

# Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen

H.-D. Neumann, M. Buxtrup

**Zusammenfassung** In Nordrhein-Westfalen wurden in 363 Klassenräumen von 111 Schulen verschiedener Schulformen CO<sub>2</sub>- und Raumklimamessungen durchgeführt. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration überschritt während der Unterrichtsstunde bei geschlossenen Fenstern in annähernd 50 % der Fälle den Wert von 2 000 ppm, bei dem der vom Umweltbundesamt als „hygienisch inakzeptabel“ bezeichnete Bereich beginnt. Unterschritten wurde der Wert am häufigsten im Primärbereich. Durch eine gründliche Stoßlüftung in den Pausen lässt sich die Raumluftqualität deutlich verbessern. Bei darauf folgender Kipplüftung wird die CO<sub>2</sub>-Endkonzentration von 1 000 ppm dann im Mittel nicht mehr wesentlich überschritten. Trotz der Kipplüftung fiel das Temperaturniveau selbst in den Wintermonaten nur selten unter 20 °C, sodass das Raumklima auch in dieser Situation nicht als zu kühl empfunden werden sollte. Ferner wurden für die ungelüftete Unterrichtssituation die schulformspezifischen CO<sub>2</sub>-Anstiege pro Person ermittelt. Durch Multiplikation der ermittelten 95-Perzentilwerte mit der Zahl der Raumnutzer ergibt sich eine einfache Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Unterricht.

## Assessment of the CO<sub>2</sub> concentration in classrooms

**Abstract** CO<sub>2</sub> and room climate measurements were performed in 363 classrooms of 111 schools of different types in North-Rhine/Westphalia. During lessons with closed windows, the CO<sub>2</sub> concentration in almost 50% of cases exceeded the value of 2,000 ppm at which the range considered „hygienically unacceptable“ by the German Federal Environment Agency starts. The value was complied with most frequently in primary schools. With brief and thorough airing in the breaks it is possible to improve room air quality appreciably. During subsequent continuous ventilation with the windows tilted open, the final CO<sub>2</sub> concentration of 1,000 ppm is no longer seriously exceeded on average. Despite ventilation via tilted windows, the temperature seldom dropped below 20 °C even in the winter months, so the room climate ought not to be considered chilly even under these conditions. Furthermore, the CO<sub>2</sub> increase per person was calculated during lessons in unventilated rooms for different school types. Multiplying the calculated 95th percentiles with the number of room users yields a simple estimate of the CO<sub>2</sub> concentration during lessons.

## 1 Einleitung

Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ist unter anderem ein Abbauprodukt der menschlichen Atmung. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Innenluft gilt daher als allgemeiner Indikator für die Raumluftqualität und als Leitparameter zur Beurteilung von Lüftungssituationen [1]. Klassenräume sind wegen der hohen Zahl der Nutzerinnen und Nutzer und deren regelmäßigen langen Aufenthaltszeiten unter diesem Aspekt besonders kritisch zu betrachten. Eine gute Raumluftqualität ist aber eine wichtige Voraussetzung für gutes Lernen und Lehren, wie verschiedene Studien zeigen. So bemerkte schon *Max von Pettenkofer* im Jahr 1858 [2]: „*Ich bin auf das*

*Lebendigste überzeugt, dass wir die Gesundheit unserer Jugend wesentlich stärken würden, wenn wir in den Schulhäusern, in denen sie durchschnittlich fast den fünften Teil des Tages verbringt, die Luft stets so gut und rein erhalten würden, dass ihr Kohlensäuregehalt nie über 1 Promille anwachsen könnte*“.

Um einen statistisch abgesicherten Überblick über Innenraumbelastungen in Schulen unter verschiedenen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen zu gewinnen, haben die Unfallkasse Nordrhein-Westfalen und ihre Vorgängerinstitutionen im Rahmen des Projektes „Gesunde Luft in Schulen“ umfangreiche Messungen unter anderem der CO<sub>2</sub>-Konzentration in zufällig ausgewählten Klassenräumen durchgeführt [3 bis 6]. Die Messungen erfolgten im Leerzustand des Raumes und unter verschiedenen Lüftungsbedingungen bei Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern. Mithilfe eines standardisierten Fragebogens wurden darüber hinaus Daten wie z. B. über die Belegungsstärke des Raumes, Schuljahrgang, Schulform, Baujahr, Lage sowie Bau- und Ausstattungsmerkmale der Schule dokumentiert.

## 2 Methode

Die Messungen erfolgten unter Ausgleichsbedingungen in Anlehnung an die Richtlinie VDI 4300 Blatt 9 [7]. Vor der Messung wurden die Klassenräume intensiv mindestens 15 min lang gelüftet. Anschließend wurden alle Türen und Fenster für einen Zeitraum von mindestens acht Stunden, in der Regel über Nacht, geschlossen. Die Messung begann im Anschluss bei weiterhin geschlossenen Türen und Fenstern. Die Klassenräume waren dabei nicht belegt. Nach Betreten des Klassenraumes durch die Schülerinnen und Schüler erfolgte zunächst eine Messung im ungelüfteten Zustand des Raumes während des Unterrichts. Nach Stoßlüftung des Raumes über geöffnete Fenster und Türen wurde die Messung in der nächsten Unterrichtsstunde mit in Kippstellung geöffneten Fenstern fortgesetzt. Die Zahl der geöffneten Fenster war mit den Lehrkräften sowie Schülerinnen und Schülern abgestimmt, um den Unterricht möglichst nicht durch ein unbehagliches Raumklima zu stören. In der Regel waren zumindest die Fenster in der Nähe der Raumstirnseiten während der Unterrichtsstunde geöffnet.

Die Messungen erfolgten in Räumen für den allgemeinbildenden Unterricht, zu denen keine Beschwerden über eine unzureichende Luftqualität vorlagen. Der Messort lag in der Regel auf der Mittelachse des Klassenraumes in Höhe der letzten Tischreihe (siehe Bild in [5]). Der Abstand zu den Wänden betrug jeweils mindestens 1,5 m, die Höhe des Messpunktes 1,2 m vom Fußboden in Kopfhöhe der Schüler. Zu Beginn der Kampagne (90 Räume) wurden die CO<sub>2</sub>-Messungen mit einem Infrarot-Einstrahl-Spektrometer Miran 1B der Fa. Foxboro durchgeführt. Der Analysator ist für die Erfassung aller infrarotaktiven Gase geeignet, die in einem Wellenlängenbereich zwischen 4,5 und 14,5 µm absorbieren. Das Gerät wurde im Labor des Institutes für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 500, 1 000, 3 000 und

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

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Schulen, Räume und Randbedingungen; MW: Mittelwert.

Schulform	Anzahl der Schulen	Anzahl der Räume	Raumgrößen in m <sup>3</sup>			Personen pro Raum			Luftraum pro Person in m <sup>3</sup>		
			MW	Median	95-Perzentil	MW	Median	95-Perzentil	MW	Median	95-Perzentil
Grundschulen	41	117	215	210	277	24	25	30	9,5	8,6	15,9
Hauptschulen	12	36	207	206	247	22	22	27	10,0	9,0	14,2
Realschulen	13	55	218	206	300	29	29	35	7,6	7,1	10,5
Gymnasien	19	68	185	188	241	26	27	33	7,7	6,8	13,4
Gesamtschulen	8	24	198	200	263	24	25	32	8,9	7,9	15,6
Berufskollegs	9	32	220	210	328	18	19	26	13,6	11,0	27,4
Sonderschulen	9	31	172	177	215	13	13	19	14,8	13,4	25,3
<b>Alle Schulen</b>	<b>111</b>	<b>363</b>	<b>205</b>	<b>203</b>	<b>277</b>	<b>23</b>	<b>25</b>	<b>32</b>	<b>9,7</b>	<b>8,4</b>	<b>17,7</b>

5 000 ppm kalibriert. Der jeweilige Nullpunkt wurde vor der Messung mit synthetischer Luft eingestellt. Die Genauigkeit bei spezifischer Kalibrierung ist mit ± 5 % angegeben.

Um den Unterricht nicht zu stören, wurde wegen der geringeren Geräuschemission danach das Gasmessgerät X-am 7000 der Fa. Dräger eingesetzt. Das Gerät ist mit einem Infrarot-Sensor für CO<sub>2</sub> Typ Smart IR CO<sub>2</sub>-68 10 590 ausgestattet. Dieser ist werkseitig kalibriert und wird jährlich überprüft. Vor jeder Messung wurde die Funktion des Sensors in der Außenluft überprüft. Der CO<sub>2</sub>-Messbereich liegt zwischen 0 und 5 Vol.-% (0 bis 50 000 ppm) mit einer Auflösung von 0,01 Vol.-% (100 ppm). Der Linearitätsfehler beträgt ± 5 % des Messwertes, die Langzeitdrift ± 40 ppm/Monat.

Bei den Messungen der raumklimatischen Verhältnisse und zur Berechnung des mittleren vorausgesagten Votums (PMV-Index) [8] kam der „Thermal Comfort Data Logger“ Innova 1221 der Fa. Luma Sense Technologies zum Einsatz. Gemessen wurde zu folgenden Zeitpunkten:

1. Messung vor dem Eintreten der Schülerinnen und Schüler ohne Lüftung,
2. Messung zum Ende der ersten Schulstunde ohne Lüftung vor Beginn der Stoßlüftung,
3. Messung zu Beginn der zweiten Schulstunde nach Stoßlüftung bei Fenstern in Kippstellung,
4. Messung zum Ende der zweiten Schulstunde bei Fenstern in Kippstellung.

Zusätzlich wurden mithilfe eines standardisierten Begleitbogens die Randbedingungen der Messung beschrieben. Erfasst wurden u. a. folgende Parameter:

- Schulform,
- Schuljahr,
- Raumgröße,
- Anzahl der Raumnutzer,
- Gebäudeart (massiv, Pavillon oder Ständerbauweise),
- Baujahr (vor 1950, 1950 bis 1985, nach 1985, in den letzten zwei Jahren),
- Renovierung in den letzten zwei Jahren,
- Lage der Schule,
- Lüftungsöffnungen bei Stoßlüftung,
- Lüftungsöffnungen bei Kipp Lüftung.

Zur Ableitung von Perzentil- und Mittelwerten der CO<sub>2</sub>-Konzentration wurden die Messdaten mit dem Programm Microsoft Office Excel statistisch ausgewertet. Bestimmt wurden die arithmetischen Mittelwerte, Mediane und 95-Perzentilwerte.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Untersuchte Räume und Randbedingungen

Die CO<sub>2</sub>- und Raumklimamessungen fanden in 363 Räumen von 111 Schulen statt. Die Verteilung der Räume auf die Schulformen, die Raumgrößen und Raumnutzerzahlen sind **Tabelle 1** zu entnehmen. In zwei Räumen konnte nur die Grundbelastung ermittelt werden. Die Raumgröße betrug im Mittel 205 m<sup>3</sup>. Die kleinsten Raumvolumina wurden in Sonderschulen angetroffen, gefolgt von den Gymnasien, die größten in Berufskollegs.

Im Mittel befanden sich 25 Personen im Raum, wobei in den Sonderschulen mit Abstand die geringsten Schülerzahlen angetroffen wurden. Die meisten Schülerinnen und Schüler befanden sich in Realschulklassen, gefolgt von Gymnasialklassen. Das dadurch ermittelte Raumvolumen pro Nutzer betrug im Mittel 9,7 m<sup>3</sup>. Die geringsten Raumvolumina pro Nutzer waren in Realschulen und Gymnasien, die größten in Sonderschulen zu verzeichnen (Tabelle 1). Unter dem Aspekt der Baujahre sind die Raumvolumina, aber auch die Zahl der Raumnutzer in Gebäuden, die in den letzten zwei Jahren errichtet wurden, etwas geringer als in den Jahren zuvor. Die operativen Raumtemperaturen lagen in der Unterrichtssituation ohne Lüftung zwischen 19,4 und 28,5 °C in den Wintermonaten sowie zwischen 20,2 und 31,1 °C in den Sommermonaten. In der Unterrichtssituation mit Kipp Lüftung lagen sie zwischen 18,0 und 26,5 °C in den Wintermonaten sowie zwischen 19,8 und 30,1 °C in den Sommermonaten. Die Medianwerte lagen in allen Intervallen über 21 °C. Eine ausführlichere Darstellung der raumklimatischen Verhältnisse folgt in einem späteren Heft dieser Zeitschrift.

#### 3.2 Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Messungen

Die **Bilder 1** und **2** zeigen die Mediane und 95-Perzentile zu allen oben genannten Messzeitpunkten verteilt auf die Schulformen. Die Grundbelastung ist dabei als Median mit 600 ppm in allen Schulformen gleich. Die höchsten Anstiege in der Unterrichtsstunde ohne Lüftung ergaben sich entsprechend dem zur Verfügung stehenden Luftraum in Realschulen und Gymnasien, die geringsten in den Sonderschulen. Als 95-Perzentil war die Konzentration am Ende der Schulstunde in den Gymnasien mit 5 320 ppm am höchsten und in den Sonderschulen mit 2 500 ppm am niedrigsten. Der Maximalwert wurde mit einer Konzentration von 3 900 ppm in einer Realschule gemessen. Im Mittel stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration in allen Schulformen auf etwa 2 000 ppm. Unter dem Durchschnitt lagen die Sonderschulen, Grund-

schulen, Hauptschulen und Berufskollegs. In der Unterrichtsstunde mit Kipplüftung stieg die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Mittel auf etwa 1 000 ppm.

**Bild 5** zeigt die mittleren CO<sub>2</sub>-Anstiege pro Raumnutzer in der Unterrichtsstunde ohne Lüftung, die aus den jeweils in den einzelnen Unterrichtsstunden gemessenen CO<sub>2</sub>-Anstiegen berechnet wurden. Gemittelt über alle Schulformen liegt dieser Anstieg bei 58 ppm/Raumnutzer. Über dem Durchschnitt liegen die Werts in Realschulen, Gymnasien und Gesamtschulen. Deutlich unter dem Durchschnitt liegen die Werte in Grundschulen.

Die CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Stoßlüftung über Fenster und Türen in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung ist **Bild 4** zu entnehmen. Es zeigt sich eine leicht ansteigende Tendenz in Abhängigkeit von der geöffneten Fensterfläche, jedoch keine lineare Abhängigkeit. Grund dafür sind weitere Faktoren wie die Differenz zwischen der Außen- und Innentemperatur, die Windrichtung und Windstärke sowie die Möglichkeit, die Klassenraurtür in der Fünf-Minuten-Pause zu öffnen. Teilweise war eine effektive Stoßlüftung nicht möglich, da die Fenster wegen technischer Defekte nicht ausreichend geöffnet werden konnten. So betrug die geringste Lüftungsöffnung bei Stoßlüftung 0,26 m<sup>2</sup>, was dann auch der Situation bei Kipplüftung entsprach. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion bei solch geringen Fensteröffnungen liegt deutlich unter 500 ppm. Die größte Lüftungsöffnung wurde mit 12,33 m<sup>2</sup> im Sommer in einem Gymnasium realisiert. Es handelte sich um einen Klassenraum mit dreiseitiger Fensterfläche. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion betrug etwa 2 100 ppm. Der höchste Wert wurde mit etwa 2 900 ppm in einem Raum mit einer geöffneten Fensterfläche von 3,7 m<sup>2</sup> realisiert. Die größten Lüftungsöffnungen wurden in den Realschulen, die kleinsten in den Sonderschulen und Grundschulen angetroffen. In weiterführenden Schulen war die geöffnete Fläche im Mittel mehr als 0,5 m<sup>2</sup> größer.

Bei Auswertung der Daten unter Berücksichtigung der Windrichtung ergab sich eine leicht bessere Stoßlüftungssituation, wenn die Fenster auf der dem Wind zugewandten Seite lagen. Wegen der Stoßlüftung über Türen und Fenster ist der Unterschied zwischen der windzugewand-

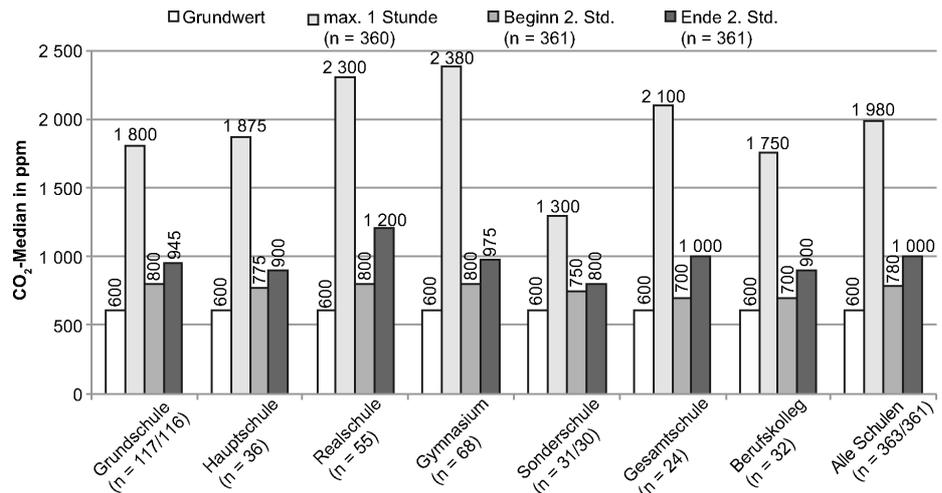


Bild 1. CO<sub>2</sub>-Mediane für alle Situationen in Abhängigkeit von der Schulform.

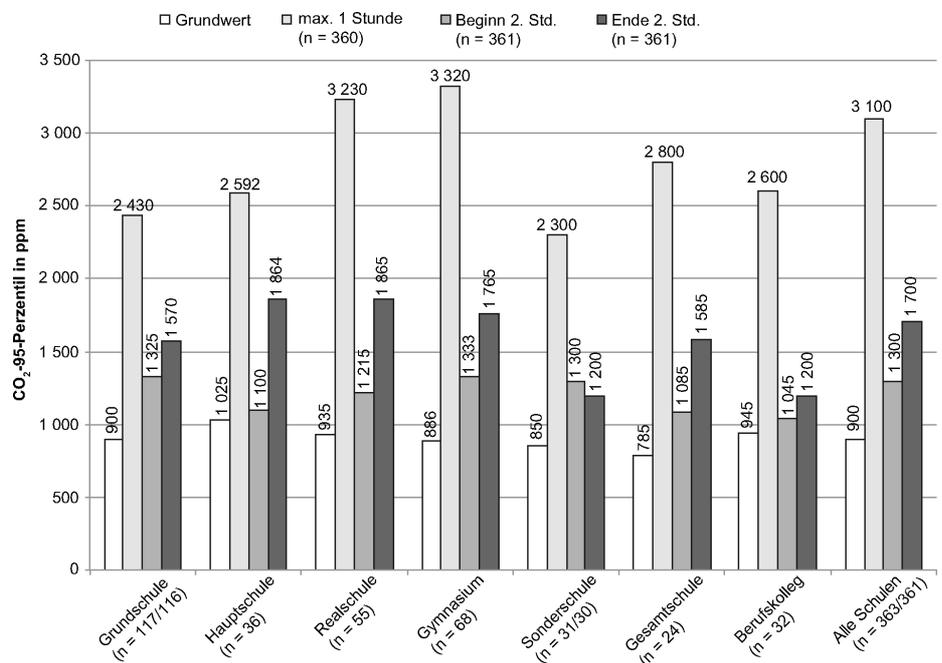


Bild 2. CO<sub>2</sub>-95-Perzentil für alle Situationen in Abhängigkeit von der Schulform.

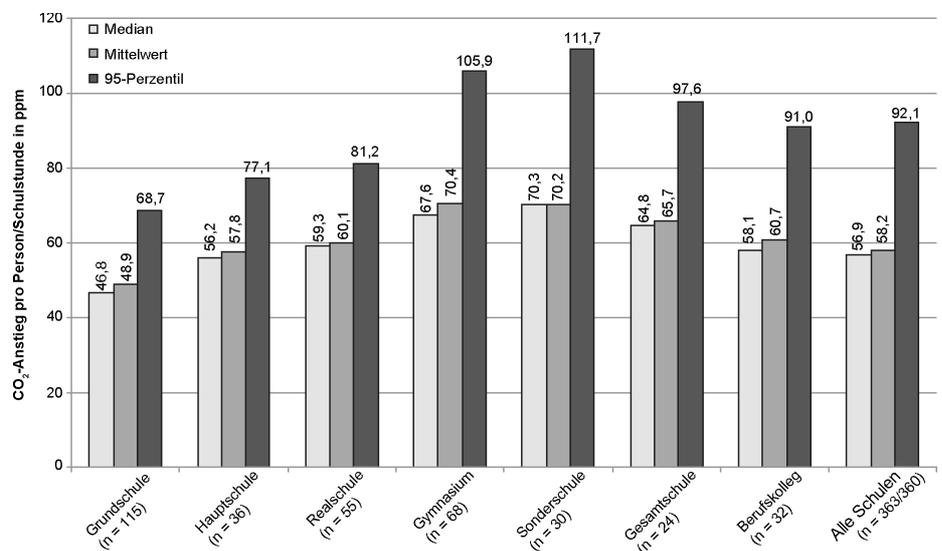


Bild 3. CO<sub>2</sub>-Anstieg pro Person im ungelüfteten Raum in Abhängigkeit von der Schulform.

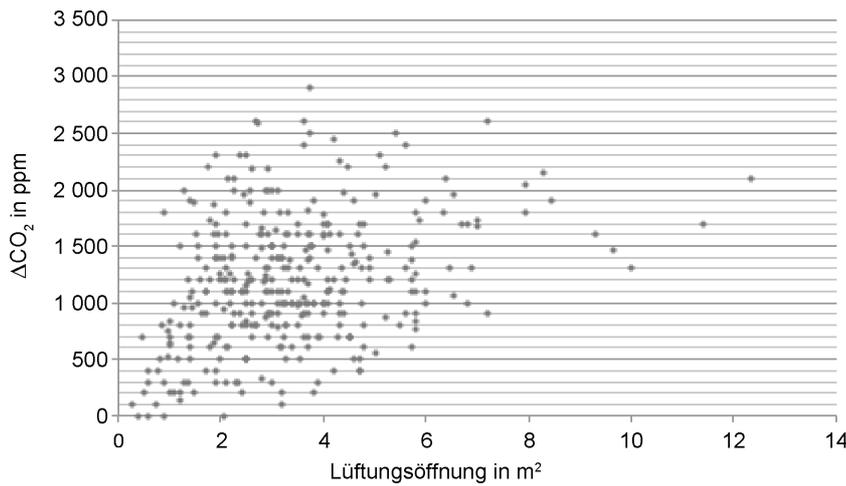


Bild 4. CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Stoßlüftung in Abhängigkeit von der Größe der Lüftungsöffnung.

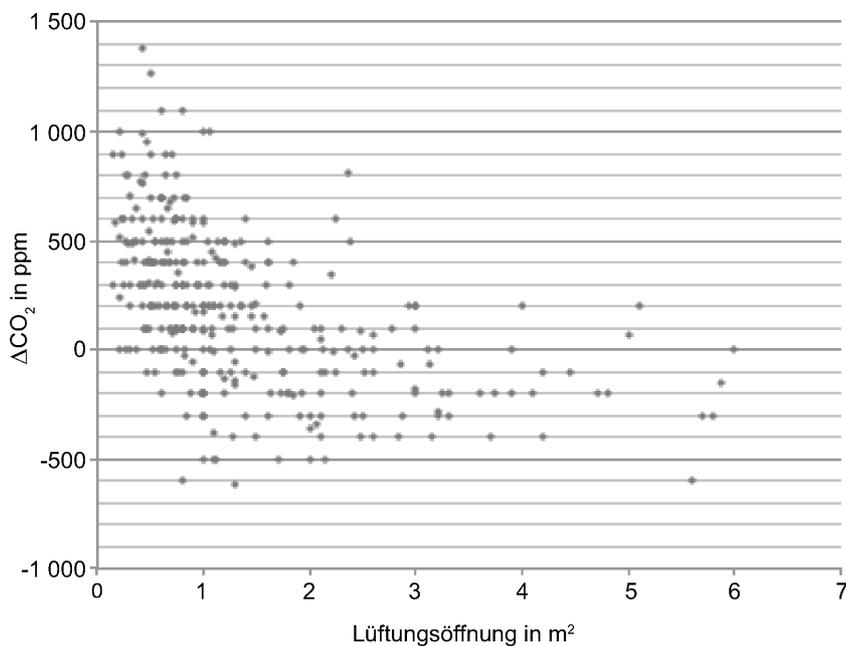


Bild 5. CO<sub>2</sub>-Anstieg bei Kipplüftung unter Berücksichtigung der Lüftungsöffnung.

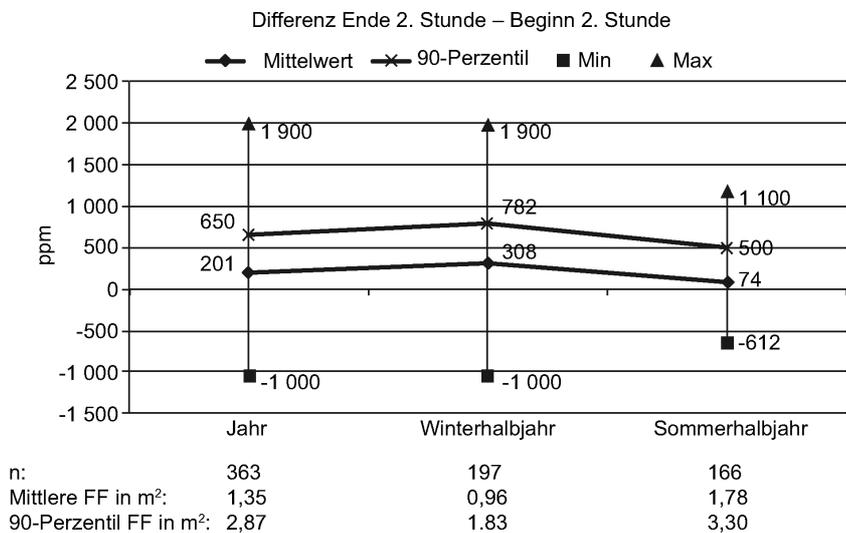


Bild 6. CO<sub>2</sub>-Anstieg während der Unterrichtsstunde mit Kipplüftung bezogen auf das Winter- und Sommerhalbjahr mit Angabe der im Mittel geöffneten Fensterfläche, FF: Fensterfläche.

ten und windabgewandten Seite jedoch nicht gravierend.

In Bild 5 ist der CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Unterrichtsstunde mit Kipplüftung dargestellt. Auch hier ist aus den bereits bei der Stoßlüftung genannten Gründen keine einheitliche lineare Tendenz erkennbar. In den meisten Situationen ließ sich eine Fensteröffnung bis 2 m<sup>2</sup> realisieren. Die geringste Öffnung betrug 0,14 m<sup>2</sup>, die größte 6 m<sup>2</sup>. Zum Teil sind die Möglichkeiten der Fensteröffnung auch hier technisch bedingt. Dennoch zeigt sich hier auch bei kleineren Lüftungsöffnungen in einigen Fällen eine Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration. Im Gegensatz zur Stoßlüftung ist die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit rund 300 ppm auf der windzugewandten Seite höher als die auf der windabgewandten Seite mit 100 ppm.

Der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Stunde mit Kipplüftung verteilt auf die Schulformen beträgt im Durchschnitt 200 ppm. Die höchsten Anstiege sind in den Realschulen zu verzeichnen, die geringsten in den Sonderschulen. Im arithmetischen Mittel lagen die Berufskollegs, Gymnasien und Grundschulen unter dem Durchschnitt. In den Berufskollegs und Gymnasien waren die geöffneten Fensterflächen im Mittel auch am größten. In den Sonderschulen lag die geöffnete Fensterfläche zwar unter dem Durchschnitt, dafür waren hier aber die Schülerzahlen am geringsten.

Bild 6 zeigt die CO<sub>2</sub>-Anstiege während der Stunde mit Kipplüftung bezogen auf das Winterhalbjahr (Monate November bis April) und das Sommerhalbjahr (Monate Mai bis Oktober) unter Berücksichtigung der geöffneten Fensterfläche. Im Winterhalbjahr war der mittlere Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen mit 308 ppm deutlich höher als im Sommerhalbjahr (74 ppm), wobei im Sommerhalbjahr die geöffnete Fensterfläche mit 1,78 m<sup>2</sup> auch annähernd doppelt so hoch war wie die im Winterhalbjahr (0,96 m<sup>2</sup>).

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Raumgrößen und Raumnutzerzahlen (siehe Tabelle 1) wurden die Anstiege der CO<sub>2</sub>-Konzentration pro Raumnutzer in der Stunde mit Schülerinnen und Schülern ohne Lüftung in Abhängigkeit von den Baujahren, dem Renovierungszustand und der Bauweise ausgewertet. Unter Berücksichtigung der Baujahre ist ein leicht höherer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Gebäuden zu verzeichnen, die nach 1985 errichtet wurden, was auf eine dichtere Gebäudehülle schließen lässt (Bild 7).

Auch in renovierten Klassenräumen ist der CO<sub>2</sub>-Anstieg leicht höher als in nicht renovierten, wenngleich die Frage nach dem Renovierungszustand sich nicht auf einen Austausch der Fenster oder eine durchgeführte Fassa-

dendämmung bezog. Rückschlüsse auf eine eventuell größere Dichtheit der Gebäudehülle bei renovierten Gebäuden sind somit nur eingeschränkt möglich. Kaum Unterschiede zeigen sich auch beim Vergleich der Gebäudebauweisen. Die Vermutung, dass Gebäude in Massivbauweise dichter sind als die in Pavillon- oder Ständerbauweise, lässt sich somit nicht bestätigen.

Bei Auswertung der Lage der Schule zeigte sich, dass die Grundbelastung in allen Lagen etwa gleich ist. Auch bei der CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Stoßlüftung sind keine gravierenden Unterschiede messbar. An viel befahrenen Straßen zeigen sich die geringsten Anstiege der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei Kipplüftung, die höchsten dagegen im ländlichen Bereich bzw. am Stadtrand, wengleich die Differenzen nicht erheblich sind. Die geöffnete Fensterfläche bei Kipplüftung ist in allen Lagen im Mittel etwa gleich. Auch bei dieser Betrachtung scheinen die Zahl und Aktivität der Raumnutzer, die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen sowie die Windstärke und -richtung die maßgebenden Faktoren zu sein.

Um eine gute Raumluftqualität in Klassenräumen zwangsläufig zu realisieren, kommen nur technische Maßnahmen in Betracht. In einer Passivhausschule war bei eingeschalteter Lüftungsanlage über beide Schulstunden und zwischenzeitlicher Stoßlüftung in beiden Stunden nur ein geringer Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu verzeichnen (Bild 8).

## 4 Diskussion

### 4.1 Wirkungen erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenräumen

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Innenraum hängt im Wesentlichen von der Anzahl der Personen im Innenraum, deren Aktivität, dem Raumvolumen, der Aufenthaltsdauer und dem Luftwechsel bzw. Außenluftvolumenstrom ab [1]. Wengleich der Arbeitsplatzgrenzwert [9] in Höhe von 5 000 ppm als Achtstundenmittelwert im Regelfall nicht erreicht wird, so belegen doch zahlreiche Studien, dass die in Schulen bei mangelhafter Lüftung auftretenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenräumen zahlreiche nachteilige Wirkungen hervorrufen können. Folgende Wirkungen werden beschrieben:

- Einbußen an Komfort und Wohlbefinden sowie eine signifikant geringere Fehlererkennung beim Lesen eines Textes mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad insbesondere ab einem Konzentrationsbereich von 3 000 ppm im Vergleich zu einer Konzentration von 600 ppm [10],
- altersjustierte Abnahme der mentalen Leistung mit dem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration und deutliche Zunahme von Symptomen des Zentralen Nervensystems, wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel und Konzentrationsschwäche, bei steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration bis 3 827 ppm [11],
- Steigerung der Aufmerksamkeitsleistung, intensivere Kommunikation und reduzierter Geräuschpegel verknüpft

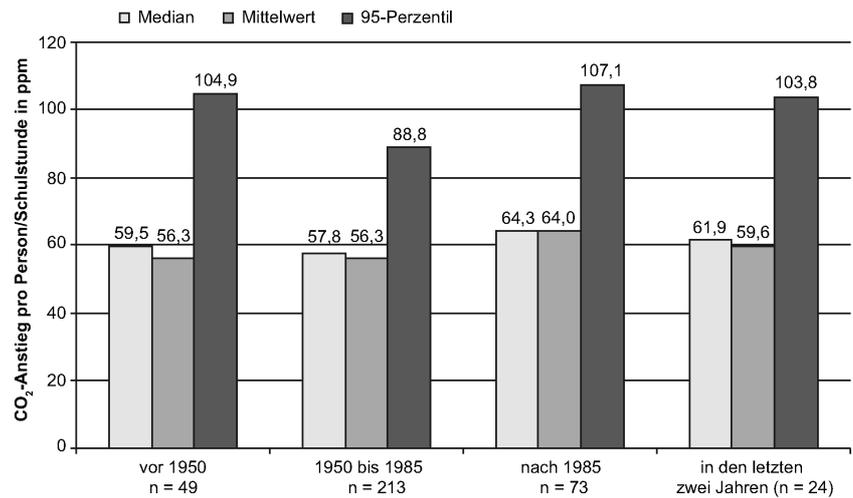


Bild 7. CO<sub>2</sub>-Anstiege pro Person und Schulstunde in Abhängigkeit vom Baujahr der Schule.

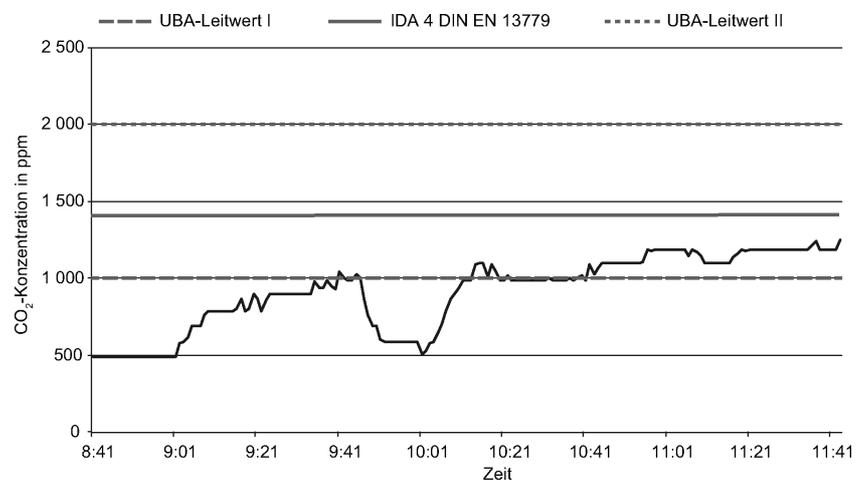


Bild 8. CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einer vollklimatisierten Grundschule in Passivbauweise mit eingeschalteter Lüftung und Stoßlüftung in der Pause; IDA 4: Indoor Air, niedrige Raumluftqualität.

mit einer Senkung der Beanspruchung in Form der gemessenen Herzfrequenz [12],

- Verbesserung der Leistungsfähigkeit um 8 bis 14 % bezogen auf die Schnelligkeit und Fehlerfreiheit bei Verdoppelung der Luftzufuhr und somit Senkung der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration auf unter 1 000 ppm [13].
- bessere physische Verfassung und geringere Prävalenz akuter Erkrankungen von Schülerinnen und Schülern in einer Klasse mit einer Frischluftzufuhr von 40 m<sup>3</sup>/h und konstant geringer CO<sub>2</sub>-Konzentration im Vergleich zu einer Klasse mit einer Frischluftzufuhr von 20 m<sup>3</sup>/h, beobachtet über ein Schuljahr [14],
- signifikante Erhöhung der relativen Abwesenheitsrate von Schülerinnen und Schülern zwischen 10 und 20 % pro 1 000 ppm Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration [15],
- Zunahme von unzufriedenen Raumnutzern mit Steigerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration, ab 2 000 ppm etwa 36 % unzufriedene Raumnutzer [16].

### 4.2 Diskussion der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenräumen

Untersuchungen zur CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen wurden auch in anderen Bundesländern durchgeführt [17 bis 20]. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Sie zeigen, dass auch dort die vielfältigen Einflussfaktoren in

Tabelle 2. CO<sub>2</sub>-Studien in Schulen anderer Bundesländer; ar. MW: arithmetischer Mittelwert.

Bundesland	Zahl der Klassenräume	Randbedingungen	CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in ppm				
			min	max	ar. MW	Median	95-Perzentil
Thüringen [1; 17]	251	Unterrichtsstunde ungelüftet	355	4998		1654	4996
Bayern [1; 18]	90	Nutzungsbedingungen	367	5359		1412	
	75	Nutzungsbedingungen	314	2742		728	
Berlin [1; 19]	39	Nutzungsbedingungen	300	6000		1600	
Baden-Württemberg [1]	19	Nutzungsbedingungen	431	4380		1459	
	18	Nutzungsbedingungen	304	3554		820	
Niedersachsen [1; 20]	36	Nutzungsbedingungen	350	5580	1 316	1510	2521
	22	Nutzungsbedingungen	339	1270	1 652	581	1216

Klassenräumen zu einer großen Spannweite der CO<sub>2</sub>-Konzentration führen. Auch die Raumvolumina und Schülerzahlen waren dort schulformspezifisch unterschiedlich. In Nordrhein-Westfalen (NRW) wurden geringe Raumvolumina insbesondere in Sonderschulen und in Gymnasien festgestellt, wobei die Zahl der Raumnutzerinnen und -nutzer in Sonderschulen deutlich unterdurchschnittlich, in Gymnasien aber überdurchschnittlich hoch war. Im Mittel wurde ein Raumvolumen von 9,7 m<sup>3</sup> ermittelt. Bei einer Höhe von 3 m ergibt sich somit eine mittlere Grundfläche von 3,2 m<sup>2</sup> pro Raumnutzerin bzw. Raumnutzer. Das Raumvolumen ist somit etwas höher als in der niedersächsischen Studie mit einem dort gemittelten Raumvolumen von 8,5 m<sup>3</sup>. Es übersteigt auch die Mindestanforderung aus der Norm DIN EN 15251 [21], die mit einer Grundfläche von 2 m<sup>2</sup> und somit etwa 6 m<sup>3</sup> pro Person angegeben ist.

Die Ergebnisse unter dem Aspekt der Schulform zeigen, dass in Grundschulen mit dem geringsten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu rechnen ist. Hier sind auch die Atemminutenvolumina der Raumnutzer am niedrigsten [22]. Am höchsten sind die Anstiege in den Gymnasien. Hier sind die Atemminutenvolumina und die Anzahl der Schülerinnen und Schüler hoch sowie die Klassenraumvolumina niedrig.

Viele Faktoren haben Einfluss auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen. So wurde z. B. der Einfluss der geöffneten Fensterfläche bei Stoß- und Kipplüftung untersucht. Wie festgestellt wurde, ist die Fensteröffnung nicht alleine maßgebend für die Senkung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bei Stoßlüftung bzw. den Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der Phase mit Kipplüftung. So war zum Beispiel der Luftaustausch auf der dem Wind abgewandten Seite des Gebäudes vermutlich durch den dort entstehenden Unterdruck besser als auf der dem Wind zugewandten Seite. Ferner streute die Größe der zu Lüftungszwecken geöffneten Fensterflächen erheblich. Insbesondere in Grund- und Sonderschulen waren diese Flächen geringer als in anderen Schulformen. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auf den Fensterbänken häufig Schulmaterialien, Bastelmaterialien oder Pflanzen abgestellt sind.

Die Kipplüftung trägt somit durchaus zu einer Verbesserung der Luftqualität in den Klassenräumen bei, wenngleich der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Unterrichtsphase mit Kipplüftung im Winter, wie in den Studien der anderen Bundesländer, höher ausfiel als im Sommer. Im Sommer waren die geöffneten Fensterflächen jedoch auch annähernd dop-

pelt so groß wie im Winter. Die dauerhafte Kipplüftung in Kombination mit Stoßlüftung ist in den Sommermonaten somit eine geeignete Lüftungsmaßnahme. Da die gemessenen operativen Raumtemperaturen und berechneten PMV-Indizes für die Wintermonate zeigen, dass in annähernd 90 % der Fälle das Raumklima in Klassenräumen auch bei Kipplüftung nicht als zu kühl empfunden werden sollte, kann man die Kipplüftung unter Raumklimaaspekten auch in den Wintermonaten durchaus als praktikables Element der Raumklimaverbesserung ansehen.

Auch unter dem Aspekt des Alters der Schulen ist tendenziell ein CO<sub>2</sub>-Anstieg in der Stunde ohne Lüftung erkennbar. Hier waren die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Schulen, die nach 1985 erbaut wurden, leicht höher gegenüber Schulen aus den Jahren zuvor. Ferner war die CO<sub>2</sub>-Konzentration in renovierten Schulen leicht höher als in nicht renovierten Schulen. Da hinsichtlich der Baujahre und des Renovierungszustandes das Alter der Fenster oder sonstige Fassadendichtungsmaßnahmen nicht abgefragt wurden, ist die festgestellte Tendenz allerdings nur bedingt aussagekräftig. Es ist davon auszugehen, dass auch in Schulen aus Baujahren vor 1985 die Fenster bereits ausgetauscht waren, sodass die Unterschiede hier nicht erheblich ausfallen.

In einer niedersächsischen Studie [23] wurde das Alter der Fenster mit einem Alter von mehr oder weniger als fünf Jahren abgefragt. Die Ergebnisse waren allerdings nicht plausibel, da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Räumen mit älteren Fenstern höher ausfiel als in Räumen mit neueren Fenstern. Dies ist wohl auf die bereits genannten vielfältigen Einflussfaktoren zurückzuführen.

Hinsichtlich der Lage der Schule waren sowohl bei der Grundbelastung als auch in der gelüfteten Situation keine gravierenden Unterschiede erkennbar. Der Unterschied zwischen städtischen Bereichen (ca. 400 ppm) und ländlichen (ca. 350 ppm) [1] ist in den Messwerten nicht erkennbar. Auch in diesem Fall sind wohl die anderen bereits genannten Faktoren maßgebend. So fällt die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei Kipplüftung im Innenstadtbereich sogar etwas niedriger aus als in ländlicher Lage.

Basierend auf den Erkenntnissen zur Wirkung von CO<sub>2</sub> im untersuchten Konzentrationsbereich entwickelte das Umweltbundesamt (UBA) ein Leitwertkonzept für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Räumen [1]. Die Leitwerte und erforderlichen Lüftungsmaßnahmen sind in **Tabelle 3** dargestellt. Mittlerweile ist dieses Leitwertkonzept auch in die Arbeitsstätten-

Tabelle 3. Leitwertkonzept nach ASR A3.6 und des UBA.

CO <sub>2</sub> -Konzentration in ppm	Hygienische Bewertung nach ASR A3.6 [24]	Maßnahmen nach UBA-Leitwertkonzept [1]
< 1000	Hygienisch unbedenklich	• Keine weiteren Maßnahmen (sofern durch die Raumnutzung kein Konzentrationsanstieg über 1000 ppm zu erwarten ist)
1000 bis 2000	Hygienisch auffällig	• Lüftungsverhalten überprüfen und verbessern • Lüftungsplan aufstellen (z. B. Verantwortlichkeiten festlegen) • Lüftungsmaßnahme (z. B. Außenluftvolumenstrom oder Luftwechsel erhöhen)
> 2000	Hygienisch inakzeptabel	• Weitergehende Maßnahmen erforderlich (z. B. verstärkte Lüftung, Reduzierung der Personenzahl im Raum)

richtlinie ASR A 3.6 [24] eingeflossen, sodass diese Werte als verbindlich im Sinne der Arbeitsstättenverordnung anzusehen sind.

Darüber hinaus ist in DIN EN 13779 [25] ein vierstufiges Raumlufqualitätskonzept dargestellt. Demnach wird eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von mehr als 1000 ppm im Raum als mäßige Raumlufqualität und eine Konzentration von mehr als 1400 ppm als niedrige Raumlufqualität eingestuft.

Insgesamt zeigen die Messungen, dass eine gute Luftqualität in Klassenräumen nur mit konsequenter Lüftung zu erreichen ist. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1000 ppm ist bei geschlossenen Fenstern selbst nach erfolgter guter Stoßlüftung bereits nach wenigen Minuten überschritten. Der Wert von 1400 ppm ist im Mittel bereits vor der Hälfte der Schulstunde erreicht. Auch der Wert von 2000 ppm kann im Mittel während der Unterrichtsstunde nicht eingehalten werden. Diese Werte werden deutlich überschritten, wenn die Lüftungsintervention in den Pausen unterbleibt, wie in **Bild 9** am Beispiel einer Grundschulklasse dargestellt ist. Die Endkonzentration von fast 4000 ppm liegt dabei noch unter den Maximalwerten aus den anderen Studien. Daraus lässt sich schließen, dass die Lüftung in den Pausen in vielen Schulen wohl häufig ausfällt.

Die eigenen Ergebnisse zeigen, dass sich durch gründliche Stoßlüftung in den Pausen und Fenster in Kippstellung während des Unterrichts eine gute Raumlufqualität realisieren lässt. Dieses gilt nicht nur für die CO<sub>2</sub>-Konzentration, sondern auch für Aldehyd- und VOC-Emissionen durch Baustoffe, Einrichtungen und Personen, wie im ersten Teil der Studie „Gesunde Luft in Schulen“ dargestellt wurde [5 bis 5]. Die notwendige Fensterfläche bei Kipp Lüftung muss dabei nicht übermäßig dimensioniert sein (Bild 6). Im Winterhalbjahr genügt im Mittel eine Lüftungsöffnungsfläche von knapp 1 m<sup>2</sup>. Diese lässt sich zum Beispiel durch vier in Kippstellung geöffnete Fenster in Höhe der Raumstirnseiten realisieren, wenn diese eine Größe von 1 m mal 1,2 m aufweisen [24]. Die Anforderungen an Lüftungsöffnungen in Schulen müssen somit nicht den in der ASR A3.6 [24] gestellten Anforderungen an eine freie kontinuierliche Lüftung genügen, um für eine gute Luftqualität in Klassenräumen zu sorgen. Die dortigen Anforderungen sind mit 0,35 m<sup>2</sup>/anwesende Person angegeben, was in Klassenräumen im Mittel zu einer Lüftungsöffnung von 8 m<sup>2</sup> führen würde. Der Leitfaden des UBA

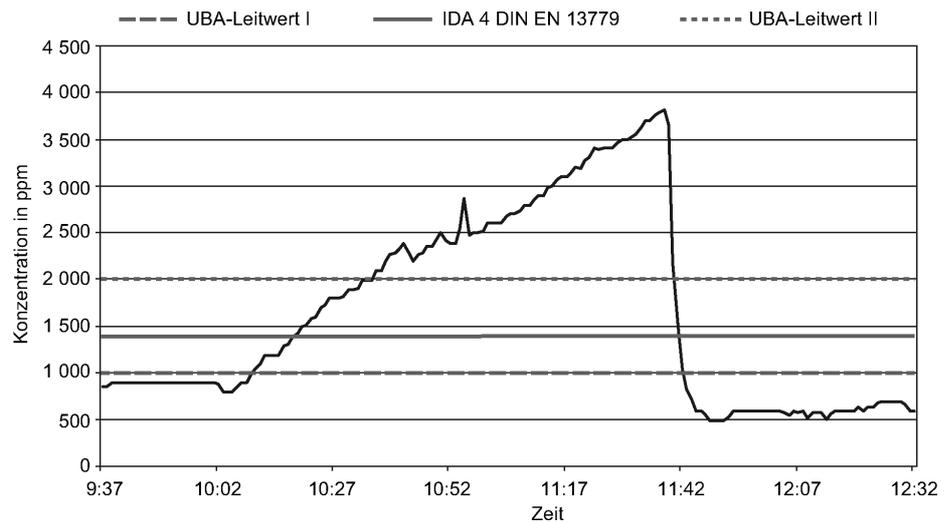


Bild 9. CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in einer Grundschulklasse über zwei Unterrichtsstunden ohne Lüftung; IDA 4: Indoor Air, niedrige Raumlufqualität.

für die Innenraumhygiene in Schulen [26] schlägt zur Hälfte des Unterrichts noch einmal eine gründliche Stoßlüftung vor. Dies erscheint jedoch aus unterrichtstechnischen Gründen nicht praktikabel, da die dadurch erzeugte Zugluft Unterrichtsmaterialien verwirbeln könnte.

Zur Realisierung einer guten Raumlufqualität kommen alternativ zur freien Lüftung auch raumluftechnische Maßnahmen in Betracht, wenngleich die freie Lüftung das einfachste Lüftungsmodell ist [24]. So wurden auch in Frankfurt am Main während des Winters CO<sub>2</sub>-Messungen in zwei Klassenräumen von Passivhausschulen durchgeführt [27]. Die Daten wurden mit den Ergebnissen aus zwei Schulen in konventioneller Bauweise verglichen. Der Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen betrug in den konventionellen Schulen 1475 ppm und in den Passivbauschulen 1124 ppm. Die Maximalwerte lagen in konventionellen Schulen bei 4850 und 1980 ppm in Passivhausschulen. Die durchschnittliche mittlere Belastung von 1124 ppm als Mittelwert in den Schulstunden legt jedoch den Schluss nah, dass der Wert von 1400 ppm als Momentanwert wohl im Regelfall überschritten wurde, die Konzentration insgesamt jedoch in einem Korridor bis maximal 2000 ppm blieb. Die Raumlufanlagen in den überprüften Schulen scheinen weniger wirkungsvoll als in der hier überprüften Schule gewesen zu sein.

Eine technische Lüftung lässt sich auch durch dezentrale Lüftungsgeräte zur Unterstützung der Fensterlüftung realisieren. Im Zuge der Gestaltung von zwei Musterklassenzimmern in NRW und in Sachsen wurden drei von vier Heizkörpern im Raum durch CO<sub>2</sub>-sensorgesteuerte Lüftungsgeräte ersetzt [28]. Zusätzlich wurde ein Plan aufgestellt, anhand dessen die großen Pausen zum Lüften durch weites Öffnen

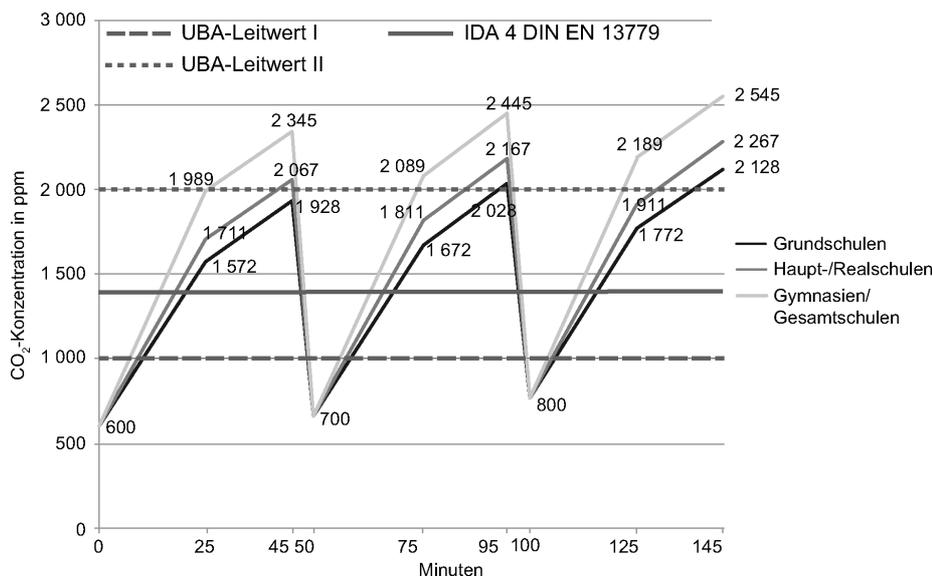


Bild 10. Modellhafte Darstellung von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Unterricht verschiedener Schulformen in Anlehnung an die ermittelten 95-Perzentilwerte für die CO<sub>2</sub>-Anstiege pro Raumnutzer und Kipplüftungsintervention nach 25 Minuten Unterrichtszeit bei einer Raumnutzerzahl von 25; IDA 4: Indoor Air, niedrige Raumluftqualität.

der Fenster genutzt wurden. Bei Einsatz der Geräte nahm die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Laufe des Unterrichts von rund 700 auf 1 600 ppm zu und hielt sich dann auf diesem Niveau. Dieses Ergebnis entspricht somit nicht dem Niveau, das durch Kipplüftung während der Unterrichtsstunden erzielt werden kann.

**4.3 Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenräumen anhand der ermittelten Ergebnisse**

Aus den Ergebnissen dieser Studie lässt sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration für eine Unterrichtsstunde ohne Lüftung schulformspezifisch einfach abschätzen. Zur Berechnung der möglichen Endkonzentration in der Unterrichtsstunde sind die in Bild 3 dargestellten 95-Perzentilwerte für den CO<sub>2</sub>-Anstieg pro Raumnutzer mit den vor Ort vorliegenden Raumnutzerzahlen zu multiplizieren und der Startkonzentration in Höhe von 600 ppm (Bild 1) hinzuzuaddieren. Diese Startkonzentration gilt allerdings nur unter der Bedingung einer gründlichen Lüftung vor Unterrichtsbeginn.

Die Umsetzung der beschriebenen Vorgehensweise und die mögliche CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Lüftungsmaßnahmen sind in Bild 10 dargestellt. Die Zahl der Raumnutzer soll entsprechend dem hier ermittelten Median 25 Personen betragen. Für die CO<sub>2</sub>-Anstiege ohne Lüftung im Unterricht werden näherungsweise die 95-Perzentilwerte aus Bild 3 herangezogen. Folgende Werte werden für die Schulformen zum Ansatz gebracht:

- Grundschulen: 70 ppm/Raumnutzer
- Haupt- und Realschulen: 80 ppm/Raumnutzer
- Gymnasien und Gesamtschulen: 100 ppm/Raumnutzer

Der höhere Wert für Gymnasien und Gesamtschulen ist dabei nicht durch den Unterricht in der Oberstufe bedingt. Auf einen entsprechenden Ansatz für Sonderschulen und Berufskollegs wird hier verzichtet, da die Raumnutzerzahlen nicht dem der Abschätzung zugrunde liegenden Sachverhalt entsprechen. In Sonderschulen sind häufig auch die Unterrichtszeiten mit denen der anderen Schulformen nicht vergleichbar.

Nach 25 min Unterrichtszeit sollen die Räume mit Fenstern in Kippstellung belüftet werden. Unter Berücksichtigung des 95-Perzentils ist für diese Situation ein Anstieg von 800 ppm/Unterrichtsstunde zu erwarten (siehe auch Winterhalbjahr in Bild 6).

In der Fünf-Minuten-Pause soll eine gründliche Stoßlüftung erfolgen. Nach den Ergebnissen dieser Studie lassen sich dadurch in der Mehrzahl der Fälle folgende CO<sub>2</sub>-Reduktionen erreichen [6]:

- Grundschulen: mindestens 1 000 ppm
- Haupt- und Realschulen: mindestens 1 200 ppm
- Gymnasien und Gesamtschulen: mindestens 1 500 ppm

Dennoch wird die Startposition von 600 ppm nach Lüftung in den Fünf-Minuten-Pausen nicht mehr erreicht und soll nach den nächsten Schulstunden jeweils um 100 ppm steigen.

Die Abschätzung ist insofern zur schlechteren Seite hin abgesichert. Spätestens nach der dritten Schulstunde sollte eine längere Pause erfolgen, in der dann wieder die ursprüngliche Startposition erreicht werden kann.

Wie man Bild 10 entnehmen kann, lässt sich durch dieses Lüftungsverhalten erreichen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Grundschulen überwiegend unterhalb des oberen Leitwertes im Sinne der Arbeitsstättenrichtlinien und der Empfehlungen des UBA in Höhe von 2 000 ppm verbleibt. In den anderen Schulen ist dieser Wert zum Ende der Unterrichtsstunde hin überschritten. Die Intervention durch Kipplüftung sollte daher hier bereits nach 20 min Unterrichtszeit beginnen.

Somit lässt sich durch die gestaffelte Kombination von Kipp- und Stoßlüftung eine hygienisch inakzeptable Raumluftqualität im Sinne der Arbeitsstättenrichtlinien und der Leitlinien des UBA weitgehend vermeiden. Eine hygienisch unbedenkliche Situation im Sinne dieser Richtlinien ist dagegen kaum erreichbar. Auch der Wert von 1 400 ppm kann durch das vorgestellte Lüftungsmodell nicht dauerhaft unterschritten werden.

**5 Zusammenfassung**

Klassenräume sind wegen der hohen Personenzahl und deren regelmäßigen langen Aufenthaltszeiten hinsichtlich ihrer CO<sub>2</sub>-Konzentration besonders kritisch zu betrachten. Wenngleich der Arbeitsplatzgrenzwert in Höhe von 5 000 ppm als Achtstundenmittelwert im Regelfall nicht erreicht wird, so belegen doch zahlreiche Studien, dass die bei mangelhafter Lüftung auftretenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenräumen nachteilige Wirkungen hervorrufen können.

Um einen Überblick über die CO<sub>2</sub>-Belastung im Unterricht bei geschlossenen Fenstern und die Möglichkeiten der Lüftungsinterventionen in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts zu erhalten, wurden in NRW in 363 Klassenräumen von 111 Schulen verschiedener Schulformen

CO<sub>2</sub>-Messungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten in der Unterrichtssituation ohne Lüftungsmaßnahmen, in der Situation nach Stoßlüftung und in der Unterrichtssituation bei in Kippstellung geöffneten Fenstern. Die mediane Grundbelastung vor dem Unterricht lag in allen Schulformen bei 600 ppm. Die höchsten Anstiege der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ergaben sich in Gymnasien. Hier waren auch die Schülerzahlen am höchsten und die Klassenräume am kleinsten. Die niedrigsten Anstiege waren in Sonderschulen, Grundschulen, Hauptschulen und Berufskollegs zu verzeichnen. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bewegte sich im Unterricht bei geschlossenen Fenstern im Mittel und als Median in dem vom UBA als hygienisch auffällig bezeichneten Bereich zwischen 1 000 und 2 000 ppm. Am häufigsten wurde dieser Bereich in Schulen der Primarstufe eingehalten. In 50 % der Fälle wurde der Leitwert von 2 000 ppm, dessen Überschreitung laut UBA als hygienisch inakzeptabel gilt, überschritten. Der Wert von 1 400 ppm, dessen Überschreitung im Sinne von DIN EN 13779 eine niedrige Raumluftqualität charakterisiert, ist zumeist schon vor Mitte der Unterrichtsstunde erreicht.

Durch eine gründliche Stoßlüftung in den Pausen lässt sich eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität erreichen. In der Unterrichtssituation mit darauf folgender Kipp-  
lüftung wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration von im Mittel 1 000 ppm dann in allen Schulformen nicht mehr wesentlich überschritten. Der Anstieg ist im Winterhalbjahr höher als im Sommer. Die geöffnete Fensterfläche war im Winterhalbjahr dabei halb so groß wie im Sommerhalbjahr. Trotz der Kipp-  
lüftung sank das Temperaturniveau in den Klassenräumen auch in den Wintermonaten nicht deutlich ab. Die Kipp-  
lüftung ist somit in den Sommermonaten eine durchaus geeignete Lüftungsmaßnahme und kann auch in den Wintermonaten als Ergänzung zur Stoßlüftung die Luftqualität deutlich verbessern.

Bei Betrachtung der unterschiedlichen Einflussfaktoren zeigte sich, dass neben der Lüftungsöffnung auch die Raumgröße, die Anzahl und Aktivität der Raumnutzerinnen und -nutzer, die Temperaturen sowie der Wind die CO<sub>2</sub>-Konzentration

im Raum wesentlich beeinflussen. Einflüsse wie das Baujahr und die Bauart der Schule, der Renovierungszustand und die Lage der Schule waren dagegen weniger erheblich.

Auf der Basis der vorliegenden Gesamtergebnisse wurden die schulformspezifischen CO<sub>2</sub>-Anstiege pro Person in einer Unterrichtsstunde ermittelt. Die Multiplikation der ermittelten 95-Perzentile mit der Zahl der Personen im Raum ermöglicht eine einfache Abschätzung des möglichen CO<sub>2</sub>-Anstiegs in ungelüfteten Räumen. Mithilfe dieser Abschätzung und der ermittelten CO<sub>2</sub>-Reduktionswerte durch Lüftungsintervention konnte gezeigt werden, dass sich selbst unter Betrachtung eines Worst-case-Szenarios der Zielkorridor im Sinne der Arbeitsstättenrichtlinien und der UBA-Leitlinien zwischen 1 000 und 2 000 ppm durch geeignete Kombination von Stoßlüftung und Kipp-  
lüftung weitgehend einhalten lässt. Abschließend ist festzustellen, dass die hygienischen Mindestanforderungen des UBA und der Arbeitsstättenrichtlinien an die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Arbeitsräumen bei fehlender Lüftung im Unterricht in vielen Fällen nicht eingehalten werden. Durch intensive Stoßlüftung in den Pausen und Kipp-  
lüftung während des Unterrichts lässt sich jedoch eine akzeptable Raumluftqualität erreichen. Alternativ zu diesen Lüftungsmaßnahmen lässt sich auch durch raumlufttechnische Anlagen eine gute Raumluftqualität realisieren.

### Danksagung

Die Autoren möchten allen Beteiligten, die an dieser Studie teilgenommen haben, ihren herzlichen Dank aussprechen. Besonderer Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der örtlichen Fachämter, den Schulleiterinnen und Schulleitern, den Lehrkräften sowie den Schülerinnen und Schülern, die uns bei der Studie vor Ort unterstützt haben und ohne deren Mitwirkung diese Studie nicht möglich gewesen wäre. Ferner bedanken wir uns bei Herrn Dr. Thomas Klüner von der Unfallkasse Nordrhein-Westfalen für die Unterstützung bei der Auswahl von Messobjekten und die hilfreichen Diskussionsbeiträge sowie bei Herrn Andreas Sander für die Unterstützung bei den vorbereitenden Arbeiten zur Durchführung der Datenauswertung.

### Literatur

- [1] Gesundheitliche Bewertung von Kohlendioxid in der Innenraumluft – Mitteilung der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes und der Obersten Landesgesundheitsbehörden. Bundesgesundheitsbl. Gesundheitsforsch. Gesundheitsschutz 51 (2008) Nr. 11, S. 1358-1369.
- [2] Neumann, H.-D.: Luftqualität und Lüftung in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 11/12, S. 495-497.
- [3] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Benitez, S.; Breuer, D.; Hahn, J.-H.: Gesunde Luft in Schulen, Teil 1 – VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen. Bericht. Düsseldorf: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen 2013. [www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/Sonderschriften/S\\_63.pdf](http://www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/Sonderschriften/S_63.pdf)
- [4] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Benitez, S.; Hahn, J.-H.: VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen unter unterschiedlichen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 3, S. 85-94.
- [5] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.; Benitez, S.; Breuer, D.: VOC-Konzentrationen in Schulen. Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 3, S. 79-84.
- [6] Neumann, H.-D.; Buxtrup, M.: Gesunde Luft in Schulen, Teil 2 – Beurteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen. Bericht. Düsseldorf: Unfallkasse Nordrhein-Westfalen. [www.unfallkasse-nrw.de/medien](http://www.unfallkasse-nrw.de/medien) (in Vorbereitung)
- [7] VDI 4300 Blatt 9: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>). Berlin: Beuth 2005.
- [8] 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. Berlin: Beuth 2006. Berichtigung. Berlin: Beuth 2007.
- [9] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). Ausg. 1/2006. BArbBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. GMBL. (2011) Nr. 10, S. 193-194.
- [10] Kajtár, L.; Herczeg, L.; Láng, E.; Hrustinszky, T.; Banhidi, L.: Influence of carbon-dioxide pollutant on human well-being

- and work intensity. In: Proceedings of Healthy Buildings 2006, 4.-8. Juni 2008, Lissabon, S. 85-90.
- [11] Myhrvold, A. N.; Olsen, E.; Lauridsen, O.: Indoor environment in schools – pupils health and performance in regard to CO<sub>2</sub> concentrations. In: Indoor air '96: Proceedings of the 7th international conference on indoor air quality and climate. Vol. 4, S. 369-374.
- [12] Tiesler, G.; Schönwälder, H. G.; Ströver, F.: Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht. Hrsg.: ISF – Institut für interdisziplinäre Schulforschung, Universität Bremen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Gemeindeunfallversicherungsverbandes Hannover und der Unfallkasse Hessen. 2008.
- [13] Wargocki, P.; Wyon, D. P.: Research report on effects of HVAC on student performance. ASHRAE J. 48 (2006), S. 23-26.
- [14] Voronova, B. Z.; Veremkovich, L. V.; E'lkovskaia, E. A.: Optimal air conditioning in the classrooms of secondary schools as a factor of improving health status of schoolchildren. Gig. Sanit. (1989) Nov., S. 19-22.
- [15] Shendell, D. G.; Prill, R.; Fisk, W. J.; Apte, M. G.; Blake, D.; Faulkner, D.: Associations between classroom CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho. Indoor Air 14 (2004), S. 333-341.
- [16] European concerted action "Indoor Air Quality and its Impact on Man". Report No. 11: Guidelines for ventilation requirements in buildings. Luxemburg: Office for Publications of the European Community 1992.
- [17] Bebersdorf, J.: Untersuchungen zur Raumluftqualität an Erfurter Schulen. Dissertation, Universität Jena 2010.
- [18] Fromme, H.; Heitmann, D.; Dietrich, S.; Schierl, R.; Körner, W.; Kiranoglu, M.; Zapf, A.; Twardella, D.: Raumluftqualität in Schulen – Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. Gesundheitswesen 70 (2008) Nr. 2, S. 88-97.
- [19] Lahrz, T.; Piloty, M.; Oddoy, A.; Fromme, H.: Gesundheitlich bedenkliche Substanzen in öffentlichen Einrichtungen in Berlin. Untersuchungen zur Innenraumluftqualität in Berliner Schulen. Bericht des Instituts für Lebensmittel, Arzneimittel und Tierseuchen (ILAT), Fachbereich Umwelt und Gesundheitsschutz, Berlin 2003.
- [20] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 64 (2003) Nr. 7, S. 447-456.
- [21] DIN EN 15251: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik (12.12). Berlin: Beuth 2012.
- [22] Standardlehraussagen – intellexi – Institut für Kommunikation, Psychotraumatologie & Notfallmanagement, Geldern (2011). [www.intellexi.de/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=2:informationen-rettungsdienst-a-notfallmanagement&Itemid=4](http://www.intellexi.de/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=2:informationen-rettungsdienst-a-notfallmanagement&Itemid=4)
- [23] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.: Niedersächsisches Schulummessprogramm – Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxidverläufen. Hrsg.: Niedersächsisches Landesgesundheitsamt. Hannover 2003, aktualisiert 2005.
- [24] Arbeitsstättenrichtlinie: Lüftung (ASR A.3.6). Ausg. 1/2012. GMBL (2012) Nr. 6, S. 92; zul. geänd. GMBL (2013) Nr. 16, S. 359.
- [25] DIN EN 13779: Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme (9/2007). Berlin: Beuth 2007.
- [26] Leitfaden für die Innenraumluftthygiene in Schulen. Innenraumluftthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Hrsg.: Umweltbundesamt. Berlin 2008.
- [27] Heudorf, U.: Raumluftthygienische Probleme in Schulen – Bringen Passivhausschulen die Lösung? Umweltmed. Forsch. Prax. 13 (2008) Nr. 4, S. 219-226.
- [28] 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.