

Methode zur Abschätzung der CO₂-Konzentration in Klassenräumen anhand empirisch ermittelter Daten und Vorschläge für Lüftungsmaßnahmen

H.-D. Neumann

Zusammenfassung Basierend auf den Messergebnissen einer Studie in 363 Klassenräumen an 111 Schulen wird eine Methode zur einfachen Abschätzung der CO₂-Konzentrationen bei fehlender Lüftung sowie für Zeitpunkt und Art notwendiger Lüftungsmaßnahmen vorgestellt. Grundlage der Schätzung sind Messwerte aus dem Unterricht in Schulräumen ohne Lüftung sowie unter verschiedenen natürlichen Lüftungsverhältnissen im Primar- und Sekundarbereich. Die Schätzmethoden orientieren sich an den 95-Perzentilwerten der Daten für die Situation ohne Lüftung und mit Kipplüftung. Die Schätzmethode 1 basiert auf dem ermittelten CO₂-Anstieg in ppm/Raumnutzer, die Schätzmethode 2 auf der CO₂-Anreicherung im Raum pro Person in Liter. Zur Abschätzung genügen Angaben zur Zahl der Raumnutzer und zum Raumvolumen, was eine einfache Handhabung durch Laien sicherstellt. Die Einhaltung des Zielwertes von 1 000 ppm ist im Schulunterricht bei freier Lüftung nur schwer realisierbar. Ziel der Schätzung ist es daher, dass die CO₂-Konzentration im Raum durch rechtzeitige Lüftungsintervention nicht in den „hygienisch inakzeptablen“ Bereich ansteigt und deutlich unter 2 000 ppm verbleibt. Auf der Basis der Ergebnisse wird ein Lüftungskonzept vorgeschlagen. Der Abschätzungsrechner ist auf der Homepage der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen online verfügbar.

Method for estimating the CO₂ concentration in classrooms on the basis of empirical data and ventilation suggestions

Abstract On the basis of the measurement results from a study in 363 classrooms in 111 schools, a method is proposed for the simplified estimation of the CO₂ concentration in rooms without ventilation and for the timing and type of necessary ventilation. The estimate is based on measured values from lessons in schoolrooms without ventilation and under different natural ventilation conditions in primary and secondary schools. The estimation methods make use of the 95th percentiles of the data for rooms without ventilation and with the windows tilted open. Estimation method 1 is based on the measured increase in CO₂ in ppm/room user, while estimation method 2 on the CO₂ enrichment in the room per person in litres. The estimation requires merely the number of room users and the room volume and can be readily performed by laypersons. Compliance with the target value of 1,000 ppm is rather difficult to achieve during lessons with natural ventilation. The purpose of the estimate is therefore, by adopting timely ventilation measures, to prevent the CO₂ concentration in the room from rising into the „hygienically unacceptable“ range and keep it well below 2,000 ppm. A ventilation strategy is proposed on the basis of the results. The estimate calculator is available online at the website of the Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, the German Social Accident Insurance Institution for the public sector in North Rhine-Westphalia.

Dr.-Ing. Heinz-Dieter Neumann,
Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

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. Häufig sorgen allerdings die Personen im Raum durch ihre Anwesenheit dafür, dass dieses nicht eintritt. Grund hierfür sind die Abgabe von Kohlenstoffdioxid (CO₂) als Produkt der menschlichen Atmung und mangelhafte Lüftung. Klassenräume in Schulen sind wegen der hohen Zahl der anwesenden Personen und deren langen Aufenthaltszeiten in den Räumen besonders betroffen. Daher besteht insbesondere hier die Notwendigkeit, für gute Luft durch Lüftung zu sorgen.

Um den Lehrkräften eine Hilfe zur Abschätzung der im Unterricht auftretenden CO₂-Konzentrationen und den Zeitpunkt für notwendige Lüftungsinterventionen zu liefern, wurde eine einfache Methode zu deren Ermittlung entwickelt. Die Berechnung ist auf den Internetseiten der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen online verfügbar. Basis sind die CO₂-Messergebnisse einer Studie in 363 Klassenräumen an 111 Schulen [2]. Die der Abschätzung zugrunde liegenden Daten und die Methode werden hier vorgestellt.

2 Zielsetzung und Zielwerte

Vielfach wird in Schulen die notwendige Lüftung vernachlässigt. Wie in [2; 3] erläutert wird, zeigen zahlreiche Studien, dass in Klassenräumen häufig Konzentrationen von mehr als 4 000 ppm CO₂ anzutreffen sind. Dies sorgt nicht nur für mangelndes Wohlbefinden. Auch die Leistungsfähigkeit der Schülerinnen, Schüler und Lehrkräfte wird dadurch beeinträchtigt.

Die Verschlechterung der Raumluftqualität nehmen die Betroffenen häufig selbst nicht wahr, sondern bemerken dies erst bei Eintritt oder Wiedereintritt in die Räumlichkeit. Eine „natürliche“ Konzentrationsüberwachung ist insofern nicht gegeben.

Zur Einschätzung der Luftqualität kommt daher eine messtechnische Überprüfung zum Beispiel in Form von „CO₂-Ampeln“ in Betracht [4]. Sie wird in der Praxis jedoch nur selten angewandt. Eine weitere Möglichkeit ist die Abschätzung der Konzentration durch CO₂-Modellrechner. Bei deren Anwendung sind jedoch zahlreiche Eingaben zu machen, die von Laien häufig nicht ohne Weiteres einschätzbar sind. Hierzu zählen zum Beispiel die Außenluftkonzentration und die Luftwechselrate, die wiederum unter anderem von der Dichtheit der Gebäudehülle sowie den Temperatur- und Windverhältnissen abhängt. Auch die Einschätzung der Atmungsaktivität und damit der CO₂-Abgabe ist kein leichtes Unterfangen. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur einfachen Abschätzung der in Klassenräumen auftretenden CO₂-Konzentrationen bei

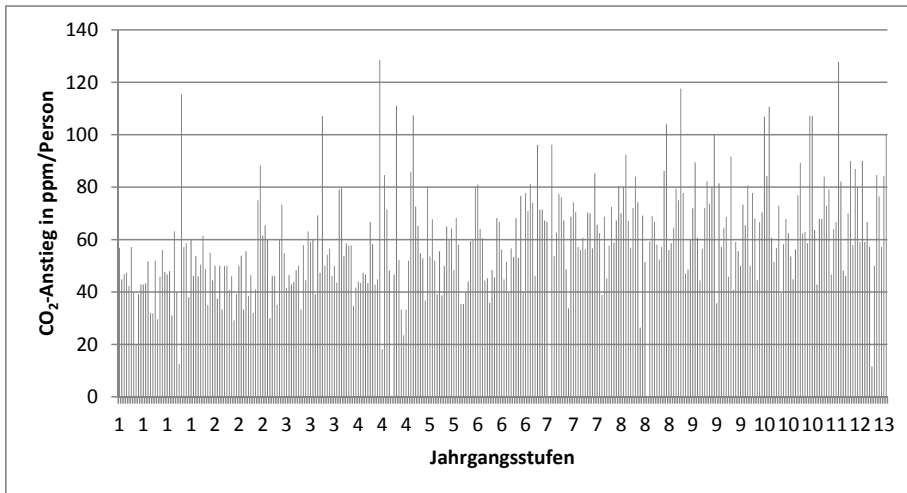


Bild 1. CO₂-Anstiege in ml/m³ (ppm) in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde pro Person in den einzelnen Jahrgangsstufen.

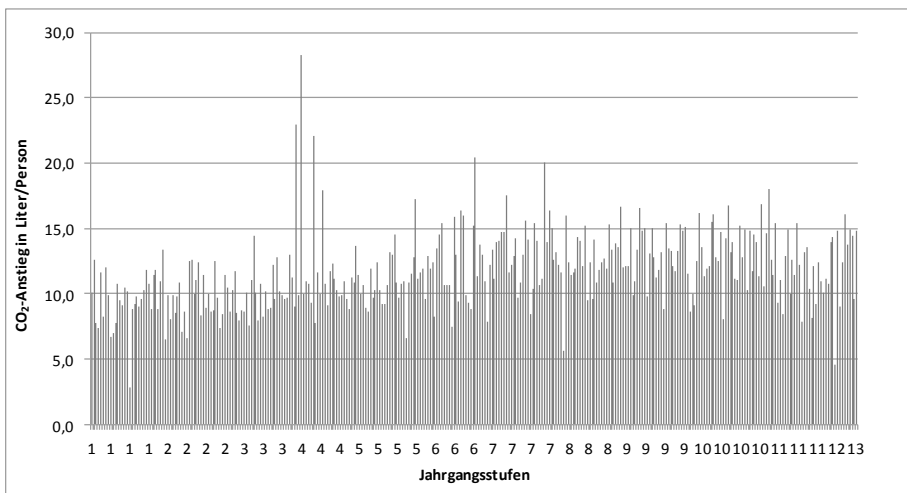


Bild 2. CO₂-Anstiege in l/Person in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde in den einzelnen Jahrgangsstufen.

fehlender Lüftung sowie für Zeitpunkt und Art notwendiger Lüftungsmaßnahmen vorzustellen. Das Modell basiert auf tatsächlichen Verhältnissen in Klassenräumen und gewährleistet eine einfache Handhabung durch Laien. Grundlage der Schätzung sind Messwerte in Unterrichtssituationen ohne Lüftung und unter verschiedenen natürlichen Lüftungsverhältnissen [2; 3].

Maßstab für die Einschätzung der Luftqualität unter dem Aspekt der CO₂-Konzentration sind folgende Ziel- und Orientierungswerte:

- Laut der Arbeitsstätten-Regel A 3.6 „Lüftung“ [5] und den Empfehlungen des Umweltbundesamt [6] ist eine CO₂-Konzentration bis 1 000 ppm als „hygienisch unbedenklich“ anzusehen. Zwischen 1 000 und 2 000 ppm gilt die Konzentration als „hygienisch auffällig“ und eine Konzentration von mehr als 2 000 ppm ist „hygienisch inakzeptabel“.
- Laut DIN EN 13779 [7] wird bereits das Überschreiten von 1 000 ppm als „mäßige Raumluftqualität“ und das Überschreiten von 1 400 ppm als „niedrige Raumluftqualität“ angesehen. Wenngleich diese Norm für Anforderungen an die Auslegung von Lüftungs- und Klimaanlage gilt, können diese Werte als zusätzliche Orientierungshilfe dienen.

3 Abschätzung der CO₂-Konzentration in Klassenräumen

3.1 Datenbasis

Die Abschätzung des CO₂-Anstiegs in einer Unterrichtsstunde und des Zeitpunkts der Lüftungsintervention basiert auf den Ergebnissen der Studie „Gesunde Luft in Schulen“ [2]. Durch die Auswertung der Messwerte in 365 Klassenräumen an 111 Schulen beruht die Schätzung auf einer ausreichenden Datenbasis. Die methodische Vorgehensweise bei den durchgeführten Messungen ist beschrieben [2; 3].

Als Ausgangspunkt für die Abschätzung des Anstiegs der CO₂-Konzentration wird der ermittelte Medianwert zu Beginn der Unterrichtsstunde in Höhe von 600 ppm angenommen [2; 3]. Für den CO₂-Anstieg in der Unterrichtssituation ohne Lüftung wird dann jeweils vom 95-Perzentilwert der ermittelten Anstiege in einer Unterrichtsstunde ausgegangen. Basis ist eine Unterrichtszeit von 45 min. Werte aus Sonderschulen wurden nicht berücksichtigt. Hier entsprachen das Unterrichtsschema und die durchgeführten Lüftungsinterventionen häufig nicht dem der Schätzung zugrunde liegenden Modell. Zur Schätzung sind zwei Methoden möglich:

- Schätzmethode 1 anhand der Zahl der Raumnutzer,
- Schätzmethode 2 anhand der Zahl der Raumnutzer und des Raumvolumens.

Die Verteilung der Einzelwerte in Abhängigkeit von den Jahrgangsstufen ist den **Bildern 1** (Schätzmethode 1) und **2** (Schätzmethode 2) dargestellt.

Das Verteilungsmuster ist sehr inhomogen. Eine Abhängigkeit von den Jahrgangsstufen und somit vom Alter der Schülerinnen und Schüler ist nur tendenziell erkennbar. Um die Schätzmethoden unabhängig von der Schulform zu gestalten und auch der Etablierung neuer Schulformen, wie z. B. der Sekundarschule, Rechnung zu tragen, wurde auf eine detaillierte Betrachtung der Jahrgangsstufen und der einzelnen Schulformen – wie in [2; 3] dargestellt – bei der hier vorgestellten Abschätzung verzichtet. Die Verteilungen der Werte und 95-Perzentilberechnungen wurden nunmehr nach Primarbereich und Sekundarbereich unterschieden.

3.2 Schätzung des CO₂-Anstiegs in der Unterrichtssituation ohne Lüftung anhand der Zahl der Raumnutzer

Bei der ersten Schätzmethode wird vom 95-Perzentilwert des CO₂-Anstiegs in ml/m³ (ppm) pro Raumnutzer in der Unterrichtssituation ohne Lüftung ausgegangen.

Die Verteilung der 116 Messwerte für den Primarbereich auf der Basis der Schätzmethode 1 ist in **Bild 3** dargestellt. Die Anstiege liegen in einem Bereich zwischen minimal

12,5 ppm/Person und maximal bei 128,6 ppm/Person bei einem Medianwert von 47 ppm/Person. Der 95-Perzentilwert beträgt 68 ppm/Person. Für die Abschätzungsrechnung werden aufgerundet 70 ppm/Person zugrunde gelegt.

Die Verteilung der Werte für den Sekundarbereich ist **Bild 4** zu entnehmen. Der Medianwert aus 189 Messwerten liegt bei 64 ppm/Person bei einem minimalen Anstieg von 11,5 ppm/Person und einem Maximalwert von 127,8 ppm/Person. Der 95-Perzentilwert beträgt hier 92 ppm/Person. Für die Abschätzungsrechnung werden abgerundet 90 ppm angesetzt.

Bei der Verteilung der Werte ausschließlich für die Jahrgangsstufen 5 bis 10 beträgt das 95-Perzentil aus 164 Messwerten 91 ppm/Person und entspricht insofern dem Schätzungsansatz. Das 95-Perzentil in den Jahrgangsstufen 11 bis 13 beträgt 98 ppm/Person bei allerdings nur 25 Messwerten. Davon liegen 23 Werte im Bereich bis 90 ppm. Auf eine Unterscheidung des Sekundarbereichs 2 zwischen den Jahrgangsstufen 5 bis 10 und 11 bis 13 wird daher verzichtet.

3.3 Schätzung des CO₂-Anstiegs in der Unterrichtssituation ohne Lüftung anhand der Zahl der Raumnutzer und des Raumvolumens

Bei der zweiten Schätzmethode werden die 95-Perzentilwerte der CO₂-Anstiege in l/Person und Unterrichtsstunde zur Abschätzung angesetzt (siehe auch Abbildung 42 in [1]). In diesem Fall sind sowohl die jeweils anwesenden Personen als auch die vorherrschenden Raumvolumina zu berücksichtigen, sodass man den vor Ort vorliegenden Verhältnissen näher kommt als bei der Schätzung nach Methode 1.

Die CO₂-Anstiege im Primarbereich liegen zwischen 2,9 und 28,5 l/Person (**Bild 5**). Der Medianwert aus 115 Messwerten beträgt 9,9 l/Person, das 95-Perzentil 13,1 l/Person.

Im Sekundarbereich beträgt der Minimalwert 4,6 l/Person und der Maximalwert 20,5 l/Person (**Bild 6**). Der Medianwert aus 216 Messwerten liegt bei 12,4 l/Person, das 95-Perzentil bei 16,2 l/Person. Für die Schätzung werden daher die Werte von 13 l/Person für den Primarbereich und 16 l/Person im Sekundarbereich verwendet.

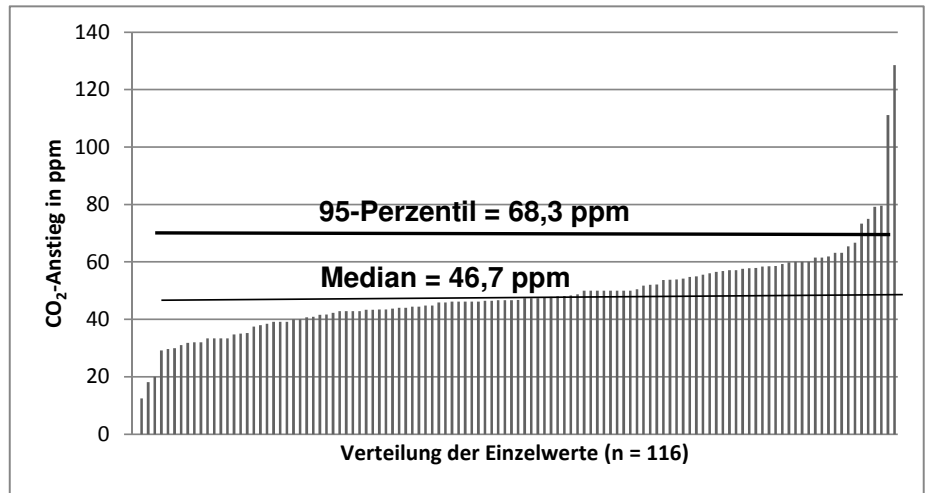


Bild 3. CO₂-Anstieg in ml/m³ (ppm) in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde pro Person im Primarbereich.

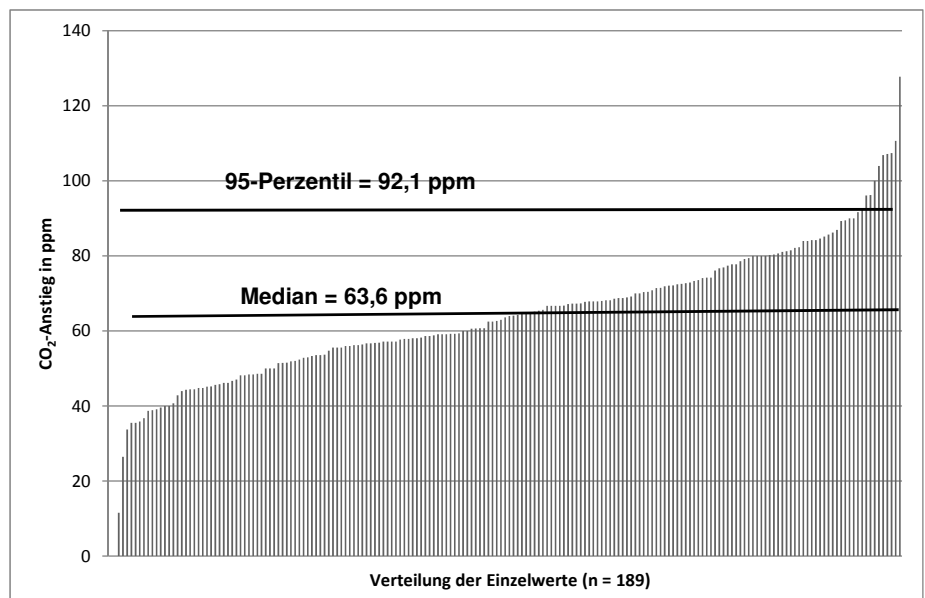


Bild 4. CO₂-Anstieg in ml/m³ (ppm) in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde pro Person im Sekundarbereich.

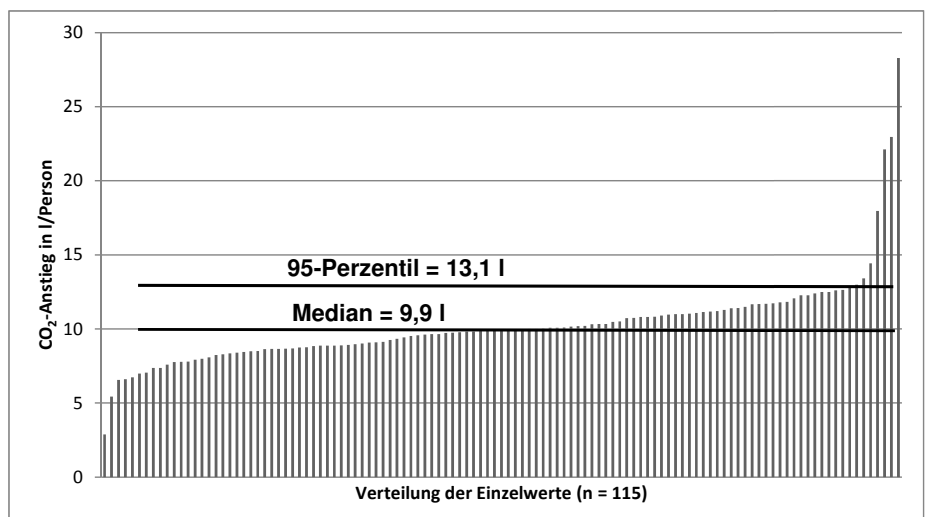


Bild 5. CO₂-Anstieg in l/Person in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde im Primarbereich.

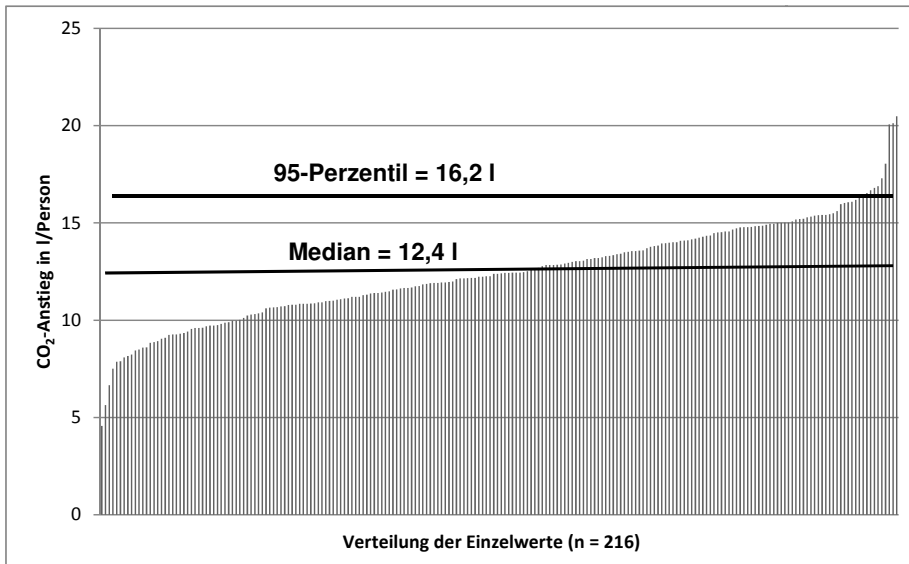


Bild 6. CO₂-Anstieg in l/Person in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde im Sekundarbereich.

3.4 CO₂-Anstieg in der Unterrichtssituation mit Kipp-lüftung

Da der CO₂-Anstieg in der Unterrichtssituation mit Lüftung nicht nur von der Zahl der Raumnutzer und dem Raumvolumen abhängt, sondern auch andere Faktoren eingehen, wie die Differenz der Innen- und Außentemperatur, die Windrichtung und Windstärke oder die Größe der Lüftungsöffnung, wird der über alle Schulformen ermittelte 95-Perzentilwert des CO₂-Anstiegs bei Kipp-lüftung herangezogen. Der 95-Perzentilwert aus 318 Werten beträgt 800 ppm/Unterrichtsstunde (Bild 7), wobei der Anstieg im Winter deutlich höher ist als im Sommer. Um das Behag-

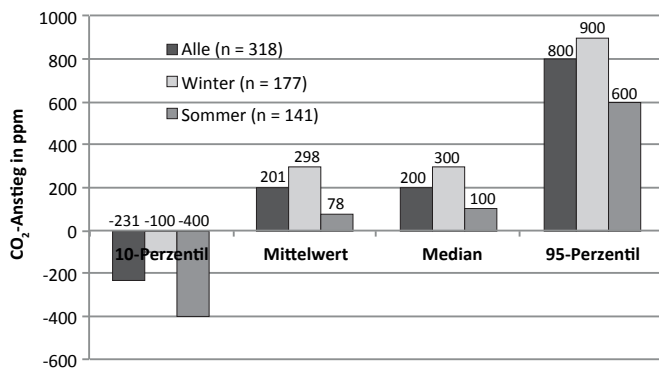


Bild 7. CO₂-Anstieg in ppm bei Kipp-lüftung in einer 45-minütigen Unterrichtsstunde.

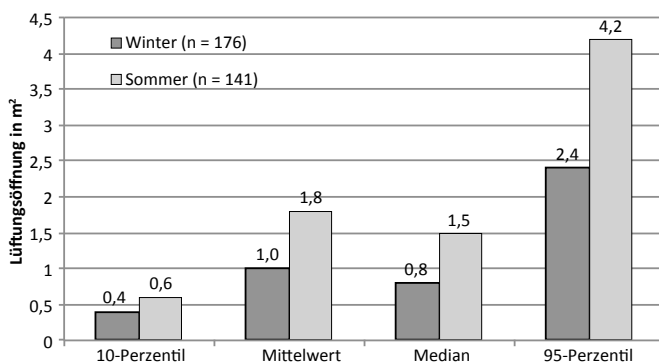


Bild 8. Realisierte Lüftungsöffnung bei Kipp-lüftung in m².

lichkeitsempfinden in den Klassenräumen so wenig wie möglich zu beeinträchtigen, war es den Raumnutzern überlassen, die Zahl der in Kippstellung geöffneten Fenster selbst zu bestimmen. Zusätzlich zu den Messungen wurden die Größe der dadurch realisierten Lüftungsöffnungen dokumentiert. Wie man Bild 8 entnehmen kann, wurde dabei im Mittel eine geöffnete Fensterfläche von nur 1 m² realisiert. Um den CO₂-Anstieg in den oben genannten Grenzen zu halten, muss die Lüftungsöffnung daher nicht übermäßig groß sein. In der Regel reicht es aus, wenn man dazu die Fenster im Bereich der Raumstirnseiten in Kippstellung öffnet. Der Anstieg der CO₂-Konzentration während der Lüftungsphase wird somit

mit 800 ppm/45 min angenommen. Dies entspricht 17,78 ppm/min.

3.5 CO₂-Verringerung durch Stoßlüftung

In jeder Pause nach der Unterrichtsstunde ist der Unterrichtsraum einer gründlichen Stoßlüftung zu unterziehen. Wie man Bild 9 entnehmen kann, lässt sich bereits bei mittelmäßigem Erfolg der Stoßlüftung die CO₂-Konzentration um 1 200 ppm reduzieren. Der Ausgangswert von 600 ppm sollte dann in vielen Fällen wieder annähernd erreicht sein. Im Mittel wurde bei der Stoßlüftung eine Lüftungsfläche von ca. 3 m² realisiert (Bild 10), wobei die Jahreszeit im Gegensatz zur Kipp-lüftung in diesem Fall nicht so bedeutend für den Lüftungserfolg ist. Wichtig ist in diesem Fall die über geöffnete Fenster und Türen erzeugte Zugluft.

3.6 Abschätzung des Lüftungszeitpunktes für Kipp-lüftung

Die Abschätzung des Lüftungszeitpunktes ist so ausgelegt, dass man mithilfe der Kipp-lüftung während der Unterrichtsstunde in dem Korridor bis maximal 2 000 ppm verbleibt. Der Lüftungszeitpunkt berechnet sich somit nach folgender Formel:

$$C_{\max} = 2\,000 \text{ ppm} = 600 \text{ ppm} + \Delta C_{\text{ol}} \cdot t_{\text{LZP}} + 17,78 \text{ ppm/min} \cdot (45 \text{ min} - t_{\text{LZP}})$$

$$t_{\text{LZP}} = \frac{600 \text{ ppm}}{\Delta C_{\text{ol}} - 17,78 \text{ ppm/min}}$$

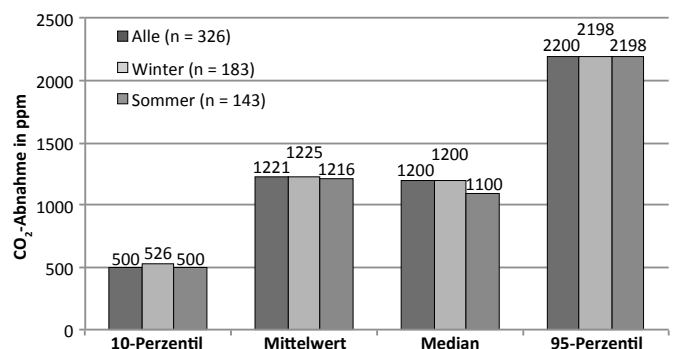


Bild 9. CO₂-Reduktion in ppm durch Stoßlüftung.

mit:

t_{LZP} = Lüftungszeitpunkt in Minuten nach Unterrichtsbeginn

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

Anstieg pro Person und Unterrichtsstunde nach Schätzmethode 1 ohne Raumvolumen:

$\Delta C_{ol} = N \cdot 70 \text{ ppm}/45 \text{ min} = N \cdot 1,56 \text{ ppm}/\text{min}$
-> Primarbereich

$\Delta C_{ol} = N \cdot 90 \text{ ppm}/45 \text{ min} = N \cdot 2 \text{ ppm}/\text{min}$
-> Sekundarbereich

Anstieg pro Person und Unterrichtsstunde nach Schätzmethode 2 mit Raumvolumen:

$\Delta C_{ol} = \frac{N}{V} \cdot \frac{15000 \text{ ml}}{45 \text{ min}} = \frac{N}{V} \cdot 288,89 \text{ ml}/\text{min}$ → Primarbereich

$\Delta C_{ol} = \frac{N}{V} \cdot \frac{16000 \text{ ml}}{45 \text{ min}} = \frac{N}{V} \cdot 355,56 \text{ ml}/\text{min}$ → Sekundarbereich

mit:

N = Zahl der Personen im Raum

V = Raumvolumen in m³

4 Beispiele für die Abschätzung des CO₂-Anstiegs

In **Tabelle 1** sind Beispiele für die Abschätzung der ohne Lüftung auftretenden CO₂-Maximalkonzentration und des notwendigen Lüftungszeitpunktes anhand beider Schätzmethode dargestellt. Die Schätzung erfolgt für mittelgroße Klassenräume und Belegungsstärken, weshalb für die Schätzungen die in [2] festgestellten arithmetischen Mittelwerte für die Raumnutzer und Raumvolumina zum Ansatz gebracht werden.

Die geschätzten Endkonzentrationen am Ende einer Unterrichtsstunde und die empfohlenen Lüftungszeitpunkte der beiden Schätzmethode differieren in der Grundschule stärker als im Gymnasium. Grund hierfür ist, dass das 95-Perzentil im Sekundarbereich nach der Schätzmethode

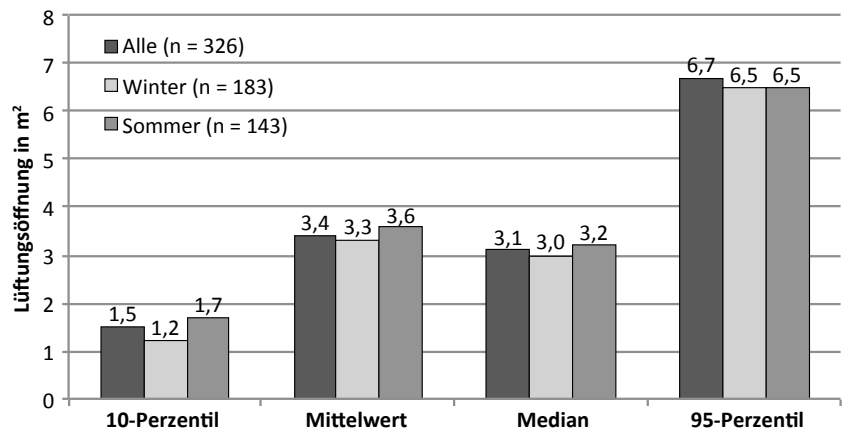


Bild 10. Geöffnete Lüftungsfläche bei Stoßlüftung in m².

1 durch die verhältnismäßig kleinen Raumvolumina und hohen Raumnutzerzahlen in Gymnasien geprägt ist. Bei der Eingabe eines größeren Raumvolumens für Gymnasien differieren die Ergebnisse auch hier stärker.

5 Vergleichsrechnungen mithilfe von CO₂-Modellrechnern

Um die eigenen Ergebnisse zu überprüfen, wurden Vergleichsrechnungen für die oben dargestellten Beispiele mithilfe der CO₂-Modellsoftware des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes (NLG) [8; 9] und des im Auftrag des österreichischen Umweltministeriums erstellten CO₂-Rechners durchgeführt [10]. Dabei wurden die in Tabelle 1 genannten Raumnutzerzahlen und Raumvolumina eingesetzt. Weitere Ausgangsgrößen sind:

- Luftwechsel: 0,2/h
- CO₂-Konzentration in der Außenluft: 400 ppm
- CO₂-Anfangskonzentration: 600 ppm
- sowie die in **Tabelle 2** aufgeführten Werte

Die CO₂-Abgaben für den Ruhezustand im NLG-Rechner entsprechen dabei weitgehend denen, die auch im Entwurf der Richtlinie VDI 6040 Teil 2 [11] angegeben sind. Hier wird für Unterrichtssituationen in den Jahrgangsstufen 1

Tabelle 1. Beispiele für geschätzte Endkonzentrationen nach einer 45-minütigen Unterrichtsstunde und empfohlene Lüftungszeitpunkte nach Unterrichtsbeginn.

Schulform	Anwesende Personen	Raumvolumen in m ³	Schätzmethode	Endkonzentration in ppm	Lüftungszeitpunkt in min
Grundschule	24		1	2 280	31
Grundschule	24	215	2	2 051	41
Gymnasium	26		1	2 940	18
Gymnasium	26	185	2	2 849	19

Tabelle 2. Voreingestellte CO₂-Abgaben in Abhängigkeit von der Aktivität und vom Alter; *: lineare Interpolation der CO₂-Abgaben zwischen den Altersstufen, NLG: Rechner des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes.

Modellrechner	Schulform	Alter in Jahren	Aktivität	CO ₂ -Abgabe in l/h
NLG	Grundschule	7 bis 9	Ruhezustand	14,3
NLG	Grundschule	7 bis 9	Leichte Aktivität	28,3
NLG	Gymnasium	10 bis 14	Ruhezustand	20,0
NLG	Gymnasium	10 bis 14	Leichte Aktivität	38,3
NLG	Gymnasium	≥ 15	Ruhezustand	21,7
NLG	Gymnasium	≥ 15	Leichte Aktivität	43,4
Österreich		6		10,0*
Österreich		18		18,0*

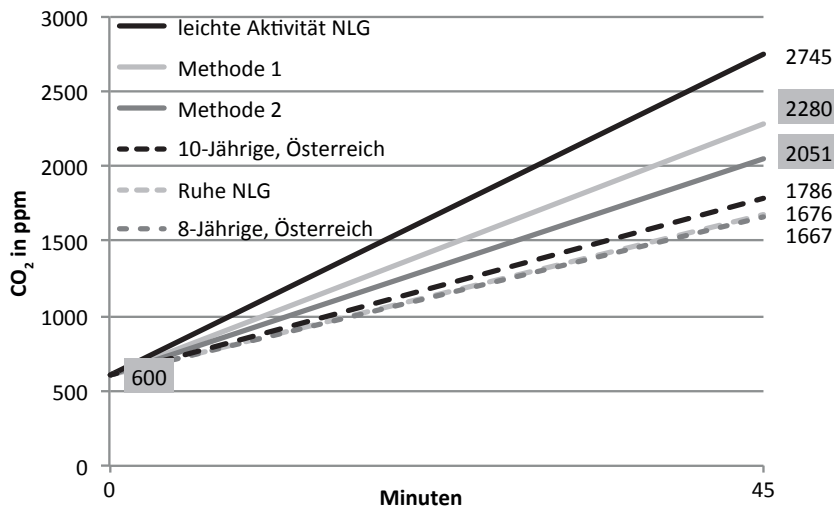


Bild 11. Vergleichsrechnungen Grundschule (NLG: Rechner des Niedersächsischen Landesgesundheitsamtes).

bis 4 von einer CO₂-Abgabe in Höhe von 15,6 l/h und in den Jahrgangsstufen 5 bis 13 in Höhe von 18,9 l/h ausgegangen. Die CO₂-Abgaben dürfen allerdings nicht mit den in der hier vorgestellten Schätzung angesetzten CO₂-Anreicherungen im Raum gleichgesetzt werden. Diese beziehen sich auf eine 45-minütige Unterrichtsstunde und enthalten bereits den Luftwechsel über vorhandene Undichtigkeiten des Raumes.

Der Vergleich der Berechnungsergebnisse erfolgt anhand der ermittelten Endkonzentrationen aus Abschnitt 4 (in Bild 11 grau hinterlegt). Bild 11 zeigt, dass das Ergebnis für die auftretende Endkonzentration für die Unterrichtsstunde ohne Lüftung nach beiden Schätzmethoden etwa mittig zwischen den Ergebnissen aus der Modellrechnung für Grundschüler für die Situation „in Ruhe“ und „leichte

Aktivität“ nach den Ergebnissen des NLG-Rechners liegt. Die Werte des Rechners aus Österreich unterscheiden sich mit 1 667 ppm für achtjährige und 1 786 ppm für zehnjährige Schülerinnen und Schüler kaum von den berechneten Endkonzentrationen des NLG-Rechners für den „Ruhezustand“ in Höhe von 1 676 ppm. Die berechneten Werte kommen der Endkonzentration der hier vorgestellten Schätzmethode nahe, wenn man die Medianwerte zum Ansatz bringt. Die geschätzten Endkonzentrationen erreichen dann 1 728 ppm mit Methode 1 und 1 716 ppm mit Methode 2.

Die berechneten und hier ermittelten (grau hinterlegten) Endkonzentrationen für das Beispiel Gymnasien liegen dagegen nahe beieinander, wenn man in der Modellrechnung des NLG die Ansätze für die angegebenen Altersstufen im Ruhezustand einsetzt

(Bild 12). Der Wert für den „Ruhezustand“ für Schülerinnen und Schüler im Alter von mehr als 15 Jahren (2 696 ppm) entspricht dabei dem Wert für 18-jährige Schüler des österreichischen Rechners (2 699 ppm). Die Ergebnisse für „leichte Aktivität“ des NLG-Rechners liegen dagegen deutlich über den eigenen Schätzergebnissen. Bei Ansatz der Medianwerte aus der hier vorgestellten Studie würden die geschätzten Endkonzentrationen mit Werten von 2 264 ppm (Methode 1) und 2 343 ppm (Methode 2) leicht unter den berechneten Werten des Ruhezustandes liegen.

Der Vergleich mit den Medianwerten zeigt, dass bei Berücksichtigung der 95-Perzentilwerte bei der Abschätzung des Lüftungszeitpunktes die Endkonzentration von 2 000 ppm in der Mehrzahl der Fälle deutlich unterschritten sein sollte.

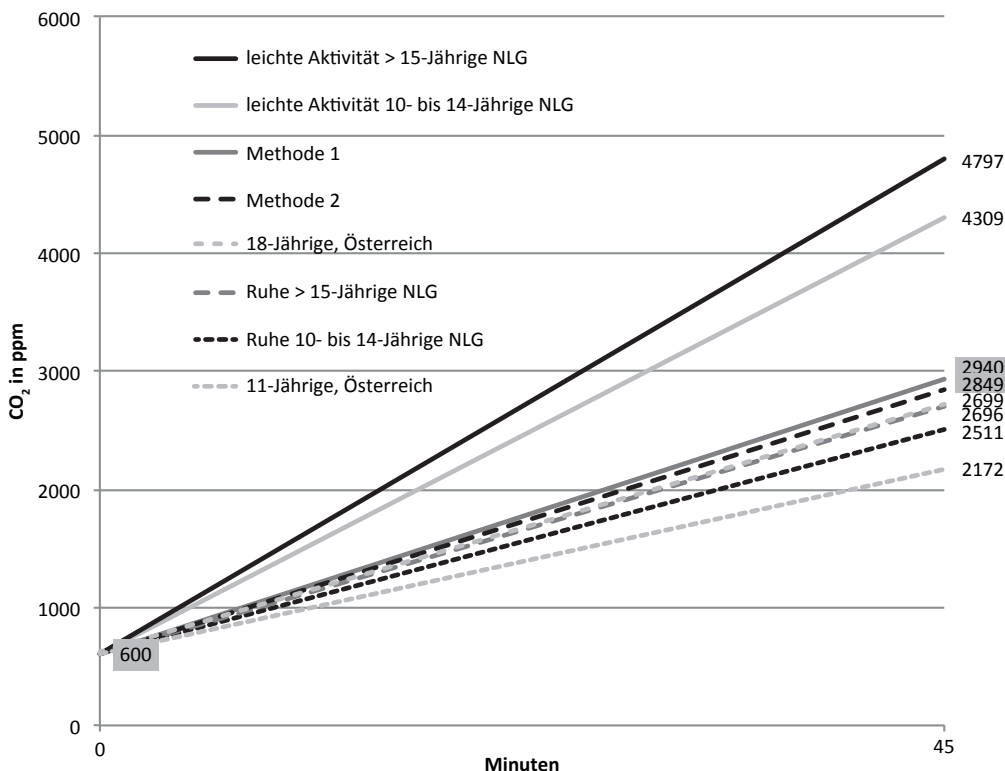


Bild 12. Vergleichsrechnungen Gymnasium.

6 Diskussion

Die Vergleichsrechnungen mit den Modellrechnern zeigen, dass die Schätzmethode anhand der in [2] empirisch ermittelten Daten als Instrument zur Abschätzung der Endkonzentration in Unterrichtssituationen und notwendiger Lüftungsinterventionen durchaus geeignet erscheinen. Die Schätzung nach Methode 1 – nur anhand der Raumnutzerzahlen – führt dabei zu höheren Ergebnissen als die nach Methode 2. Grund hierfür ist, dass die dabei zugrunde liegenden Daten durch eine hohe CO₂-Anreicherung in kleinen Räumen geprägt sind. Die geschätzten Endkonzentrationen nach Methode 2 liegen somit näher bei den berechneten Endkonzentrationen der

Modellrechner. Dennoch sind die geschätzten Endkonzentrationen höher als die mit den Modellrechnern ermittelten, ausgenommen für die Einstellung „leichte Aktivität“ des NLG-Rechners. Dies ist jedoch plausibel, da der jeweils an das 95-Perzentil angelehnte Schätzwert der hier vorgestellten Methoden in Höhe von 13 l/Unterrichtsstunde für den Primärbereich und 16 l/Unterrichtsstunde für den Sekundärbereich eine höhere Aktivität als die des Ruhezustandes beinhaltet. Insofern entsprechen sich die Werte der Modellrechner und der hier durchgeführten Schätzung auch weitgehend, wenn man bei der Schätzung die Medianwerte ansetzt. Die Angaben für „leichte Aktivität“ aus dem Modellrechner des NLG scheinen die Situation dagegen zu überschätzen.

Die Orientierung an den 95-Perzentilwerten der CO₂-Anstiege für die Unterrichtssituationen ohne Lüftung und mit Kipp Lüftung bei der Abschätzung des notwendigen Lüftungszeitpunktes sollte in der überwiegenden Zahl der Fälle sicherstellen, dass die Endkonzentration in der realen Unterrichtssituation deutlich unter 2 000 ppm verbleibt und dem Orientierungswert aus DIN EN 13779 [7] näher kommt. So sollte selbst bei mittelmäßiger Stoßlüftung in den Pausen wieder der Ausgangswert von 600 ppm erreichbar sein.

Wie in der Studie „Gesunde Luft in Schulen“ [12; 13] gezeigt werden konnte, sorgt eine gute Lüftung nicht nur für eine Senkung der CO₂-Konzentration in Räumen. Sie ist auch mit einer deutlichen Abnahme der VOC-Konzentrationen durch Emissionen aus Baustoffen und Einrichtungsgegenständen verbunden.

7 Vorschlag für ein Lüftungskonzept

Sofern die Klassenräume nicht mechanisch – zum Beispiel durch Klima- oder Lüftungsanlagen – gelüftet werden, ist eine freie Lüftung der Räume über Fenster und Türen erforderlich. Auf der Basis der ermittelten Ergebnisse wird in diesem Fall folgendes Lüftungskonzept empfohlen:

- Gründliche Lüftung der Räume durch Stoßlüftung über Fenster und Türen (mindestens 15 min) nach Unterrichtschluss oder vor Beginn des Unterrichtstages.
- Stoßlüftung des Raums in jeder Pause (nach 45 min) über geöffnete Fenster und Türen durch Öffnen der zu den Raumstirnseiten hin aufschlagenden Fenster und Kippstellung der sonstigen Fenster. Möglichst sollte auch die Tür zum Flur geöffnet werden.
- Stoßlüftung zur Hälfte der Unterrichtsstunde wie oben mit einer Dauer von mindestens fünf Minuten (laut Empfehlung des Umweltbundesamtes [14]).
- Ist die Stoßlüftung während des Unterrichts nicht durchführbar, lässt sich durch zusätzliche Kipp Lüftung über Fenster eine akzeptable Raumluftqualität einstellen. Außerhalb der Heizperiode sollte die Kipp Lüftung während der gesamten Unterrichtsstunde stattfinden. Während der Heizperiode sollten zumindest bestimmte Kipp Lüftungszeiten eingeführt werden. Dazu müssen nicht alle Fenster geöffnet werden. Es hat sich gezeigt, dass während der Heizperiode eine Lüftungsöffnung von maximal 1 m² ausreicht, um unterhalb des Richtwertes für den „hygienisch inakzeptablen“ Bereich in Höhe von 2 000 ppm zu verbleiben. In der Regel reicht es aus, wenn dazu die Fenster im Bereich

der Raumstirnseiten in Kippstellung geöffnet werden, Stoßlüftung in den Pausen vorausgesetzt.

- Der Zeitpunkt für die notwendige Lüftungsintervention kann nach den vorgestellten Schätzmethode ermittelt werden.
- Auch wenn keine zusätzliche Lüftungsintervention angezeigt werden sollte, sind zusätzliche Lüftungsmaßnahmen sinnvoll. Es ist anzustreben, möglichst in einem Bereich von weniger als 1 400 ppm CO₂ zu verbleiben, um eine „niedrige Raumluftqualität“ im Sinne von DIN EN 13779 [7] zu vermeiden.
- Die Möglichkeit zur Abschätzung der notwendigen Lüftungsintervention nach der hier beschriebenen Methode findet man im Internet¹⁾.

8 Zusammenfassung

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. Voraussetzung dazu ist eine gute Belüftung des Raumes. Vielfach wird aber gerade in Schulen die notwendige Lüftung vernachlässigt. Zahlreiche Studien zeigen, dass in Klassenräumen häufig Konzentrationen von mehr als 4 000 ppm CO₂ anzutreffen sind. Dies sorgt nicht nur für mangelndes Wohlbefinden, auch die Leistungsfähigkeit der Schülerinnen, Schüler und Lehrkräfte wird dadurch beeinträchtigt.

Ziel dieser Arbeit ist es, eine Methode zur einfachen Abschätzung der in Klassenräumen auftretenden CO₂-Konzentrationen bei fehlender Lüftung sowie Zeitpunkt und Art notwendiger Lüftungsmaßnahmen vorzustellen. Das Modell basiert auf empirisch ermittelten Daten in Klassenräumen und gewährleistet eine einfache Handhabung durch Laien. Grundlage der Schätzung sind Messwerte in Unterrichtssituationen ohne Lüftung und unter verschiedenen natürlichen Lüftungsverhältnissen im Primar- und Sekundärbereich. Die Schätzmethode orientieren sich dabei an den 95-Perzentilwerten der ermittelten Daten für die Situation ohne Lüftung und mit Kipp Lüftung. Die Schätzmethode 1 basiert dabei auf dem ermittelten CO₂-Anstieg in Räumen in ppm/Raumnutzer, die Schätzmethode 2 auf der CO₂-Anreicherung im Raum pro Person in Liter. Zur Abschätzung genügt bei Methode 1 die Angabe der Zahl der Raumnutzer, bei Methode 2 ist zusätzlich das Raumvolumen erforderlich. Methode 1 führt zu einem früheren Lüftungszeitpunkt als Methode 2.

Vergleichsrechnungen mit Modellrechnern zeigen, dass die Schätzmethode anhand der empirisch ermittelten Daten als Instrument zur Abschätzung der Endkonzentration von CO₂ in Unterrichtssituationen und notwendiger Lüftungsinterventionen durchaus geeignet erscheinen.

Die Orientierung an den 95-Perzentilwerten der CO₂-Anstiege für die Unterrichtssituationen ohne Lüftung und mit Kipp Lüftung bei der Abschätzung des notwendigen Lüftungszeitpunktes sollte in der überwiegenden Zahl der Fälle sicherstellen, dass die Endkonzentration in der realen Unterrichtssituation deutlich unter 2 000 ppm verbleibt. Auf der Basis der Ergebnisse wird ein Lüftungskonzept in Form einer Kombination aus Stoß- und Kipp Lüftung vorgeschlagen.

¹⁾ www.unfallkasse-nrw.de, Webcode S0294

Literatur

- [1] Arbeitsstättenverordnung vom 12. August 2004. BGBl. I (2004) Nr. 44, S. 2179-2189; zul. geänd. BGBl. I (2010) Nr. 38, S. 960-967.
- [2] *Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.*: Gesunde Luft in Schulen, Teil 2 – Beurteilung der CO₂-Konzentration und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. Hrsg.: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf 2014. www.unfallkasse-nrw.de/medien/schriftenreihe-praevention-in-nrw.de
- [3] *Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.*: Beurteilung der CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 6, S. 235-244.
- [4] Klasse(n) – Räume für Schulen – Empfehlungen für gesundheits- und lernfördernde Klassenzimmer (BG/GUV-I-Si 8094). Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. Berlin 2012.
- [5] Technische Regeln für Arbeitsstätten: Lüftung (ASR A.3.6) (Ausg. 1/2012). GMBL (2012), S. 92-97; geänd. GMBL (2013) Nr. 16, S. 359-360.
- [6] 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.
- [7] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme. Berlin: Beuth 2007.
- [8] *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, aktualisiert 2005.
- [9] *Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.*: Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 64 (2003), S. 447-456.
- [10] 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. www.raumluft.org/rlt-anlagen/co2-rechner/
- [11] VDI 6040 Blatt 2 (Entwurf): Raumlufttechnik Schulen – Ausführungshinweise. Berlin: Beuth 2014.
- [12] *Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Benitez, S.; Breuer D.; Hahn, J.-U.*: Gesunde Luft in Schulen, Teil 1 – VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen. Bericht. Hrsg.: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf 2013. www.unfallkasse-nrw.de/medien/schriftenreihe-praevention-in-nrw.de
- [13] *Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Benitez, S.; Hahn, J.-U.*: VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen unter unterschiedlichen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 3, S. 85-94.
- [14] Leitfaden für die Innenraumluftthygiene in Schulen. Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Hrsg.: Umweltbundesamt. Berlin 2008.