

Abschätzung der CO₂-Konzentration in Räumen anhand empirisch gewonnener Daten – Update des Rechners und Erweiterung des Anwendungsbereichs

H.-D. Neumann

Zusammenfassung Die CO₂-Konzentration ist ein wesentlicher Faktor zur Beurteilung der Luftqualität in Räumen. Die Höhe der Konzentration kann durch Messungen oder durch Berechnungen mithilfe von CO₂-Rechnern ermittelt werden. Eine einfache Art der CO₂-Abschätzung in Klassenräumen mit einem Rechner auf der Basis empirisch ermittelter Daten ist im Internet verfügbar. Flexible Unterrichtszeiten, veränderbare Unterrichtsraumgrößen, unterschiedliche Klassenstärken sowie eine Neuinterpretation des CO₂-Leitwertes für den Bildungsbereich durch das Umweltbundesamt machten es erforderlich, diesen Rechner variabler zu gestalten. Nunmehr werden für die Zeit ohne Lüftung und für die Kipplüftungsphase die Werte der CO₂-Anstiege pro Person in l/h in Anlehnung an die jeweiligen Medianwerte der Messergebnisse angesetzt. Ferner wurde festgestellt, dass der neue Rechner auch in anderen Bereichen, z. B. in Büros, Besprechungs- und Seminarräumen, zur Abschätzung des notwendigen Lüftungszeitpunktes verwendet werden kann.

Estimation of the CO₂ concentration in interiors on the basis of empirically obtained data – update of the calculator and an extension of its scope

Abstract The CO₂ concentration is an important factor in the assessment of air quality in interiors and can be determined with measurements or by calculation with the aid of CO₂ calculators. A simple way of estimating CO₂ in classrooms with a calculator on the basis of empirically obtained data is available on the Internet. Flexible lesson times, changing classroom sizes, different class sizes and a re-interpretation of the CO₂ guide value for the education sector by the German Environment Agency have made it necessary to make this calculator more adaptable. From now on, the CO₂ increases per person in l/h are now estimated for periods without ventilation and with windows tilted open on the basis of the respective median values of the measurement results. It has been found that the new calculator can also be used in other areas, e.g. offices, and meeting and seminar rooms, to estimate when ventilation is necessary.

1 Einleitung

Die Konzentration von Kohlenstoffdioxid (CO₂) in der Raumluft ist ein wesentlicher Faktor zur Beurteilung von guter Luft in Räumen. Die Beurteilungsmaßstäbe sind in der Arbeitsstättenregel ASR A3.6 „Lüftung“ [1] auf der Basis einer Mitteilung des Umweltbundesamtes (UBA) [2] definiert. Demnach gilt eine CO₂-Konzentration bis 1 000 ppm als „hygienisch unbedenklich“. Nach neuer Verlautbarung des UBA für den Bildungsbereich soll dieser Leitwert nicht mehr als Momentanwert, sondern als Mittelwert über eine

Nutzungseinheit betrachtet werden [3]. Eine Konzentration zwischen 1 000 und 2 000 ppm gilt als „hygienisch auffällig“, bei mehr als 2 000 ppm ist sie „hygienisch inakzeptabel“.

Ursache für die CO₂-Anreicherung im Raum ist die Atmung der dort anwesenden Personen. Problematisch ist die Luftverunreinigung durch CO₂ somit insbesondere bei Aufenthalt vieler Personen im Raum, wie z. B. in Klassen- und Seminarräumen. Es gilt daher, die auftretende CO₂-Konzentration abzuschätzen und zu beurteilen. Dies kann durch Messungen erfolgen, z. B. durch CO₂-Ampeln, oder durch Berechnungen mit CO₂-Rechnern.

2 Methode der CO₂-Abschätzung in Klassenräumen anhand empirisch gewonnener Daten

Eine besonders einfache Art der CO₂-Abschätzung in Klassenräumen mithilfe eines Rechners auf der Basis empirisch ermittelter Daten wurde in dieser Zeitschrift bereits 2015 vorgestellt [4]. Die der Berechnung zugrunde liegenden Daten wurden durch Messungen der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen (UK NRW) in 363 Klassenräumen von 111 Schulen gewonnen [5; 6]. Werte aus Sonderschulen wurden dabei nicht berücksichtigt. In Sonderschulen entsprachen das Unterrichtsschema und die durchgeführten Lüftungsinterventionen häufig nicht dem der Schätzung zugrunde liegenden Modell. Anhand der in [4] vorgestellten Berechnung lassen sich die notwendigen Lüftungszeitpunkte abschätzen. Kann während des Unterrichts zur Hälfte der Unterrichtszeit keine Stoßlüftung erfolgen, wird hier der Zeitpunkt für die notwendige Kipplüftungsintervention angegeben. Ziel war es dabei, zumindest den Interventionswert von 2 000 ppm deutlich zu unterschreiten.

Grundlage für die Schätzung waren der 95-Perzentilwert für den CO₂-Anstieg im Unterrichtsraum im ungelüfteten Zustand sowie der 95-Perzentilwert der Unterrichtsstunden mit Kipplüftung. Die Werte wurden für übliche 45-minütige Unterrichtsstunden ermittelt. Die Medianwerte der Klassenraumgrößen und Personenzahlen aus dieser Studie [5] sind für einige Schulformen in **Tabelle 1** dargestellt. Die Flexibilisierung von Unterrichtszeiten sowie veränderbare Unterrichtsraumgrößen und unterschiedliche Klassenstärken, die den gemessenen Verhältnissen nicht entsprechen, sowie die neue Verlautbarung des UBA [3] machen es erforderlich, den Rechner anzupassen.

3 Neue Verlautbarung des Umweltbundesamtes

Laut der Empfehlung des Arbeitskreises „Lüftung“ am UBA soll die CO₂-Konzentration nunmehr als Mittelwert über eine Unterrichtseinheit betrachtet werden. Dieses ist zwar nicht konform mit der ASR A3.6 [1] und der Mitteilung des UBA zu Leitwerten von CO₂ aus dem Jahr 2008 [2], aber als Mittelwert ist die Einhaltung des Leitwertes von 1 000 ppm eher realisierbar denn als Momentanwert. Auch beim Ein-

Dr.-Ing. Heinz-Dieter Neumann,
ehemals Unfallkasse Nordrhein-Westfalen (UK NRW),
Düsseldorf.

Tabelle 1. Personen im Raum und Klassenraumgrößen aus [5].

	Alle Schulen		Grundschule		Gymnasium		Gesamtschule	
	Medianwert	Mittelwert	Medianwert	Mittelwert	Medianwert	Mittelwert	Medianwert	Mittelwert
Luftraum in m ³ /Person	8,4	9,7	8,6	9,5	6,8	7,7	7,9	8,9
Anzahl der Personen	25	23	25	24	27	26	25	24
Raumgröße in m ³	203	205	210	215	188	185	200	198

satz von raumluftechnischen Anlagen in Klassenräumen, die dort bevorzugt zur Luftreinhaltung dienen sollen, ist die Einhaltung einer Konzentration von 1 000 ppm als Momentanwert nur schwer zu gewährleisten, wie Nachrüstungen in der Praxis zeigen [7].

Der Arbeitskreis empfiehlt, die Einhaltung des Zielwertes mithilfe von CO₂-Sensoren (z. B. CO₂-Ampeln) zu über-

wachen oder anhand von Berechnungstools wie dem CO₂-Online Tool des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes (NLGA) [8; 9] oder der Richtlinie VDI 6040 Teil 2 [10] nachzuweisen. Alternativ bietet sich der Nachweis anhand der im Rahmen der Studie der UK NRW gewonnenen Daten an, wobei der vorhandene Rechner den neuen Anforderungen entsprechend zu modifizieren ist. Die dabei verwendeten Daten und Berechnungen werden im Folgenden vorgestellt.

4 Abschätzung der CO₂-Konzentration und der Lüftungsintervention mithilfe des modifizierten Rechners

4.1 Berechnungsgrundlage 1: CO₂-Anstiege im ungelüfteten Raum

Bild 1 zeigt die gemessenen CO₂-Anstiege in ppm pro Raum und die daraus berechneten Ergebnisse für den CO₂-Anstieg in Liter pro Person für alle Schulformen. Demnach liegt der Medianwert bei 11,4 l/Person und der 95-Perzentilwert bei 16,1 l/Person in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde. Die Bilder 2 und 3 veranschaulichen die Verteilung der auf die Personen im Raum bezogenen Werte für den Primarbereich und den Sekundarbereich. So ist der Anstieg im Primarbereich als 95-Perzentilwert mit 13,1 l/Person etwa 3 l niedriger als der im Sekundarbereich mit 16,4 l/Person. Die Medianwerte betragen 9,9 l/Person im Primar- und 12,4 l/Person im Sekundarbereich. Die Anstiege in ppm/Person sowie in Liter/Person korrelieren dabei nur tendenziell.

4.2 Vergleich der Anwendungen: Werte aus der Berechnungsgrundlage 1 mit den vom Umweltbundesamt empfohlenen Rechentools

Der Vergleich erfolgt beispielhaft auf der Basis der Medianwerte für Schülerzahlen und Raumgrößen für verschiedene Schulformen, wie sie in [5] ermittelt wurden (Tabelle 1). In den Rechentools kommen die in der Richtlinie VDI 6040 Blatt 2 [10] angegebenen Werte für den CO₂-Anstieg pro Person und Stunde mit 15,6 l für den Primarbereich und mit 18,9 l für den Sekundarbereich zum Ansatz. Für das hier vorgestellte Abschätzungstool werden die Medianwerte für den CO₂-Anstieg in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde mit 9,9 l/Person für den Primar-

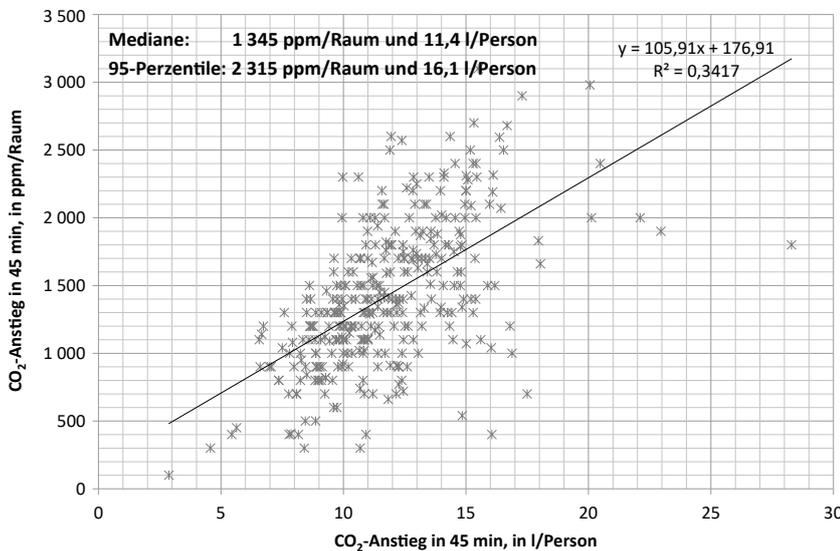


Bild 1. CO₂-Anstiege im Raum in ppm und daraus berechnete CO₂-Anstiege in Liter/Person für alle Schulformen außer Sonderschule im ungelüfteten Zustand; n = 336.

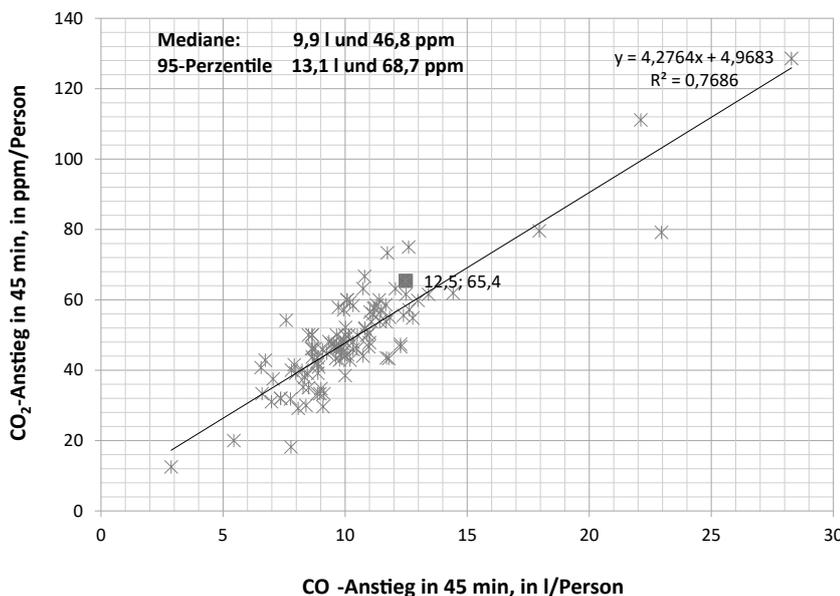


Bild 2. CO₂-Anstiege im Raum in Liter/Person und in ppm/Person im Primarbereich im ungelüfteten Zustand; n = 115.

bereich sowie 12,4 l/Person für den Sekundarbereich angesetzt. Ausgangspunkt ist eine Grundkonzentration von 600 ppm, die in der Studie der UK NRW [5] als Medianwert ermittelt wurde. In den Rechentools wurden zusätzlich eine Außenluftkonzentration von 400 ppm sowie eine Luftwechselrate von 0,2/h für geschlossene Isolierfenster berücksichtigt. Zielwert ist der Wert von 1 400 ppm am Ende der Unterrichtseinheit, sodass sich im Mittel eine Konzentration von 1 000 ppm ergibt.

Bild 4 zeigt den Vergleich der berechneten Endkonzentrationen für die in Tabelle 1 beschriebenen Beispierräume in Grundschulen, Gesamtschulen und Gymnasien. Demnach unterscheiden sich die mit den Tools berechneten Endkonzentrationen für die jeweiligen Unterrichtseinheiten und Schulformen kaum von den mit den Medianwerten aus der Berechnungsgrundlage 1 berechneten Werten.

Auch die Unterschiede der Zeitpunkte für die Überschreitung der Konzentration von 1 400 ppm sind für die Praxis unerheblich (**Bild 5**). Die Ergebnisse der vorgeschlagenen Rechentools und der hier vorgestellten Methode auf der Basis der Medianwerte korrelieren demnach sehr gut. Die in der VDI-Richtlinie angegebenen CO₂-Abgaberraten bilden somit eine eher mittlere CO₂-Abgabe durch die Raumnutzer ab.

4.3 Berechnungsgrundlage 2: CO₂-Konzentration im gelüfteten Raum

Bild 6 zeigt die Veränderung der CO₂-Konzentration in der Unterrichtsstunde mit Kipp- Lüftung. Demnach ergibt sich ein 95-Perzentilwert von 804 ppm/Raum. Dieser Wert war bislang die Grundlage der Berechnung zur Abschätzung des notwendigen Lüftungszeitpunktes. Der Grund dafür war, dass der Einfluss der Parameter wie Lüftungsöffnung, Windrichtung, Windstärke und Temperaturunterschiede zwischen innen und außen als wesentlicher eingeschätzt wurde als die Aktivität und das Alter und damit die CO₂-Abgabe der Personen im Raum [4].

Die Neuauswertung der Daten während der Kipp- Lüftungsphase unter Berücksichtigung der Altersstufe und der Veränderung der CO₂-Konzentration im Raum in Liter pro Person zeigt allerdings, dass die gemessenen CO₂-Konzentrationen in ppm pro Raum mit denen in Liter pro Person sogar deutlich besser korrelieren als im ungelüfteten Zustand (**Bild 6**). Die äußeren Einflussfaktoren aufgrund des Lüftens erzeugen offenbar keine größere Varianz der Ergebnisse. Dabei ist, wie im ungelüfteten Zustand, ein deutlicher Unterschied zwischen dem Primarbereich (**Bild 7**) und dem Sekundarbereich (**Bild 8**) zu verzeichnen.

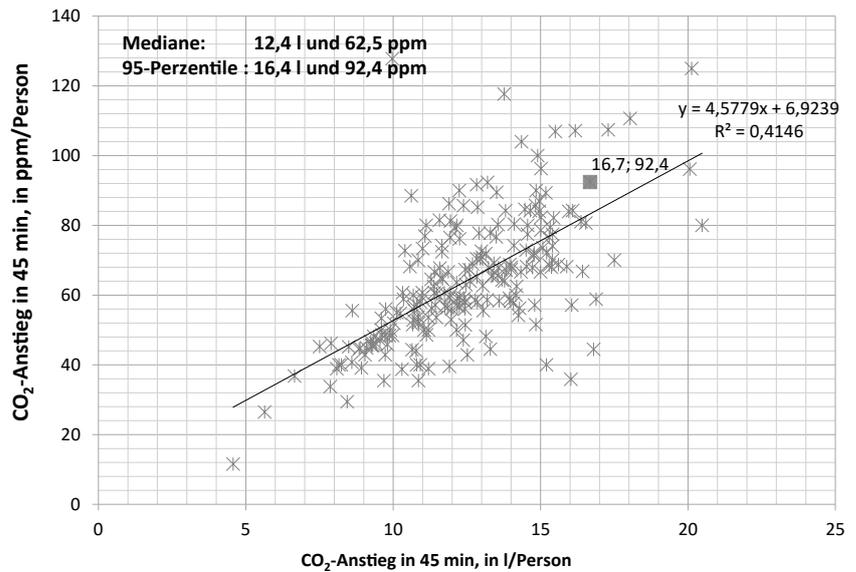


Bild 3. CO₂-Anstiege im Raum in Liter/Person und in ppm/Person im Sekundarbereich im ungelüfteten Zustand; n = 221.

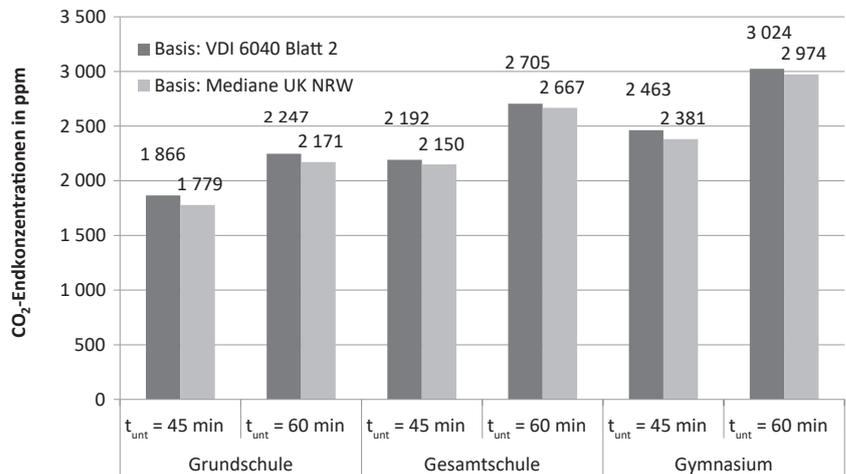


Bild 4. Vergleich der ermittelten Endkonzentrationen für die Beispierräume aus Tabelle 1, ermittelt nach der Berechnungsformel aus der Richtlinie VDI 6040 Blatt 2 und nach der Methode empirisch ermittelter Daten; t_{unt} = Unterrichtszeit.

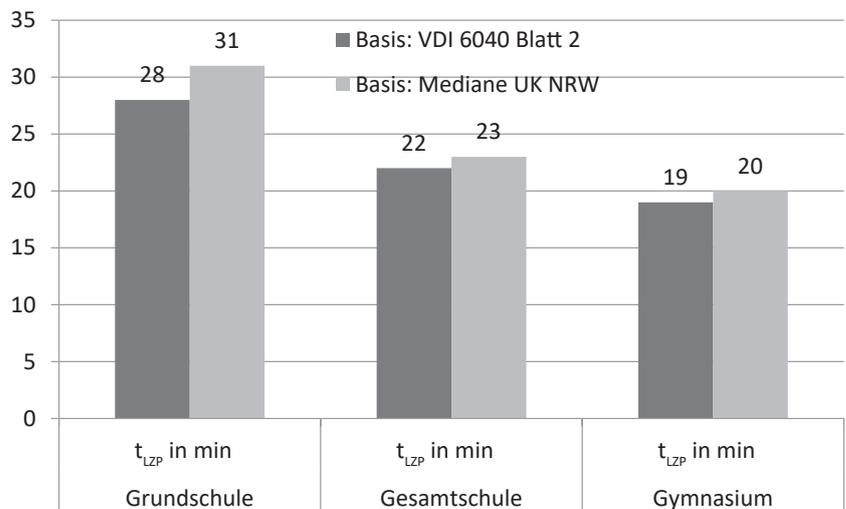


Bild 5. Vergleich der notwendigen Stoßlüftungszeitpunkte (t_{LZP}) zur Einhaltung einer mittleren CO₂-Raumluftkonzentration von 1 000 ppm für die Beispierräume aus Tabelle 1, ermittelt nach der Berechnungsformel aus der Richtlinie VDI 6040 Blatt 2 und nach der Methode empirisch ermittelter Daten.

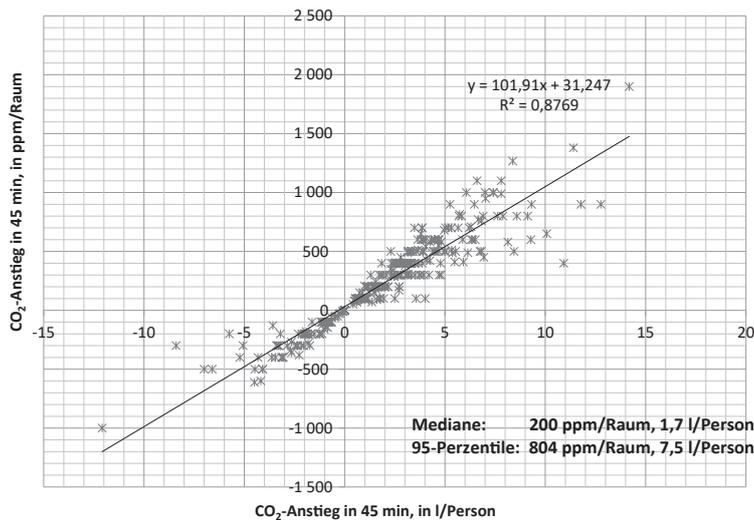


Bild 6. CO₂-Anstiege im Raum in ppm und daraus berechnete CO₂-Anstiege in Liter/Person für alle Schulformen außer Sonderschule im gelüfteten Zustand; n = 336.

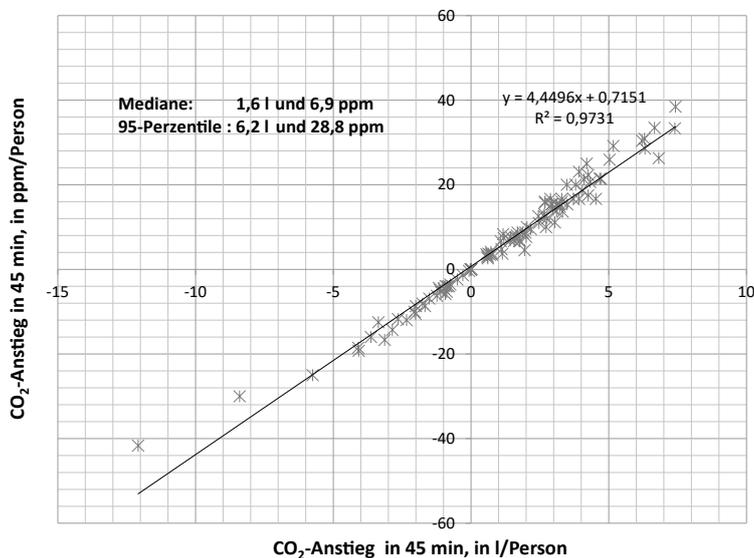


Bild 7. CO₂-Anstiege im Raum in Liter/Person und in ppm/Person im Primärbereich im gelüfteten Zustand; n = 115.

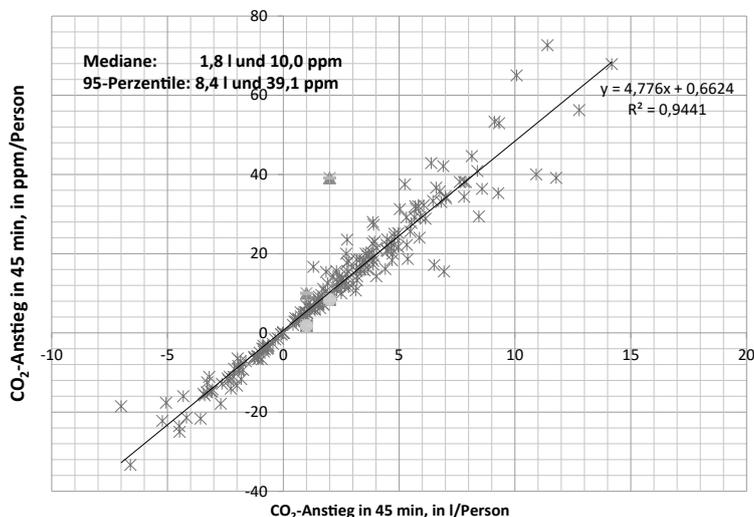


Bild 8. CO₂-Anstiege im Raum in Liter/Person und in ppm/Person im Sekundärbereich im gelüfteten Zustand; n = 221.

Laut der Empfehlung des UBA [5] ist es sinnvoll, die Lüftungsphasen für Sommer und Winter separat zu betrachten. Die Ergebnisse der entsprechenden Auswertung der Daten ist in den **Bildern 9** und **10** für den Primärbereich sowie in den **Bildern 11** und **12** für den Sekundärbereich zu entnehmen.

Für die neue Form des Rechners werden nunmehr auch für die Lüftungsphase die Werte in l/Person in Anlehnung an die jeweiligen Medianwerte angesetzt. Dieses sind für den Primärbereich ein Anstieg von 1,8 l/Person in 45 Minuten im Winter und 0 l/Person im Sommer, da während dieser Zeit bei Kipplüftung im Median keine Veränderung der CO₂-Konzentration im Raum zu verzeichnen war. Im Sekundärbereich betragen die Werte 2,8 l/Person im Winter und 0,9 l/Person in 45 Minuten im Sommer.

Die Kipplüftungsfläche lag dabei im Winterhalbjahr in 50 % der Fälle bei 0,7 m² im Primärbereich (Bild 9) bzw. 0,8 m² im Sekundärbereich (Bild 11), was sich durch Öffnen der Fenster in Kippstellung im Bereich der Raumstirnseiten realisieren lässt. Auch die 95-Perzentilwerte der CO₂-Anstiege werden bei diesen Kipplüftungsflächen nicht überschritten. Im Sommerhalbjahr sind auch wesentlich größere Lüftungsflächen unproblematisch, sodass die CO₂-Konzentration deutlich geringer ansteigt und häufiger als im Winter abnimmt (Bilder 10 und 12). Aber auch in den Sommermonaten reichen bereits kleine Lüftungsquerschnitte aus, um den 95-Perzentilwert des CO₂-Anstiegs im Raum einzuhalten.

4.4 Berechnungsformel für den Lüftungszeitpunkt für Kipplüftung

Der Lüftungszeitpunkt für die variable Form des Rechners berechnet sich somit nunmehr nach Gl. (1), S. 443.

5 Einfluss der Kipplüftung auf die raumklimatischen Verhältnisse

Die Beurteilung der raumklimatischen Verhältnisse aus der Studie der UK NRW ist ausführlich beschrieben [5; 11]. In den **Bildern 13** und **14** sind daraus die operativen Temperaturen (siehe Kasten, S. 446) am Ende der Unterrichtsstunde mit Kipplüftung in Abhängigkeit von der Kipplüftungsfläche dargestellt. Demnach betrug die operative Temperatur auch im Winter in 90 % der Fälle trotz Kipplüftung mindestens 20 °C. In 50 % der Fälle lag die geöffnete Kipfensterfläche dabei unterhalb von 0,7 m². Aber auch bei größeren Flächen sank die Temperatur nicht in einen unbehaglichen Bereich ab.

Gleiches gilt auch für die ermittelten PMV-Indizes [12] (**Bilder 15** und **16**, Kasten). Diese liegen im Winterhalbjahr in 90 % der Fälle oberhalb von -0,5. Das Raumklima ist insofern als annähernd neutral zu betrachten und sollte nicht mehr als 10 % unzufriedene Raumnutzer verursachen. Wenngleich Kipplüftung in den Empfehlungen des UBA in den Wintermonaten als ungeeignet eingestuft wird, zeigen die Ergebnisse, dass sie durchaus auch zu dieser Jahreszeit als Unterstützungslüftung eingesetzt werden

$$C_{\max} = 1\,400 \text{ ml/m}^3 = 600 \text{ ml/m}^3 + \Delta C_{\text{ol1}} \times t_{\text{LZP}} + \Delta C_{\text{ol2}} \times (t_{\text{unt}} - t_{\text{LZP}}) \quad (1)$$

$$t_{\text{LZP}} = \frac{800 \text{ ml/m}^3 - \Delta C_{\text{ol2}} \times t_{\text{unt}}}{\Delta C_{\text{ol1}} - \Delta C_{\text{ol2}}}$$

mit:

t_{LZP} = Lüftungszeitpunkt in Minuten nach Unterrichtsbeginn

t_{unt} = Unterrichtszeit in Minuten

ΔC_{ol1} = Anstieg der CO₂-Konzentration ohne Lüftung/45 min

ΔC_{ol2} = Anstieg der CO₂-Konzentration mit Kipplüftung/45 min

$$\Delta C_{\text{ol1}} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{9900 \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \rightarrow \text{Primarbereich}_{\text{ungelüftet}}$$

$$\Delta C_{\text{ol1}} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{12\,400 \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \rightarrow \text{Sekundarbereich}_{\text{ungelüftet}}$$

$$\Delta C_{\text{ol2}} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{1800 \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \rightarrow \text{Primarbereich}_{\text{KipplüftungWinter}}$$

$$\Delta C_{\text{ol2}} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{0 \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \rightarrow \text{Primarbereich}_{\text{KipplüftungSommer}}$$

$$\Delta C_{\text{ol2}} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{2800 \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \rightarrow \text{Sekundarbereich}_{\text{KipplüftungWinter}}$$

$$\Delta C_{\text{ol2}} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{900 \text{ ml/Person}}{45 \text{ min}} \rightarrow \text{Sekundarbereich}_{\text{KipplüftungSommer}}$$

kann, ohne das Raumklima erheblich zu beeinflussen (siehe auch Kasten, S. 446).

6 Beispiele für die Anwendung des Rechners und Ergebnisdarstellungen

Die Bilder 17 und 18 zeigen die Ergebnisse des Rechners für die auftretende Endkonzentration und Lüftungszeitpunkte im Winterhalbjahr in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde in einem Raum mit einem Volumen von 205 m³ und 25 Personen für den Primar- und Sekundarbereich. Demnach ergibt sich für den Primarbereich ein notwendiger Kipplüftungszeitpunkt nach 26 Minuten, um die Konzentration von 1 000 ppm als Mittelwert sicher zu unterschreiten. Im Sekundarbereich ist der Unterricht ohne Kipplüftung dagegen nur für 18 Minuten möglich, um die Einhaltung des Wertes zu gewährleisten. Zusätzlich gibt der Rechner auch die Zeitpunkte für eine Stoßlüftungsintervention an, die vorrangig durchgeführt werden sollte, falls dieses im Unterricht möglich ist. Diese wäre im Primarbereich nach 30 Minuten und im Sekundarbereich nach 24 Minuten erforderlich. Die notwendigen Stoßlüftungszeitpunkte werden auch angezeigt, wenn der genannte Zielwert durch Kipplüftung nicht eingehalten werden kann.

7 Vergleich der 95-Perzentilwert- und Medianwertabschätzung

In Bild 19 sind die ermittelten notwendigen Kipplüftungszeiten zur Einhaltung der Zielwerte für die Abschätzung mithilfe der bisher angewandten Methode anhand der 95-Perzentilwerte des gesamten Jahres (Zielwert: 2 000 ppm als Momentanwert) und der hier vorgestellten Methode anhand der Medianwerte der Sommer- und Winterhalbjahre (Zielwert von 1 000 ppm als Mittelwert)

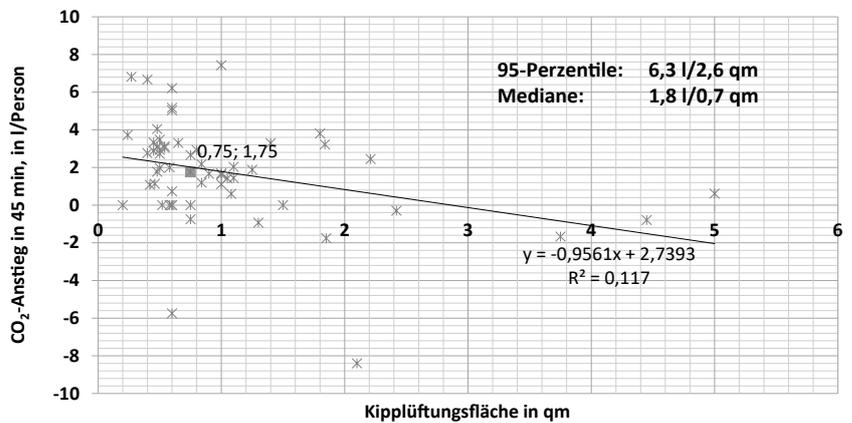


Bild 9. CO₂-Anstiege im Primarbereich im Winterhalbjahr in Liter/Person in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung; n = 58.

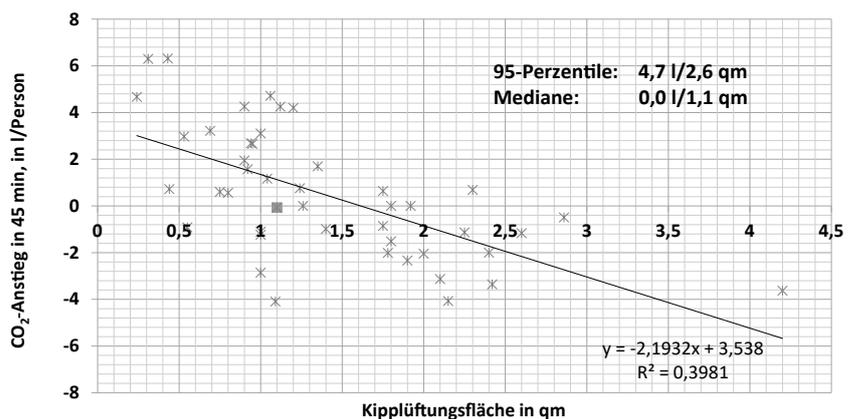


Bild 10. CO₂-Anstiege im Primarbereich im Sommerhalbjahr in Liter/Person in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung; n = 45.

gegenübergestellt. Demnach unterscheiden sich die ermittelten Lüftungszeiten für die nach den Medianwerten bemessenen Räume aus Tabelle 1 für die Grundschule und das Gymnasium nicht gravierend. Dieses gilt insbesondere für den Vergleich der Medianwerte im Winter mit den 95-Perzentil-Jahreswerten, die ja insbesondere durch das Winterhalbjahr geprägt sind. Die größte Diskrepanz zeigt

sich hier beim Vergleich der Werte während einer 60-minütigen Unterrichtsstunde im Gymnasium. Hier würde in der 95-Perzentilwert-Version eine Stoßlüftungsintervention gefordert, während in der Medianwert-Version auch eine Kipplüftungsphase als möglich angezeigt wird, die allerdings fast über die gesamte Unterrichtszeit erforderlich wäre. So kann man auch bei der Medianwertabschätzung davon ausgehen, dass auch der obere Leitwert von 2 000 ppm als Momentanwert unter ungünstigen Belastungs- und Lüftungssituationen mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten wird. Da dabei die Maßgaben zur Verbesserung der Luftqualität im Luftgütembereich zwischen 1 000 und 2 000 ppm als Momentanwert im Sinne der ASR A3.6 erfüllt werden, kann auch diese technische Regel zur Arbeitsstättenverordnung [13] als eingehalten angesehen werden. Die durchgeführten Maßnahmen sind entsprechend in der Gefährdungsbeurteilung zu dokumentieren.

8 Erweiterung des Rechners auf Bereiche außerhalb des Unterrichts

8.1 Betreuungsräume in Schulen

Die für die Unterrichtssituation vorgestellte Abschätzungsrechnung kann auch auf Betreuungsräume in Schulen übertragen werden. Da im Rahmen der Betreuung jedoch eine Stoßlüftung im Regelfall möglich sein sollte, wird hier der Zeitpunkt für die jeweils erforderliche Stoßlüftungsintervention berechnet. Zielwert ist wiederum der Wert von 1 400 ppm CO₂ zur Einhaltung eines mittleren Wertes von 1 000 ppm. Die Anstiege ΔC₀₁₂ in oben genannten Gleichungen für die Kipplüftungsphase kommen daher nicht zur Anwendung. Sollte in Ausnahmefällen eine Stoßlüftung nicht möglich sein, können die Rechner für die Unterrichtssituation verwendet werden.

8.2 Räume im Erwachsenenbereich

Es stellt sich die Frage, ob der hier vorgestellte Rechner auch in anderen Bereichen, z. B. in Büros, Besprechungsräumen und Seminarräumen, zur Abschätzung des notwendigen Lüftungszeitpunktes verwendet werden kann. Da Stoßlüftung hier in der Regel möglich ist, sollte auch in diesen Fällen der Zielwert von 1 000 ppm durch Wahl des richtigen Stoßlüftungszeitpunktes eingehalten werden. In Seminarräumen ist dabei laut der Verlautbarung des UBA [5] wie im Schulbereich der Mittelwert maßgebend, im Bürobereich jedoch der Momentanwert. Für CO₂-Abgaben im Erwachsenenbereich werden in der Literatur Werte zwischen 15 und 20 Liter CO₂ pro Stunde und Person für sitzende Tätigkeit im Bürobereich angegeben [14]. Insofern ist die CO₂-Abgaberate von 18,9 l/h/Person für den Sekundarbereich aus der Richtlinie VDI 6040 Blatt 2 [10] auch im Seminarbereich anwendbar. Die

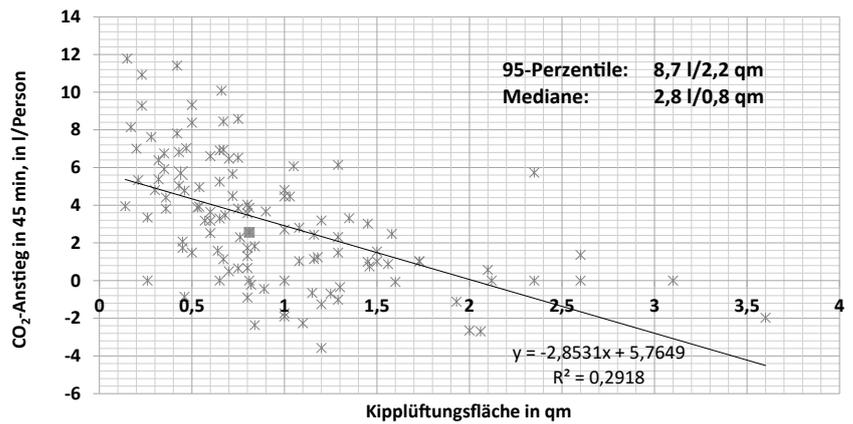


Bild 11. CO₂-Anstiege im Sekundarbereich im Winterhalbjahr in Liter/Person in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung; n = 117.

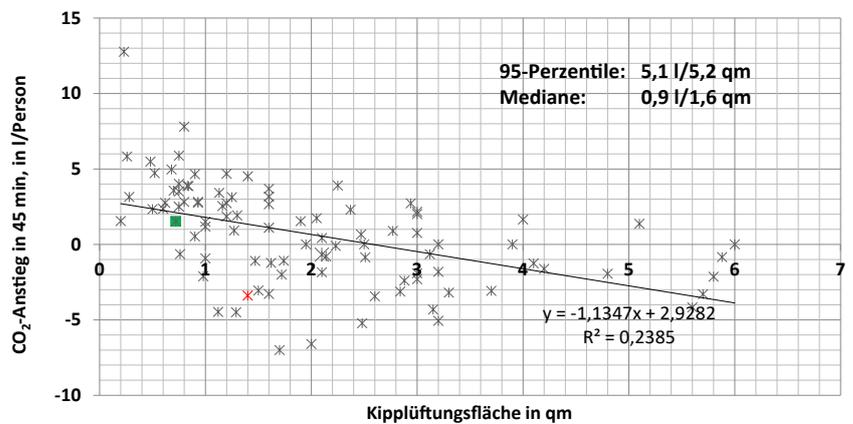


Bild 12. CO₂-Anstiege im Sekundarbereich im Sommerhalbjahr in Liter/Person in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung; n = 96.

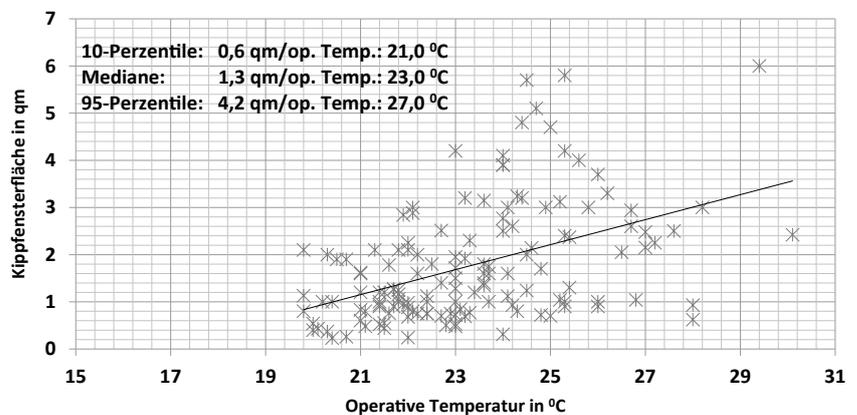


Bild 13. Operative Temperaturen (op. Temp.) in Abhängigkeit von der Kippfensterfläche im Sommerhalbjahr; n = 141.

Berechnungsformeln aus dem Sekundarbereich können somit auch in Seminarräumen Anwendung finden. Die Vergleichbarkeit der Anwendung dieses Wertes in Rechentools und der Anwendung der hier vorgestellten Methode wurde bereits erläutert (siehe Bilder 4 und 5).

Zu überprüfen ist daher noch die Anwendbarkeit der Methode für Büros und Besprechungsräume im Sinne einer Momentanwertabschätzung. Basis für die Berechnung im Erwachsenenbereich soll dabei der Medianwert aus dem Sekundarbereich mit 12,4 l/45 min oder 16,5 l/Stunde CO₂-Anstieg pro Person sein. Die Gleichung für den Bürobereich lautet demnach:

$$t_{LZP} = \frac{400 \text{ ml/m}^3}{\Delta C_{ol}} \quad (2)$$

mit:

t_{LZP} = Lüftungszeitpunkt in Minuten nach Raumnutzungsbeginn

ΔC_{ol} = Anstieg der CO₂-Konzentration ohne Lüftung/Stunde

$$\Delta C_{ol} = \frac{\text{Zahl Personen}}{\text{Raumvolumen}} \times \frac{16500 \text{ ml/Person}}{60 \text{ min}}$$

Die Überprüfung soll anhand von Vergleichsrechnungen mit einem Simulationsprogramm aus Österreich zur Berechnung der CO₂-Konzentration in Schulen [15] und den bereits für die Unterrichtssituation vorgestellten Rechentools erfolgen [8 bis 10]. Für die Luftwechselrate wird der Wert von 0,2/h für geschlossene Isolierfenster berücksichtigt. Die Außenluftkonzentration soll 400 ppm und die Startkonzentration im Raum 600 ppm betragen. Grundeinstellung im österreichischen Rechner ist eine CO₂-Emissionsrate von 18 l/h/Person. Diese gilt für eine Aktivität von 1,0 met für ruhig sitzende Tätigkeit. Voreingestellt ist aber eine Aktivität von 1,2 met für sitzende Tätigkeit z. B. in Büro und Schule [12], woraus sich eine CO₂-Emissionsrate von 21,6 l/h/Person ergibt. Im NLGA-Rechner ist eine Emissionsrate von 20 l/h/Person voreingestellt und bei der Berechnung mit der Formel aus der Richtlinie VDI 6040 Blatt 2 wird der CO₂-Volumenstrom von 18,9 l/h/Person berücksichtigt. Die Parameter für die Berechnung unterscheiden sich also leicht, liegen jedoch alle im Bereich der oben genannten Werte für CO₂-Abgaben bei Erwachsenen.

Wie man **Tabelle 2** entnehmen kann, liegen die berechneten Endkonzentrationen für die vier Beispiele nicht weit auseinander. Die größten Abweichungen von den mit dieser Methode berechneten Werten ergeben sich zu den Ergebnissen des österreichischen Rechners, wobei dort ja auch die größte Emissionsrate eingestellt ist. Eine gute Übereinstimmung ist mit den Ergebnissen des NLGA-Rechners und insbesondere mit den Ergebnissen des Ansatzes für die CO₂-Abgabe aus der Richtlinie VDI 6040 Blatt 2 zu verzeichnen, wie auch bereits für die Unterrichtssituation festgestellt wurde. Somit kann der Ansatz mit dem Medianwert für die CO₂-Anstiege in den Unterrichtsstunden ohne Lüftung im Sekundarbereich in Höhe von 16,5 l/h/Person auch im Bürobereich Anwendung finden.

Auch die ermittelten Lüftungszeitpunkte für die notwendige Stoßlüftung variieren nicht erheblich. Sie kommen dabei auch den Anhaltswerten aus der ASR A5.6 [1] nahe,

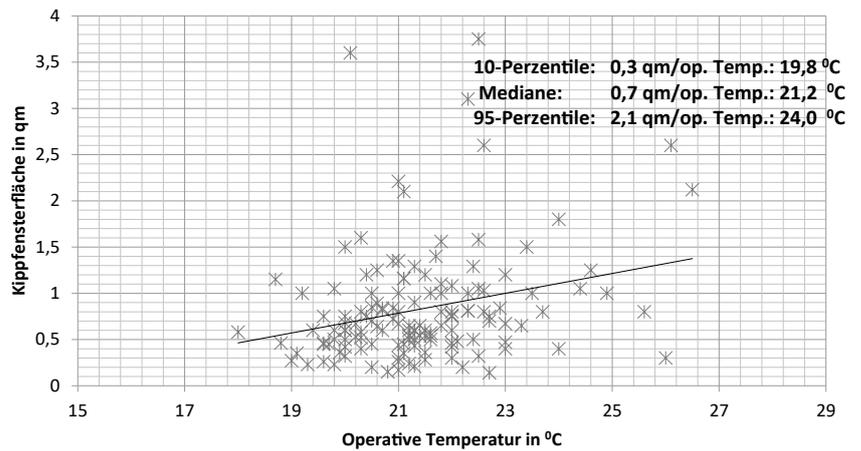


Bild 14. Operative Temperaturen (op. Temp.) in Abhängigkeit von der Kippfensterfläche im Winterhalbjahr, n = 140.

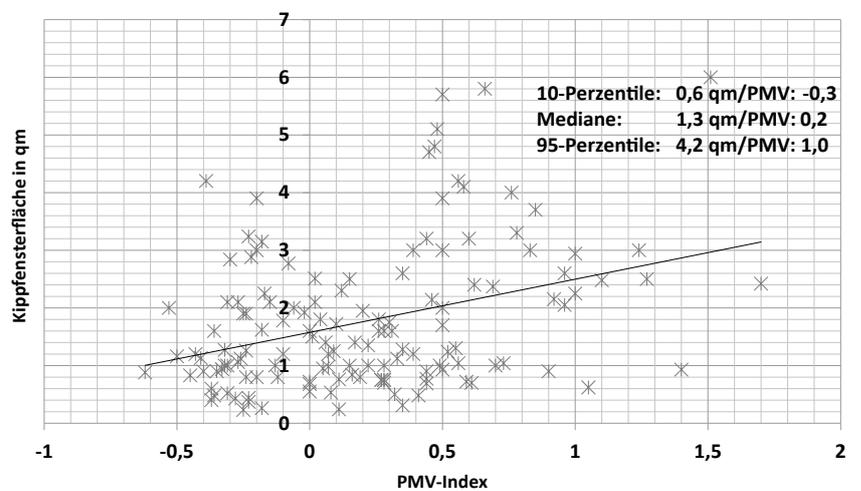


Bild 15. PMV-Indizes in Abhängigkeit von der Kippfensterfläche im Sommerhalbjahr, n = 138.

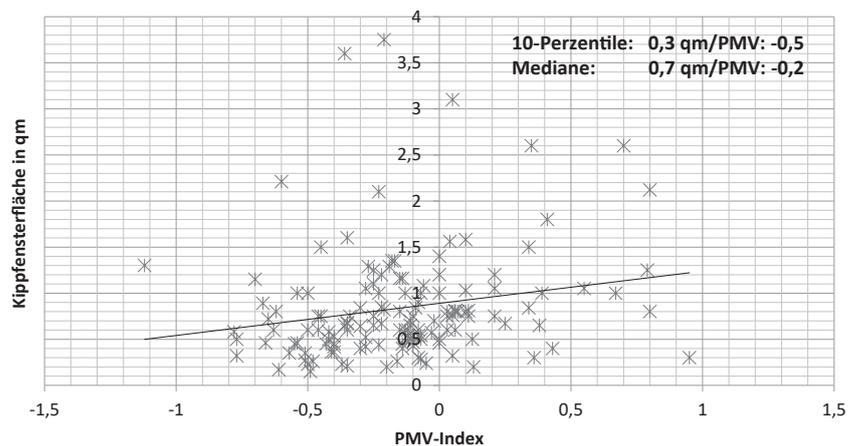


Bild 16. PMV-Indizes in Abhängigkeit von der Kippfensterfläche im Winterhalbjahr; n = 141.

die dort für Büroräume mit 60 min und für Besprechungsräume mit 20 min angegeben werden.

9 Fazit

Die Flexibilisierung von Unterrichtszeiten, veränderbare Unterrichtsraumgrößen und unterschiedliche Klassenstärken sowie die neue Verlautbarung des UBA machen es erforderlich, den bestehenden CO₂-Rechner anzupassen.

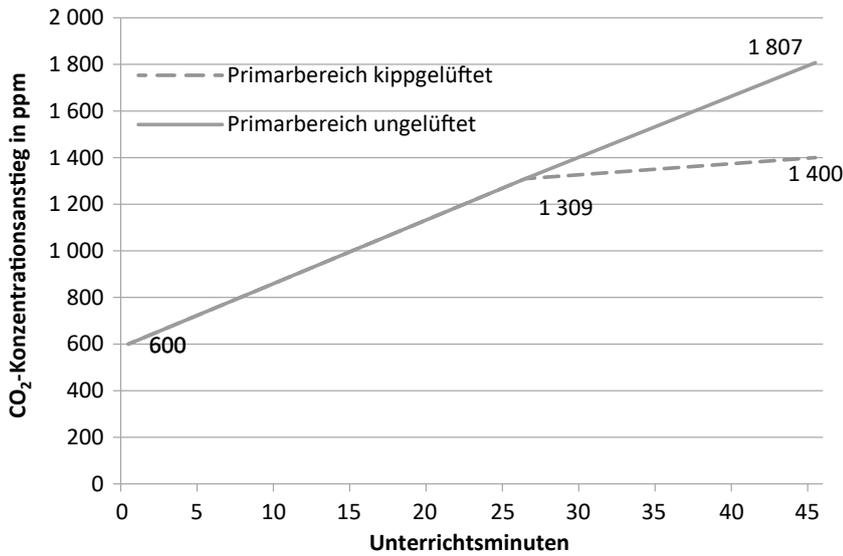


Bild 17. Beispiel für die Berechnung der möglichen Endkonzentration und des notwendigen Lüftungszeitpunktes im Primarbereich für eine 45-minütige Unterrichtsstunde in einem Raum mit 205 m³ und 25 Personen im Winterhalbjahr.

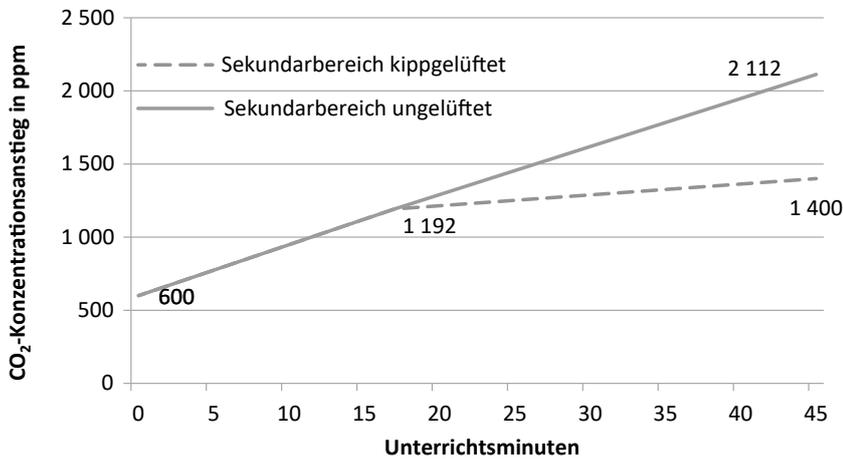


Bild 18. Beispiel für die Berechnung der möglichen Endkonzentration und des notwendigen Lüftungszeitpunktes im Sekundarbereich für eine 45-minütige Unterrichtsstunde in einem Raum mit 205 m³ und 25 Personen im Winterhalbjahr.

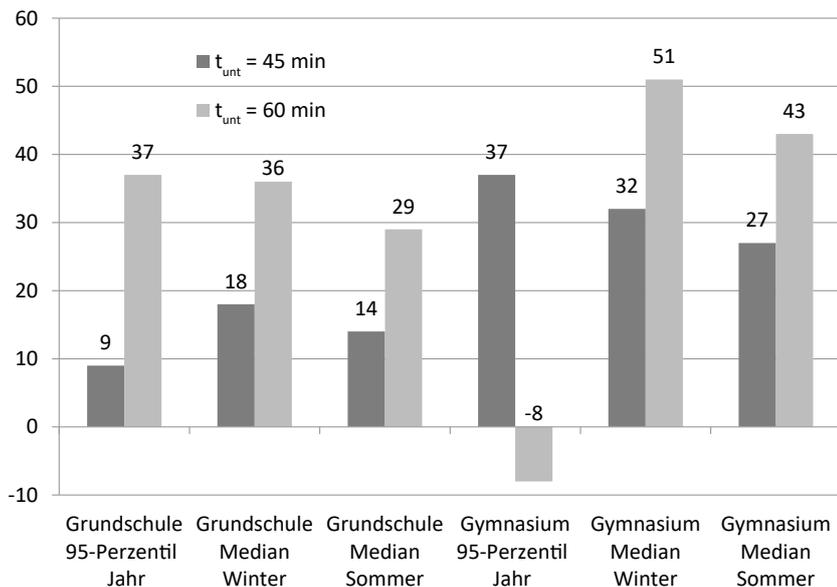


Bild 19. Vergleich der notwendigen Kipplüftungszeiten in Klassenräumen aus Tabelle 1, ermittelt mithilfe der 95-Perzentil-Jahreswerte und der Median-Halbjahreswerte (t_{unt} = Unterrichtszeit).

Nach der neuen Verlautbarung soll die CO₂-Konzentration in Bildungseinrichtungen nunmehr als Mittelwert über eine Unterrichtseinheit betrachtet werden. Dieser Ansatz ist pragmatisch, da die Einhaltung des Leitwertes von 1 000 ppm als Mittelwert über eine Unterrichtseinheit eher realisierbar ist denn als Momentanwert. Durch die dafür erforderlichen Lüftungsmaßnahmen ist auch gewährleistet, dass der obere Leitwert von 2 000 ppm im Sinne der ASR A3.6 nicht überschritten wird.

Die dem Rechner zugrunde liegende Methode zur Abschätzung der CO₂-Konzentration und des notwendigen Lüftungszeitpunktes in Räumen anhand empirisch gewonnener Daten liefert dabei im Vergleich zu den vom UBA empfohlenen Rechentools durchaus kompatible Ergebnisse. Kipplüftung im Unterricht kann im Falle einer nicht möglichen Stoßlüftung zur Verbesserung der Raumluftqualität beitragen, ohne dabei selbst im Winter ein unbehagliches Raumklima zu erzeugen. Die Berechnungsmethoden aus dem Sekundarbereich in Schulen sind auf Seminarräume übertragbar. Der hier vorgestellte Rechner kann auch für die Abschätzung von Stoßlüftungszeitpunkten im Erwachsenenbereich, z. B. in Büros oder Besprechungsräumen, Anwendung finden. Eine App für die mobile Verwendung des Rechners im Bildungs- und Bürobereich unter der Federführung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) und der Unfallkasse Hessen ist in Vorbereitung.

Die **operative Temperatur** ist die Empfindungstemperatur. Bestimmt wird sie als arithmetischer Mittelwert aus der Raumlufttemperatur und der Strahlungstemperatur der Raumumschließungsflächen.

Der **PMV-Index** (PMV = Vorausgesagtes mittleres Votum) ist ein Summenindex, der sowohl die raumklimatischen Parameter als auch die Aktivität und die Bekleidung der Personen im Raum berücksichtigt. Er reicht von +3 (warm) bis -3 (kalt). Zwischen -0,5 und +0,5 ist noch mit einem Anteil von Unzufriedenen in Höhe von zehn Prozent zu rechnen. Selbst bei einem PMV-Wert von 0 (neutral) beträgt der Anteil von Unzufriedenen wahrscheinlich noch fünf Prozent.

Tabelle 2. Vergleich der CO₂-Anstiege in 60 min ($\Delta C_{60 \text{ min}}$) und notwendiger Lüftungszeitpunkte (t_{Lzp}) zur Einhaltung des Zielwertes von 1 000 ppm als Momentanwert bei einer Grundbelastung von 600 ppm in Abhängigkeit von der Raumgröße (F: Fläche, h: Höhe) und der Zahl der Personen im Raum (RN).

Raum	Raumluft.org		NLGA		VDI 6040 Blatt 2		DGUV	
	$\Delta C_{60 \text{ min}}$	t_{Lzp}						
F = 15 m ² h = 2,5 m RN = 1	486 ppm	49 min	447 ppm	53 min	421 ppm	57 min	441 ppm	54 min
F = 20 m ² h = 2,5 m RN = 3	1 138 ppm	20 min	1 052 ppm	22 min	992 ppm	23 min	992 ppm	24 min
F = 40 m ² h = 2,5 m RN = 10	1 921 ppm	12 min	1 777 ppm	13 min	1 677 ppm	13 min	1 653 ppm	15 min
F = 70 m ² h = 3 m RN = 30	2 768 ppm	8 min	2 554 ppm	9 min	2 411 ppm	9 min	2 362 ppm	10 min

Literatur:

- [1] Arbeitsstätten-Richtlinie (ASR) A3.6 – Lüftung (1/2012). GMBL. (2012) Nr. 6, S. 92-97, zul. geänd. GMBL. (2018) Nr. 24, S. 474.
- [2] Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft – Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 11 (2008), S. 1358-1369.
- [3] Anforderungen an Lüftungskonzeptionen in Gebäuden – Teil I: Bildungseinrichtungen. Hrsg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau 2017.
- [4] 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.
- [5] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.: Gesunde Luft in Schulen, Teil 2 – Beurteilung der CO₂-Konzentration und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. Bericht, Bestellnr. PIN57. Hrsg.: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2014. www.unfallkasse-nrw.de/service/medien/schriftenreihe-praevention-in-nrw.html
- [6] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.: Beurteilung der CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 6, S. 235-244.
- [7] Freiberg, S.; Hanßen-Pannhausen, R.; Hessenmöller, A. M.; Zieschang, H.; von der Heyden, T.; Maue, J.; Peters, S.: Das ergonomische Klassenzimmer als Beitrag zur guten, gesunden Schule. DGUV Report 2/2013. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2013. www.dguv.de/ifa, Webcode: d641421
- [8] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Niedersächsisches Schulmessprogramm: Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxid-Verläufen. Hrsg.: Niedersächsisches Landesgesundheitsamt, Hannover 2002, aktualisiert 2004. www.nlga.niedersachsen.de/umweltmedizin/luft/projekt_lufthygiene_schulen/lufthygienische_untersuchungen/lufthygienische_untersuchungen-in-niedersaechsischen-schulen-19335.html
- [9] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 64 (2003), S. 447-456. NLGA-Rechner abrufbar unter www.co2-modell.nlga.niedersachsen.de
- [10] VDI 6040 Blatt 2: Raumlufttechnik Schulen – Ausführungshinweise (9/2015). Berlin: Beuth 2015.
- [11] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.: Beurteilung der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 7/8, S. 322-328.
- [12] DIN EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (5/2006). Berlin: Beuth 2006 und Berichtigung 1 (6/2007).
- [13] Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004. BGBl. I (2004), S. 2179; zul. geänd. BGBl. I (2017) S. 3584.
- [14] Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter. Hrsg.: Arbeitskreis Innenraumluft am Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) unter Mitarbeit der Kommission Klima und Luftqualität (KML) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW), Wien, Österreich 2017.
- [15] Simulationsprogramm zur Berechnung von CO₂-Konzentrationen in Schulen. Hrsg.: Innenraum Mess- und Beratungsservice im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich. www.raumluft.org/rlt-anlagen/co2-rechner/