made, such as calculation of the timing of ventilation in consideration of summer and winter time rather than six-monthly periods, which enabled the body of data to be distributed more evenly over the periods. Further evaluations showed that good air quality can also be achieved with ventilation by means of tilting windows with comparatively small vent areas, and that the increases in indoor CO₂ concentrations calculated by the app are consistent with the measured values. The CO₂ timer thus represents a good alternative to indoor measurements of CO₂.

1 Einleitung

Gute Luft ist eine der Grundlagen für Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit. Die Arbeitsstättenverordnung [1] fordert daher, dass in Räumen ausreichend „gesundheitlich zuträgliche Atemluft“ vorhanden sein muss. Dies gilt insbesondere in Zeiten von Epidemien, wie derzeit im Rahmen der SARS-CoV-2-Pandemie. Ein Maßstab für gute Luft ist im Allgemeinen die Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in Räumen. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Abgabe von CO₂ als Abbauprodukt der menschlichen Atmung. So wird die Einhaltung der Konzentration von 1 000 ppm (parts per million = ml/m³) CO₂ in der Raumluft als hygienisch unbedenklich angesehen. Laut der „SARS-CoV-2-Arbeitsschutzregel“ [2] soll dieser Wert jedoch möglichst unterschritten werden, da auch verstärktes Lüften die Konzentration von möglicherweise in der Raumluft vorhandenen virenbelasteten Aerosolen reduzieren kann. Dies war ein Grund, die bestehende CO₂-App [3] zu überarbeiten und einen Infektionsschutzzielwert einzuführen, der auch in Zeiten anderer Epidemien wie Grippewellen Anwendung finden kann. Darüber hinaus wurden auch weitere Verbesserungen vorgenommen, z. B. die Berechnung der Lüftungszeitpunkte bezogen auf die Sommer- und Winterzeit anstatt auf Halbjahreszeiträume. Ferner wurden Informationen zum infektionsschutzgerechten Lüften eingefügt.

2 Änderungen im Vergleich zur alten App

- Informationen zum infektionsschutzgerechten Lüften
- Neue Berechnung des Stoß- und Kipplüftungszeitpunktes zur Einhaltung eines Infektionsschutzzielwertes von 800 ppm CO₂
- Neue Medianwerte für die Kipplüftungsphase in der Sommer- und Winterzeit
- Neue Darstellung der Kipplüftung für den Infektionsschutzzielwert
- Berechnung der Lüftungszeitpunkte in einem zulässigen Bereich für das Verhältnis Raumvolumen/Person
- Darstellung und Berechnung der notwendigen Lüftungszeitpunkte und der auftretenden Endkonzentration ohne Lüftung in einem Zeitraum bis zu 120 min
- Kipplüftungsversionen im Bildungsbereich bezogen auf den Mittelwert während der Nutzungseinheit

3 Informationen zum infektionsschutzgerechten Lüften

Neben den bisherigen Informationen zu schlechter Luft und ihren Folgen oder richtiger Lüftung werden in einem neuen Kapitel Informationen zur Ausbreitung von Tröpfchen und Aerosolen mit Krankheitserregern dargestellt (**Bild 1**) und Präventionsmaßnahmen erläutert [4].

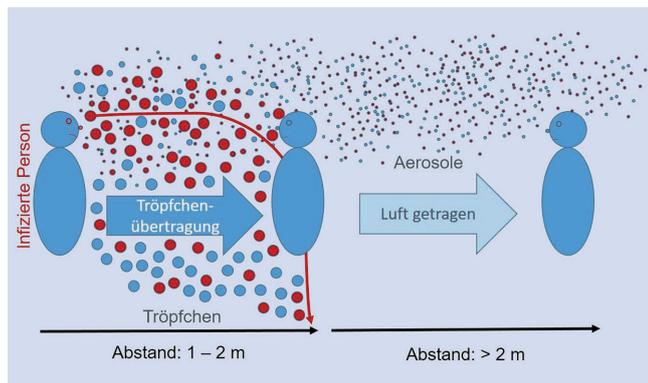


Bild 1 Übertragungswege von Krankheitserregern in der Luft über Tröpfchen in einem Abstand von 1 bis 2 Metern und über Aerosole in einem Abstand von mehr als 2 Meter. Quelle: C. Jehn, *Verwaltungs-Berufsgenossenschaft (VBG)*

In Epidemiezeiten soll die CO₂-Konzentration von 1 000 ppm möglichst unterschritten werden. Als Infektionsschutzzielwert wird daher ein Wert von 800 ppm vorgeschlagen. Ferner werden zum infektionsschutzgerechten Lüften folgende Empfehlungen gegeben:

- Eine ausreichende Frischluftzufuhr von außen durch regelmäßiges Stoßlüften sicherstellen, ggf. ergänzendes Dauerlüften mit Kippstellung der Fenster,
- Insbesondere Unterrichts-, Besprechungs- und Seminarräume, aber auch andere Räume, die von mehreren Personen genutzt werden, vor und nach Benutzung ausgiebig lüften,
- Zeitliche Lüftungsabstände an die Anzahl der Personen anpassen,
- Ein rechtzeitiges Erinnern an das Lüften kann über die CO₂-Konzentration durch Berechnung mit dem CO₂-Timer oder Messen mit z. B. „CO₂-Ampeln“ erfolgen.

4 Beurteilung der Raumluftqualität

Zur Beurteilung der Raumluftqualität wird die CO₂-Konzentration im Raum in ppm herangezogen. Es gilt folgendes Bewertungsschema:

- Bis 800 ppm* = Infektionsschutz,
- Bis 1 000 ppm* = hygienisch unbedenklich,
- 1 000 bis 2 000 ppm = hygienisch auffällig,
- Mehr als 2 000 ppm = hygienisch inakzeptabel.

*Im Bildungsbereich wird die CO₂-Konzentration als Mittelwert über eine Nutzungs(Einheits)-Einheit gemäß den Empfehlungen des Umweltbundesamtes [5] berechnet. In Büro- und Besprechungsräumen wird der Momentanwert der CO₂-Konzentration gemäß der Technischen Regel für Arbeitsstätten ASR A3.6 „Lüftung“ [6] verwendet.

5 Datenbasis

Der CO₂-Rechner basiert auf den Ergebnissen einer Studie der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, in der die CO₂-Konzentration während 720 Unterrichtsstunden in 111 Schulen gemessen wurde [7 bis 9]. Die Messungen erfolgten nach folgendem Studiendesign:

1. Messung der Grundbelastung vor dem Unterricht nach gründlicher Lüftung am Vortag,
2. Messung in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde ohne Lüftung,
3. Durchführung einer intensiven Stoßlüftung in der 5-Minuten-Pause über geöffnete Fenster und Türen,
4. Messung in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde mit Kipp Lüftung.

Da sich das Studiendesign in Förderschulen häufig nicht realisieren ließ, wurden diese bei der Auswertung von CO₂-Messungen nicht berücksichtigt. Somit kamen jeweils 330 Messungen für jede der genannten Situationen in die Auswertung. Die Datenbasis ermöglichte eine statistische Auswertung der Messwerte für die Primar- und Sekundarstufe im Schulbereich für die Sommerzeit (April bis Oktober) und die Winterzeit (November bis März).

6 Vergleich alte und neue statistische Auswertung

Im Rahmen der Studie wurden neben den Schulformen und gewonnenen Messwerten unter anderem auch die Raumgrößen, Zahl der anwesenden Personen, Lüftungsflächen und raumklimatischen Verhältnisse aufgezeichnet [8 bis 10]. Somit ließen sich die CO₂-Konzentrationsanstiege in den Räumen in Liter pro anwesender Person in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde bestimmen. Diese Werte wurden statistisch ausgewertet.

6.1 Unterrichtsstunde ohne Lüftung

Für die Unterrichtsstunde ohne Lüftung wurden so für den CO₂-Konzentrationsanstieg Medianwerte von 12,4 l/Person in 45 Minuten für den Sekundarbereich und 9,9 l/Person in 45 Minuten für den Primarbereich bestimmt. Diese Werte wurden bereits in der alten und werden auch in der neuen App-Version zur Bestimmung der Stoßlüftungszeitpunkte in der Sommer- und Winterzeit herangezogen.

- Im Sekundarbereich betragen die CO₂-Konzentrationsanstiege 12,4 l/Person in 45 Minuten in der Sommerzeit und 12,3 l/Person in 45 Minuten in der Winterzeit.
- Im Primarbereich 9,9 l/Person in 45 Minuten in der Sommerzeit und 10,0 l/Person in 45 Minuten in der Winterzeit.

Die Unterschiede zwischen Sommer- und Winterzeit für den ungelüfteten Zustand sind somit gering und können deshalb vernachlässigt werden. Der Vergleich mit rechnerisch ermittelten und messtechnisch gewonnenen Werten für den Bürobereich zeigte, dass die Ergebnisse aus dem Sekundarbereich auch auf diesen Arbeitsbereich übertragbar sind [3]. Gleiches gilt für Seminar- und Besprechungsräume.

6.2 Unterrichtsstunde mit Kipp Lüftung

Die Median- und 95-Perzentilwerte für die Unterrichtsstunde mit Kipp Lüftung nach neuer Jahreszeitauswertung sind in **Tabelle 1** dargestellt.

In der alten App-Version [3] erfolgte die statistische Auswertung nach Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und Winterhalbjahr (November bis April). Durch die neue Sortierung der CO₂-Messwerte nach Sommer- bzw. Winterzeit konnte den Ferienzeiten besser Rechnung getragen werden. Insgesamt ergibt sich nunmehr eine gleichmäßigere Verteilung für die jeweiligen Zeiträume.

Tabelle 1 Median- und 95-Perzentilwerte für die Unterrichtsstunde mit Kipplüftung nach neuer Jahreszeitauswertung.

	CO ₂ -Anstieg pro Person in 1/45 min gesamtes Jahr	CO ₂ -Anstieg pro Person in 1/45 min Sommerzeit	CO ₂ -Anstieg pro Person in 1/45 min Winterzeit
Primarstufe			
Anzahl	115	58	57
Median	1,6	0,6	2,0
95-Perzentil	6,2	6,3	5,4
Sekundarstufe			
Anzahl	215	108	107
Median	1,7	0,7	3,6
95-Perzentil	8,4	5,3	9,3

Im Vergleich zur alten App-Version sind die Medianwerte der CO₂-Anstiege/Person in der Primarstufe im Sommer nun 0,6 l/45 min und im Winter 0,2 l/45 min höher. In der Sekundarstufe ist der Medianwert im Sommer nun 0,2 l/45 min niedriger und im Winter 0,6 l/45 min höher.

7 Berechnungsformeln

7.1 Startkonzentration vor Beginn der Raumnutzung

Vor Beginn der Raumnutzung betrug der Medianwert der CO₂-Konzentration 600 ppm. Dieser Wert wird bei der Berechnung daher als Startkonzentration verwendet. Insgesamt wurden von den 330 Messungen ca. 130 Werte unterhalb von 600 ppm gemessen. Nur 40 Werte lagen im Bereich der Außenluftkonzentration von 400 ppm und ca. 120 Werte lagen oberhalb von 600 ppm.

7.2 Berechnung der Stoßlüftungszeitpunkte im Bürobereich

Die Stoßlüftungszeitpunkte für die Momentanwert-Version im Bürobereich berechnen sich aus der Differenz zwischen dem jeweiligen Zielwert und der Startkonzentration von 600 ppm. Neben den Zielwerten für den Infektionsschutz bei 800 ppm und die hygienische Unbedenklichkeit bei 1 000 ppm wird zusätzlich ein Zielwert für eine niedrige Raumluftqualität bei 1 400 ppm berechnet [11].

Die Formeln lauten daher wie folgt: **(Gleichung 1)**

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Infektionsschutz}}: \quad t_{x1} &= \frac{(800 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{200 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{hygienisch unbedenklich}}: \quad t_{x2} &= \frac{(1000 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{400 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{niedrige Raumluftqualität}}: \quad t_{x3} &= \frac{(1400 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{800 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{hygienisch bedenklich}}: \quad t_{x4} &= \frac{(2000 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{1400 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{Ende Nutzungszeit}}: \quad t_n &
 \end{aligned}$$

Somit lassen sich für den Bürobereich folgende CO₂-Konzentrationen für die Stoßlüftungszeitpunkte und die Konzentration zum Ende der Nutzungszeit berechnen: **(Gleichung 2)**

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Start}} &= 600 \text{ ppm} \\
 C_{\text{Infektionsschutz}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x1} \cdot a_1 = 800 \text{ ppm} \\
 C_{\text{hygienisch unbedenklich}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x2} \cdot a_1 = 1000 \text{ ppm} \\
 C_{\text{niedrige Raumluftqualität}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x3} \cdot a_1 = 1400 \text{ ppm} \\
 C_{\text{hygienisch bedenklich}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x4} \cdot a_1 = 2000 \text{ ppm} \\
 C_{\text{Ende Nutzungszeit}} &= 600 \text{ ppm} + t_n \cdot a_1
 \end{aligned}$$

mit **(Gleichung 3)**

$$\begin{aligned}
 t_x &= \text{Lüftungszeitpunkt in min nach Raumnutzungsbeginn} \\
 t_n &= \text{Raumnutzungszeit in min} \\
 C &= \text{CO}_2\text{-Konzentration zum Zeitpunkt } t_x \text{ bzw. } t_n \\
 a_1 &= \text{CO}_2\text{-Konzentrationsanstieg ungelüftet pro Minute unter Berücksichtigung der Anzahl der Personen im Raum und des Raumvolumens} \\
 a_1 &= \frac{N}{V} \cdot \frac{Md_{\text{ungelüftet}} \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \\
 N &= \text{Zahl der anwesenden Personen} \\
 V &= \text{Raumvolumen in m}^3 \\
 Md_{\text{ungelüftet}} &= \text{Medianwert des CO}_2\text{-Konzentrationsanstiegs in 45 min in ml pro Person im ungelüfteten Zustand (siehe Abschnitt 6.1)}
 \end{aligned}$$

7.3 Berechnung der Stoßlüftungszeitpunkte im Bildungsbereich

Die Stoßlüftungszeitpunkte für die Mittelwert-Version im Bildungsbereich berechnen sich ebenfalls aus der Differenz zwischen dem jeweiligen Zielwert und der Startkonzentration von 600 ppm. Um das im Bildungsbereich verwendete Bewertungsverfahren der Mittelwertbildung über eine Nutzungseinheit (siehe Bewertungsschema in Abschnitt 4) zu berücksichtigen, werden für die Berechnung der Stoßlüftungszeitpunkte höhere Zielwerte für den Infektionsschutz und die hygienische Unbedenklichkeit in Form von entsprechend angepassten Momentanwerten verwendet. Das bedeutet, dass für eine Einhaltung der CO₂-Konzentration von 800 ppm als Mittelwert für den Infektionsschutz ein höherer Zielwert von 1 000 ppm verwendet wird. Für eine Einhaltung der CO₂-Konzentration von 1 000 ppm als Mittelwert für die hygienische Unbedenklichkeit wird ein höherer Zielwert von 1 400 ppm verwendet.

Die Formeln lauten daher wie folgt (**Gleichung 4**):

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Infektionsschutz}}: \quad t_{x1} &= \frac{(1000 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{400 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{hygienisch unbedenklich}}: \quad t_{x2} &= \frac{(1400 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{800 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{hygienisch bedenklich}}: \quad t_{x3} &= \frac{(2000 - 600) \text{ ppm}}{a_1} = \frac{1400 \text{ ppm}}{a_1} \\
 t_{\text{Ende Nutzungszeit}}: \quad t_n &
 \end{aligned}$$

Aufgrund der Mittelwertbildung sind die Stoßlüftungszeitpunkte im Bildungsbereich im Vergleich zum Bürobereich doppelt so hoch. Somit ergeben sich im Bildungsbereich folgende CO₂-Konzentrationen bei erforderlicher Stoßlüftung und am Ende der Nutzungszeit ohne Lüftung (**Gleichung 5**):

$$\begin{aligned}
 C_{\text{Start}} &= 600 \text{ ppm} \\
 C_{\text{Infektionsschutz}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x1} \cdot a_1 = 1000 \text{ ppm} \\
 C_{\text{hygienisch unbedenklich}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x2} \cdot a_1 = 1400 \text{ ppm} \\
 C_{\text{hygienisch bedenklich}} &= 600 \text{ ppm} + t_{x3} \cdot a_1 = 2000 \text{ ppm} \\
 C_{\text{Ende Nutzungszeit}} &= 600 \text{ ppm} + t_n \cdot a_1
 \end{aligned}$$

mit (**Gleichung 6**)

$$\begin{aligned}
 t_x &= \text{Lüftungszeitpunkt in min nach Raumnutzungsbeginn} \\
 t_n &= \text{Raumnutzungszeit in min} \\
 C &= \text{CO}_2\text{-Konzentration zum Zeitpunkt } t_x \text{ bzw. } t_n \\
 a_1 &= \text{CO}_2\text{-Konzentrationsanstieg ungelüftet pro Minute unter} \\
 &\quad \text{Berücksichtigung der Anzahl der Personen im Raum und des} \\
 &\quad \text{Raumvolumens} \\
 a_1 &= \frac{N}{V} \cdot \frac{Md_{\text{ungelüftet}} \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \\
 N &= \text{Zahl der anwesenden Personen} \\
 V &= \text{Raumvolumen in m}^3 \\
 Md_{\text{ungelüftet}} &= \text{Medianwert des CO}_2\text{-Konzentrationsanstiegs in} \\
 &\quad 45 \text{ min in ml pro Person im ungelüfteten Zustand} \\
 &\quad \text{(siehe Abschnitt 6.1)}
 \end{aligned}$$

7.4 Herleitung der Formeln für die erforderlichen Kipplüftungszeitpunkte im Bildungsbereich

Die Berechnung der Kipplüftungszeitpunkte berechnet sich nach folgender Ausgangsformel: (**Gleichung 7**)

$$\frac{1}{2} a_1 \cdot t_x^2 + \frac{1}{2} a_2 \cdot (t_n - t_x)^2 + a_1 \cdot t_x \cdot (t_n - t_x) - \frac{1}{2} a_0 \cdot t_n^2 = 0$$

Somit ergibt sich folgender Lösungsansatz: (**Gleichung 8**)

$$t_x^2 - 2 \cdot t_n \cdot t_x + \frac{(a_2 - a_0)}{(a_2 - a_1)} \cdot t_n^2 = 0$$

Die Formel für den Kipplüftungszeitpunkt zur Einhaltung der hygienischen Unbedenklichkeit lautet demnach: (**Gleichung 9**)

$$t_x = t_n - \sqrt{t_n^2 - \frac{(a_2 - a_0)}{(a_2 - a_1)} \cdot t_n^2}$$

Der Kipplüftungszeitpunkt zur Einhaltung des Infektions-schutzzielwertes berechnet sich nach folgender Formel: (**Gleichung 10**)

$$t_x = t_n - \sqrt{t_n^2 - \frac{\left(a_2 - \frac{1}{2} a_0\right)}{(a_2 - a_1)} \cdot t_n^2}$$

mit (**Gleichung 11**)

$$\begin{aligned}
 t_x &= \text{Kipplüftungszeitpunkt in min nach Beginn der Raumnutzung} \\
 t_n &= \text{Raumnutzungszeit in min} \\
 a_0 &= \text{CO}_2\text{-Konzentrationsanstieg ungelüftet pro min ab} \\
 &\quad t = 0 = 800 \text{ ppm} / t_n \\
 a_1 &= \text{CO}_2\text{-Konzentrationsanstieg ungelüftet pro min unter} \\
 &\quad \text{Berücksichtigung der Anzahl der Personen im Raum und des} \\
 &\quad \text{Raumvolumens} \\
 a_1 &= \frac{N}{V} \cdot \frac{Md_{\text{ungelüftet}} \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \\
 a_2 &= \text{CO}_2\text{-Konzentrationsanstieg gelüftet pro min unter} \\
 &\quad \text{Berücksichtigung der Anzahl der Personen im Raum und des} \\
 &\quad \text{Raumvolumens} \\
 a_2 &= \frac{N}{V} \cdot \frac{Md_{\text{gelüftet}} \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \\
 N &= \text{Zahl der anwesenden Personen} \\
 V &= \text{Raumvolumen in m}^3 \\
 Md_{(\text{un})\text{gelüftet}} &= \text{Medianwert des CO}_2\text{-Konzentrationsanstiegs} \\
 &\quad \text{in 45 min. in ml pro Person im (un-)gelüfteten} \\
 &\quad \text{Zustand (siehe Abschnitt 6.1 und Tabelle 1)}
 \end{aligned}$$

Somit ergibt sich folgende Formel für die graphische Darstellung bei Kipplüftung: (**Gleichung 12**)

$$\begin{aligned}
 C_{\text{end}} &= C_{\text{Start}} + C_{\text{tx}} + a_2 \cdot (t_n - t_x) \\
 \text{mit: } C & \\
 C_{\text{end}} &= \text{CO}_2\text{-Konzentration am Ende der Nutzungszeit} \\
 C_{\text{Start}} &= \text{CO}_2\text{-Konzentration zu Beginn der Nutzungszeit} = \\
 &\quad 600 \text{ ppm} \\
 C_{\text{tx}} &= \text{Konzentration zum Kipplüftungszeitpunkt} = t_x \cdot a_1
 \end{aligned}$$

8 Anwendungsbereich des CO₂-Timers

Die Berechnungsgrundlage für den CO₂-Timer beruht auf den Ergebnissen von Messungen in 45-minütigen Unterrichtsstunden. In diesem Zeitraum ist von einem linearen Anstieg der CO₂-Konzentration auszugehen. Zu Beginn der Nutzungseinheit wird in der App eine CO₂-Startkonzentration von 600 ppm angesetzt. Zur korrekten Berechnung des Konzentrationsanstiegs und der Lüftungszeitpunkte sollte der Raum daher zuvor, spätestens am Vortag nach der letzten Nutzung, gelüftet worden sein. Bei längeren Nutzungszeiten flacht der Konzentrationsanstieg nach Berechnung mit dem Rechner des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes (NLGA) [12; 13] und der Berechnung nach der Formel aus der VDI-Richtlinie 6040 Blatt 2 [14] jedoch ab. Die grafische Darstellung des Konzentrationsanstiegs und die Berechnung der Endkonzentration ohne Lüftung sind daher auf 120 Minuten begrenzt (**Bild 2**). Dieses ist für die Berechnung der Lüftungszeitpunkte aber unproblematisch, da eine Lüftung innerhalb dieses Zeitraums im Regelfall erforderlich ist.

Auch für große Raumvolumina/Person ist eine Berechnung der Lüftungszeitpunkte mit Hilfe des CO₂-Timers nicht möglich.

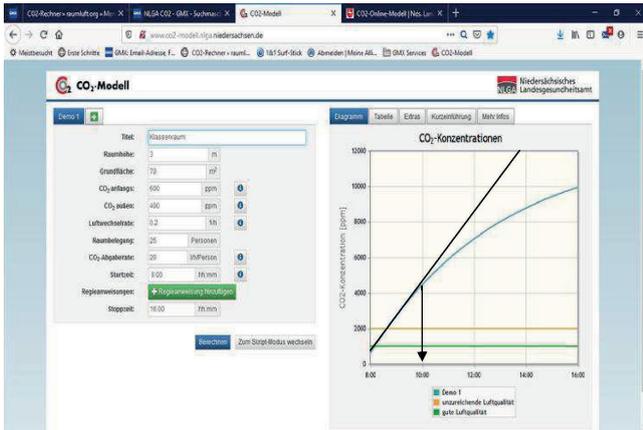


Bild 2 Beispielhafte Berechnung des CO₂-Anstiegs in einem Klassenraum der Sekundarstufe mithilfe des NLGA-Rechners. *Quelle: [12]*

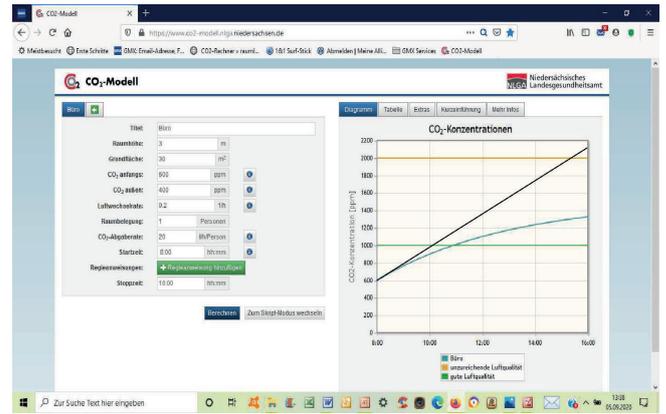


Bild 3 Beispielhafte Berechnung des CO₂-Anstiegs in einem Büroraum mit einem großen Raumvolumen von 90 m³/Person mit Hilfe des NLGA-Rechners. *Quelle: [12]*

In diesem Fall würde ein zu früher Lüftungszeitpunkt angegeben und die berechnete Endkonzentration ohne Lüftung würde nicht den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen (**Bild 3**). Die App kann daher bis zu folgenden Raumvolumina pro anwesender Person angewendet werden:

- Primarstufe: 35 m³/Person,
- Sekundarstufe/Seminar: 45 m³/Person,
- Büro/Besprechung: 60 m³/Person.

Bei Überschreitung dieser Werte erfolgt ein Warnhinweis. Als untere Grenze für das Raumvolumen/Person wurde ein Wert von 4 m³ festgelegt. Auch bei Unterschreitung dieses Wertes erfolgt ein Warnhinweis.

9 CO₂-Konzentrationsanstiege und Kipplüftungsflächen in der Winterzeit

In **Tabelle 2** sind die CO₂-Konzentrationsanstiege in Liter/Person in 45 Minuten und die Kipplüftungsflächen für die Winterzeit für alle Schulformen dargestellt. Demnach reichten im Winter durchaus kleine Kipplüftungsflächen aus, um einen Anstieg der CO₂-Konzentration von 5 l/Person in 45 min nicht zu überschreiten.

So betrug in der Winterzeit die geöffnete Kipplüftungsfläche in 75 % der Fälle maximal 1 m² und in 95 % der Fälle maximal

Tabelle 2 Übersicht über die CO₂-Konzentrationsanstiege und die Größe der Kipplüftungsflächen in der Winterzeit für alle Schulformen.

	Kipplüftungsfläche in m ² in der Winterzeit	CO ₂ -Anstieg pro Person in l/45 min in der Winterzeit
Anzahl Messwerte	150	150
Minimum	0,1	-5,8
Median	0,7	2,7
75-Perzentil	1,0	4,8
95-Perzentil	1,9	8,4
Maximum	5,0	11,8

1,9 m². Dabei betrug der CO₂-Konzentrationsanstieg im Klassenraum in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde in 75 % der Fälle maximal 4,8 l/Person. Wie der Minimalwert zeigt, führte die Kipplüftung in einigen Fällen sogar zur Senkung der CO₂-Konzentration.

Eine Übersicht über die Messwerte in der Winterzeit und die dabei realisierten Kipplüftungsflächen ist im **Bild 4** dargestellt. Somit wurden 81 der 150 Messwerte mit einem Anstieg der

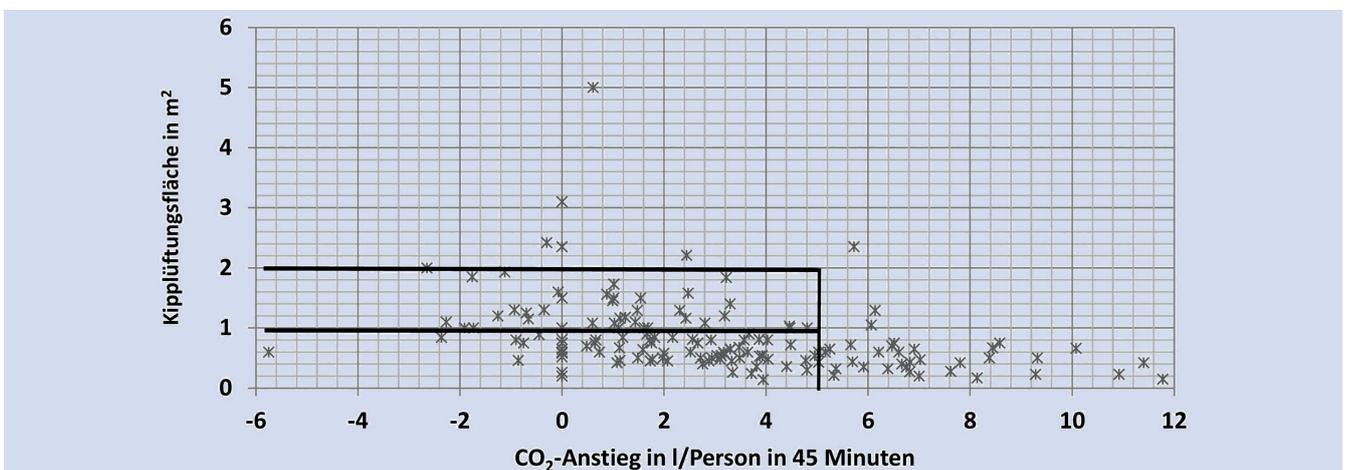


Bild 4 CO₂-Konzentrationsanstiege und Kipplüftungsflächen über alle Schulformen während der Winterzeit (n = 150). *Quelle: Autoren*

Tabelle 3 Beispiele für die CO₂-Konzentrationsanstiege in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde bei einem Ansatz des CO₂-Anstiegs von 5 l pro anwesender Person.

Schulform	Anzahl anwesender Personen	Medianwert Raumgröße in m ³	CO ₂ -Anstieg in 45 Minuten in ppm
Grundschule	25	210	595
Gymnasium	27	188	718
Berufskolleg	19	210	452

Tabelle 4 Medianwerte von in 45-minütigen Unterrichtsstunden ohne Lüftung gemessenen CO₂-Konzentrationsanstiegen und mit den Medianwerten des CO₂-Timers berechnete CO₂-Konzentrationsanstiege in Klassenräumen unterschiedlicher Schulformen.

Schulart	Anzahl Messungen	Medianwert Raumgröße in m ³	Medianwert Personenzahl	berechnete CO ₂ -Anstiege in ppm ungelüftet	Medianwert gemessene CO ₂ -Anstiege in ppm ungelüftet
Grundschule	116	210	25	1179	1200
Hauptschule	36	206	22	1324	1300
Realschule	55	208	29	1729	1700
Gymnasium	68	188	27	1781	1800
Gesamtschule	24	200	24	1488	1550
Berufskolleg	32	210	19	1122	1150

Tabelle 5 Medianwerte von in 45-minütigen Unterrichtsstunden mit Kipplüftung gemessenen CO₂-Konzentrationsanstiegen und mit den Medianwerten des CO₂-Timers berechnete CO₂-Konzentrationsanstiege in Klassenräumen der Primar- und Sekundarstufe.

Schulart	Anzahl Messungen Winter	Anzahl Messungen Sommer	Medianwert Raumgröße in m ³	Medianwert Anzahl Personen	Kipplüftung im Winter		Kipplüftung im Sommer	
					berechnete CO ₂ -Anstiege in ppm	Medianwert gemessene CO ₂ -Anstiege in ppm	berechnete CO ₂ -Anstiege in ppm	Medianwert gemessene CO ₂ -Anstiege in ppm
Primarstufe	58	58	210	25	238	200	74	100
Sekundarstufe	107	108	201	25	448	405	87	100

CO₂-Konzentration von bis zu 5 l/Person in 45 min bei einer Kipplüftungsfläche von bis zu 1 m² ermittelt, 102 Messwerte in einem Bereich bis zu 1,5 m² und 111 Messwerte in einem Bereich bis zu 2 m².

In **Tabelle 3** sind beispielhaft die CO₂-Konzentrationsanstiege in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde bei einem Ansatz des CO₂-Anstiegs von 5 l pro anwesender Person für verschiedene Schulformen dargestellt: Demnach würde selbst im Gymnasium mit dem im Mittel geringsten Raumvolumen pro Person von allen Schulformen der CO₂-Anstieg unter 800 ppm verbleiben und daher die Endkonzentration von 1 400 ppm nicht überschreiten. Somit würde sich im Mittel über die Unterrichtsstunde eine Konzentration unterhalb des Zielwerts für eine hygienische Unbedenklichkeit von 1 000 ppm ergeben. Dieses gilt dann insbesondere auch für die bei der Berechnung im CO₂-Timer angesetzten Medianwerte von 3,6 l/Person in der Sekundarstufe und 2 l/Person in der Primarstufe.

Trotz der Kipplüftung betrug die operative Raumtemperatur im Winter in 90 % der Fälle mindestens 20 °C [8; 10].

10 Vergleich gemessener und berechneter CO₂-Konzentrationsanstiege in Räumen

In **Tabelle 4** sind die Medianwerte der gemessenen CO₂-Konzentrationsanstiege in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde ohne Lüftung in Klassenräumen verschiedener Schulformen im Vergleich zu denen mit der App berechneten dargestellt. Bei der Berechnung wurden die Medianwerte der Raumgrößen und der anwesenden Personen in den einzelnen Schulformen zugrunde gelegt. Wie man sieht, unterscheiden sich die berechneten CO₂-Konzentrationsanstiege nicht wesentlich von den Medianwerten der Messwerte. Auch nach dem Spearman Rangkorrelationskoeffizienten ($r_{sp} = 1,0$) korrelieren die berechneten und gemessenen Werte gut.

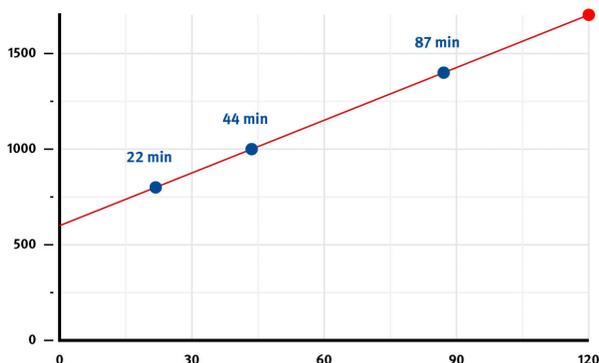
Für die Unterrichtsstunde mit Kipplüftung ist eine entsprechende Auswertung nicht möglich, da sich wegen der Auswertung nach Sommer- und Winterzeit für die einzelnen Schulformen zu geringe Fallzahlen ergeben. Daher wird in **Tabelle 5** der Vergleich nach Primar- und Sekundarstufe durchgeführt. Zur Be-

SIM fehlt 18:56 100%



CO₂-Rechner & Timer

Sie sollten nach 44 Minuten stoßlüften.



Berühren Sie die Punkte im Graphen für weitere Informationen und zur Wahl der Lüftungsvariante.

Wenn die CO₂-App Sie nach 44 Minuten automatisch erinnern soll, können Sie im nächsten Screen einen Timer setzen.

Stoßlüftung nicht möglich?

Zum Timer



Bild 5 Beispiel für erforderliche Stoßlüftungszeitpunkte in einem Büro mit einer Belegung mit 3 Personen und einem Raumvolumen von 90 m³. Quelle: Autoren

rechnung wurden die Medianwerte für die Raumgrößen und für die Anzahl der Personen nun stufenweise bestimmt.

Wie man der Tabelle 5 entnehmen kann, unterscheiden sich auch bei Kipplüftung die Medianwerte der gemessenen die CO₂-Konzentrationsanstiege nicht erheblich von den berechneten. Die Berechnung mit dem CO₂-Timer ist daher eine gute Alternative zu CO₂-Messungen.

11 Anwendungsbeispiele

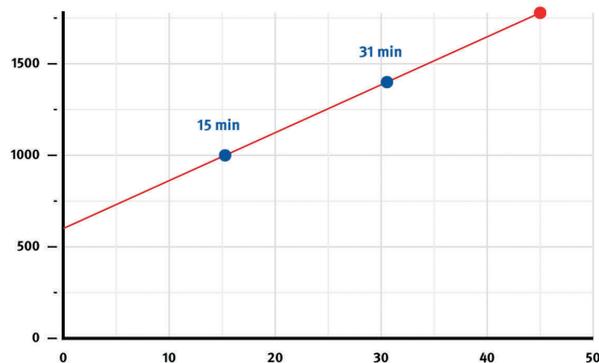
In Bild 5 ist der Anstieg der CO₂-Konzentration in einem Büroraum mit einer Grundfläche von 30 m² und einer Höhe von 3 m bei einer Belegung mit drei Personen in der Momentanwert-Version dargestellt. Demnach ergeben sich Stoßlüftungszeitpunkte zur Einhaltung des Infektionsschutzzielwertes von 800 ppm nach 22 Minuten, zur Einhaltung der hygienischen Unbedenklichkeit von 1 000 ppm nach 44 Minuten und zur Vermeidung einer niedrigen Luftqualität von 1 400 ppm [11] nach 87 Minuten.

SIM fehlt 11:19 91%



CO₂-Rechner & Timer

Sie sollten nach 31 Minuten stoßlüften.



Berühren Sie die Punkte im Graphen für weitere Informationen.

Wenn die CO₂-App Sie nach 31 Minuten automatisch erinnern soll, können Sie im nächsten Screen einen Timer setzen.

Stoßlüftung nicht möglich?

Zum Timer



Bild 6 Beispiel für erforderliche Stoßlüftungszeitpunkte in einem Klassenraum in einer Grundschule mit einer Belegung von 25 Personen und einem Raumvolumen von 210 m³. Quelle: Autoren

ten. Auf die Berechnung eines Kipplüftungszeitpunktes wird im Bürobereich verzichtet, da hier im Regelfall eine Stoßlüftung möglich sein sollte und nach der ASR A3.6 auch erforderlich ist.

Bild 6 zeigt den Anstieg der CO₂-Konzentration in einem Klassenraum in einer Grundschule mit einer Grundfläche von 70 m² und einer Höhe von 3 m bei einer Besetzung mit 25 Personen in der Mittelwertwertversion. Die Raumgröße und die Raumbesetzung entsprechen den ermittelten Medianwerten. Demnach ergeben sich Stoßlüftungszeitpunkte nach 15 Minuten zur Einhaltung des Infektionsschutzzielwertes von 800 ppm als Mittelwert (entspricht einem Momentanwert von 1 000 ppm) und nach 31 Minuten zur Einhaltung der hygienischen Unbedenklichkeit bei 1 000 ppm als Mittelwert (entspricht einem Momentanwert von 1 400 ppm).

Eine eventuell erforderliche Kipplüftung zur Einhaltung der hygienischen Unbedenklichkeit in der Winterzeit müsste nach 16 Minuten und die zur Einhaltung des Infektionsschutzzielwertes nach 4 Minuten erfolgen (Bild 7).

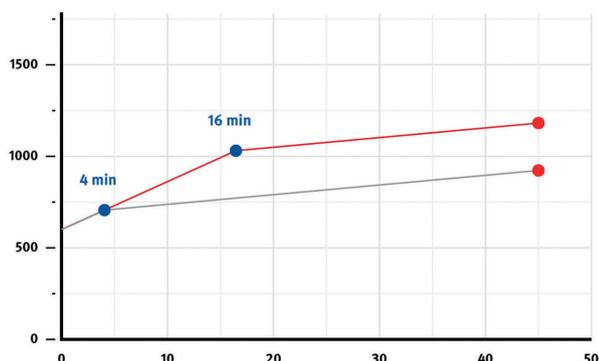
SIM fehlt

11:45

93 % 

CO₂-Rechner & Timer

Sie sollten nach 16 Minuten kipplüften.



Berühren Sie die Punkte im Graphen für weitere Informationen.

Wenn die CO₂-App Sie nach **16 Minuten** automatisch erinnern soll, können Sie im nächsten Screen einen Timer setzen.



Zum Timer



Bild 7 Beispiel für die erforderlichen Kipplüftungszeitpunkte in einem Klassenraum einer Grundschule mit einer Belegung mit 25 Personen und einem Raumvolumen von 210 m³ zur Einhaltung der Zielwerte für hygienische Unbedenklichkeit und Infektionsschutz in der Winterzeit.

Quelle: Autoren

In den **Bildern 8** und **9** sind die entsprechenden Zeitpunkte für die Stoßlüftung und die Kipplüftung in der Winterzeit für mittlere Klassenraumgrößen und Belegungsstärken im Gymnasium dargestellt. Wie bereits erwähnt, wurde dort im Mittel das geringste Raumvolumen pro Person aller Schulformen ermittelt. In diesem Fall wären die Stoßlüftungszeitpunkte (Bild 8) nach 10 Minuten zur Einhaltung des Infektionsschutzzielwertes und nach 20 Minuten zur Einhaltung des Zielwertes für hygienische Unbedenklichkeit erreicht. Ohne Lüftung würde der Zeitpunkt zum Erreichen eines hygienisch inakzeptablen Zustandes nach 35 Minuten erreicht. Die Konzentration zum Ende der Unterrichtsstunde würde ohne Lüftung 2 381 ppm betragen. Der Kipplüftungszeitpunkt zur Einhaltung des Zielwertes für hygienische Unbedenklichkeit liegt bei 5 Minuten (Bild 9). Eine Kipplüftung zur Einhaltung des Infektionsschutzzielwertes ist in diesem Fall nicht möglich.

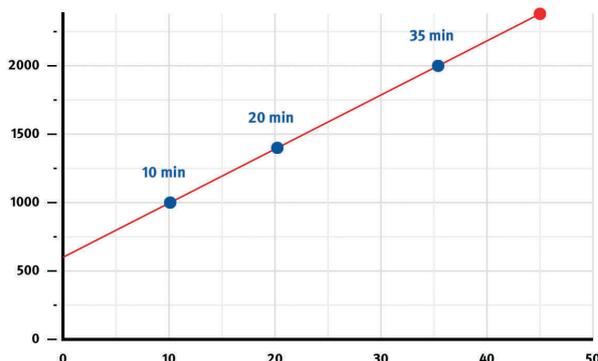
SIM fehlt

11:24

91 % 

CO₂-Rechner & Timer

Sie sollten nach 20 Minuten stoßlüften.



Berühren Sie die Punkte im Graphen für weitere Informationen.

Wenn die CO₂-App Sie nach **20 Minuten** automatisch erinnern soll, können Sie im nächsten Screen einen Timer setzen.



Zum Timer



Bild 8 Beispiel für erforderliche Stoßlüftungszeitpunkte in einem Klassenraum im Gymnasium mit einer Belegung von 27 Personen und einem Raumvolumen von 188 m³. Quelle: Autoren

12 Zusammenfassung

Gemäß der Arbeitsstättenverordnung muss in Räumen ausreichend „gesundheitlich zuträgliche Atemluft“ vorhanden sein. Dieses gilt insbesondere in Zeiten von Epidemien. Ein Maßstab für gute Luft ist im Allgemeinen die CO₂-Konzentration in Räumen. So wird die Einhaltung der Konzentration von 1 000 ppm CO₂ als hygienisch unbedenklich angesehen. In Epidemiezeiten soll dieser Wert jedoch möglichst unterschritten werden, da durch verstärktes Lüften auch die Konzentration von möglicherweise in der Raumluft vorhandenen virenbelasteten Aerosolen reduziert werden kann. Die bestehende CO₂-App wurde daher aufgrund der derzeit herrschenden SARS-CoV-2-Pandemie überarbeitet und den neuen Infektionsschutzanforderungen angepasst, in dem ein Infektionsschutzzielwert von 800 ppm eingeführt wurde. Dadurch ergeben sich kürzere Lüftungsintervalle als bei einem Ziel-

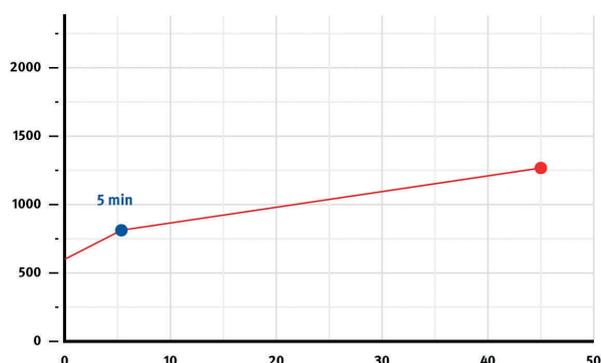
SIM fehlt

11:25

91 % 

CO₂-Rechner & Timer

Sie sollten nach 5 Minuten kipplüften.



Berühren Sie die Punkte im Graphen für weitere Informationen.

Wenn die CO₂-App Sie nach **5 Minuten** automatisch erinnern soll, können Sie im nächsten Screen einen Timer setzen.

 [Wechseln zur Stoßlüftung?](#)

[Zum Timer](#)



Bild 9 Beispiel für den erforderlichen Kipplüftungszeitpunkt in einem Klassenraum im Gymnasium mit einer Belegung mit 27 Personen und einem Raumvolumen von 188 m³ zur Einhaltung des Zielwertes für hygienische Unbedenklichkeit in der Winterzeit. *Quelle: Autoren*

wert von 1000 ppm, wodurch sich das Infektionsrisiko weiter reduziert. Ferner wurden Informationen zum infektionsschutzgerechten Lüften eingefügt. Darüber hinaus wurden weitere Verbesserungen vorgenommen, wie die Berechnung der Lüftungszeitpunkte bezogen auf die Sommer- und Winterzeit anstatt auf Halbjahreszeiträume, was eine gleichmäßigere Verteilung der Datenbasis auf die Zeiträume ermöglichte. Weitere Auswertungen zeigten, dass eine gute Luftqualität sich auch bei Kipplüftung mit relativ kleinen Kipplüftungsflächen realisieren lässt und dass die mit der App berechneten CO₂-Konzentrationsanstiege in Räumen gut mit den gemessenen übereinstimmen. Der CO₂-Timer ist somit eine gute Alternative zu CO₂-Messungen in Räumen. Sie ist im Google- und Apple-Playstore sowie über die IFA Internetseite (www.dguv.de/webcode.jsp?query=d1182599) kostenlos herunterzuladen. ■

Literatur

- [1] Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004. BGBl. I (2004), S. 2179; zul. geänd. 18. Oktober 2017, BGBl. I (2017), S. 3584.
- [2] SARS-CoV-2-Arbeitsschutzregel vom 22. Februar 2021. Hrsg.: Arbeits-schutzausschüsse beim Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Berlin 2021. www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/AR-CoV-2/AR-CoV-2.html
- [3] Neumann, H. D.: Abschätzung der CO₂-Konzentrationen in Räumen anhand empirisch gewonnener Daten – Update des Rechners und Erweiterung des Anwendungsbereichs, Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 78 (2018) Nr. 11/12, S. 439-447.
- [4] Fachbereich Aktuell, FBVW-502 „SARS-CoV-2: Empfehlungen zum Lüftungsverhalten an Innenraumarbeitsplätzen“ Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2020. publikationen.dguv.de/regelwerk/publikationen-nach-fachbereich/verwaltung/innenraumklima/3932/fbv-502-sars-cov-2-empfehlungen-zum-lueftungsverhalten-an-innenraumarbeitsplaetzen?c=109
- [5] Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2017.
- [6] Technische Regeln für Arbeitsstätten (ASR) A3.6 Lüftung, Ausg. 1/2012 GMBI. (2012), S. 92; zul. geänd. GMBI. (2017), S. 10.
- [7] Neumann, H. D.: Methode zur Abschätzung der CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen anhand empirisch ermittelter Daten und Vorschläge für Lüftungsmaßnahmen. Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 75 (2015) Nr. 4, S. 151-158.
- [8] Neumann, H. D.; Buxtrup, M.: Gesunde Luft in Schulen, Teil 2 – Beurteilung der CO₂-Konzentration und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. In: Prävention in NRW, Nr. 57. Hrsg.: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2014. www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/praevention_in_nrw/PIN_57_Gesunde_Luft_in_Schulen_II.pdf
- [9] Neumann, H. D.; Buxtrup, M.: Beurteilung der CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen. Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 6, S. 235-244.
- [10] Neumann, H. D.; Buxtrup, M.: Beurteilung der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 7/8, S. 322-327.
- [11] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlage (9/2007). zurückgezogen (11/2017). Berlin(11/2017), Beuth 2007.
- [12] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Niedersächsisches Schulmessprogramm – Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxidverläufen. Hrsg.: Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Hannover 2003. NLGA-Rechner unter www.co2-modell.nlga.niedersachsen.de/
- [13] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 64 (2003); S. 447-456;
- [14] VDI 6040 Blatt 2: Raumlufttechnik Schulen – Ausführungshinweise (9/2015). Berlin, Beuth 2015.

Dr.-Ing. Heinz-Dieter Neumann

ehemals Unfallkasse Nordrhein-Westfalen (UK NRW), Düsseldorf.

Dipl.-Ing. Ingrid Thullner

Michael Protsch

Unfallkasse Hessen (UKH), Frankfurt am Main.

Dr. rer. nat. Simone Peters

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.