



Gesunde Luft in Schulen – Teil 2

Beurteilung der CO₂-Konzentration und der thermischen Behaglichkeit in Klassenräumen

Prävention in NRW | 57

Gesunde Luft in Schulen – Teil 2

Beurteilung der CO₂-Konzentration und der thermischen
Behaglichkeit in Klassenräumen

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	4
1 Einleitung	5
2 Methode	6
3 Ergebnisse	9
3.1. Untersuchte Räume und Randbedingungen	9
3.2. Ergebnisse der CO ₂ -Messungen	12
3.3. Ergebnisse der Messungen der raumklimatischen Verhältnisse	32
4 Diskussion	44
4.1. Diskussion der CO ₂ -Messungen	44
4.1.1. Wirkungen erhöhter CO ₂ -Konzentrationen in Klassenräumen	44
4.1.2. Ergebnisse von Untersuchungen der CO ₂ -Konzentrationen in Klassenräumen	45
4.1.3. Diskussion der eigenen Ergebnisse	46
4.1.4. Modellhafte Abschätzung der CO ₂ -Konzentration in Klassenräumen	50
4.1.5. CO ₂ -Konzentrationen bei Einsatz technischer Raumlüftungsmaßnahmen	53
4.2. Diskussion der Messungen zu den raumklimatischen Verhältnissen	56
5 Zusammenfassung	59
6 Literatur	61
Abbildungsnachweis	64
Danksagung	65

Kurzfassung

Um einen Überblick über die CO₂-Belastung und die Möglichkeiten der Lüftungsintervention in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts zu erhalten, wurden in Nordrhein-Westfalen in 363 Klassenräumen von 111 Schulen verschiedener Schulformen CO₂- und Raumklimamessungen durchgeführt. Die CO₂-Konzentration bewegt sich im Unterricht bei geschlossenen Fenstern nur in 50 Prozent der Fälle in dem vom Umweltbundesamt bereits als hygienisch auffällig bezeichneten Bereich zwischen 1000 und 2000 ppm. In den anderen 50 Prozent der Fälle wird die Endkonzentration von 2000 ppm überschritten. Der Mittelwert der Endkonzentration in der Stunde ohne Lüftung in Schulen des Primarbereichs liegt leicht unter dem oberen Leitwert von 2000 ppm, in den Schulen des Sekundarbereichs jedoch darüber. Durch eine gründliche Stoßlüftung in den Pausen lässt sich eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität erreichen. In der Unterrichtssituation mit darauf folgender Kipplüftung wird die CO₂-Endkonzentration von 1000 ppm dann im Mittel in allen Schulformen nicht mehr wesentlich überschritten und verbleibt auch überwiegend im Bereich bis 2000 ppm. Trotz der Kipplüftung sank das Temperaturniveau in den Klassenräumen nicht deutlich ab. Es lag selbst in den Wintermonaten in einem Bereich zwischen 19 und 20 °C. Auch das berechnete vorausgesagte mittlere Votum (PMV-Index) legt den Schluss nahe, dass das Raumklima in annähernd 90 Prozent der Fälle auch bei Kipplüftung im Winter nicht als zu kühl empfunden werden sollte. Die Kipplüftung über Fenster ist in den Sommermonaten somit im Wechsel mit der Stoßlüftung in den Pausen eine geeignete Lüftungsmaßnahme und kann auch in den Wintermonaten ergänzend zum Einsatz kommen. Ferner wurden aus den Untersuchungsergebnissen für eine Unterrichtsstunde bei geschlossenen Fenstern die schulformspezifischen CO₂-Anstiege pro Person ermittelt. Durch Multiplikation der ermittelten 95-Perzentilwerte mit der Zahl der Raumnutzer ergibt sich eine einfache Abschätzung der CO₂-Konzentration im Unterricht.

1 Einleitung

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist unter anderem ein Abbauprodukt der menschlichen Atmung. Die CO₂-Konzentration in der Innenluft gilt daher als allgemeiner Indikator für die Raumluftqualität und als Leitparameter für die Beurteilung von Lüftungssituationen [1]. Somit sind Klassenräume wegen der hohen Zahl der Nutzerinnen und Nutzer und deren regelmäßigen langen Aufenthaltszeiten hinsichtlich ihrer CO₂-Konzentration 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 NRW und ihre Vorgängerinstitutionen im Zeitraum von 2003 bis 2009 unter anderem umfangreiche Messungen zur Beurteilung der CO₂-Konzentrationen und der raumklimatischen Verhältnisse in zufällig ausgewählten Klassenräumen durchgeführt. Die Messungen erfolgten im Leerzustand des Raumes und unter verschiedenen Lüftungsbedingungen mit 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 in Anlehnung an DIN VDI 4300 Blatt 9 [3]. Vor der Messung wurden die Klassenräume intensiv mindestens 15 Minuten 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 dabei mit den Lehrkräften sowie den 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 den Jahren 2003 bis 2009 in Räumen für den allgemeinbildenden Unterricht, in denen es keine Beschwerden über eine unzureichende Luftqualität gab. Fachräume wie z. B. für den Chemie- oder Physikunterricht oder das Fach Technik sind in dem Datenkollektiv nicht enthalten. Der Messort lag in der Regel auf der Mittelachse des Klassenraumes in Höhe der letzten Tischreihe (Abb. 1). Der Abstand zu den Wänden betrug jeweils mindestens 1,5 m, die Höhe des Messpunktes 1,2 m vom Fußboden in Kopfhöhe der Schülerinnen und Schüler.

Abb. 1: Messaufbau



Zu Beginn der Kampagne (90 Räume) wurden die CO₂-Konzentrationen mit einem Infrarot-Einstrahl-Spektrometer Miran 1B der Firma Foxboro gemessen. 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 (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung bei CO₂-Konzentrationen von 500 ppm, 1000 ppm, 3000 ppm und 5000 ppm kalibriert. Der jeweilige Nullpunkt wurde vor der Messung mit synthetischer Luft eingestellt. Die Genauigkeit bei spezifischer Kalibrierung ist mit +/- 5 Prozent angegeben.

Wegen der geringeren Geräuschemission kam danach das Gasmessgerät X-am 7000 der Firma Dräger zum Einsatz. Dieses ist mit einem Infrarot-Sensor für CO₂ Typ Smart IR CO₂ -68 10 590 ausgestattet. Dieser ist werksseitig kalibriert und wird jährlich überprüft. Vor jeder Messung wurde die Funktion des Sensors in der Außenluft überprüft. Der CO₂-Messbereich liegt zwischen 0 und 5 Volumenprozent (0 bis 50.000 ppm) mit einer Auflösung von 0,01 Volumenprozent (100 ppm). Der Linearitätsfehler beträgt +/- 5 Prozent des Messwertes, die Langzeitdrift +/- 40 ppm/Monat. Das Dräger-X-am 7000 verfügt über einen internen Datenspeicher, der 3000 Messpunkte erfassen kann. Das Speicherintervall bei den Messungen betrug 60 s. Der Speicher wurde über eine Infrarotschnittstelle ausgelesen. Zur Überprüfung der thermischen Behaglichkeit wurden folgende Parameter bestimmt:

- die operative Temperatur
- die relative Luftfeuchtigkeit
- die Luftgeschwindigkeit

Zusätzlich wurde das vorausgesagte mittlere Votum (PMV-Index) berechnet, woraus sich der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD-Index) im Sinne von DIN EN ISO 7730 [4] bestimmen lässt. Dabei werden sowohl obengenannte Parameter als auch die Aktivität und die Bekleidung der Raumnutzerinnen und -nutzer berücksichtigt. Für die Aktivität wurden der Wert von 1,2 met (sitzende Tätigkeit Schule) und für Bekleidungsisolierung die Werte von 0,7 clo (Unterwäsche, Hemd, Hose, Socken, Schuhe) für die Sommermonate sowie 1,0 clo (Slip, Hemd, Hose, Jacke, Socken, Schuhe) für die Wintermonate für die Berechnung zugrunde gelegt.

Bei den Messungen kam der „Thermal Comfort Data Logger“ Innova 1221 der Firma Luma Sense Technologies zum Einsatz. Dieser ist mit Sensoren für die operative Temperatur (MM0060), für die relative Luftfeuchtigkeit (MM0037) und für die Luftgeschwindigkeit (MM0038) bestückt. Die Datenauswertung und die Berechnung des PMV-Indexes erfolgte mit der „Thermal Comfort Manager Software“ Innova 1221.

Die operative Temperatur (Empfindungstemperatur) ist die gleichmäßige Temperatur eines imaginären schwarzen Raumes, in dem eine Person die gleiche Wärmemenge durch Strahlung und Konvektion austauschen würde wie in der bestehenden nicht gleichmäßigen Umgebung [4]. Bestimmt wird sie als der arithmetische Mittelwert aus der Raumlufttemperatur und der Temperatur der Raumumschließungsflächen. Dabei ist die letztere nicht leicht zu bestimmen, da sie von der Position des Nutzers im Raum abhängt. Der Sensor für die operative Temperatur berücksichtigt diese Parameter durch Größe, Form, Farbe und gewählte Anordnung. Im Messbereich zwischen 5 und 40 °C beträgt die Genauigkeit +/- 0,3 °C.

Der Sensor für die relative Luftfeuchtigkeit ist ein Taupunkt-Wandler. Dabei wird ein Kühlelement unter einem konischen Spiegel aktiviert, das diesen soweit abkühlt, bis der atmosphärische Wasserdampf darauf kondensiert. Die Temperatur, bei der dieses geschieht, wird Taupunkt genannt. Oberhalb des Spiegels befindet sich eine Leuchtdiode (Sender) sowie ein Transistor (Empfänger), der das auf dem Spiegel reflektierte Licht normalerweise vollständig aufnimmt. Bei eintretender Kondensation auf dem Spiegel wird jedoch nur noch ein kleiner Teil des gesendeten Lichts empfangen, wodurch die relative Luftfeuchtigkeit bestimmt wird. Hierbei darf die Differenz zwischen Lufttemperatur und Taupunkttemperatur 25 °C nicht überschreiten. Im operativen Temperaturbereich zwischen 5 und 40 °C wird eine relative Luftfeuchtigkeit bis zu 90 Prozent angezeigt.

Der Luftgeschwindigkeitssensor basiert auf dem Prinzip eines Konstanttemperatur-Anemometers. Er registriert die Luftgeschwindigkeit als Funktion des Wärmeverlustes eines beheizten Körpers durch Messung der Eingangsleistung, die zur Aufrechterhaltung einer konstanten Temperatur zwischen zwei identischen, ellipsenförmigen, temperaturempfindlichen Wandlerelementen benötigt wird. Die kontrollierte elektrische Heizung gewährleistet unabhängig von der Umgebungstemperatur eine konstante Temperaturdifferenz von 15 °C zwischen dem geheizten und nicht geheizten Wandlerelement. Die Ansprechzeit beträgt weniger als 0,2 s bis zu 90 Prozent der Änderungsschritte. Die Messgenauigkeit liegt in einem Bereich bis zu 1 m/s Luftgeschwindigkeit bei +/- (0,05 va + 0,05) m/s.

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 mit Hilfe 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, innerhalb der letzten zwei Jahre)
- Renovierung in den letzten zwei Jahren
- Lage der Schule
- Lüftungsöffnungen bei Stoßlüftung
- Lüftungsöffnungen bei Kipplüftung

Zur Ableitung von Perzentil- und Mittelwerten der CO₂-Konzentration wurden die erhobenen Messdaten statistisch ausgewertet. Die Auswertung der gewonnenen Werte erfolgte mit Microsoft Office Excel. Bestimmt wurden die arithmetischen Mittelwerte, Mediane und 95-Perzentilwerte.

3 Ergebnisse

3.1. Untersuchte Räume und Randbedingungen

Die Messungen für das Projekt „Gesunde Luft in Schulen“ fanden in 381 Räumen von 111 Schulen statt. Davon konnten in 375 Räumen die Raummaße erfasst werden. Die Zahl der anwesenden Personen mit repräsentativer Unterrichtssituation wurde in 368 Räumen erfasst. CO₂-Messungen fanden davon in 363 Räumen statt. Die Verteilung der Räume auf die Schulformen ist Abb. 2 zu entnehmen. In zwei Räumen konnte dabei lediglich die Grundbelastung ermittelt werden. Die Raumgröße betrug im Mittel 205 m³. Die kleinsten Raumvolumina wurden in Sonderschulen angetroffen, gefolgt von den Gymnasien, die größten in Berufskollegs (Abb. 3).

Im Mittel befanden sich 23 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 (Abb. 4). Das dadurch ermittelte Raumvolumen pro Nutzer betrug somit im Mittel 9,7 m³. Die geringsten Raumvolumina pro Nutzer waren in Realschulen und Gymnasien, die größten in Sonderschulen zu verzeichnen (Abb. 5). In den Abb. 6 und 7 sind die Raumvolumina und Raumnutzerzahlen in Abhängigkeit von den Baujahren dargestellt. Demnach 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.

Abb. 2: Verteilung der Schulen und Räume, in denen CO₂-Messungen durchgeführt wurden

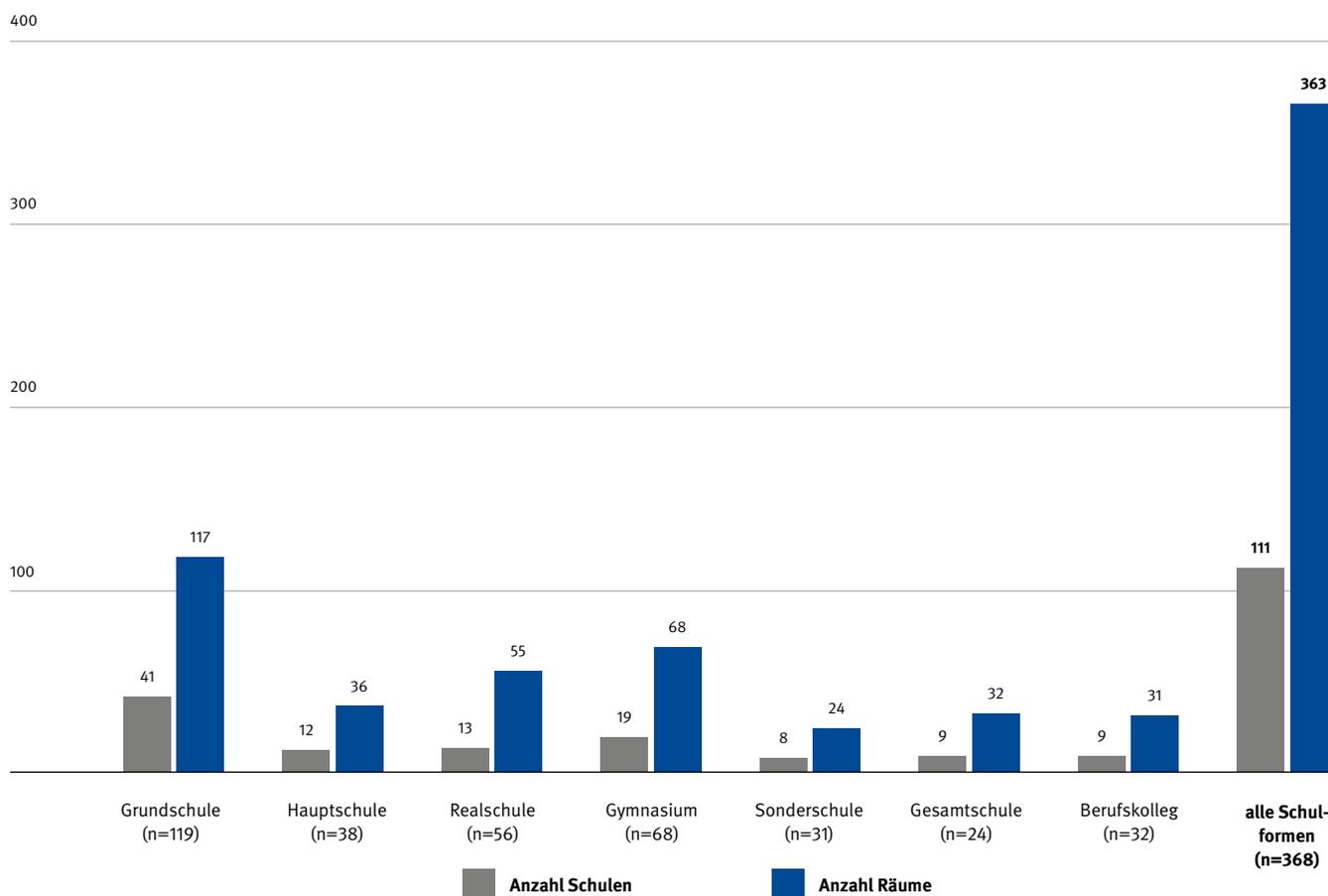


Abb. 3: Verteilung der Raumgrößen in Abhängigkeit von der Schulform

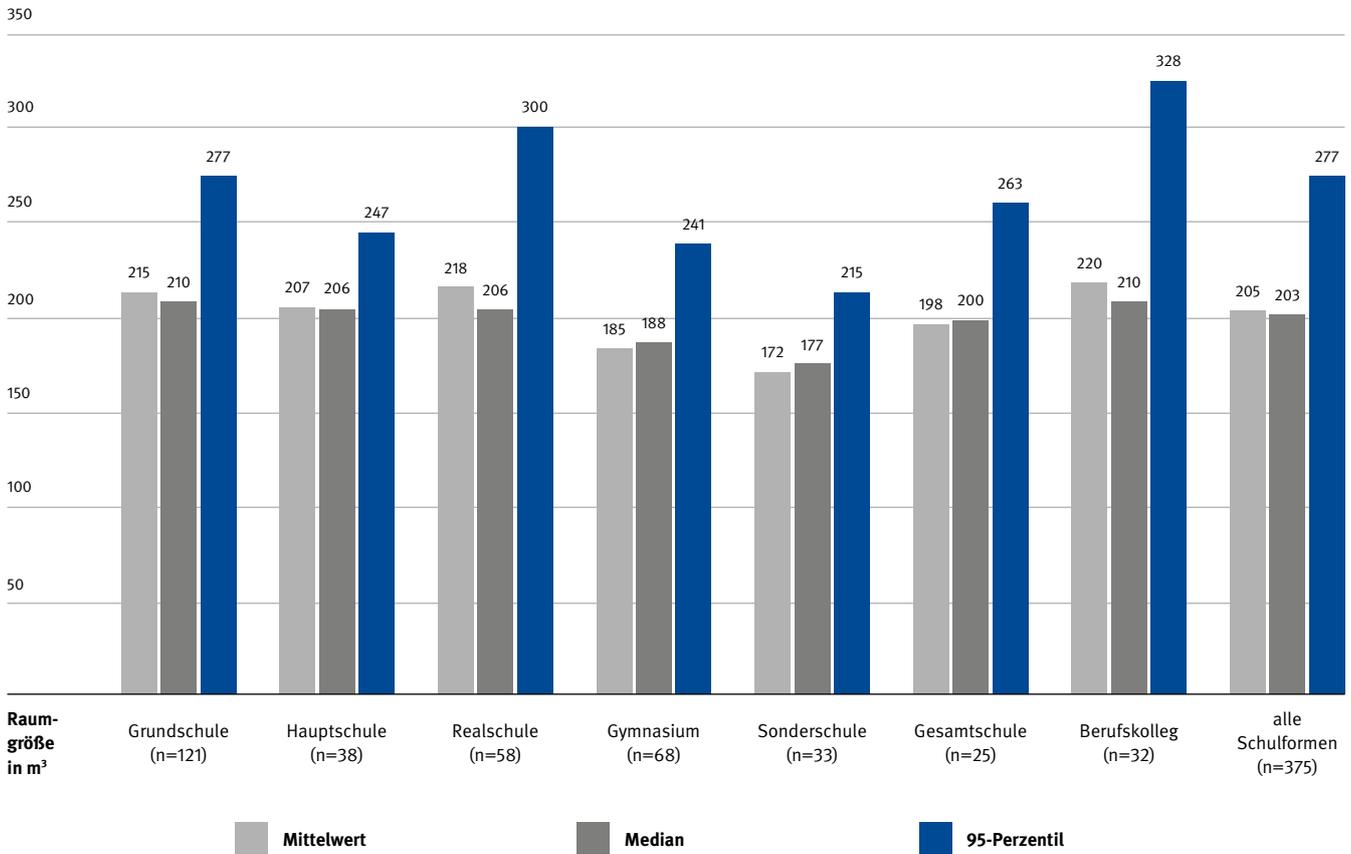


Abb. 4: Anzahl der in den Räumen anwesenden Personen in Abhängigkeit von der Schulform

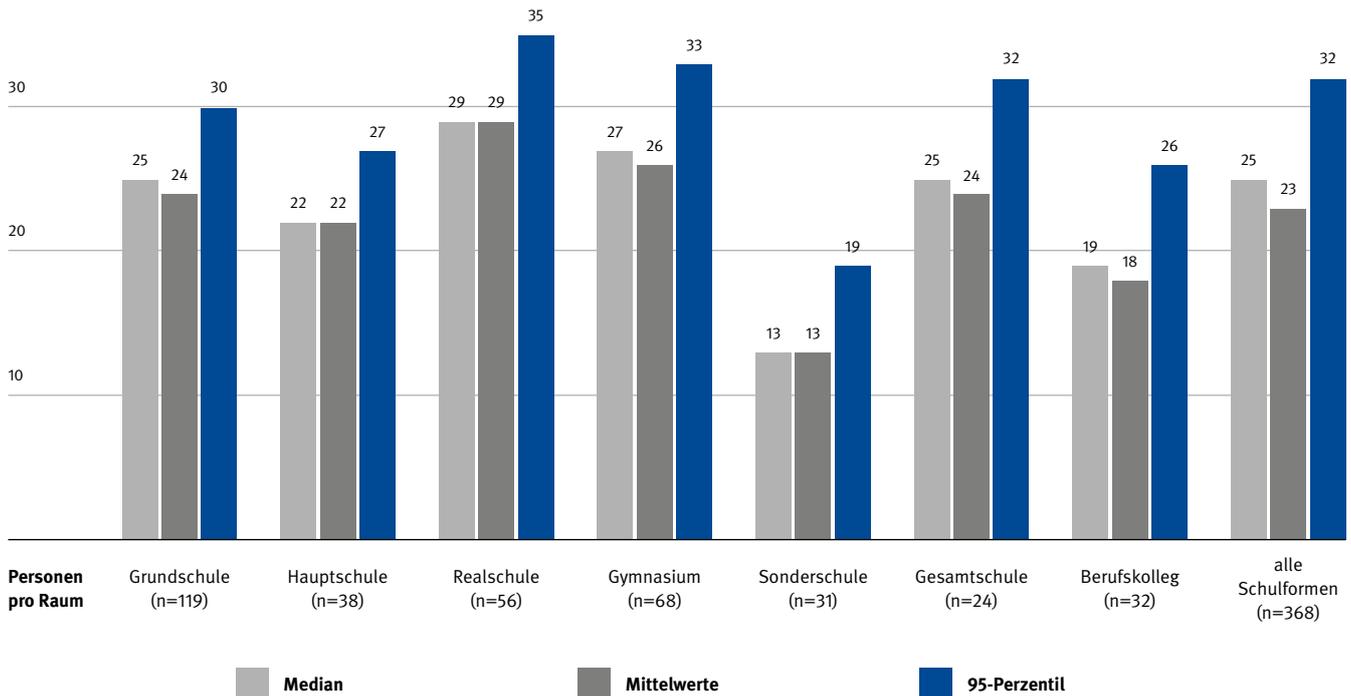


Abb. 5: Luftraum pro Raumnutzer in Abhängigkeit von der Schulform

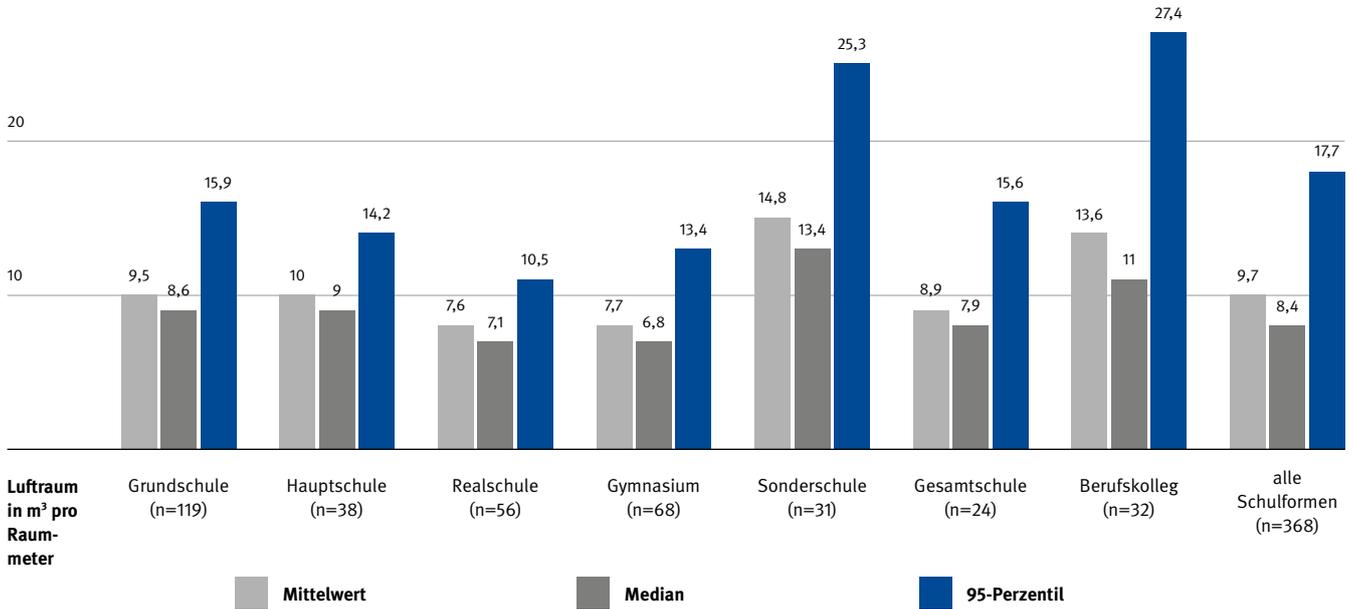


Abb. 6: Zahl der Personen im Raum unter Berücksichtigung des Baujahrs des Gebäudes

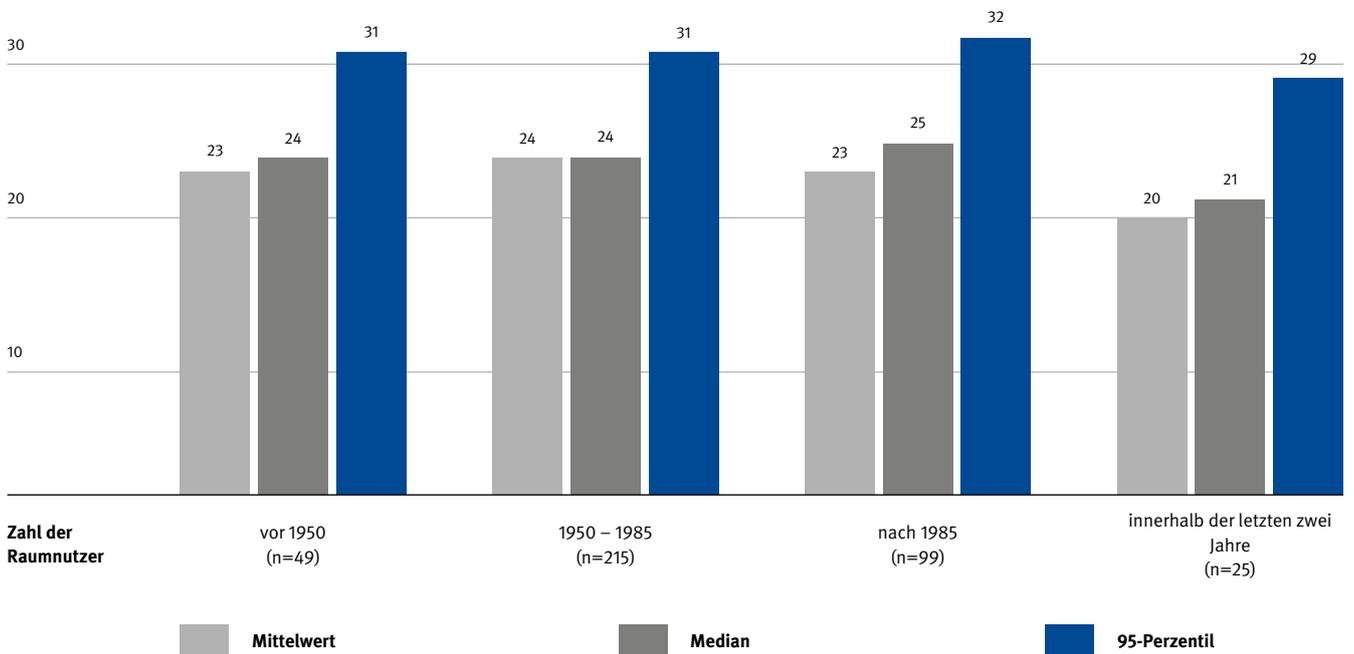
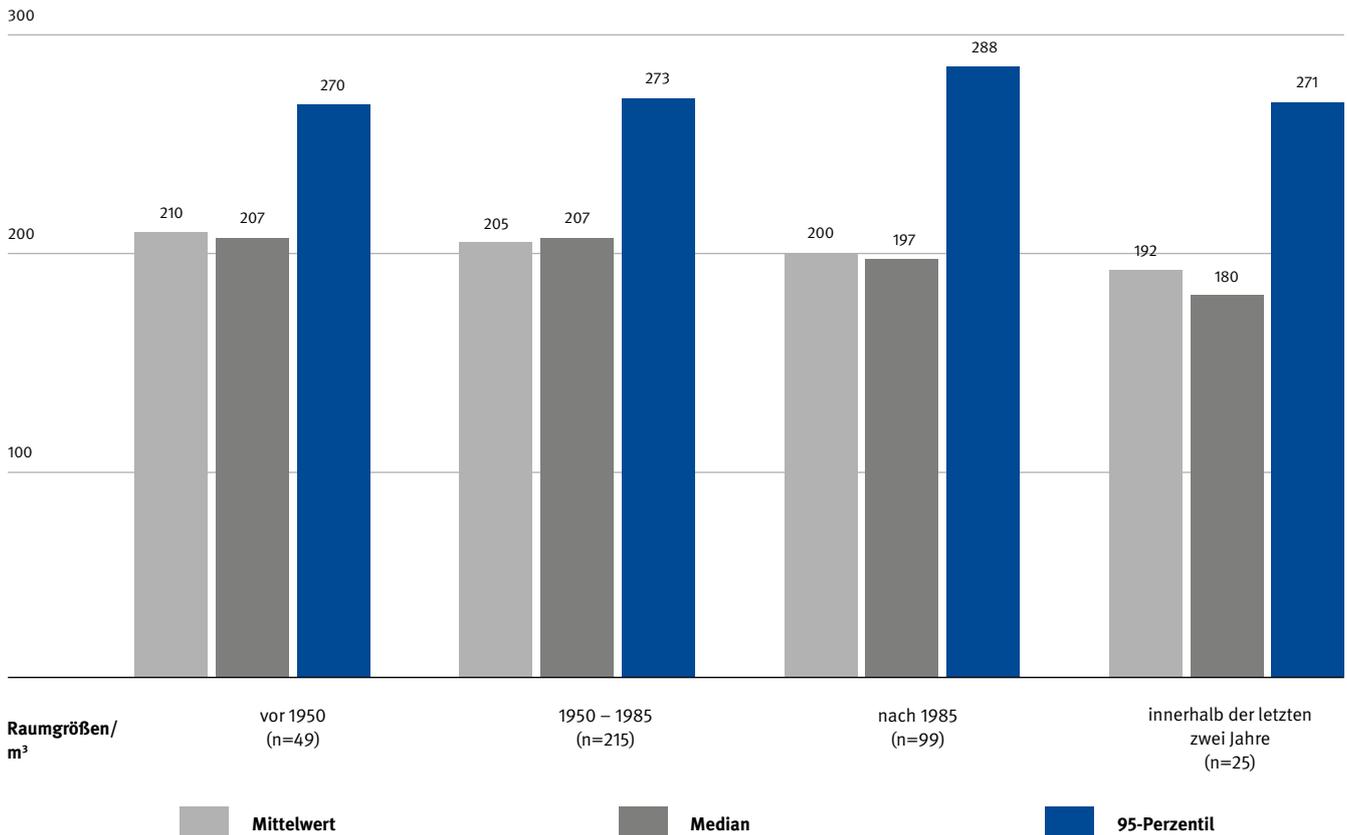


Abb. 7: Mittlere Raumgrößen unter Berücksichtigung des Baujahrs des Gebäudes



3.2 Ergebnisse der CO₂-Messungen

Abb. 8 bis 10 zeigen die Mittelwerte, Mediane und 95-Perzentilwerte in allen Situationen verteilt auf die Schulformen. Die Grundbelastung ist dabei als Mittelwert und Median mit circa 600 ppm in allen Schulformen in etwa gleich. Die höchsten Anstiege in der Stunde „mit Schülerinnen und Schülern ohne Lüftung“ ergaben sich entsprechend des zur Verfügung stehenden Luftraumes in Realschulen und Gymnasien, die geringste in den Sonderschulen. Als 95-Perzentil war die Konzentration am Ende der Schulstunde in den Gymnasien mit 3320 ppm am höchsten und in den Sonderschulen mit 2300 ppm am niedrigsten. Der Maximalwert wurde mit einer Konzentration von 3900 ppm in einer Realschule gemessen. Im Mittel stieg die CO₂-Konzentration in allen Schulformen auf etwa 2000 ppm. Unter dem Durchschnitt lagen die Sonderschulen, Grundschulen, Hauptschulen und Berufskollegs. In der Unterrichtsstunde mit Kipplüftung stieg die CO₂-Konzentration im Mittel auf etwa 1000 ppm. Die höchsten Anstiege ergaben sich hier in den Realschulen und Gymnasien, die geringsten in den Sonderschulen und den Berufskollegs.

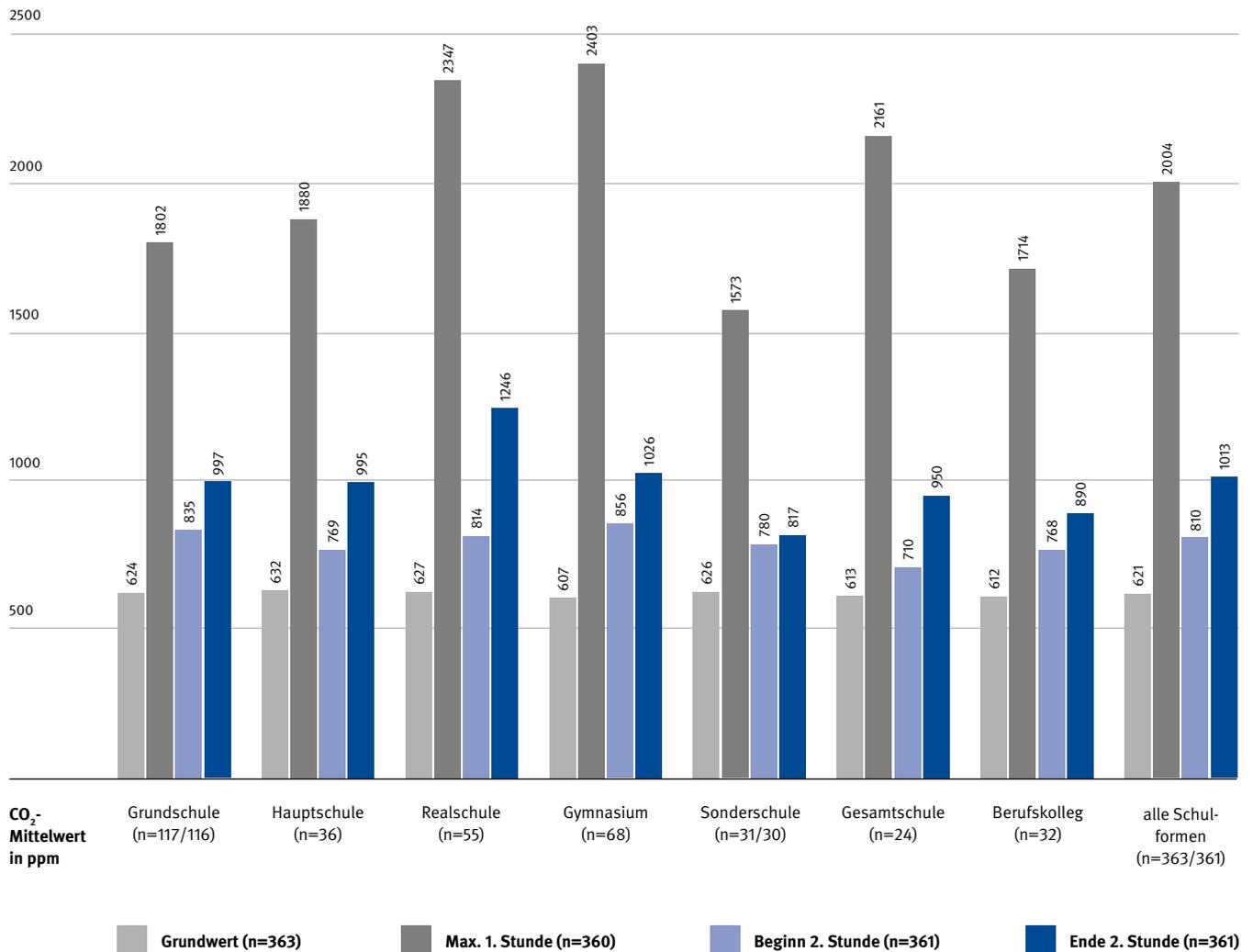
Abb. 8: CO₂-Mittelwerte für alle Situationen in Abhängigkeit von der Schulform

Abb. 9: CO₂-Mediane für alle Situationen in Abhängigkeit von der Schulform

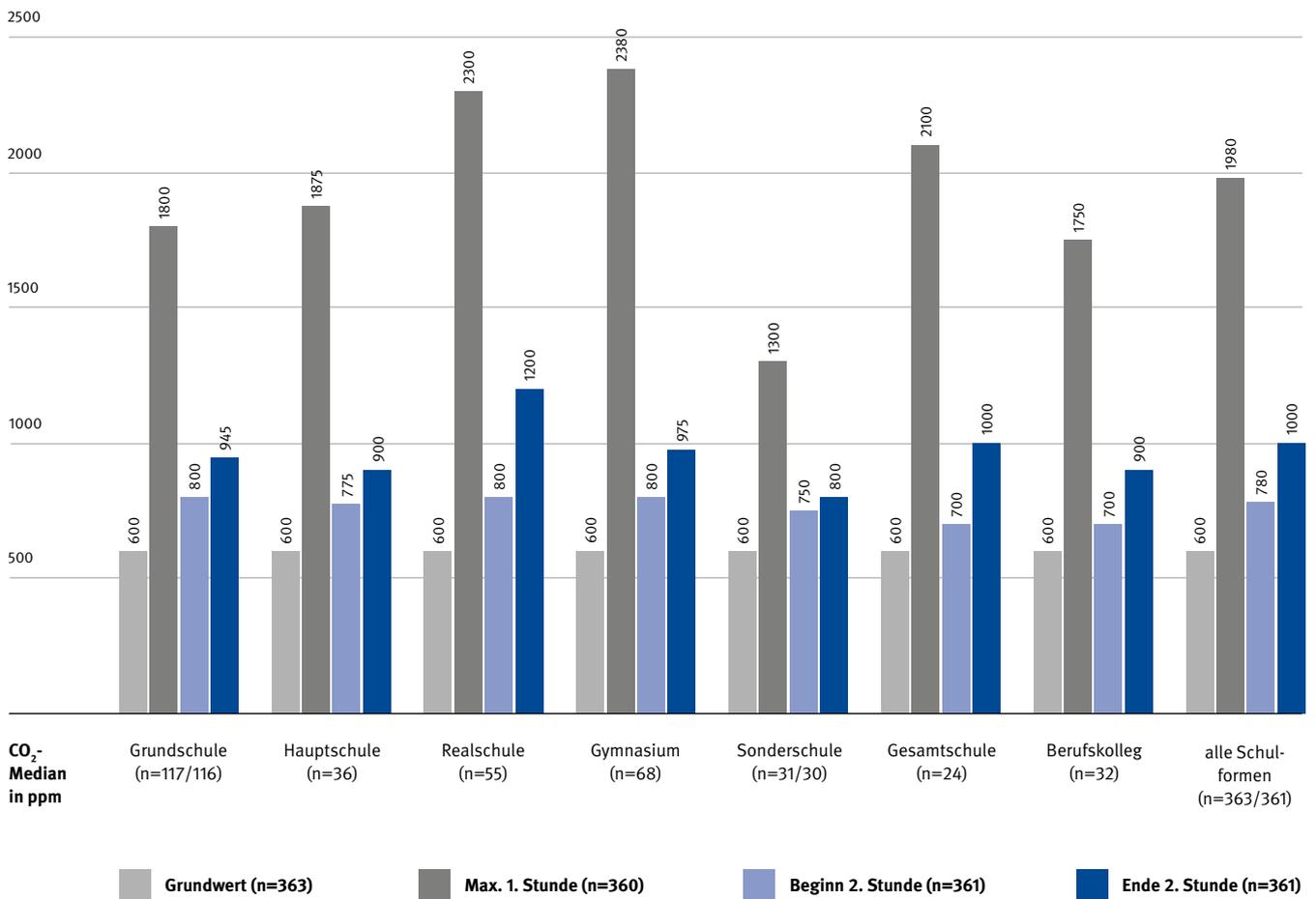


Abb. 10: CO₂-95-Perzentil für alle Situationen in Abhängigkeit von der Schulform

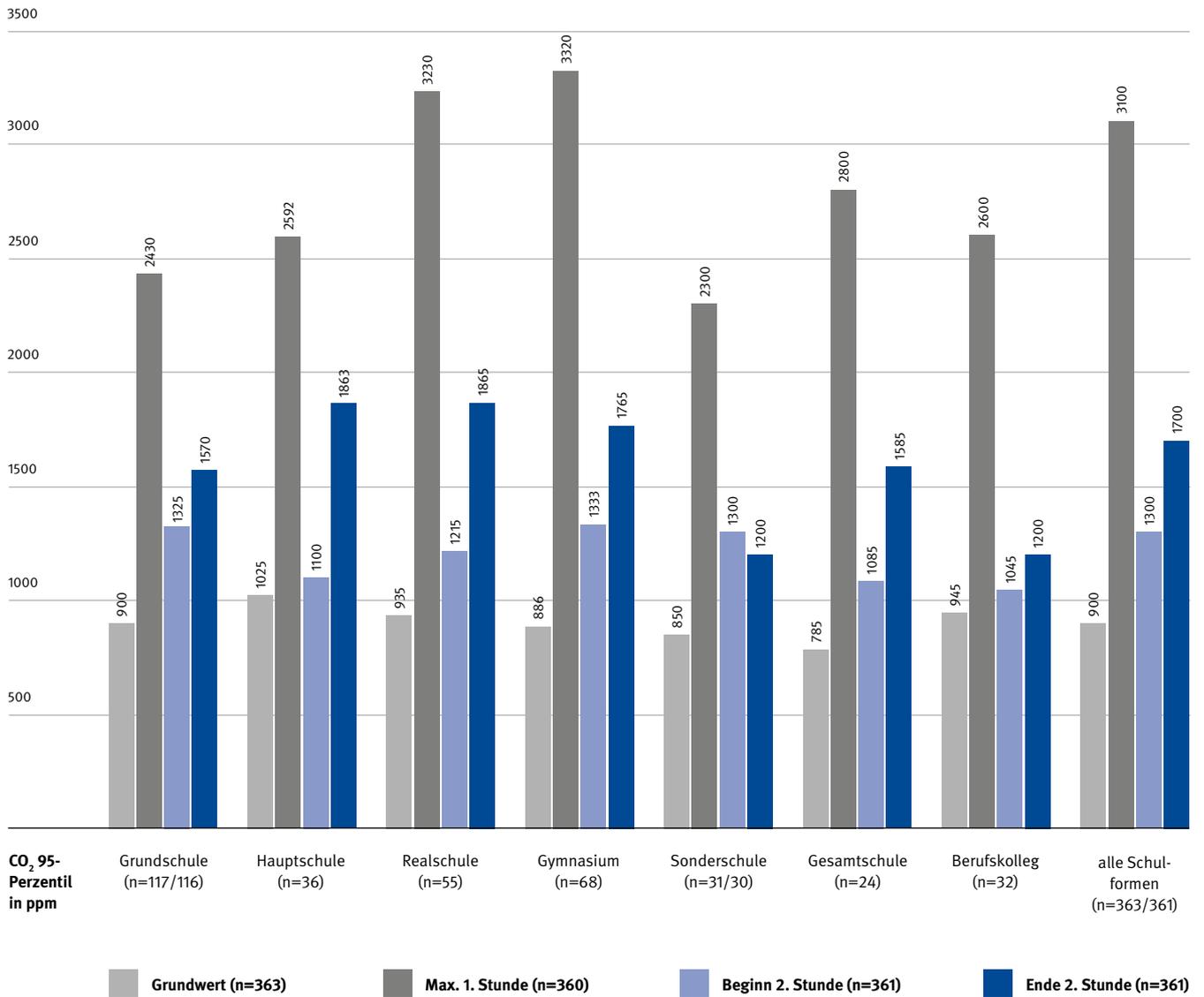
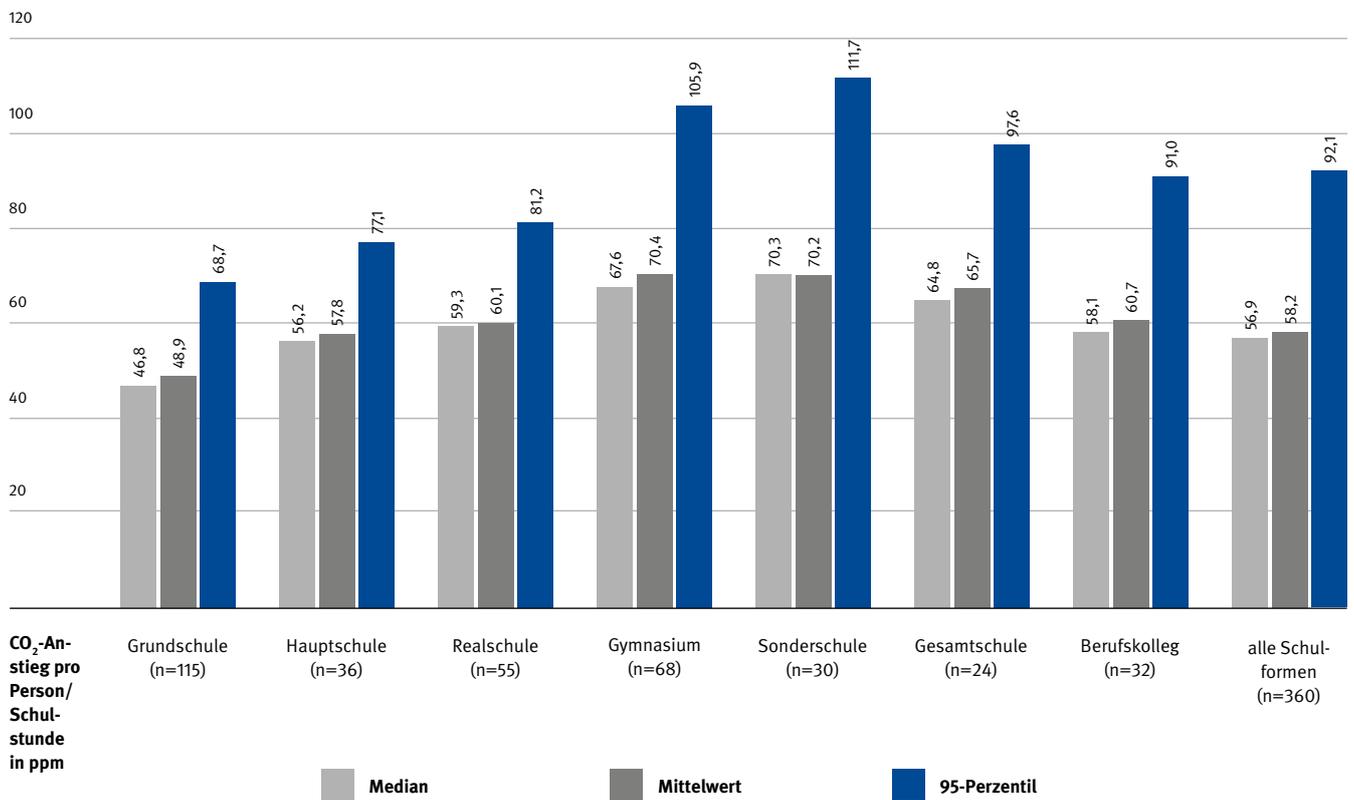


Abb. 11 zeigt die mittleren CO₂-Anstiege pro Raumnutzer in der Unterrichtsstunde ohne Lüftung, die aus den jeweils in den einzelnen Unterrichtsstunden gemessenen CO₂-Anstiegen berechnet wurden. Gemittelt über alle Schulformen liegt dieser Anstieg bei 58 ppm/Raumnutzer. Über dem Durchschnitt liegen die Sonderschulen, gefolgt von Gymnasien und Gesamtschulen. Deutlich unter dem Durchschnitt liegen die Werte in Grundschulen.

Abb. 11: CO₂-Anstieg pro Person im ungelüfteten Raum in Abhängigkeit von der Schulform



Die CO₂-Reduktion durch Stoßlüftung über Fenster und Türen in Abhängigkeit von der Lüftungsöffnung ist Abb. 12 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 der Öffnung der Klassenraumtür in der Fünf-Minuten-Pause. Teilweise war eine effektive Stoßlüftung nicht möglich, da die Fenster wegen technischer Defekte nicht mehr ausreichend geöffnet werden konnten. So betrug die geringste Lüftungsöffnung bei Stoßlüftung 0,26 m², was dann auch der Situation bei Kipplüftung entsprach. Die CO₂-Reduktion bei solch geringen Fensteröffnungen liegt deutlich unter 500 ppm. Die größte Lüftungsöffnung wurde mit 12,33 m² im Sommer in einem Gymnasium realisiert. Es handelte sich um einen Klassenraum mit dreiseitiger Fensterfläche. Die CO₂-Reduktion betrug etwa 2100 ppm. Der höchste Wert wurde mit etwa 2900 ppm in einem Raum mit einer geöffneten Fensterfläche von 3,7 m² realisiert. Die mittleren geöffneten Fensterflächen verteilt auf die Schulformen sind in Abb. 13 dargestellt. Die größten Lüftungsöffnungen wurden somit in den Realschulen, die kleinsten in den Sonderschulen und Grundschulen angetroffen.

Abb. 12: CO₂-Reduktion durch Stoßlüftung in Abhängigkeit von der Größe der Lüftungsöffnung

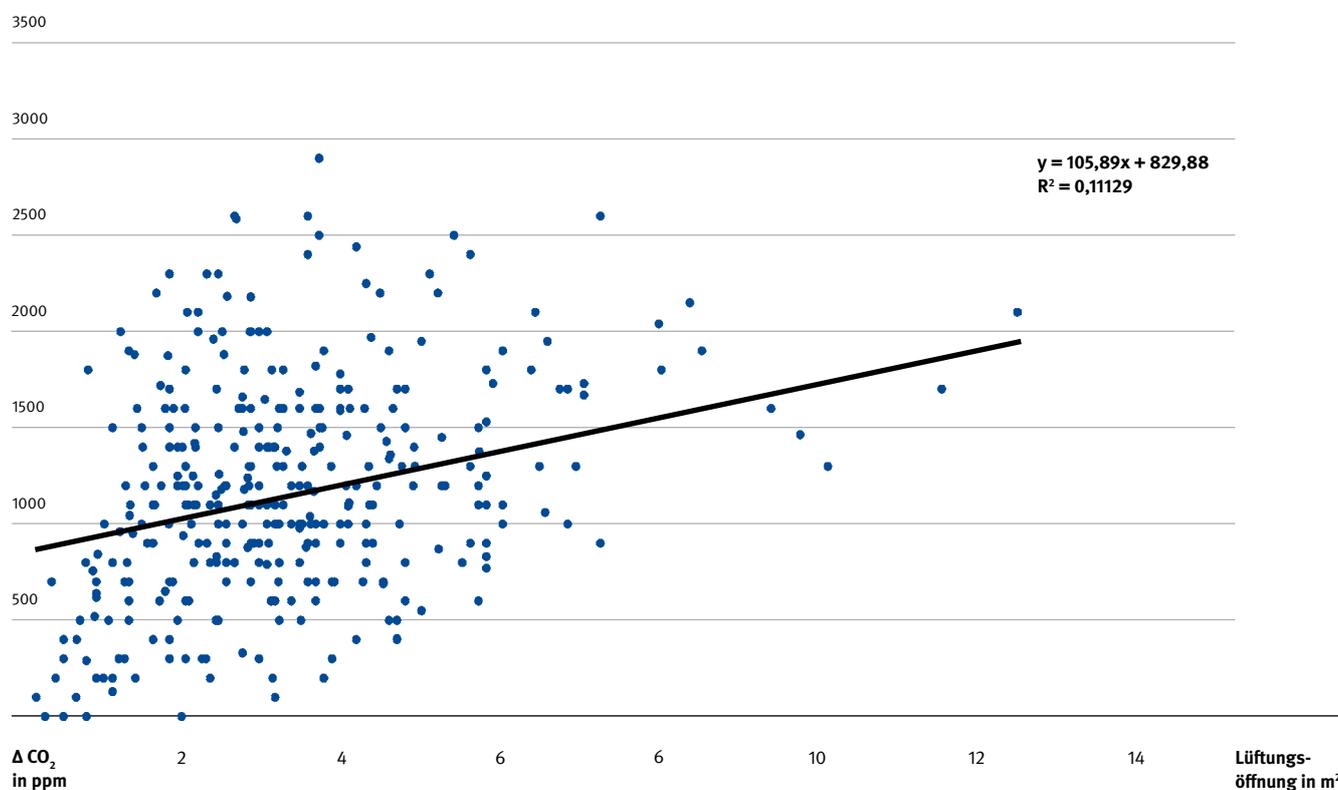


Abb. 13: Lüftungsöffnung bei Stoßlüftung unter Berücksichtigung der Schulform

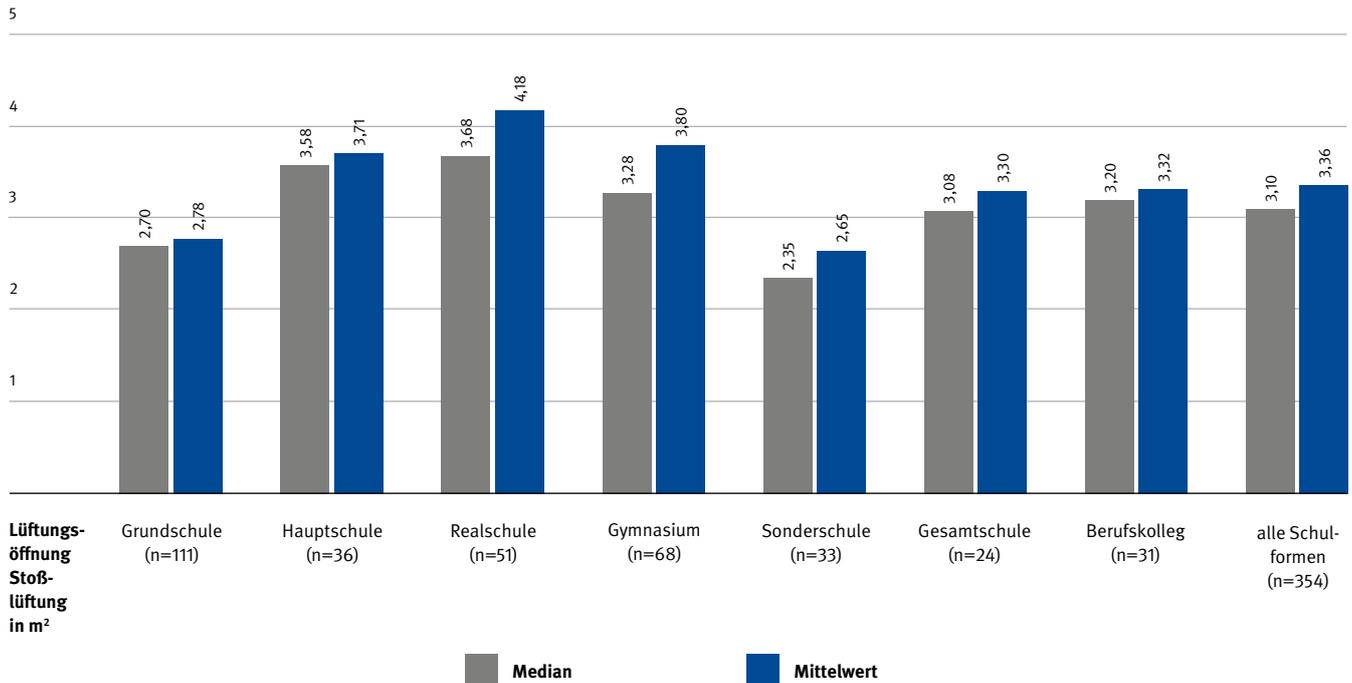


Abb. 14 zeigt eine leicht bessere Stoßlüftungssituation, wenn die Fenster auf der dem Wind zugewandten Seite (Luv) lagen. Wegen der Stoßlüftung über Türen und Fenster ist der Unterschied zwischen der windzugewandten und windabgewandten (Lee) Seite jedoch nicht gravierend.

Abb. 15 ist die Reduktion der CO_2 -Konzentration bei Stoßlüftung verteilt auf die Schulformen zu entnehmen. Diese betrug 1150 ppm als Median und 1191 ppm im arithmetischen Mittel. Über den Durchschnitt lagen hier die Gymnasien, Gesamtschulen und Realschulen. Der geringste Wert war in Sonderschulen zu verzeichnen, wo aber auch die Lüftungsöffnung am kleinsten war. In Grund- und Sonderschulen war die Stoßlüftung häufig eingeschränkt, weil auf den Fensterbänken Blumen oder Bastelmaterialien abgestellt waren. In weiterführenden Schulen war die geöffnete Fläche im Mittel mehr als 0,5 m² größer (Abb. 13).

In Abb. 16 ist der CO_2 -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 m² realisieren. Die geringste Öffnung betrug 0,14 m² die größte 6 m². 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_2 -Konzentration.

Abb. 14: CO₂-Reduktion bei Stoßlüftung unter Berücksichtigung der Windrichtung (Fenster windzugewandt = Luv; Fenster windabgewandt = Lee)

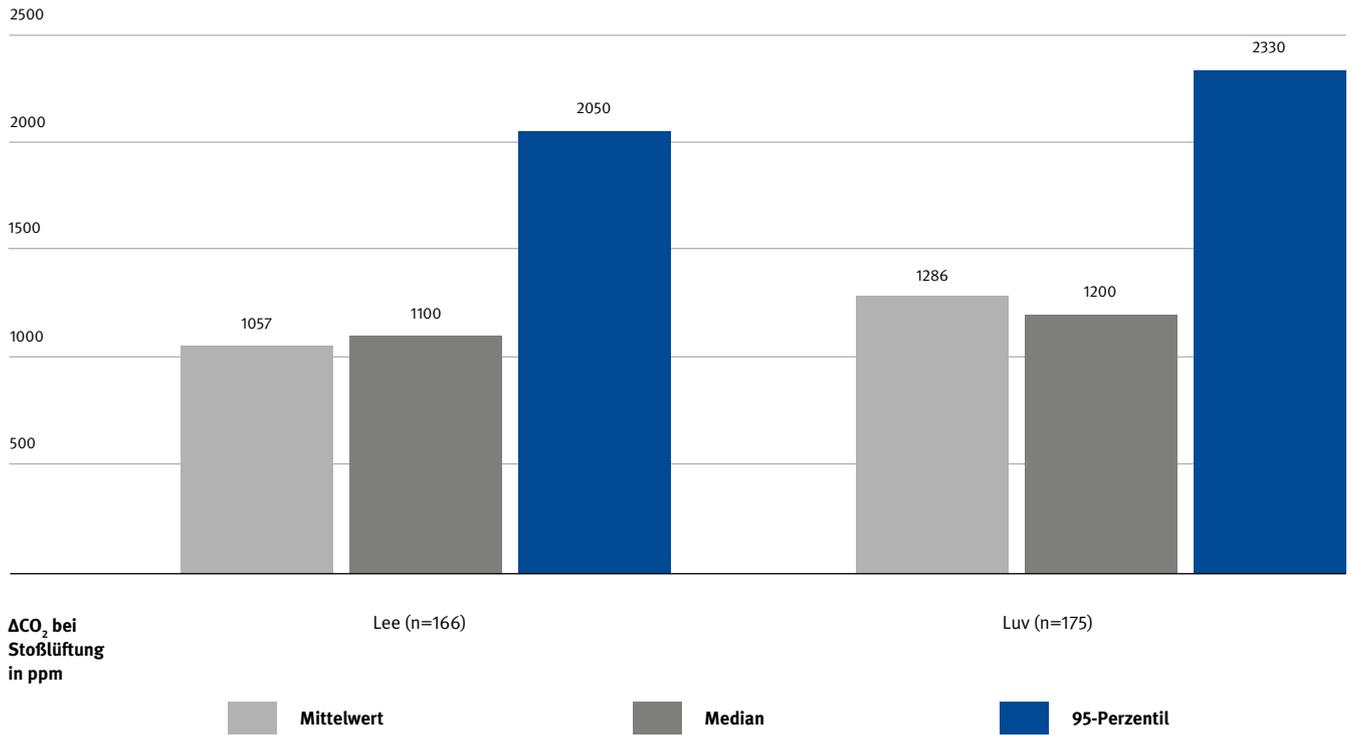


Abb. 15: CO₂-Reduktion bei Stoßlüftung unter Berücksichtigung der Schulform

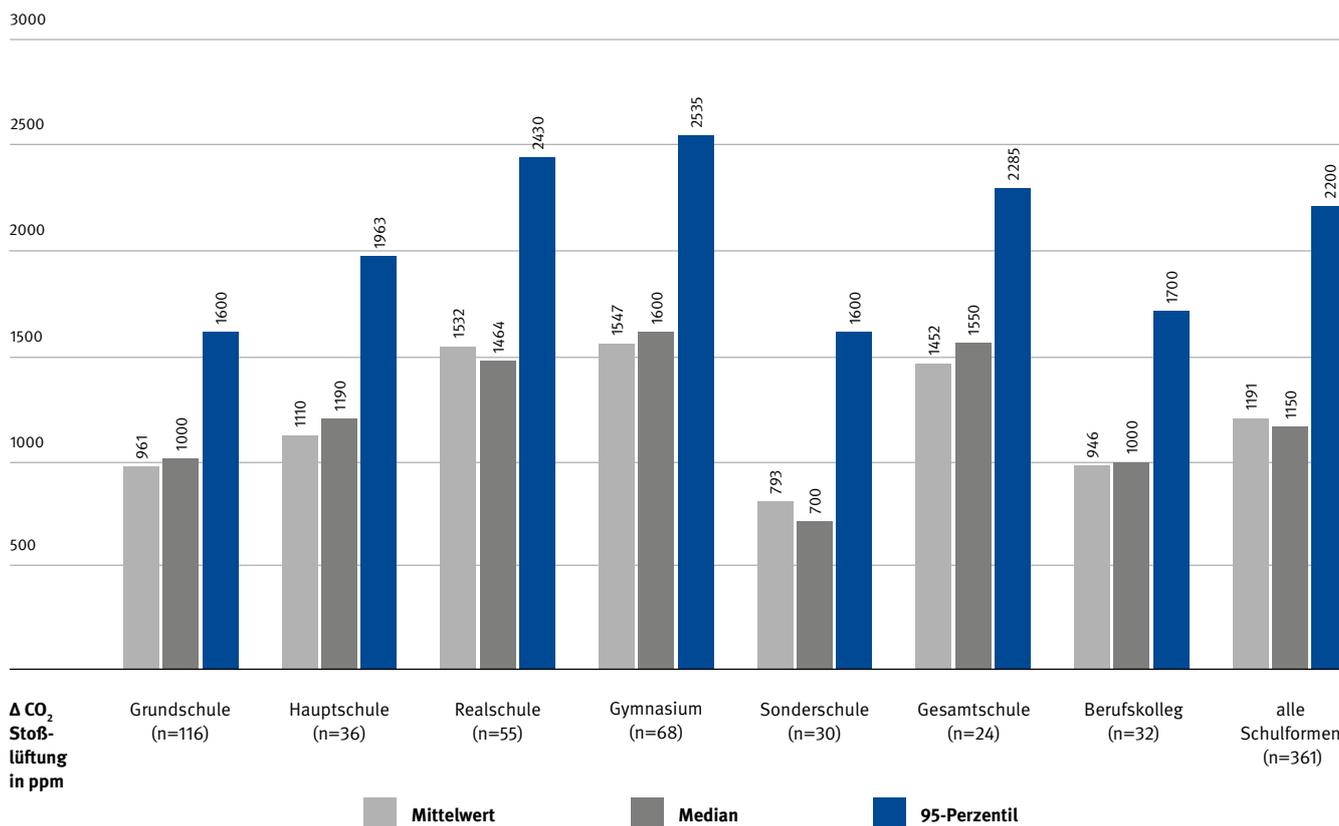
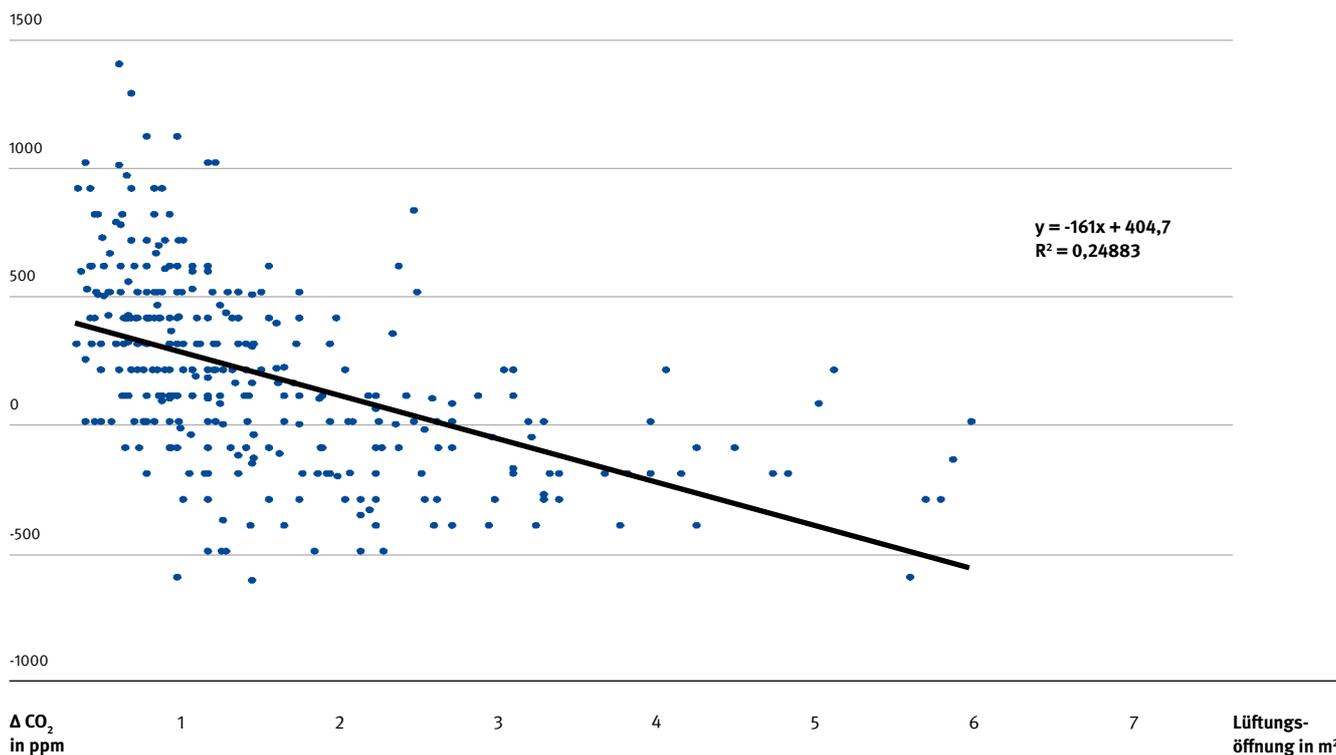


Abb. 16: CO₂-Anstieg bei Kipplüftung unter Berücksichtigung der Lüftungsöffnung

Im Gegensatz zur Stoßlüftung ist die Zunahme der CO₂-Konzentrationen mit rund 300 ppm auf der windzugewandten Seite (Luv) höher als die auf der windabgewandten Seite (Lee) mit 100 ppm (Abb. 17).

Abb. 18 zeigt den Anstieg der CO₂-Konzentration in der Stunde mit Kipplüftung verteilt auf die Schulformen. Im Durchschnitt beträgt der Anstieg 200 ppm. Die höchsten Anstiege sind in den Realschulen zu erkennen, 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 (Abb. 19). In den Sonderschulen lag die geöffnete Fensterfläche zwar unter dem Durchschnitt, dafür waren hier aber die Schülerzahlen am geringsten.

Abb. 20 zeigt die CO₂-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 Anstieg der CO₂-Konzentrationen mit 308 ppm deutlich höher als im Sommerhalbjahr (74 ppm), wobei im Sommerhalbjahr die geöffnete Fensterfläche mit 1,78 m² auch annähernd doppelt so hoch war wie die im Winterhalbjahr (0,96 m²).

Abb. 17: CO₂-Anstieg unter Berücksichtigung der Windrichtung

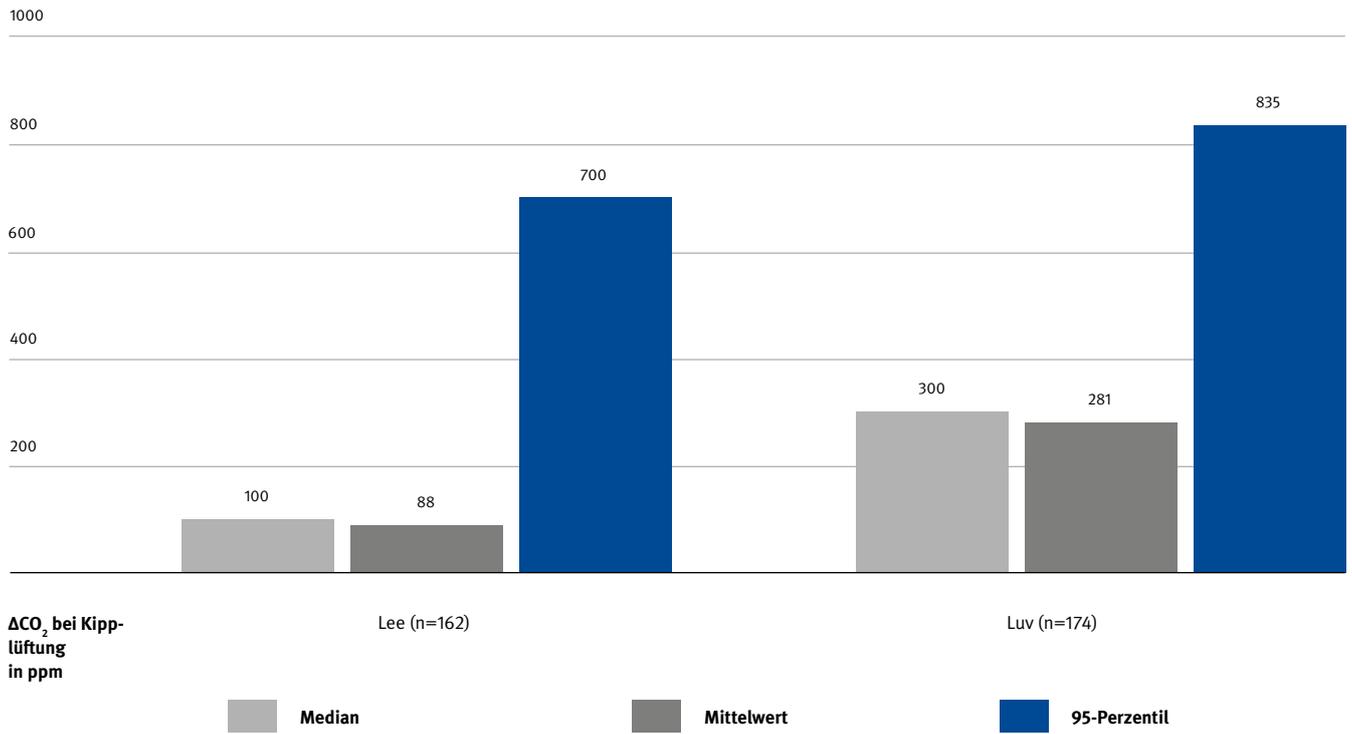


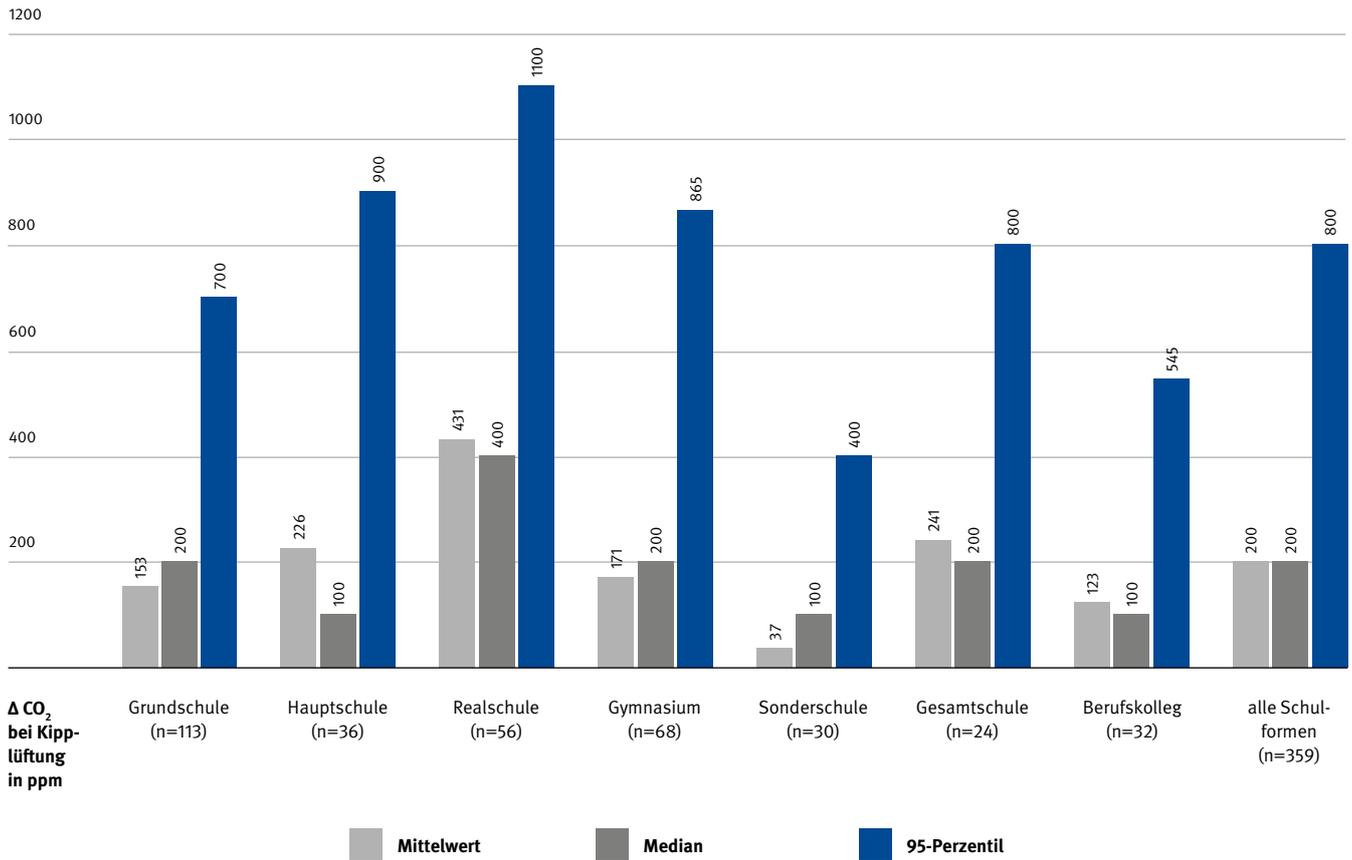
Abb. 18: CO₂-Anstieg bei Kipplüftung unter Berücksichtigung der Schulform

Abb. 19: Geöffnete Fensterfläche bei Kipp Lüftung unter Berücksichtigung der Schulform

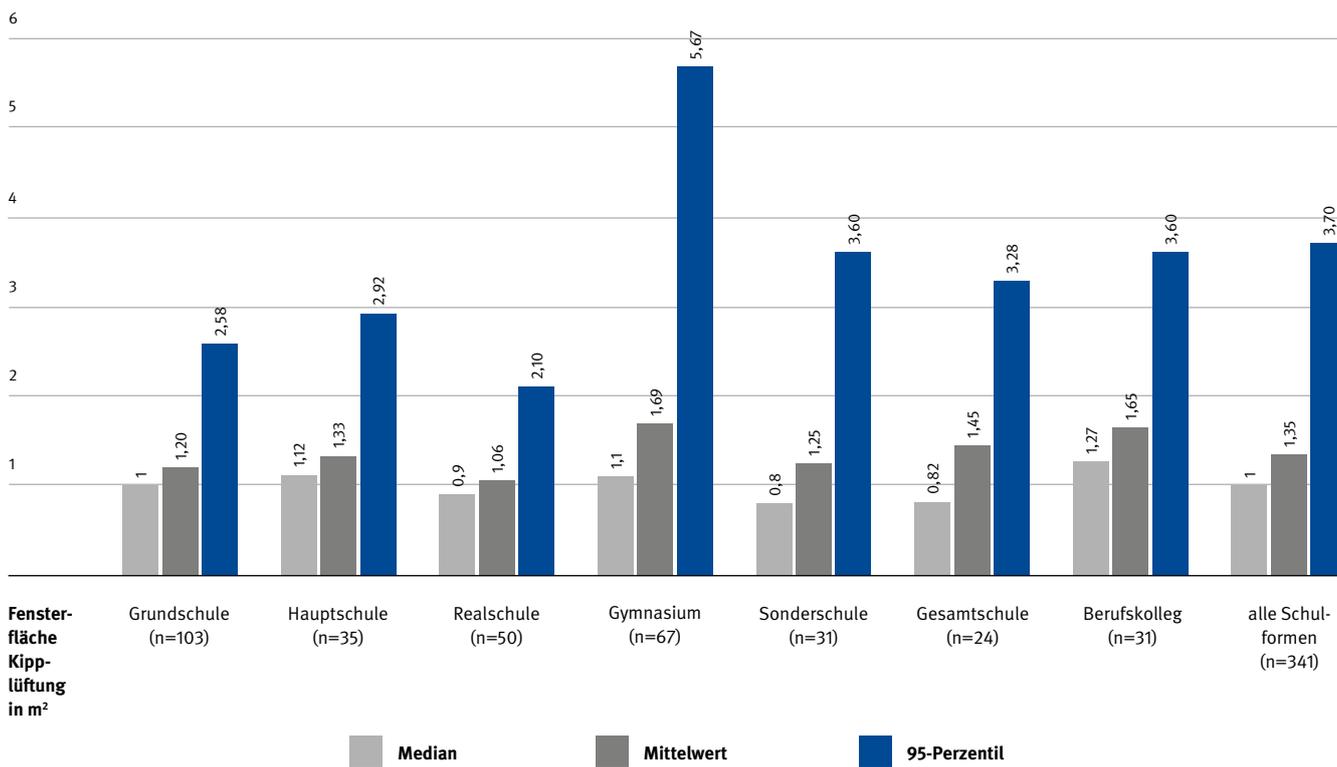
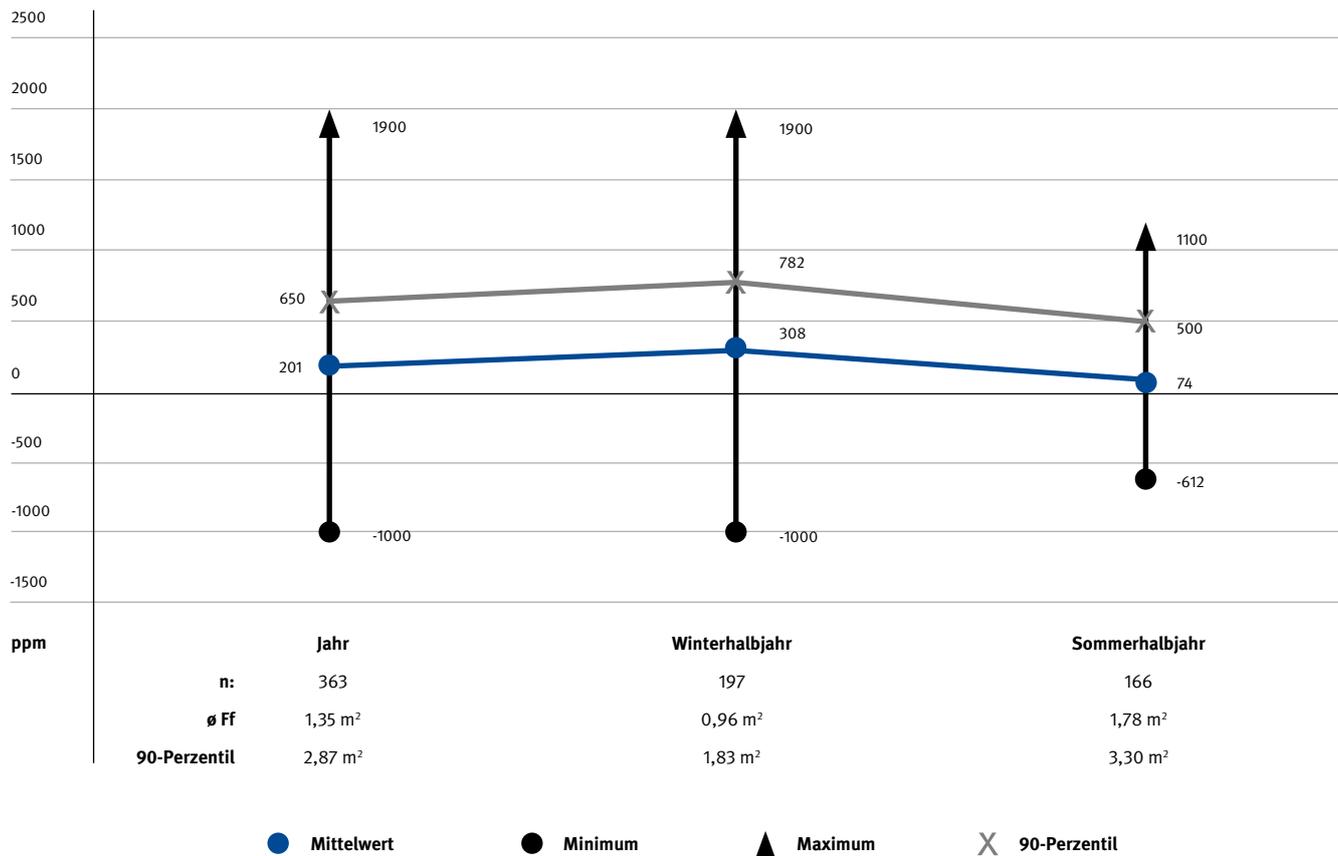


Abb. 20: CO₂-Anstieg während der Unterrichtsstunde mit Kipplüftung bezogen auf das Winter- und Sommerhalbjahr mit Angabe der geöffneten Fensterfläche (Ff)



Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Raumgrößen und Raumnutzerzahlen (siehe Abb. 6 und 7) sind in den Abb. 21 bis 23 die Anstiege der CO₂-Konzentration pro Raumnutzer in der Stunde mit Schülerinnen und Schülern ohne Lüftung in Abhängigkeit von den Baujahren, dem Renovierungszustand und der Bauweise dargestellt. Unter Berücksichtigung der Baujahre ist ein leicht höherer Anstieg der CO₂-Konzentration in den Gebäuden zu verzeichnen, die nach 1985 errichtet wurden, was auf eine dichtere Gebäudehülle schließen lässt (Abb. 21). Das Kollektiv der Gebäude, die in den letzten zwei Jahren gebaut wurden, ist dabei in dem Kollektiv der Gebäude mit Baujahr nach 1985 nicht enthalten. Der Anstieg in Gebäuden dieser Baujahre fällt sogar etwas geringer aus. Eine größere Dichtheit der Gebäudehülle bei Neubauten im Vergleich zu den nach 1985 errichteten Gebäuden ist somit nicht zu erkennen.

Auch in renovierten Klassenräumen (Abb. 22) ist der CO₂-Anstieg leicht höher als in nicht renovierten, wengleich die Frage nach dem Renovierungszustand sich nicht auf einen Austausch der Fenster oder eine durchgeführte Fassadendämmung bezieht. Rückschlüsse auf eine eventuell größere Dichtheit der Gebäudehülle bei renovierten Gebäuden sind somit nur eingeschränkt möglich. Kaum Unterschiede zeigen sich auch

bei dem Vergleich der Gebäudebauweisen (Abb. 23). Die Vermutung, dass Gebäude in Massivbauweise dichter sind als die in Pavillon- oder Ständerbauweise, lässt sich somit nicht bestätigen. Eher zeigt sich eine gegenläufige Tendenz.

Abb. 21: CO₂-Anstieg pro Raumnutzer im Unterricht ohne Lüftung unter Berücksichtigung des Baujahrs des Gebäudes

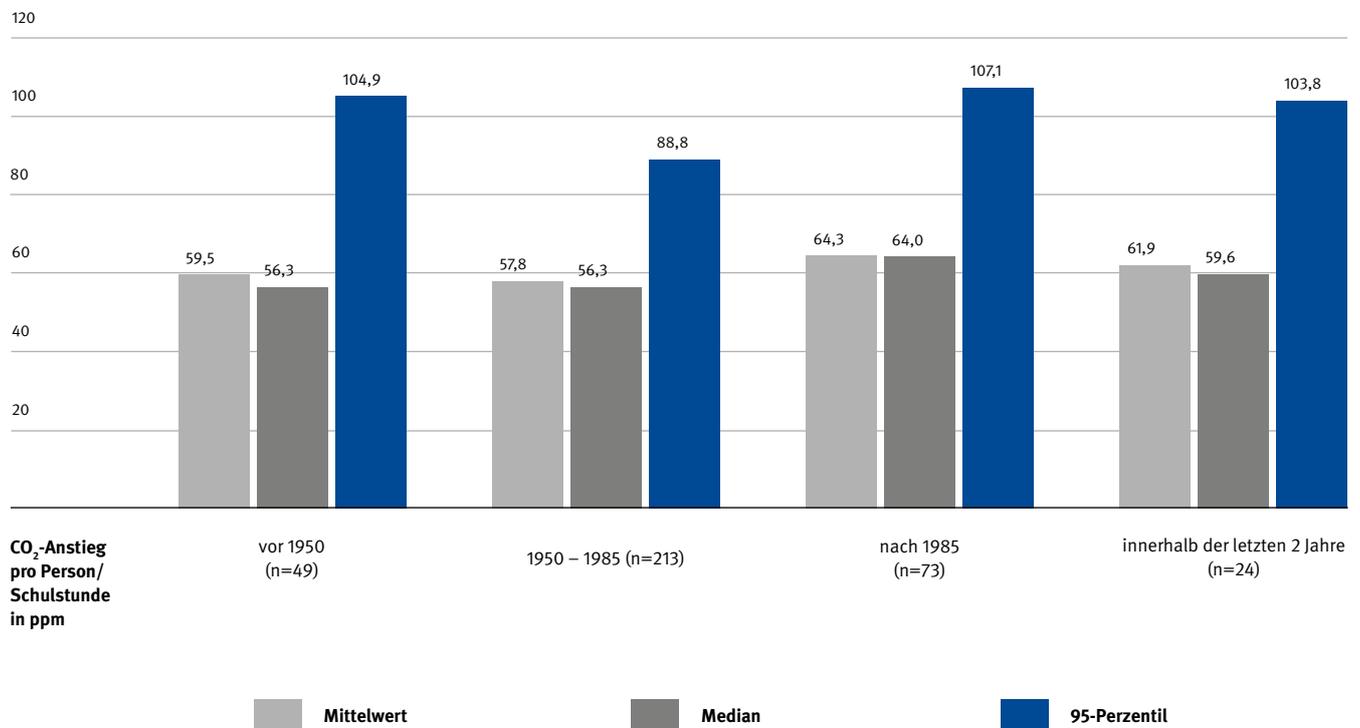


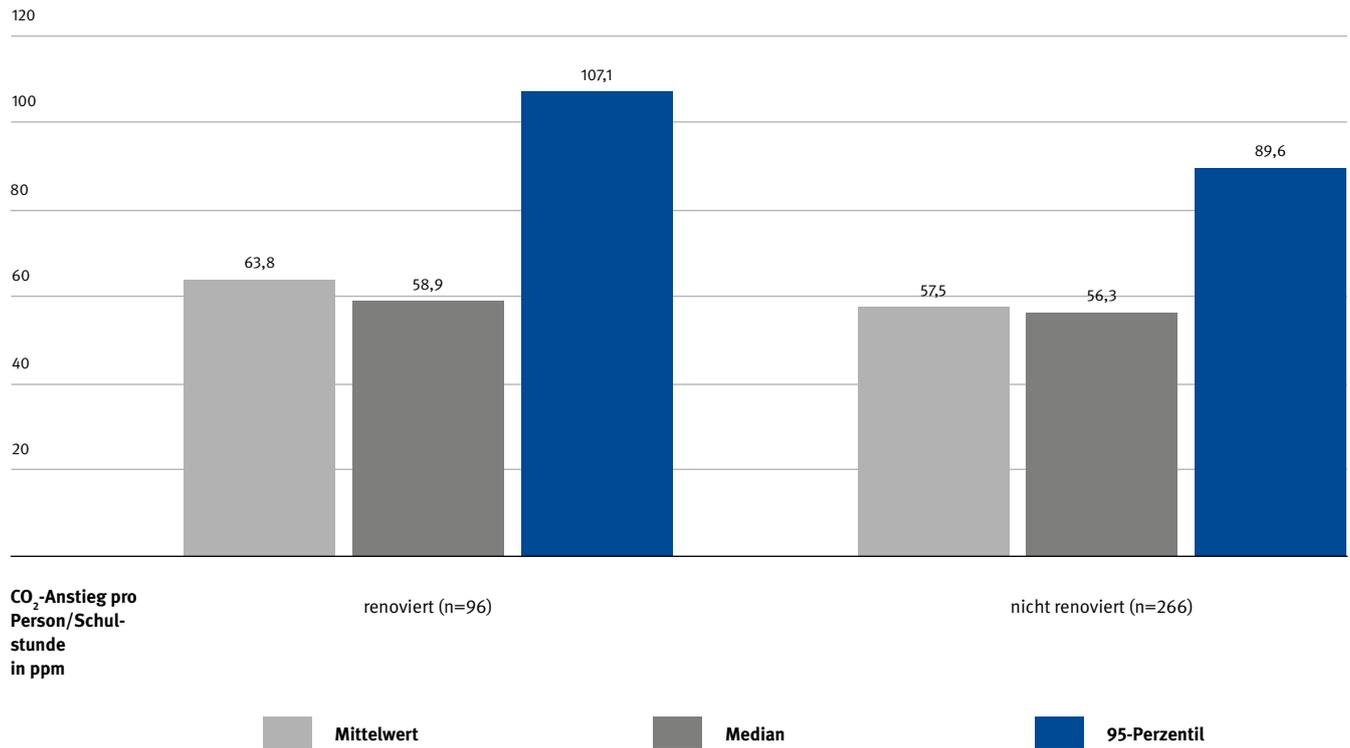
Abb. 22: CO₂-Anstieg pro Raumnutzer im Unterricht ohne Lüftung unter Berücksichtigung des Renovierungszustandes

Abb. 23: CO₂-Anstieg pro Raumnutzer im Unterricht ohne Lüftung unter Berücksichtigung der Bauweise

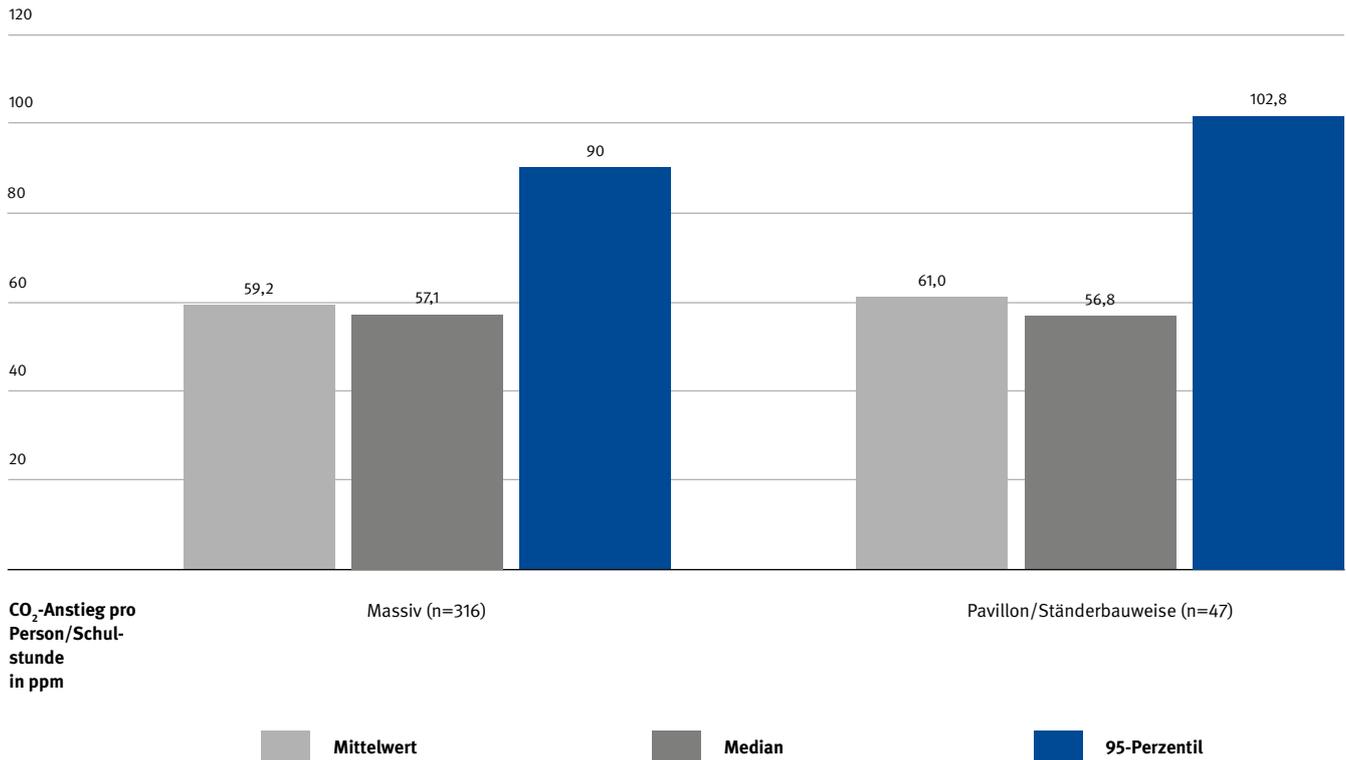


Abb. 24 und 25 zeigen die CO₂-Grundbelastung in der Stunde ohne Schülerinnen und Schüler, die CO₂-Reduktion bei Stoßlüftung und den CO₂-Anstieg in der Stunde „mit Schülerinnen und Schülern bei Kipplüftung“ unter dem Aspekt der Lage der Schule. Hierbei ist die Lage „viel befahrene Straße“ auch in dem Kollektiv „Innenstadt“ enthalten. Die Grundbelastung ist somit in allen Lagen in etwa gleich (Abb. 24). Auch bei der CO₂-Reduktion durch Stoßlüftung sind keine gravierenden Unterschiede erkennbar (Abb. 25). Die Reduktion an viel befahrenen Straßen ist demnach etwas höher als die in den ländlichen Bereichen oder in den Wohngebieten. An viel befahrenen Straßen zeigen sich auch die geringsten Anstiege der CO₂-Konzentrationen bei Kipplüftung, die höchsten dagegen im ländlichen Bereich bzw. am Stadtrand, wenngleich die Differenzen nicht erheblich sind (Abb. 26). Die geöffnete Fensterfläche bei Kipplüftung ist dabei in allen Lagen im Mittel in etwa gleich (Abb. 27). Auch bei dieser Betrachtung scheinen die Zahl der Raumnutzer, die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen sowie die Windstärke und Windrichtung die maßgebenden Faktoren zu sein. Die Lage am Stadtrand ist mit zwölf Schulen allerdings auch nur wenig repräsentativ.

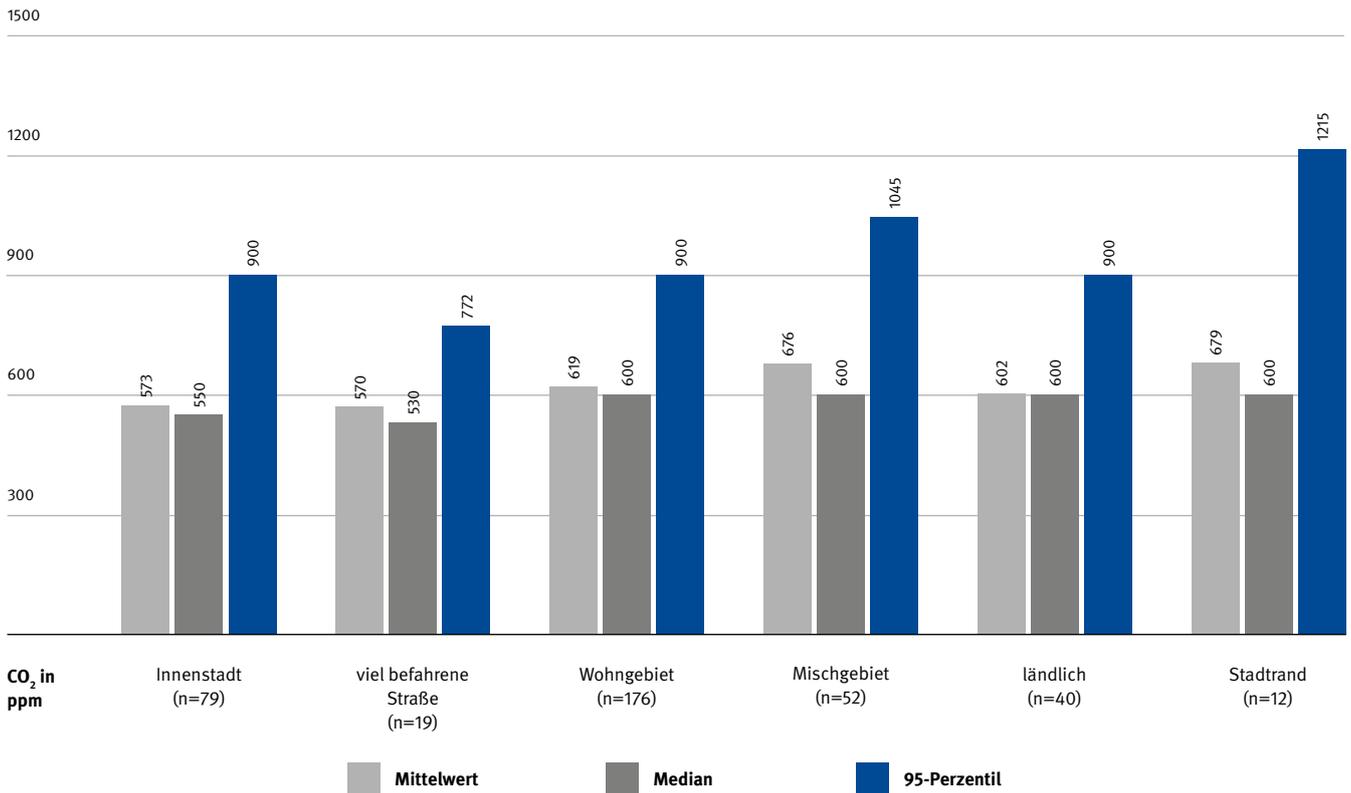
Abb. 24: Grundbelastung von CO₂ vor Unterrichtsbeginn in Abhängigkeit von der Lage der Schule

Abb. 25: CO₂-Reduktion durch Stoßlüftung unter Berücksichtigung der Lage der Schule

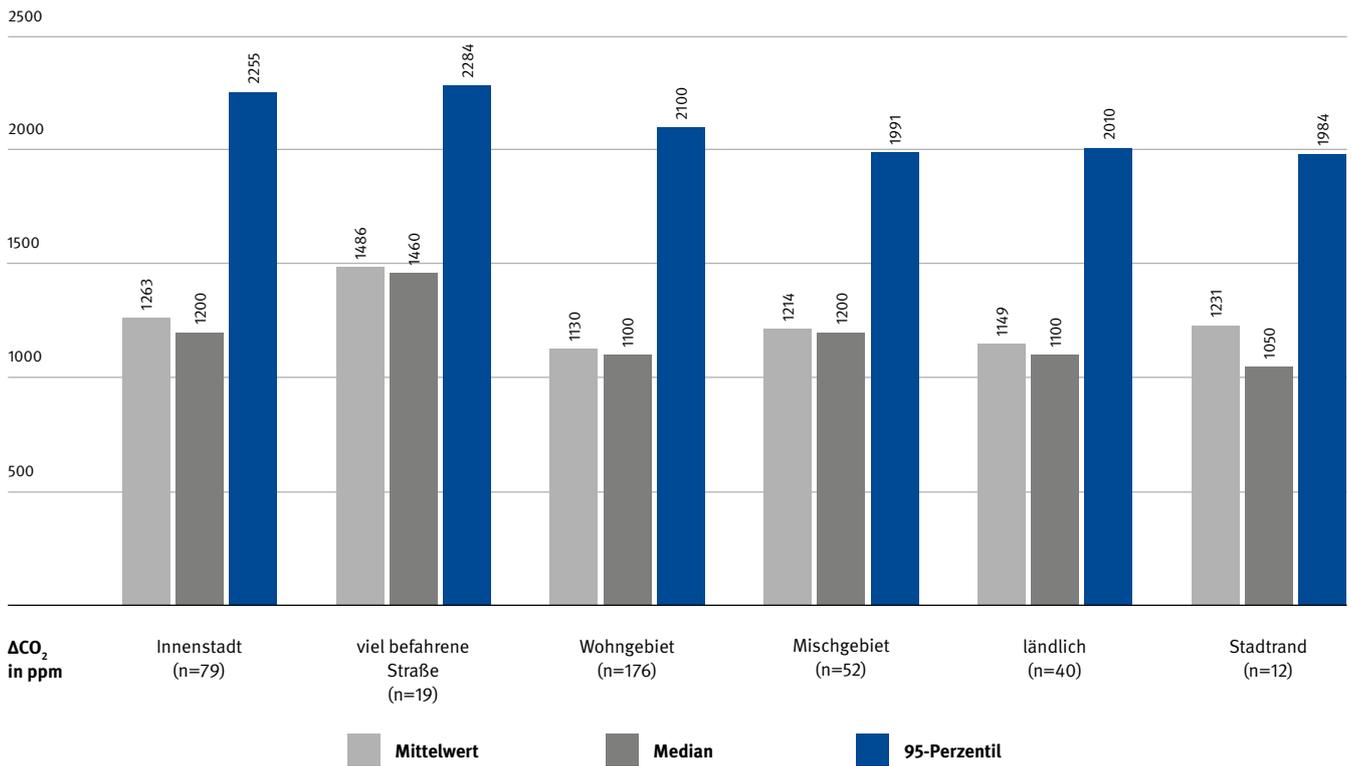


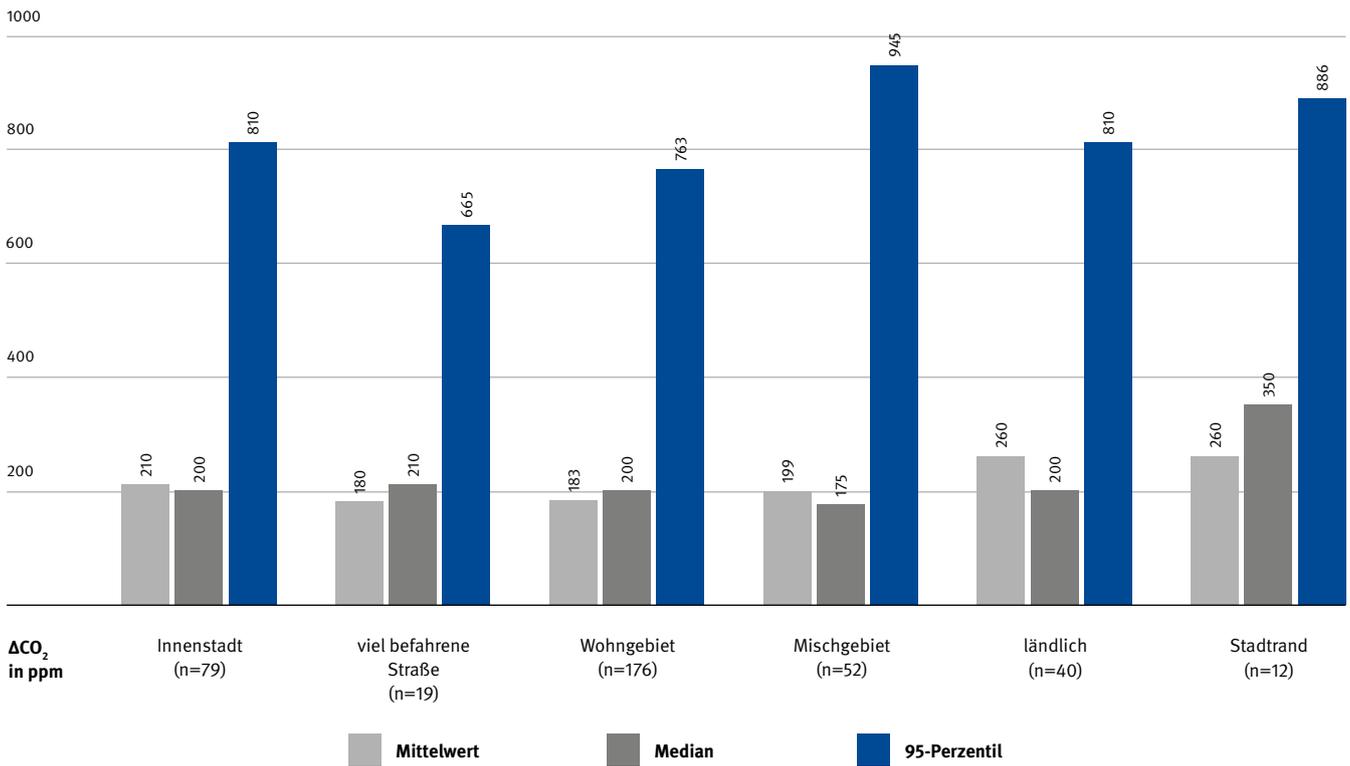
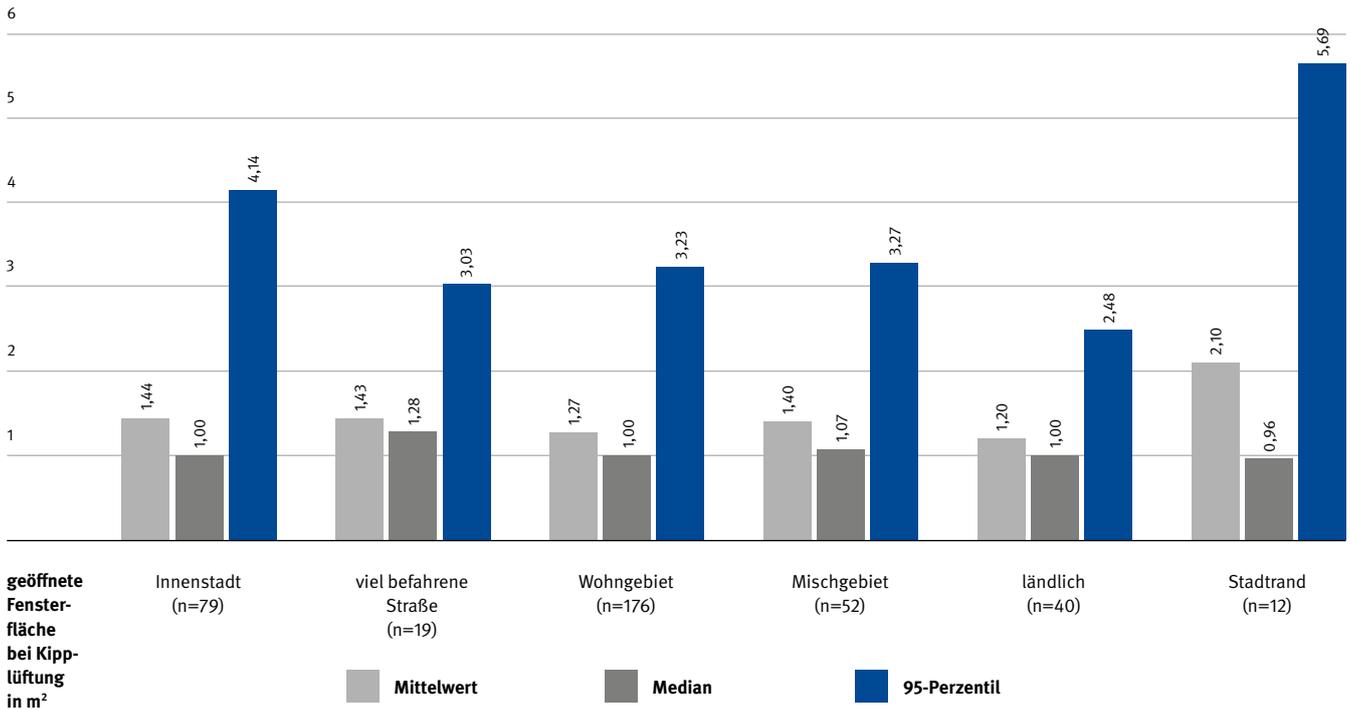
Abb. 26: CO₂-Anstieg bei Kipplüftung unter Berücksichtigung der Lage der Schule

Abb. 27: Geöffnete Fensterfläche bei Kipplüftung unter Berücksichtigung der Lage der Schule



3.3 Ergebnisse der Messungen der raumklimatischen Verhältnisse

Den Abb. 28 bis 30 sind die Ergebnisse der Messungen der operativen Raumtemperatur in den Situationen ohne Schüler, in der Unterrichtssituation ohne Lüftung, in der Situation nach Stoßlüftung und in der Unterrichtssituation mit Kipplüftung verteilt auf zwei Monatsintervalle zu entnehmen. Die Ergebnisse für die Monate Juli bis August haben insgesamt geringere Fallzahlen als in den anderen Monaten, da in den Sommerferien keine Messungen stattfanden. Die mittleren Temperaturen vor Unterrichtsbeginn liegen in 90 Prozent der Fälle in allen Monatsintervallen über 19 °C. Im Median werden operative Raumtemperaturen von 20,5 bis 22,5 °C vor Unterrichtsbeginn erreicht. In der Unterrichtsstunde mit Schülerinnen und Schülern stiegen die Temperaturen bei geschlossenen Fenstern im Median um etwa 2 °C an. Die maximal ermittelte operative Raumtemperatur beträgt 31,1 °C im Monatsintervall September bis Oktober. Nach Stoßlüftung fielen die operativen Raumtemperaturen in den Wintermonaten bis auf 16 °C ab (Abb. 30). Im Median blieben sie aber in einem Bereich zwischen 20 und 23 °C. In der Unterrichtssituation mit Schülerinnen und Schülern und Kipplüftung stiegen die Temperaturen in den Wintermonaten dann wieder um ein bis zwei °C an, in den Sommermonaten veränderten sie sich im Vergleich zur Situation nach der Stoßlüftung dagegen kaum (Abb. 31).

Abb. 28: Operative Raumtemperaturen vor Beginn des Unterrichts ohne Lüftung

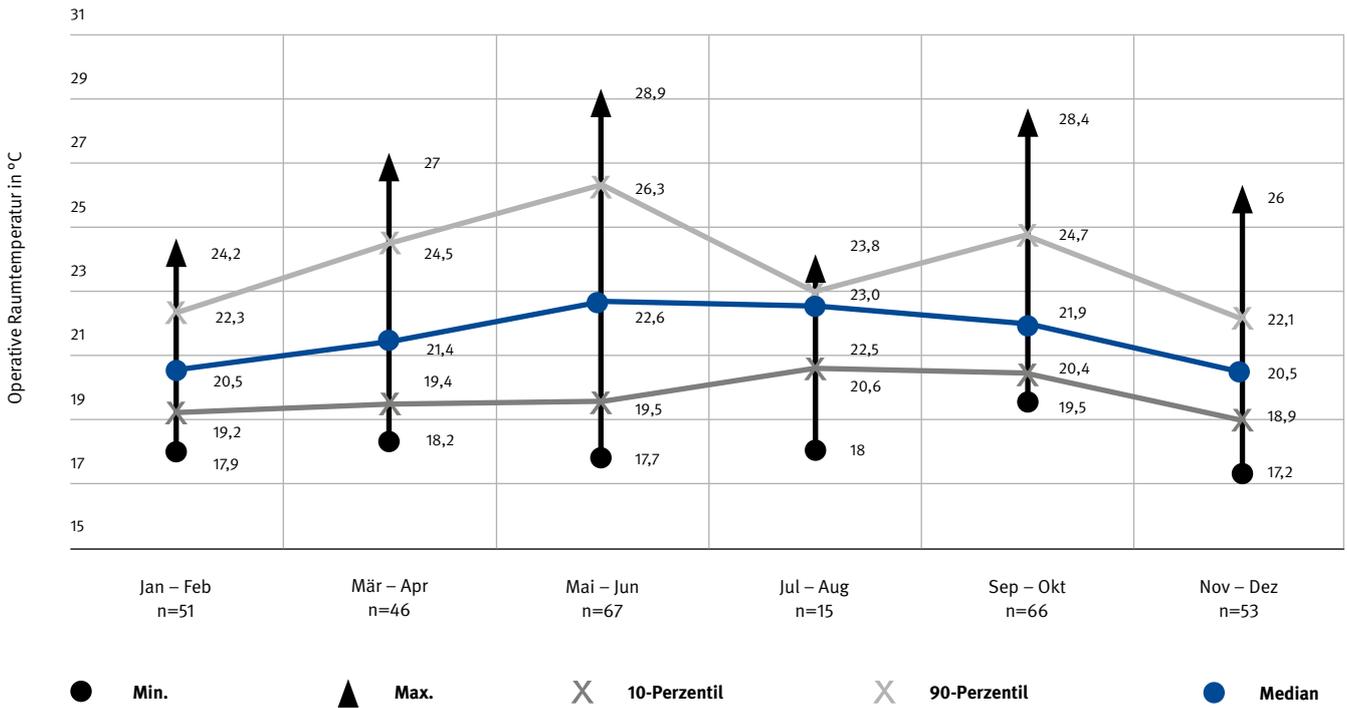


Abb. 29: Operative Raumtemperaturen im Unterricht ohne Lüftung

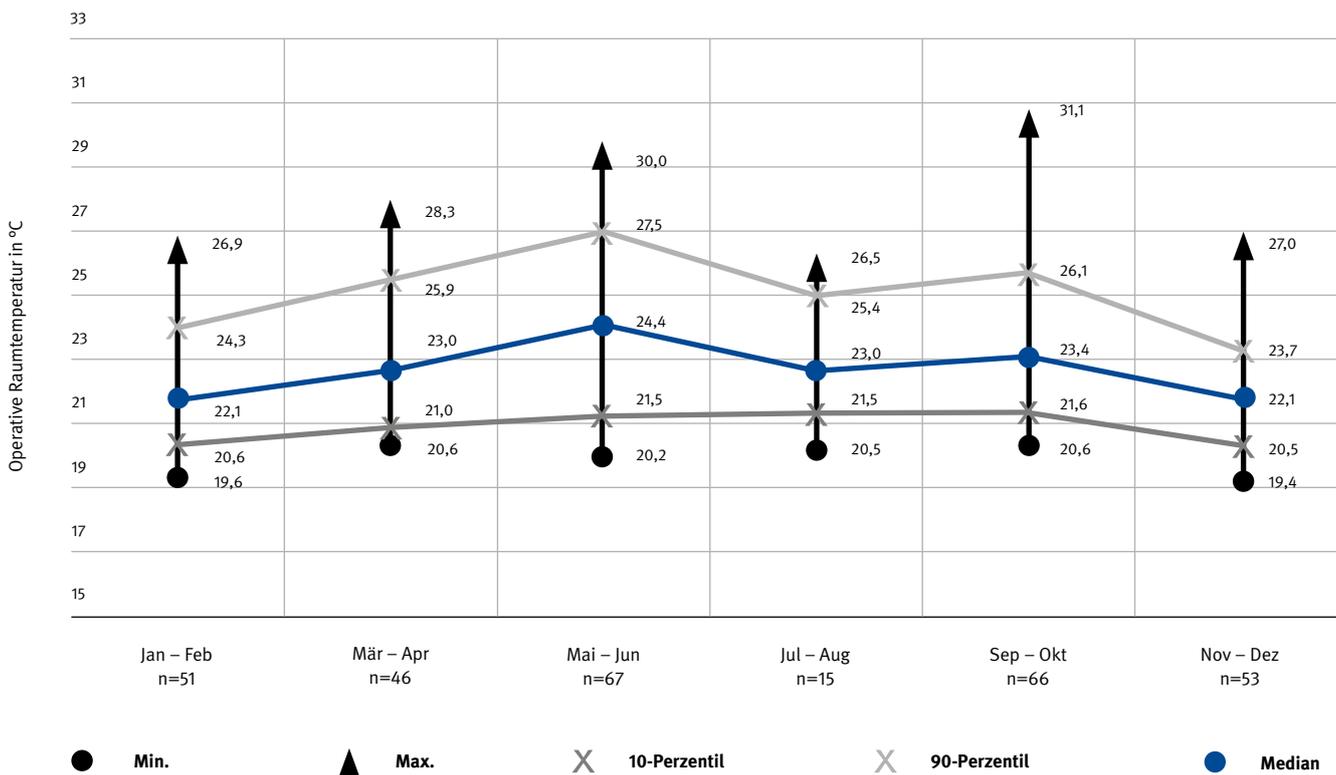
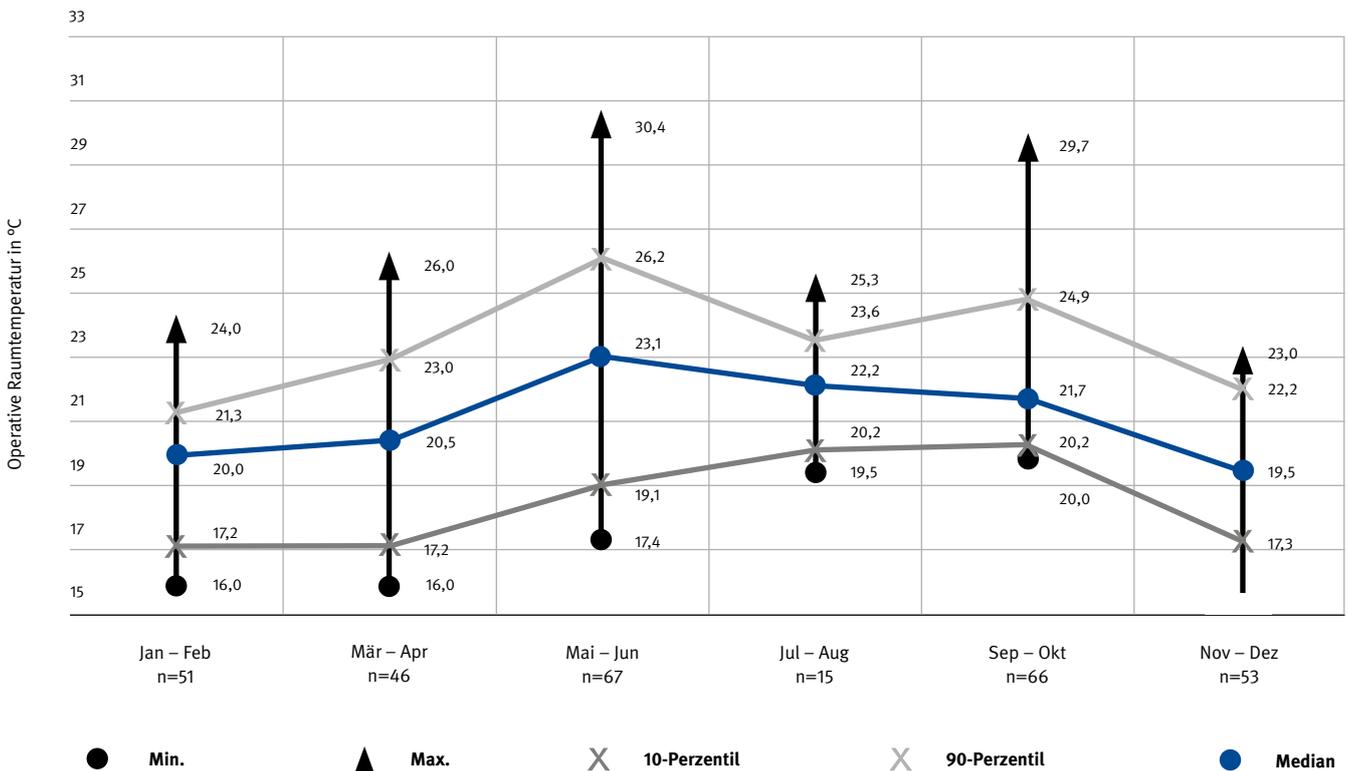


Abb. 30: Operative Raumtemperatur nach Stoßlüftung



Die relativen Luftfeuchtigkeiten in den verschiedenen Situationen sind den Abb. 32 bis 34 zu entnehmen. Man erkennt in den einzelnen Monatsintervallen eine große Spannweite. In den Wintermonaten liegt die relative Luftfeuchtigkeit vor Unterrichtsbeginn zwischen 15 und 70 Prozent, im Frühjahr und Herbst zwischen 26 und 78 Prozent sowie in den Sommermonaten zwischen 40 und 78 Prozent. Im Median wird die relative Luftfeuchtigkeit von 40 Prozent allerdings selbst in den Wintermonaten nur leicht unterstritten (Abb. 32).

Durch die Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern steigt die relative Luftfeuchtigkeit in allen Monatsintervallen um etwa fünf bis acht Prozent an (Abb. 33). Nach Stoßlüftung ergibt sich ein weiterer leichter Anstieg, wobei in den Sommermonaten die Spitzenwerte 80 Prozent relativer Luftfeuchte überschreiten (Abb. 34).

In der Unterrichtssituation mit Kipplüftung fällt die relative Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum ungelüfteten Zustand leicht ab, wobei der Abfall in den Sommermonaten etwas geringer ist als in den Wintermonaten (Abb. 35).

Abb. 31: Operative Raumtemperaturen im Unterricht bei Kipplüftung

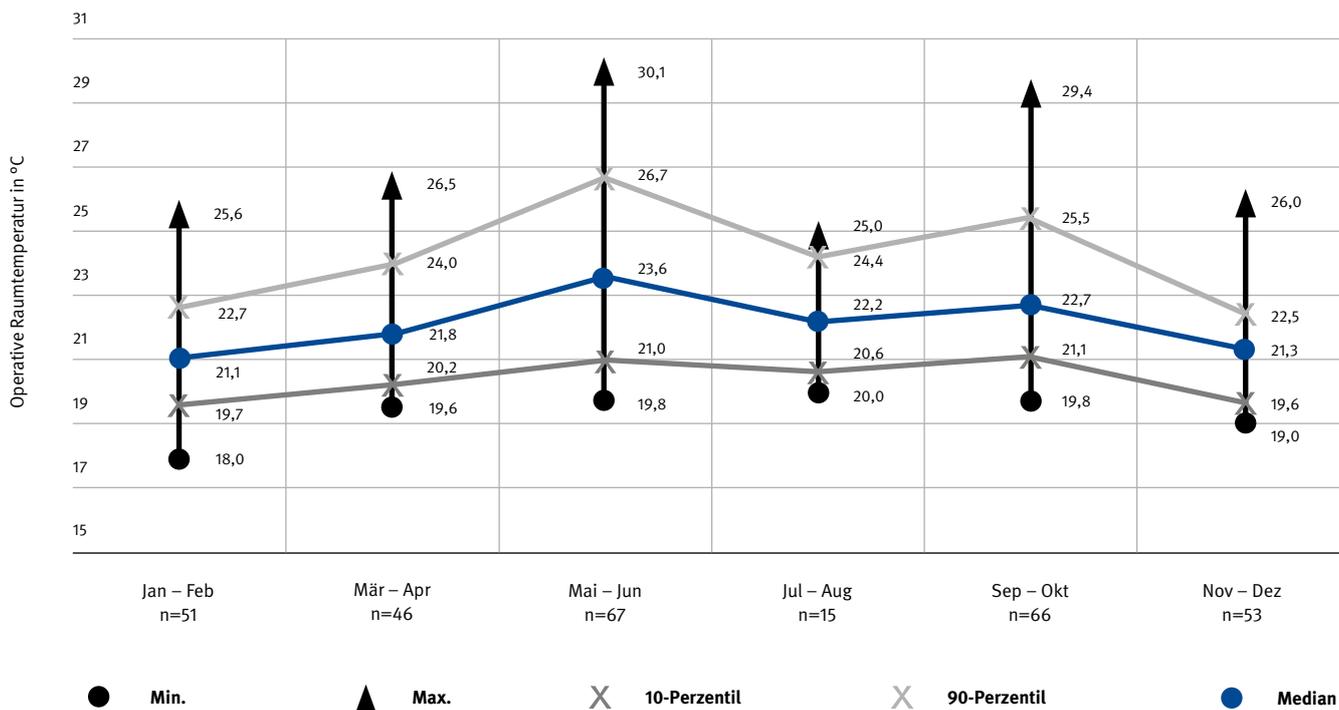


Abb. 32: Relative Luftfeuchtigkeit vor Beginn des Unterrichts ohne Lüftung

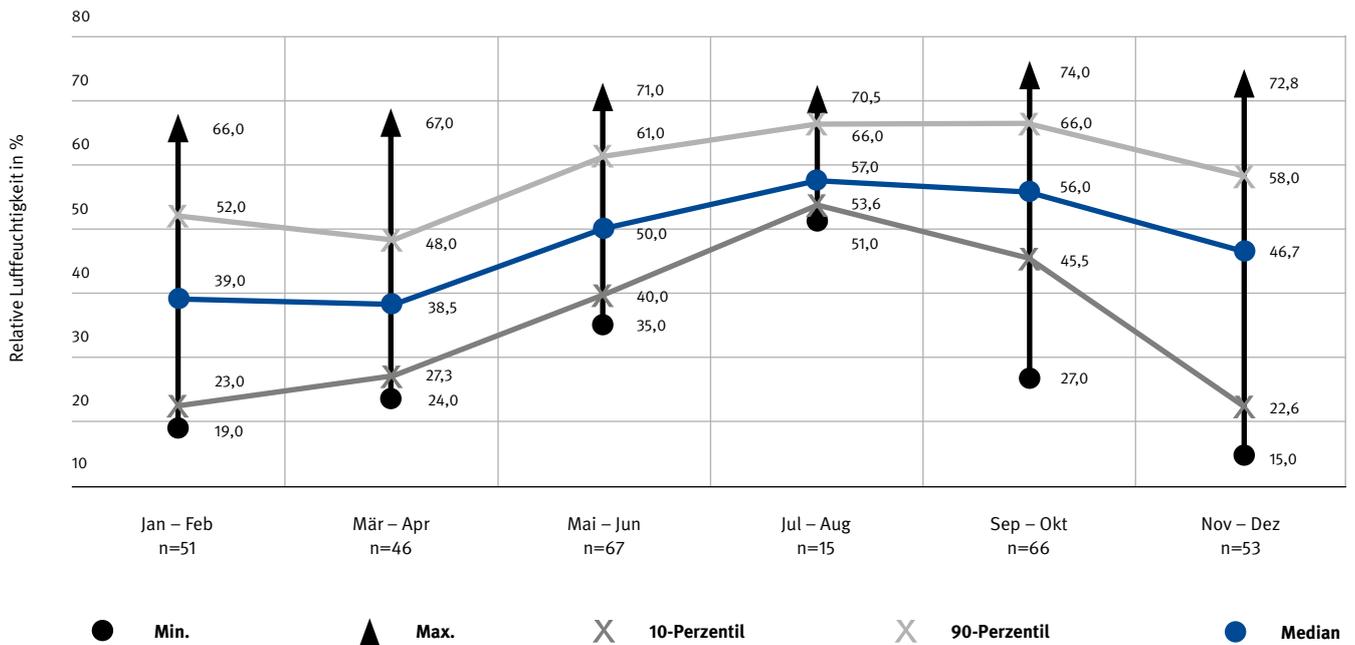


Abb. 33: Relative Luftfeuchtigkeit im Unterricht ohne Lüftung

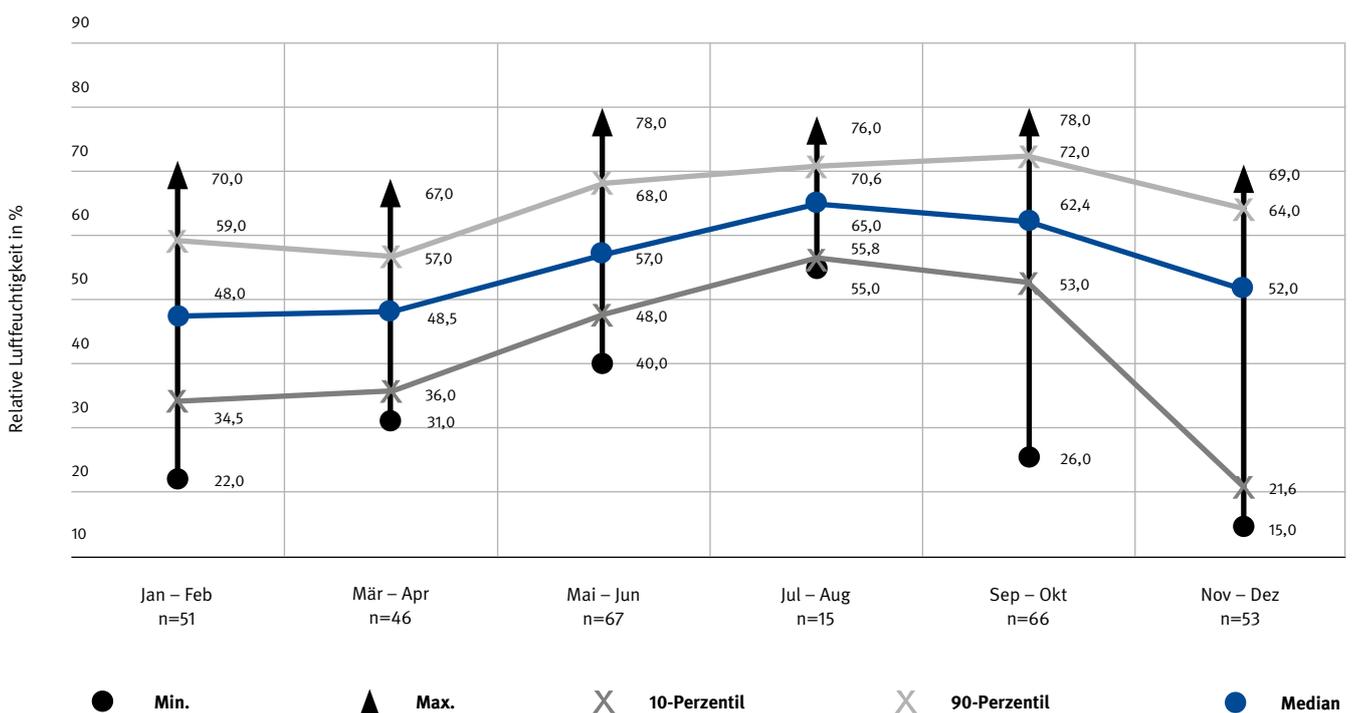


Abb. 34: Relative Luftfeuchtigkeit nach Stoßlüftung

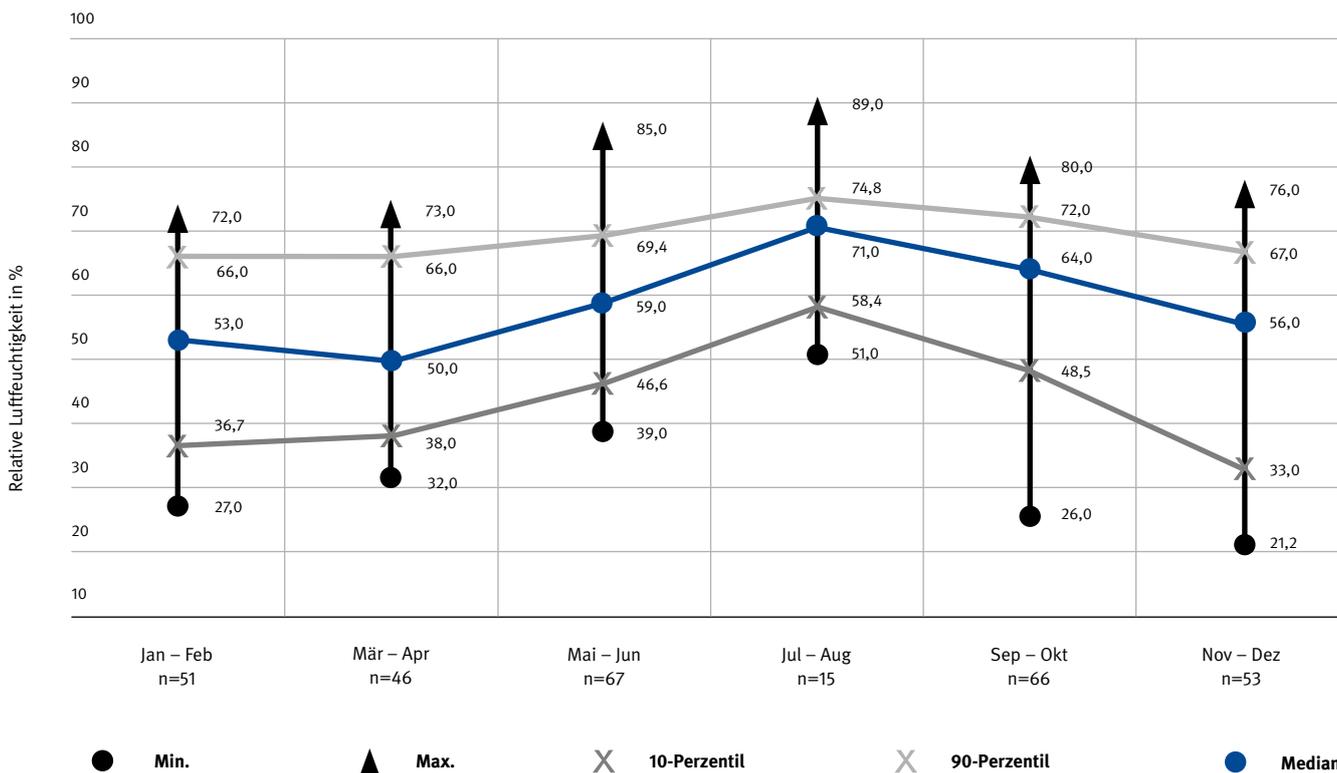
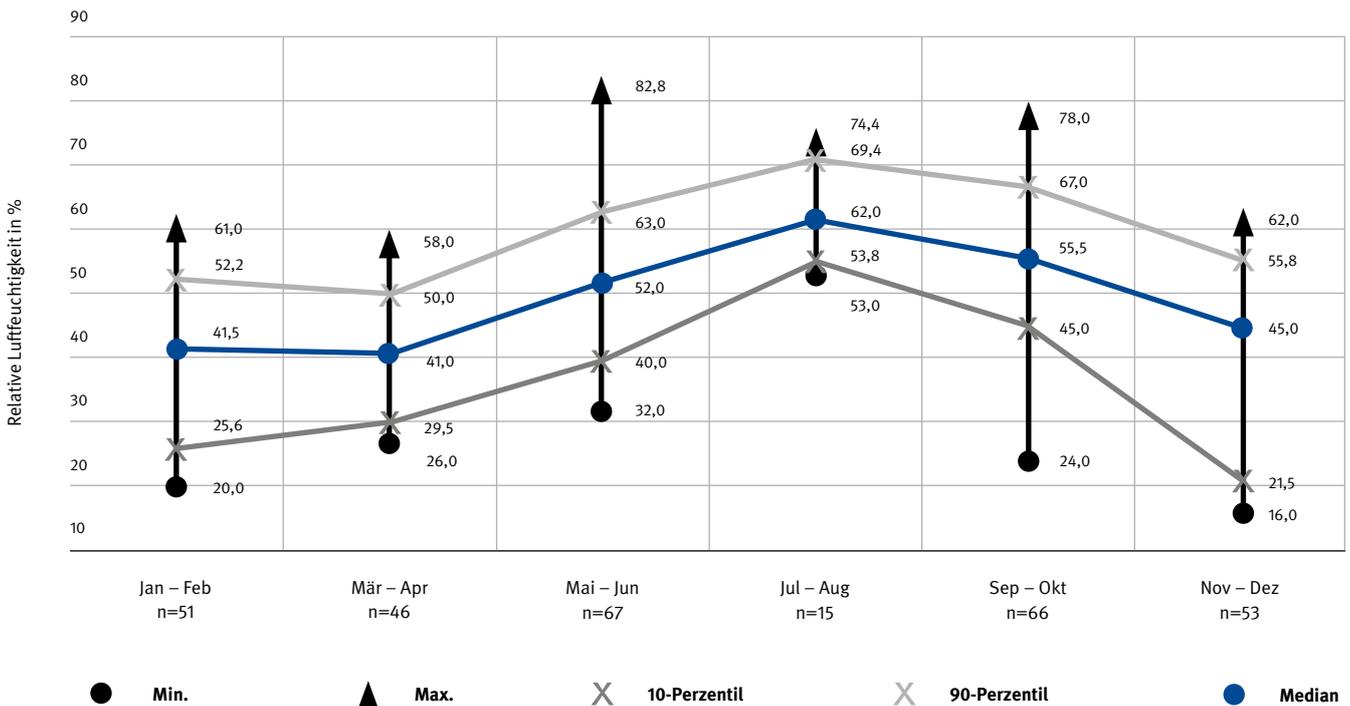


Abb. 35: Relative Luftfeuchtigkeit im Unterricht bei Kipplüftung



In den Abb. 36 bis 39 ist der PMV-Index für die unterschiedlichen Unterrichtssituationen dargestellt. Demnach liegt der Index vor dem Unterricht bis auf die Monate September und Oktober in zehn Prozent der Fälle unter $-0,5$. Im Median bewegt sich der Index jedoch in allen Intervallen in einem Bereich zwischen $-0,5$ und 0 (Abb. 36). Bei Anwesenheit von Schülerinnen und Schülern steigt der Index dann deutlich an. Betrachtet man den Bereich zwischen dem 10- und 90-Perzentil für die Unterrichtssituation ohne Lüftung, so liegt dieser in den Wintermonaten in einem Bereich zwischen etwa $-0,4$ und $+0,5$. In den Sommermonaten liegt der Bereich zwischen $-0,2$ und $1,2$ für Mai bis Juni und 0 bis $0,9$ für die Monate September bis Oktober. Der Medianwert liegt in den Wintermonaten bei 0 und steigt in den sonstigen Monaten bis auf $0,4$ an (Abb. 37).

Nach Stoßlüftung sinkt der PMV-Index im Median um etwa $0,4$ bis $0,6$, bleibt über alle Monatsintervalle aber noch in einem Bereich zwischen $-0,6$ und 0 . Das 90-Perzentil liegt bis auf das Intervall von Mai bis Juni in einem Bereich bis $+0,5$.

In der Unterrichtssituation mit Kipplüftung steigt der PMV-Index wieder an. In den Wintermonaten liegt er als 10-Perzentil in einem Bereich zwischen $-0,7$ und $-0,3$ und in den Sommermonaten in einem Bereich um $-0,3$. Der Median schwankt über alle Intervalle in einem Bereich zwischen $-0,3$ und $+0,3$ mit leicht negativen Werten in den Wintermonaten und leicht positiven Werten in den Sommermonaten. Die 90-Perzentilwerte liegen zwischen $0,1$ und $0,4$ in den Wintermonaten sowie $0,6$ bis $0,9$ in den Sommermonaten (Abb. 39).

Abb. 36: PMV Indices vor Beginn des Unterrichts ohne Lüftung

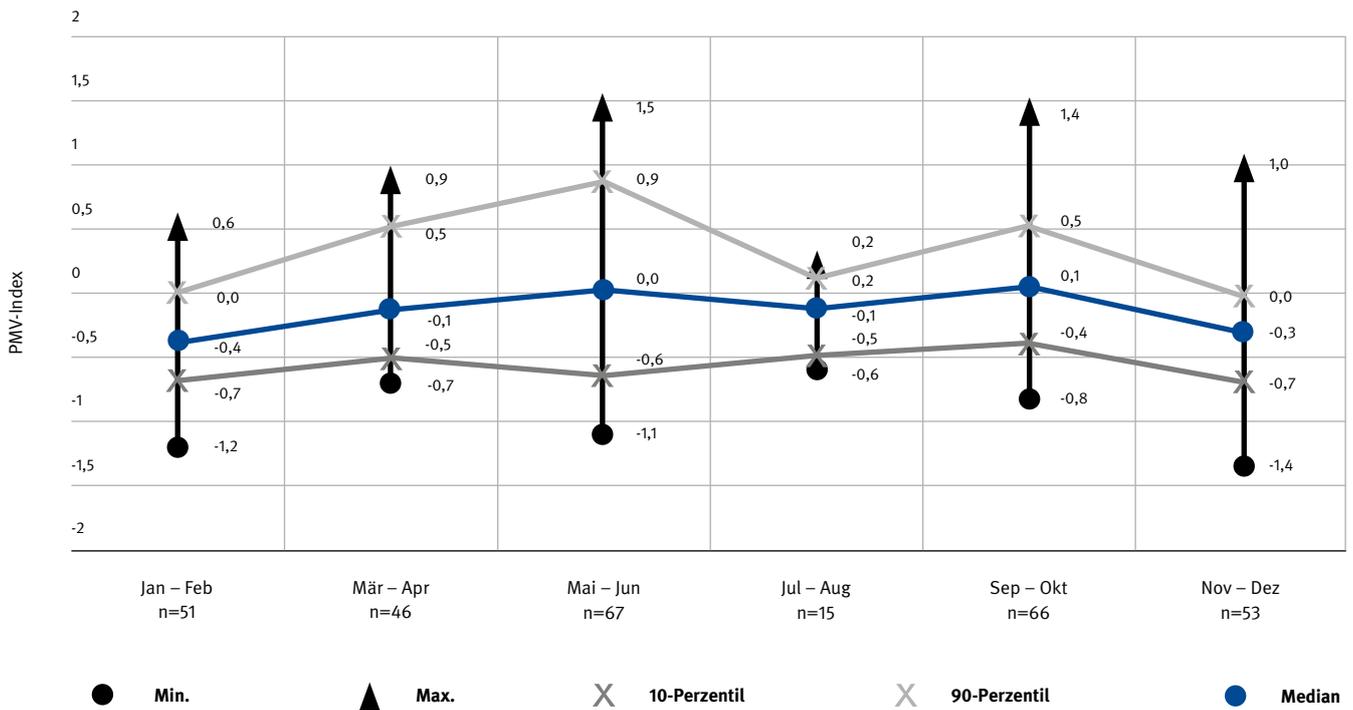


Abb. 37: PMV Indices im Unterricht ohne Lüftung

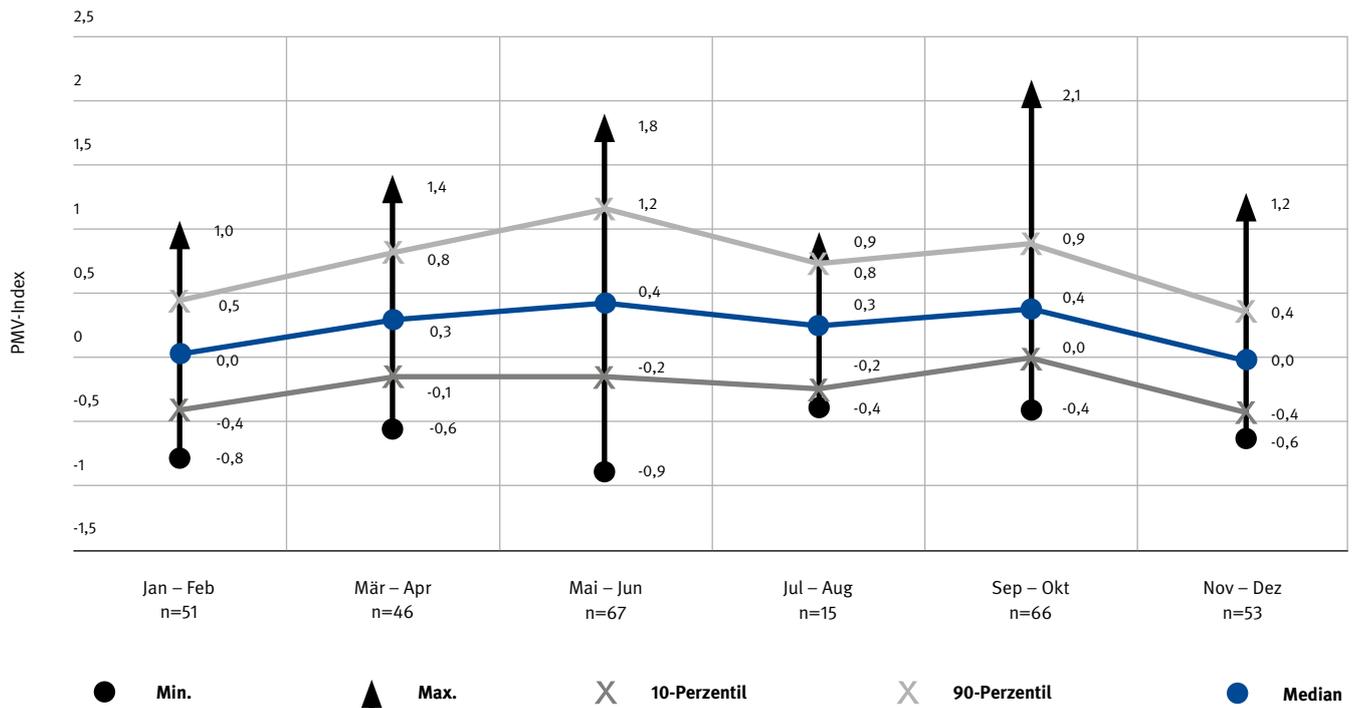


Abb. 38: PMV Indices nach Stoßlüftung

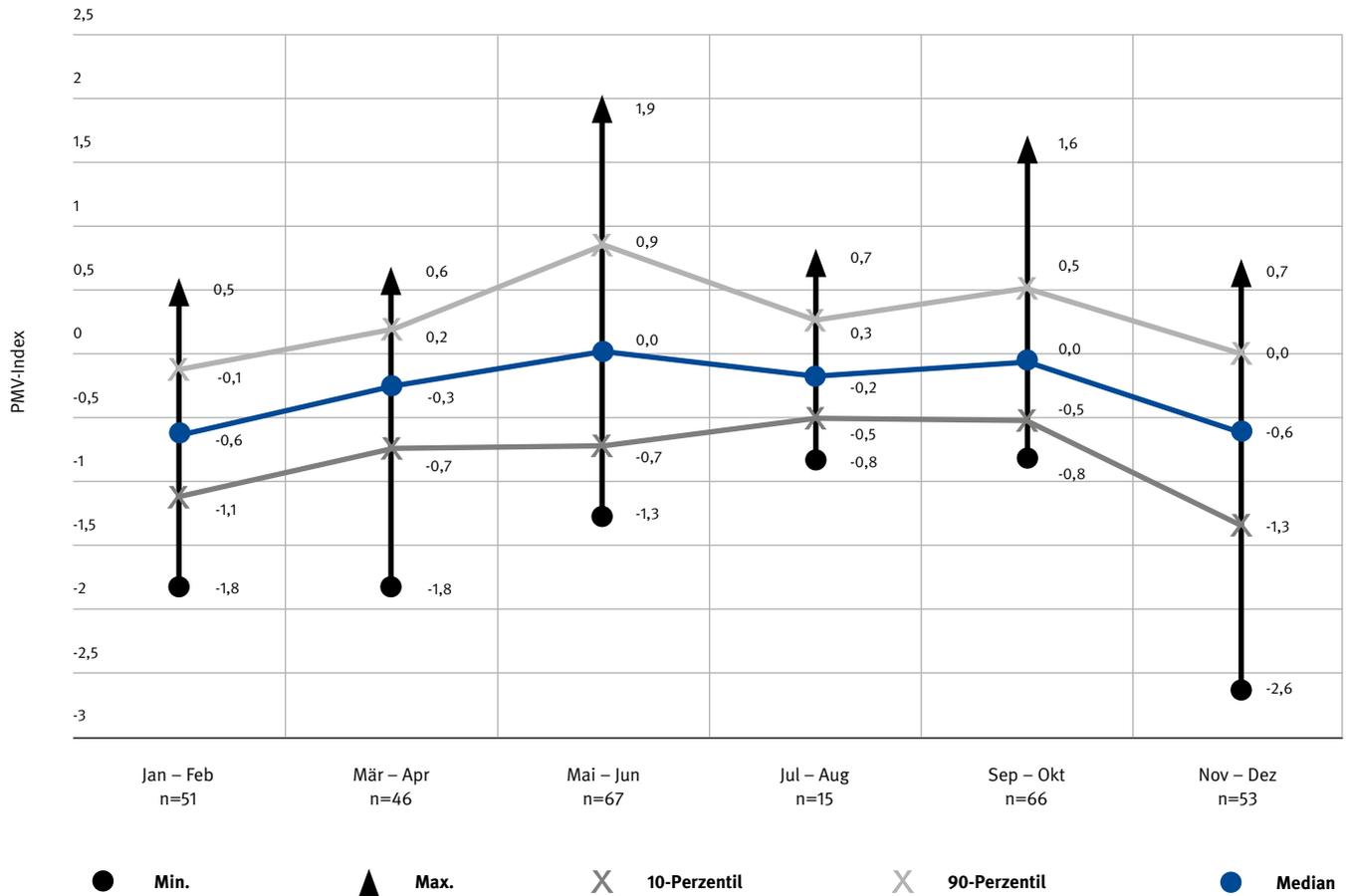
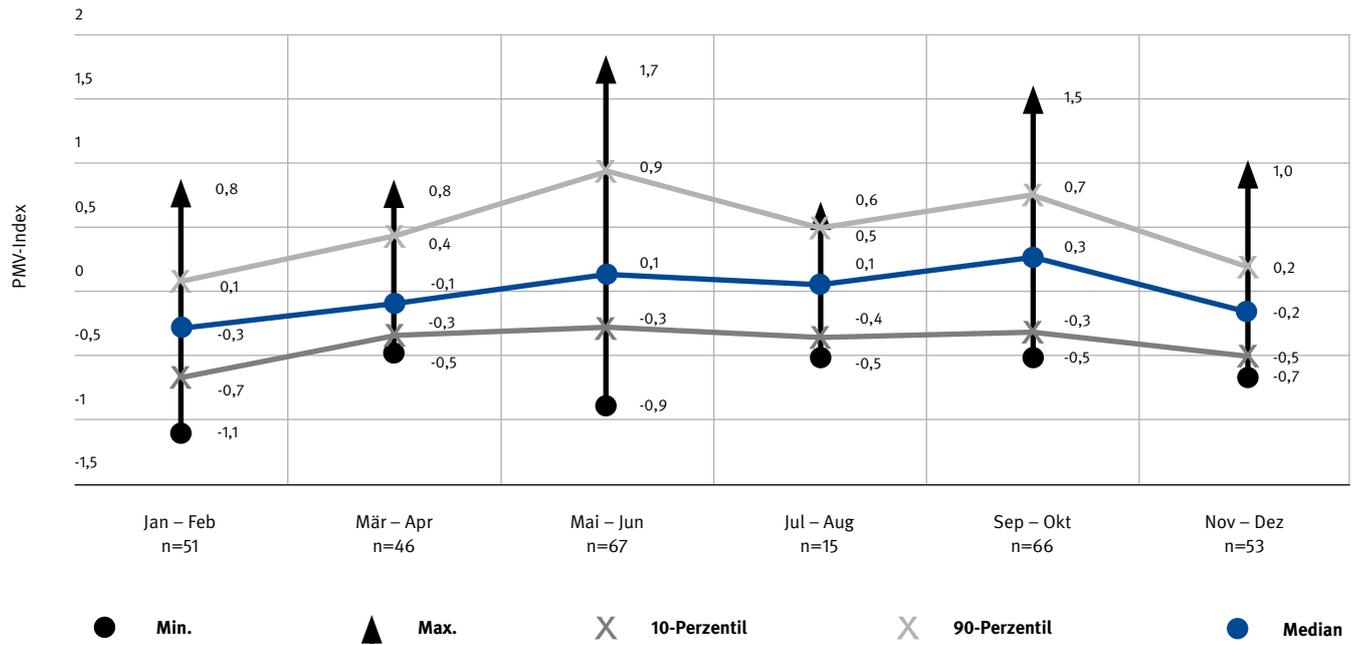


Abb. 39: PMV Indices im Unterricht bei Kipplüftung



4 Diskussion

4.1. Diskussion CO₂-Konzentrationen

4.1.1 Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen

Die CO₂-Konzentration im Innenraum hängt im Wesentlichen von folgenden Faktoren ab [1]:

- Anzahl der Personen im Innenraum
- Raumvolumen
- Aktivität der Raumnutzer
- Zeitdauer, die Raumnutzer im Innenraum verbringen
- Verbrennungsvorgänge im Innenraum
- Luftwechsel bzw. Außenluftvolumenstrom.

Klassenräume sind wegen der hohen Zahl der Nutzerinnen und Nutzer und deren regelmäßigen langen Aufenthaltszeiten hinsichtlich ihrer CO₂-Konzentration besonders kritisch zu betrachten. Wenngleich der Arbeitsplatzgrenzwert [5] in Höhe von 5000 ppm als Achtstundenmittelwert im Regelfall nicht erreicht wird, so belegen doch zahlreiche Studien, dass die in Schulen bei mangelhafter Lüftung auftretenden CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen zahlreiche nachteilige Wirkungen hervorrufen können, wie auch schon Max von Pettenkofer im Jahr 1858 feststellte (s. Einleitung). Neuere Studien haben seine Überzeugung bestätigt:

Katjar et al. [6] untersuchten den Einfluss von CO₂ in einem Konzentrationsbereich zwischen 600 und 5000 ppm. Es wurden Einbußen an Komfort und Wohlbefinden mit steigender CO₂-Konzentration festgestellt. Insbesondere in einem Konzentrationsbereich ab 3000 ppm wurde beim Lesen eines Textes mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad eine signifikant geringere Zahl erkannter Fehler im Vergleich zu einer Konzentration von 600 ppm ermittelt.

Myrvold et al [7] untersuchten an 548 Schülerinnen und Schülern im Alter von 15 bis 20 Jahren aus 22 Klassen den Einfluss der Kohlendioxid-Konzentration auf ausgewählte ZNS- und Haut- bzw. Schleimhautsymptome sowie das mentale Leistungsniveau. Der CO₂-Konzentrationsbereich lag zwischen 601 und 3827 ppm. Es zeigte sich eine altersjustierte Abnahme der mentalen Leistung mit dem Anstieg der CO₂-Konzentration, die jedoch das Signifikanzniveau nicht erreichte. Im Konzentrationsbereich über 1500 ppm zeigte sich darüber hinaus eine deutliche Zunahme von ZNS-Symptomen wie Kopfschmerzen, Müdigkeit, Schwindel und Konzentrationsschwäche.

Tiesler et al. [8] überprüften in 225 Unterrichtsstunden die Aufmerksamkeit von Schülerinnen und Schülern vor und nach dem Unterricht mittels Zahlensymboltests in 16 Klassen von zwei Grundschulen und einer Gesamtschule. Die Erfassung der Daten erfolgte sowohl unter üblichen Lüftungsbedingungen wie auch nach Einführung einer Lüftungsintervention unter gleichen Unterrichtsbedingungen bestehend aus regelmäßiger Lüftung vor dem Unterricht, in den Pausen und einer zusätzlichen Stoßlüftung zur Hälfte des 45-minütigen Unterrichts. Durch die Lüftungsintervention sanken die mittleren CO₂-Konzentrationen ausgehend von 1100, 1440 bzw. 950 ppm auf 970, 1000 bzw. 790 ppm. Die Senkung der CO₂-Konzentration ergab gesicherte Hinweise auf die Steigerung der Aufmerksamkeitsleistung, eine intensivere Kommunikation und einen reduzierten Geräuschpegel verknüpft mit einer Senkung der Beanspruchung in Form der gemessenen Herzfrequenz.

Wargocki und Wyon [9] untersuchten die Leistungsfähigkeit von zehn bis zwölf Jahre alten Schülern in zwei dänischen Schulen. Es handelte sich um eine Interventionsstudie durch Erhöhung des Außenvolumenstroms und somit Senkung der CO₂-Konzentration wochenweise von 1260 auf 910, von 1300 auf 930 bzw. von 1130 auf 900 ppm. Die Spitzenkonzentrationen sanken von 1620 auf 1170, von 1700 auf 1090 bzw. von 1760 auf 1190 ppm. Der Test der Leistungsfähigkeit der Kinder erfolgte anhand der Schnelligkeit und Fehlerfreiheit bei der Lösung altersgerechter Aufgaben. Im Ergebnis führte die Verdopplung der Luftzufuhr zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit um 8 bis 14 Prozent bezogen auf die Schnelligkeit und Fehlerfreiheit. Die Effekte waren insofern größer als in den den Autoren bekannten Studien bei Erwachsenen. Die Autoren kommen daher zu dem Schluss, dass die Reaktion von Kindern auf die Umgebungsbedingungen möglicherweise empfindlicher ist als die von Erwachsenen.

Voronova et al. [10] beobachteten den physischen Zustand von Schülerinnen und Schülern zweier Klassen bei einer Frischluftzufuhr von 20 m³/h (Kontrollklasse) und 40 m³/h (Experimentalklasse) über ein Schuljahr. Erfasst wurden die Parameter Pulsfrequenz, Belastungsblutdruck und Blutkörpersenkungsgeschwindigkeit. Außerdem wurden krankheitsbedingte Fehlzeiten der Kinder erfasst. In der Kontrollklasse stiegen die CO₂-Werte im Verlauf des Vormittags um 1000 ppm an, in der Experimentalklasse blieb ein Anstieg aus. Als Ergebnis wurde festgestellt, dass sich die Schülerinnen und Schüler in der Experimentalklasse nach einem Schuljahr in einer besseren physischen Verfassung befanden und eine geringere Prävalenz akuter Erkrankungen aufwiesen als die Kinder in der Kontrollklasse.

Shendell et al. [11] untersuchten den Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration und den Fehlzeiten von Schülerinnen und Schülern in Folge von Erkrankungen in 434 Klassenräumen an US-amerikanischen Schulen. Die mittleren CO₂-Konzentrationen lagen in 45 Prozent der untersuchten Klassenräume in einem Konzentrationsbereich von mehr als 1400 ppm. Festgestellt wurde eine signifikante Erhöhung der relativen Abwesenheitsrate von 10 bis 20 Prozent pro 1000 ppm Anstieg der CO₂-Konzentration. Schließlich kam die European Collaborative Action (ECA) aufgrund von Modellrechnungen zu dem Schluss, dass bereits ab einer CO₂-Konzentration von 1000 ppm mit etwa 20 Prozent und ab 2000 ppm mit etwa 36 Prozent unzufriedenen Raumnutzern zu rechnen ist [12].

4.1.2 Ergebnisse von Untersuchungen der CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen

Parallel zu den eigenen Untersuchungen wurden auch in anderen Bundesländern CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen gemessen. So wurden in 251 Klassenräumen von zehn Erfurter Schulen entsprechende Messungen durchgeführt [13]. Analog zu den eigenen Studien waren die Fenster während des Unterrichts geschlossen. Gelüftet wurde nur während der Pausen. Dabei zeigte sich eine große Spannweite der gemessenen CO₂-Konzentrationen. Das 5-Perzentil in den 251 Klassenräumen lag im Median bei 882 ppm, der Maximalwert bei 4186 ppm. Das 95-Perzentil der Studie lag in der Stundenberechnung als 5-Perzentil bei 1154 ppm und als Maximalwert bei 4996 ppm.

In einer bayrischen Studie [14] wurden 90 Klassenräume im Winter und 75 Klassenräume im Sommer während des Unterrichts auf ihre CO₂-Konzentrationen hin untersucht. Die Untersuchung erfolgte während des Unterrichts unter normalen Bedingungen während eines ganzen Unterrichtstags. Der Messort lag mit 50 cm vor der Wand und 90 cm über dem Fußboden allerdings näher an den Raumbegrenzungsflächen als bei den eigenen

Messungen. Die medianen CO₂-Innenraumlufthalte der Klassenräume bewegten sich im Winter in einem Bereich zwischen 598 und 4172 ppm sowie im Sommer zwischen 480 und 1875 ppm. Während der Wintermessperiode lagen die Tagesmediane in 92 Prozent der Klassenräume über 1000 ppm und 60 Prozent über 1500 ppm, im Sommer lediglich 28 Prozent über 1000 ppm und neun Prozent über 1500 ppm. Es zeigte sich, dass eine größere Zahl an Nutzerinnen und Nutzern, eine kleinere Raumgröße und ein kleineres Raumvolumen signifikant mit der Verschlechterung der Raumlufthaltqualität und somit mit einem Anstieg der CO₂-Konzentrationen einhergeht.

In Berlin wurde die CO₂-Konzentration in 39 Klassenräumen jeweils während eines ganzen Unterrichtstages unter Nutzungsbedingungen gemessen [15]. Der ermittelte Konzentrationsbereich in den 39 Klassen lag zwischen 300 und 6000 ppm bei einem Medianwert von 1600 ppm. Der Wert von 2000 ppm wurde zu einem Anteil von 17 Prozent während der Unterrichtszeit überschritten.

In 19 Klassenräumen von Baden-Württemberg [1] wurde eine CO₂-Konzentration zwischen 431 bis 4380 ppm bei einem Medianwert von 1459 ppm festgestellt. Die Messungen erfolgten im Winter unter Nutzungsbedingungen. In 23 Prozent der Unterrichtszeit wurde der Wert von 2000 ppm überschritten. Im Sommer erfolgten die gleichen Messungen in 18 Klassenräumen. Die Ergebnisse lagen hier zwischen 304 und 3554 ppm bei einem Medianwert von 820 ppm. Während der Sommerperiode wurde in nur drei Prozent der Unterrichtszeit der Wert von 2000 ppm überschritten.

Auch in sieben niedersächsischen Schulen [16] wurden in 36 Klassenräumen im Winter und in 22 Klassenräumen im Sommer CO₂-Konzentrationen unter Nutzungsbedingungen ermittelt. Die CO₂-Mittelwerte betragen 1316 ppm (58 Messtage) bzw. 766 ppm (22 Sommermesstage) und 1652 ppm (36 Wintermesstage). Das 95-Perzentil betrug 2026 ppm über alle Messungen bzw. 1216 ppm im Sommer und 2521 ppm im Winter. Basierend auf diesen Ergebnissen wurde eine Modellsoftware entwickelt, mit der sich CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen berechnen lassen.

4.1.3 Diskussion der eigenen Ergebnisse

Die Ergebnisse der eigenen Ermittlungen und Messungen werden somit durch die Ergebnisse der zitierten Studien bestätigt. Auch dort führten die vielfältigen Einflussfaktoren in Klassenräumen zu einer großen Spannweite der CO₂-Konzentration. Auch die Raumvolumina und Schülerzahlen waren schulformspezifisch unterschiedlich. In NRW wurden geringe Raumvolumina insbesondere in Sonderschulen und in Gymnasien festgestellt, wobei die Zahl der Raumnutzerinnen und -nutzer in Sonderschulen allerdings deutlich unterdurchschnittlich, in Gymnasien aber überdurchschnittlich hoch war. Im Mittel wurde ein Raumvolumen von 9,7 m³ ermittelt. Bei einer Höhe von drei Metern ergibt sich somit eine mittlere Grundfläche von 3,2 m² pro Raumnutzerin bzw. Raumnutzer. Das Raumvolumen ist somit etwas höher als in der niedersächsischen Studie mit einem dort gemittelten Raumvolumen von 8,5 m³. Es übersteigt auch die Mindestanforderung aus DIN EN 15251 [17], die mit einer Grundfläche von 2 m² und etwa 6 m³ pro Person angegeben ist.

Allerdings unterscheidet sich die Methode der eigenen Studie von einem Großteil der in den anderen Bundesländern angewandten Methoden hinsichtlich ihrer Vorgehensweise. Wie bei den Ermittlungen in den Erfurter Schulen wurde nicht unter üblichen Nutzungsbedingungen über einen Schultag gemessen. Es handelt sich hier um eine Interventionsstudie, bei der zuerst die Grundbelastung ermittelt wurde. Als nächstes wurde der

Anstieg der CO₂-Konzentration im Klassenraum ohne Lüftung gemessen. Danach wurde die Wirkung der Stoßlüftung und der Unterricht unter Lüftungsbedingungen mittels Kipplüftung beurteilt.

Die Ergebnisse unter dem Aspekt der Schulform zeigen, dass in Grundschulen mit dem geringsten Anstieg der CO₂-Konzentration zu rechnen ist. Hier sind auch die Atemminutenvolumen der Raumnutzer am niedrigsten. Am höchsten sind die Anstiege in den Gymnasien. Hier ist einerseits das Atemminutenvolumen der Nutzerinnen und Nutzer höher, zudem waren die Zahlen der Schülerinnen und Schüler hoch und die Klassenraumvolumina niedrig.

Insgesamt wurde im Mittel in allen Schulformen eine CO₂-Grundbelastung vor dem Unterricht von etwa 600 ppm ermittelt. Während der Unterrichtszeit ohne Lüftung stieg diese auf 2000 ppm an. Der in Abb. 40 auf Basis der über alle Schulformen gemessenen Mittelwerte dargestellte Tagesgang mit wirksamer Stoßlüftung in den Pausen zeigt, dass bereits nach wenigen Minuten eine Konzentration von 1000 ppm überschritten wird. Der Wert von 1400 ppm wird etwa nach einer halben Schulstunde erreicht und der Wert von 2000 ppm etwa zehn Minuten vor Beendigung der Schulstunde erreicht. Diese Werte werden deutlich überschritten, wenn die Lüftungsintervention in den Pausen unterbleibt, wie in Abb. 41 am Beispiel einer Grundschulklasse dargestellt ist. Die Endkonzentration von 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 häufig ausfällt.

Abb. 40: Mittlerer CO₂-Verlauf über mehrere Schulstunden unter Berücksichtigung der Mittelwerte über alle Schulformen aus Abb. 8

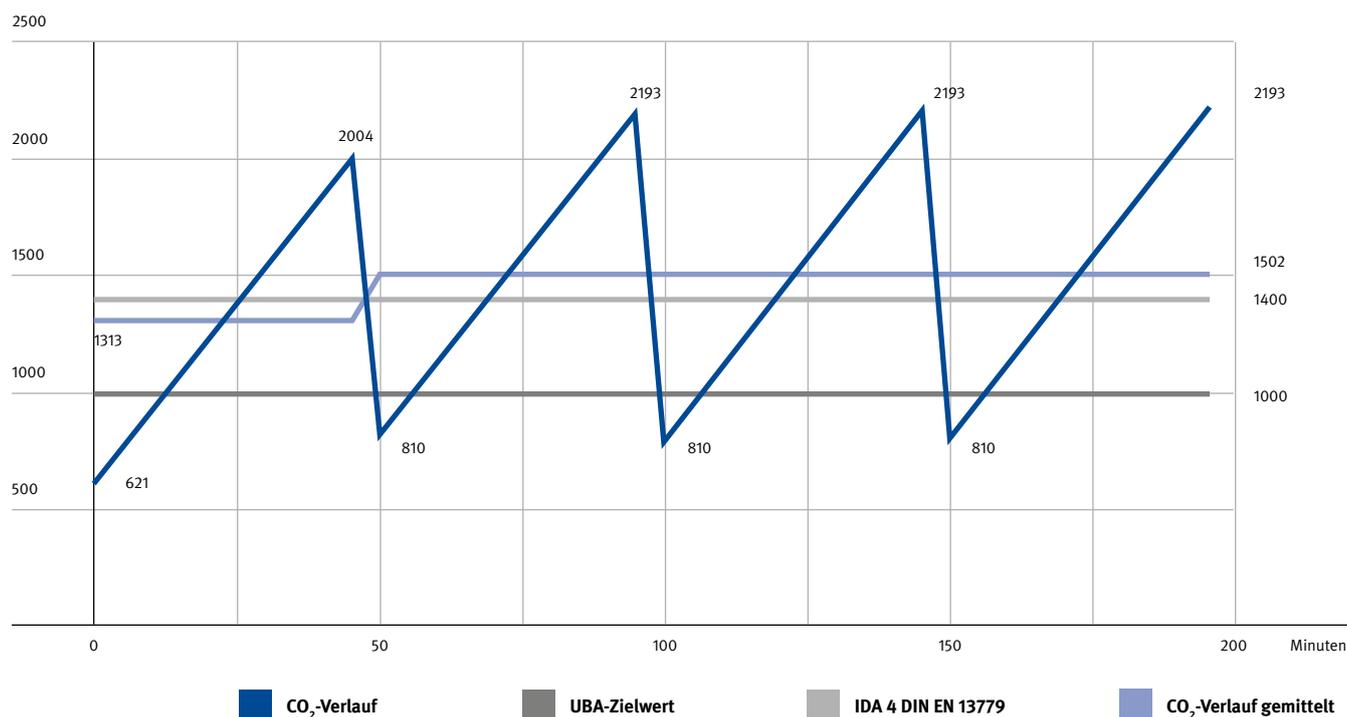
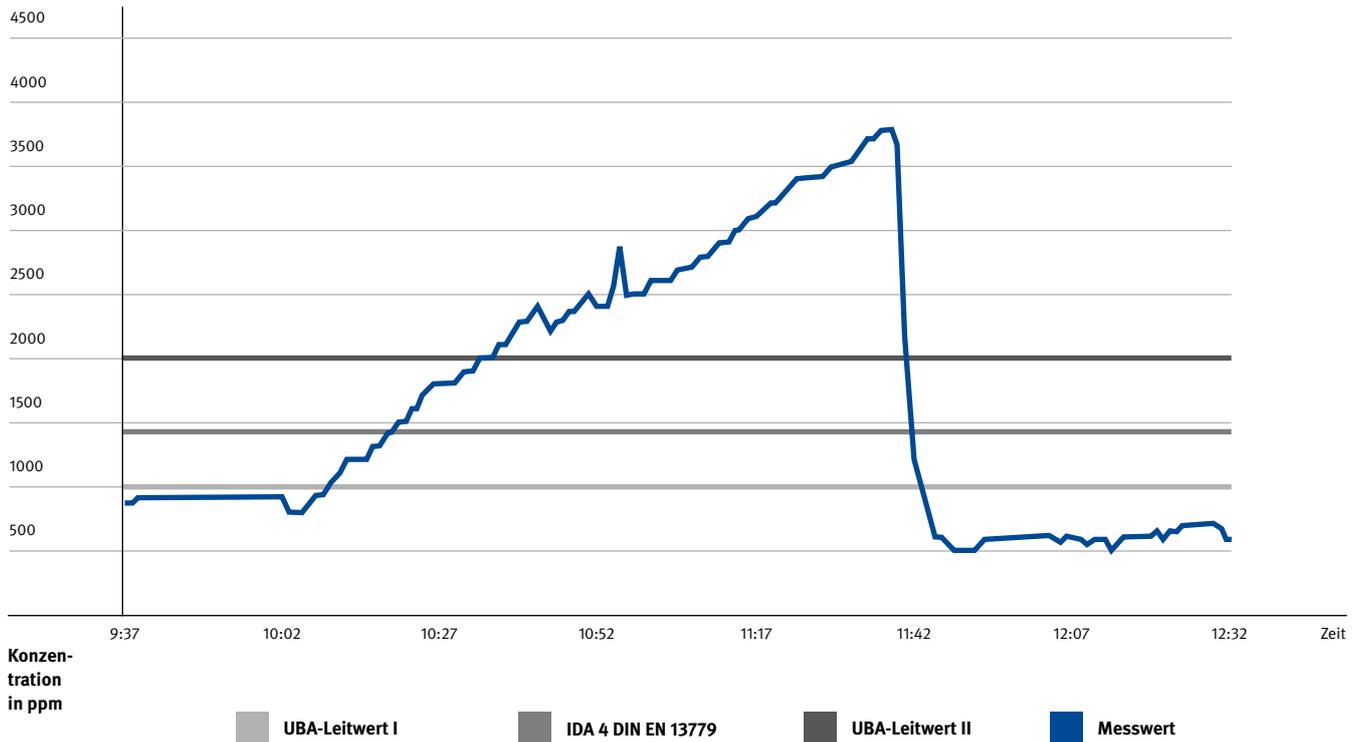


Abb. 41: CO₂-Anstieg in einer Grundschulklasse über zwei Schulstunden ohne Stoßlüftung in der Fünf-Minuten-Pause



Viele Faktoren haben Einfluss auf die CO₂-Konzentration in Klassenräumen. So wurde zum Beispiel der Einfluss der geöffneten Fensterfläche bei Stoß- und Kipplüftung untersucht. Wie festgestellt wurde, ist die Fensteröffnung nicht alleine maßgebend für die Senkung der CO₂-Konzentrationen bei Stoßlüftung bzw. den Anstieg der CO₂-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 streuten die zu Lüftungszwecken geöffneten Fensterflächen erheblich. Insbesondere in Grund- und Sonderschulen waren diese Flächen geringer als in anderen Schulformen. Dieses ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass auf den Fensterbänken hier 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 CO₂-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 doppelt so groß wie im Winter. Die dauerhafte Kipplüftung in Kombination mit Stoßlüftung in den Pausen kann in den Sommermonaten somit durchaus als geeignete Lüftungsmaßnahme angesehen werden.

Das Alter der Schulen hat tendenziell auch einen erkennbaren Einfluss auf den CO₂-Anstieg in der Stunde ohne Lüftung. Hier waren die CO₂-Konzentrationen in Schulen, die nach 1985 erbaut wurden, leicht höher gegenüber Schulen, die in den Jahren zuvor errichtet wurden. Auch in renovierten Schulen war die CO₂-Konzentration leicht höher als in nicht renovierten Schulen. Dabei ist allerdings anzumerken, dass hinsichtlich der Baujahre und des Renovierungszustandes das Alter der Fenster oder sonstiger Fasadendichtungsmaßnahmen nicht abgefragt wurde, sodass die festgestellte Tendenz nur bedingt aussagekräftig ist. Es ist davon auszugehen, dass auch in Schulen älterer Baujahre als 1985 die Fenster bereits ausgetauscht waren, sodass die Unterschiede hier nicht erheblich ausfallen.

Auch in der niedersächsischen Studie [18] wurde das Alter der Fenster mit einem Alter von mehr oder weniger als fünf Jahren abgefragt. Die Ergebnisse waren allerdings nicht plausibel, da die CO₂-Konzentration in Räumen mit älteren Fenstern höher ausfiel als in Räumen mit neueren Fenstern. Dieses ist wohl auf die vielfältigen anderen bereits genannten Einflussfaktoren zurückzuführen.

Hinsichtlich der Lage der Schule waren sowohl bei der Grundbelastung als auch in der gelüfteten Situationen keine gravierenden Unterschiede erkennbar. Der Unterschied zwischen städtischen Bereichen (ca. 400 ppm) und ländlichen Bereichen (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 CO₂-Konzentration bei Kipplüftung im Innenstadtbereich sogar etwas niedriger aus als in ländlicher Lage.

Basierend auf den Erkenntnissen zur Wirkung von CO₂ im untersuchten Konzentrationsbereich wurde vom Umweltbundesamt ein Leitwertkonzept für die CO₂-Konzentration in Räumen entwickelt [1]. Die Leitwerte und erforderlichen Lüftungsmaßnahmen sind in der Tabelle dargestellt. Mittlerweile ist dieses Leitwertkonzept auch in die Arbeitsstättenrichtlinie ASR A 3.6 [19] eingeflossen, sodass diese Werte verbindlich im Sinne der Arbeitsstättenverordnung anzusehen sind.

Darüber hinaus ist in DIN EN 13779 [20] ein vierstufiges Raumluftqualitätskonzept dargestellt. Demnach wird eine CO₂-Konzentration von mehr als 1000 ppm im Raum als mäßige Raumluftqualität und eine Konzentration von mehr als 1400 ppm als niedrige Raumluftqualität eingestuft.

Insgesamt zeigen die Messungen, dass eine gute Luftqualität in Klassenräumen nur mit konsequenter Lüftung zu erreichen ist. Die CO₂-Konzentration von 1000 ppm ist bei geschlossenen Fenstern selbst nach erfolgter guter Stoßlüftung bereits nach wenigen Minuten überschritten. Der Wert von 1400 ppm, der im Sinne der DIN EN 13779 eine niedrige Raumluftqualität charakterisiert, ist bereits vor Erreichen der Hälfte der Schulstunde erreicht. 2000 ppm werden im Mittel fünf bis zehn Minuten vor Ende der 45-minütigen Schulstunde überschritten. In weiterführenden Schulen ist von einem früheren Zeitpunkt auszugehen.

Eine deutliche Verschlechterung der Luftqualität ergibt sich darüber hinaus, wenn eine gründliche Stoßlüftung in den Pausen unterbleibt. Dieses ist nach eigenen Beobachtungen und nach dem Ergebnis der dargestellten Studien häufig der Fall. Die eigenen Ergebnisse zeigen, dass sich durch gründliche Stoßlüftung in den Pausen

und Fenster in Kippstellung während des Unterrichts eine gute Raumluftqualität realisieren lässt. Dieses gilt nicht nur für die CO₂-Konzentration, sondern auch für Aldehyd- und VOC-Emissionen durch Baustoffe, Einrichtungen und die Raumnutzerinnen und Raumnutzer, wie im ersten Teil der Studie „Gesunde Luft in Schulen“ dargestellt wurde [21,22]. Die notwendige Fensterfläche bei Kipp Lüftung muss dabei nicht übermäßig dimensioniert sein (s. Abb. 20). Im Winterhalbjahr hat im Mittel eine Lüftungsöffnungsfläche von knapp 1 m² genügt. Diese lässt sich zum Beispiel durch vier in Kippstellung geöffneten Fenstern in Höhe der Raumstirnseiten realisieren, wenn diese eine Größe von 1 m mal 1,2 m aufweisen [19].

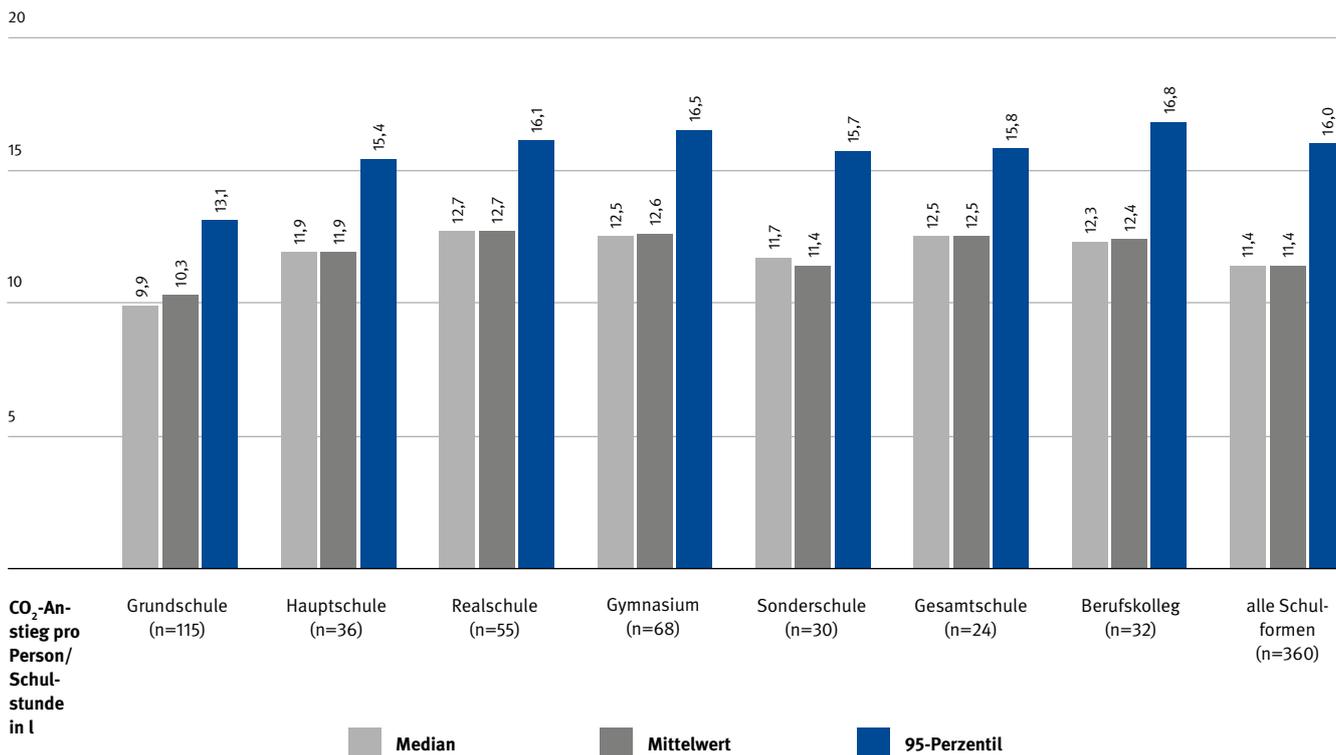
Die Anforderungen an Lüftungsöffnungen in Schulen müssen somit nicht den in der ASR A3.6 [19] gestellten Anforderungen an eine freie kontinuierliche Lüftung genügen, um für eine gute Luftqualität in Klassenräumen zu sorgen. Die dortigen Anforderungen sind mit 0,35 m²/anwesende Person angegeben, was in Klassenräumen im Mittel zu einer Lüftungsöffnung von 8 m² führen würde. Der Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden des Umweltbundesamtes [23] schlägt vor, zur Hälfte des Unterrichts noch einmal eine gründliche Stoßlüftung durchzuführen. Dieses erscheint jedoch aus unterrichtstechnischen Gründen nicht praktikabel, da die dadurch erzeugte Zugluft das Verwirbeln von Unterrichtsmaterialien verursachen könnte.

4.1.4 Modellhafte Abschätzung der CO₂-Konzentration in Klassenräumen

Basierend auf den Ergebnissen der niedersächsischen Studie wurde eine Modellsoftware entwickelt, mit der sich CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen berechnen lassen [16, 18]. In der in [16] dargestellten Unterrichtssituation wurde ein Raumvolumen von 7,2 m³ pro Nutzer und eine CO₂-Abgabe von 7,5 l/h für die Primarstufe bzw. 15 l/h für die Sekundarstufe bei einem Luftwechsel von 0,2/h für die Berechnung der CO₂-Anstiege zu Grunde gelegt. Dieses Modell lässt sich mit dem in Abb. 40 dargestellten CO₂-Konzentrationsverlauf vergleichen, in dem der mittlere CO₂-Verlauf unter Berücksichtigung der Mittelwerte über alle Schulformen dargestellt ist. Die Startposition von 500 ppm ist dort etwa 100 ppm niedriger als die hier ermittelte. Der CO₂-Anstieg für die erste Unterrichtsstunde in der Sekundarstufe (Endkonzentration rund 1900 ppm) entspricht dann dem Anstieg in Abb. 40, der für die Primarstufe (Endkonzentration 1200 ppm) ist niedriger. Auch die berechneten Lüftungserfolge in den Fünf-Minuten-Pausen sind deutlich niedriger als die hier gemessenen.

Die Unterschiede liegen unter anderem wahrscheinlich in den Ansätzen für das Raumvolumen und der CO₂-Abgabe. So wurde in der eigenen Studie mit 9,7 m³ ein höheres mittleres Raumvolumen pro Nutzerin bzw. Nutzer ermittelt. Ferner ist bei Kindern im Vergleich zu jungen Erwachsenen von einer in etwa ein Viertel geringeren CO₂-Abgabe auszugehen und nicht von einer Halbierung. So kann bei jungen Erwachsenen die CO₂-Abgabe im Mittel 17,3 l/h, bei Kindern im Mittel jedoch 12,9 l/h betragen [24]. Dieses Verhältnis kommt somit dem hier ermittelten Ergebnis für den CO₂-Anstieg in Unterrichtsstunden nahe, das als Mittelwert in Gymnasien, Gesamtschulen und Realschulen ca. 12,5 l/Unterrichtsstunde und in Grundschulen ca. 10,3 l/Unterrichtsstunde beträgt (s. Abb. 42).

Abb. 42: CO₂-Anstiege pro Person und Schulstunde in den einzelnen Schulformen unter Berücksichtigung der mittleren Raumgrößen und Raumnutzerzahlen



Berücksichtigt man diese Daten und die in dieser Studie ermittelten Raumnutzerzahlen und Raumgrößen in der Modellrechnung aus Niedersachsen, so fallen die Endkonzentrationen am Beispiel für Gymnasien und Grundschulen für die Unterrichtsstunde ohne Lüftung etwa 200 ppm niedriger aus als die hier im Mittel gemessenen. Sie entsprechen sich jedoch weitgehend, wenn man für die CO₂-Abgabe in Grundschulen 13,5 l/h und in Gymnasien 18 l/h ansetzt, wie es für die Sekundarstufe von den Autoren vorgeschlagen wurde. Diese Werte liegen somit leicht über den oben angegebenen Mittelwerten [24]. Die hier ermittelten CO₂-Anstiege in der Unterrichtssituation bei geschlossenen Fenstern sind wahrscheinlich auf ein leicht über dem Mittelwert liegendes Atemminutenvolumen der Schülerinnen und Schüler im Unterricht zurückzuführen, was auch in der Metabolismusrate für die Unterrichtssituation in Höhe von 1,2 met bei der Ermittlung des PMV-Indexes zum Ausdruck kommt. Ferner lässt sich aus dieser Betrachtung schließen, dass in Klassenräumen bei geschlossenen Fenstern im Allgemeinen von einem Luftwechsel in Höhe von 0,2/h ausgegangen werden kann.

Das österreichische Lebensministerium bietet ebenfalls einen CO₂-Rechner für die Bestimmung der CO₂-Konzentration im Unterricht an [25]. Auch mit dieser Modellsoftware lassen sich unter Verwendung der hier ermittelten Daten die schulformspezifischen CO₂-Anstiege im Unterricht reproduzieren.

Durch die Anwendung der Ergebnisse dieser Studie lässt sich eine einfache Modellrechnung für die CO₂-Konzentration im Unterricht der einzelnen Schulformen realisieren. So lässt sich der CO₂-Anstieg für eine Schulstunde ohne Lüftung sehr einfach abschätzen, indem man die in Abb. 11 dargestellten CO₂-Anstiege pro Raumnutzer mit den vor Ort vorliegenden Raumnutzerzahlen multipliziert. Zur Berechnung der Endkonzentration müsste dann noch die in Abb. 9 dargestellte Startkonzentration in Höhe von 600 ppm hinzugerechnet werden.

Alternativ können die in Abb. 43 auf der Basis der hier ermittelten Ergebnisse dargestellten CO₂-Szenarien im Unterricht verschiedener Schulformen zur Einschätzung der Luftqualität und zur Durchführung von Lüftungsmaßnahmen verwendet werden. Dieses gilt insbesondere für die Winterhalbjahrsituation, in der eine dauerhafte Kipplüftung nicht unbedingt zum Einsatz kommt. Bei der Modellrechnung wird davon ausgegangen, dass die Startposition im Unterricht nach gründlicher Lüftung am Vortag 600 ppm beträgt. Die Zahl der Raumnutzer soll entsprechend dem hier ermittelten Median 25 Personen betragen. Für die CO₂-Anstiege im Unterricht werden näherungsweise die 95-Perzentilwerte aus Abb. 11 herangezogen. Folgende Werte werden für die Schulformen zum Ansatz gebracht:

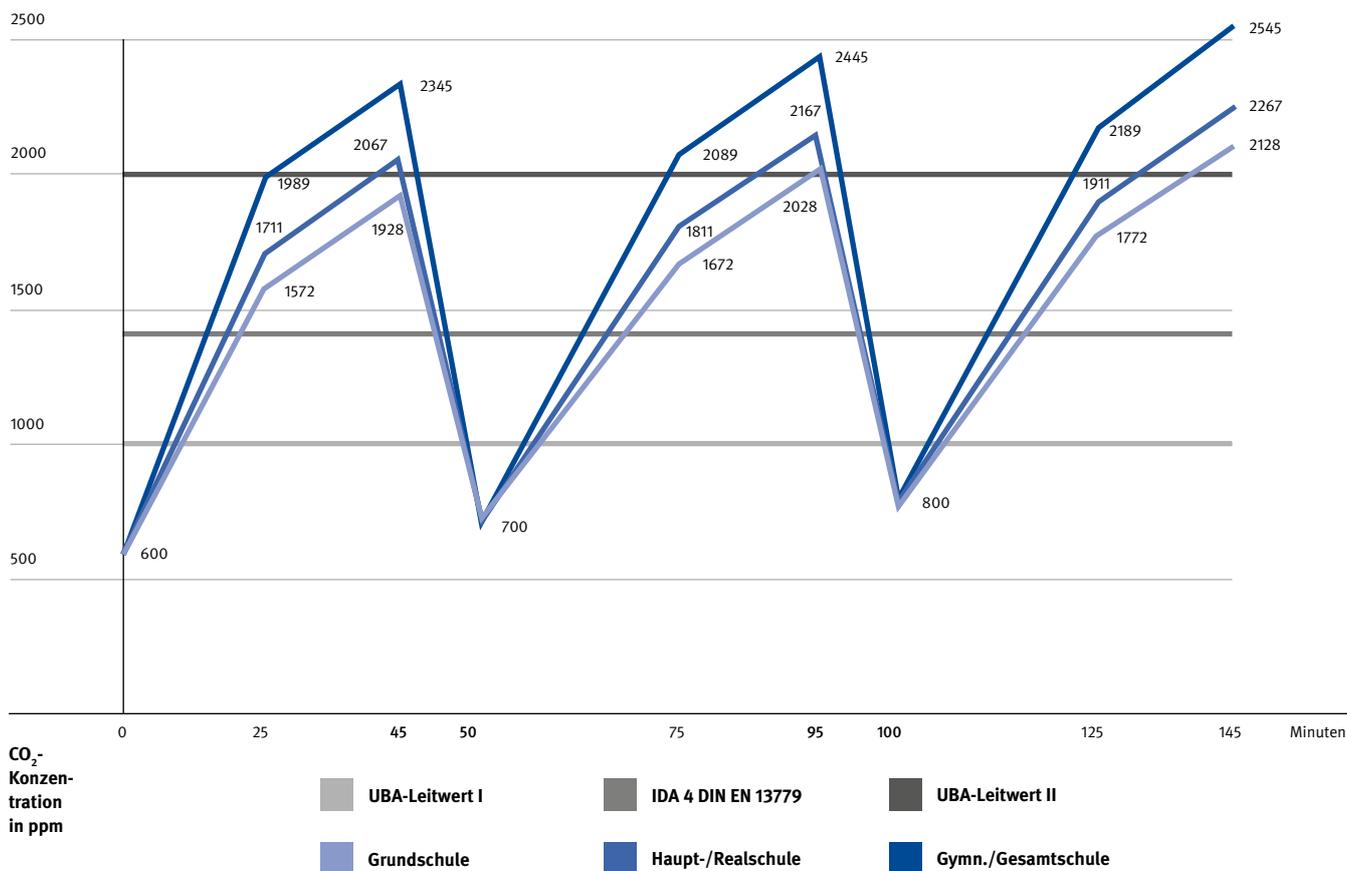
Grundschule:	70 ppm/Raumnutzer
Haupt- und Realschulen:	80 ppm/Raumnutzer
Gymnasien und Gesamtschulen:	100 ppm/Raumnutzer

Auf einen entsprechenden Ansatz für Sonderschulen und Berufskollegs wird hier verzichtet, da die Raumnutzerzahlen nicht (in Sonderschulen häufig auch nicht die Unterrichtszeiten) dem der Abschätzung zu Grunde liegenden Sachverhalt entsprechen.

Ferner sollen die Räume nach 25 Minuten Unterrichtszeit mit Fenstern in Kippstellung belüftet werden. Auch hierbei kommt wieder das 95-Perzentil zum Ansatz, nach dem ein Anstieg von 800 ppm/Unterrichtsstunde zu erwarten ist (s. auch Winterhalbjahr in Abb. 20). Nach der Unterrichtsstunde soll in der Fünf-Minuten-Pause eine gründliche Stoßlüftung erfolgen. In Grundschulen kann dadurch in der Mehrzahl der Fälle eine CO₂-Reduktion von mindestens 1000 ppm erreicht werden, in Haupt- und Realschulen mindestens 1200 ppm und in den Gymnasien und Gesamtschulen mindestens 1500 ppm (s. Abb. 15). 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. Spätestens nach der dritten Schulstunde sollte eine längere Pause erfolgen, in der dann wieder die ursprüngliche Startposition erreicht werden kann. Die Modellrechnung ist insofern insgesamt zur schlechteren Seite hin abgesichert.

Wie man der Abbildung entnehmen kann, lässt sich durch dieses Lüftungsverhalten erreichen, dass die CO₂-Konzentration in Grundschulen überwiegend unterhalb des oberen Leitwertes im Sinne der Arbeitsstättenrichtlinien und der Empfehlungen des UBA in Höhe von 2000 ppm verbleibt. In den anderen Schulen, insbesondere in den Gymnasien und Gesamtschulen, ist dieser Wert zum Ende der Unterrichtsstunde hin überschritten. Die Intervention durch Kipplüftung sollte daher hier bereits nach 20 Minuten Unterrichtszeit beginnen.

Abb. 43: Modellhafte Darstellung von CO₂-Konzentrationen im Unterricht verschiedener Schulformen in Anlehnung an die ermittelten 95-Perzentilwerte für die CO₂-Anstiege pro Raumnutzer und Kipplüftungsintervention im Winterszenario nach 25 Minuten Unterrichtszeit bei einer Raumnutzerzahl von 25



Die Darstellung zeigt, dass sich durch die gestaffelte Kombination von Kipplüftung und Stoßlüftung eine hygienisch inakzeptable Raumluftqualität im Sinne der Arbeitsstättenrichtlinien und der Leitlinien des UBA weitgehend vermeiden lässt. Eine hygienisch unbedenkliche Situation im Sinne dieser Richtlinien ist dagegen kaum erreichbar. Auch der Wert von 1400 ppm, der im Sinne der DIN EN 13779 eine niedrige Raumluftqualität charakterisiert, kann durch das vorgestellte Lüftungsmodell nicht dauerhaft unterschritten werden.

4.1.5 CO₂-Konzentrationen bei Einsatz technischer Raumlüftungsmaßnahmen

Um eine gute Raumluftqualität in Klassenräumen zwangsläufig zu realisieren, kommen nur technische Maßnahmen in Betracht, wenngleich die freie Lüftung das einfachste

Lüftungsmodell ist [19]. Abb. 44 zeigt den Verlauf der CO₂-Konzentrationen in einer Grundschule in Passivhausbauart mit Raumklimaanlage bei ausgeschalteter Lüftungsanlage und geschlossenen Fenstern in der ersten Unterrichtsstunde und die Unterrichtssituation bei eingeschalteter Lüftungsanlage nach Stoßlüftung in der zweiten Unterrichtsstunde. Es zeigt sich eine deutliche Verbesserung der Raumluftqualität durch die Raumluftumlage im Vergleich zu ausbleibender Lüftung während der Stunde. Bei eingeschalteter Lüftungsanlage über beide Schulstunden und zwischenzeitlicher Stoßlüftung ist in beiden Stunden nur ein geringer Anstieg der CO₂-Konzentration zu verzeichnen (Abb. 45).

Abb. 44: CO₂-Konzentrationen in einer vollklimatisierten Grundschule in Passiv-Bauweise mit ausgeschalteter Lüftung in der ersten Unterrichtsstunde ohne Lüftung und Stoßlüftung in der Pause

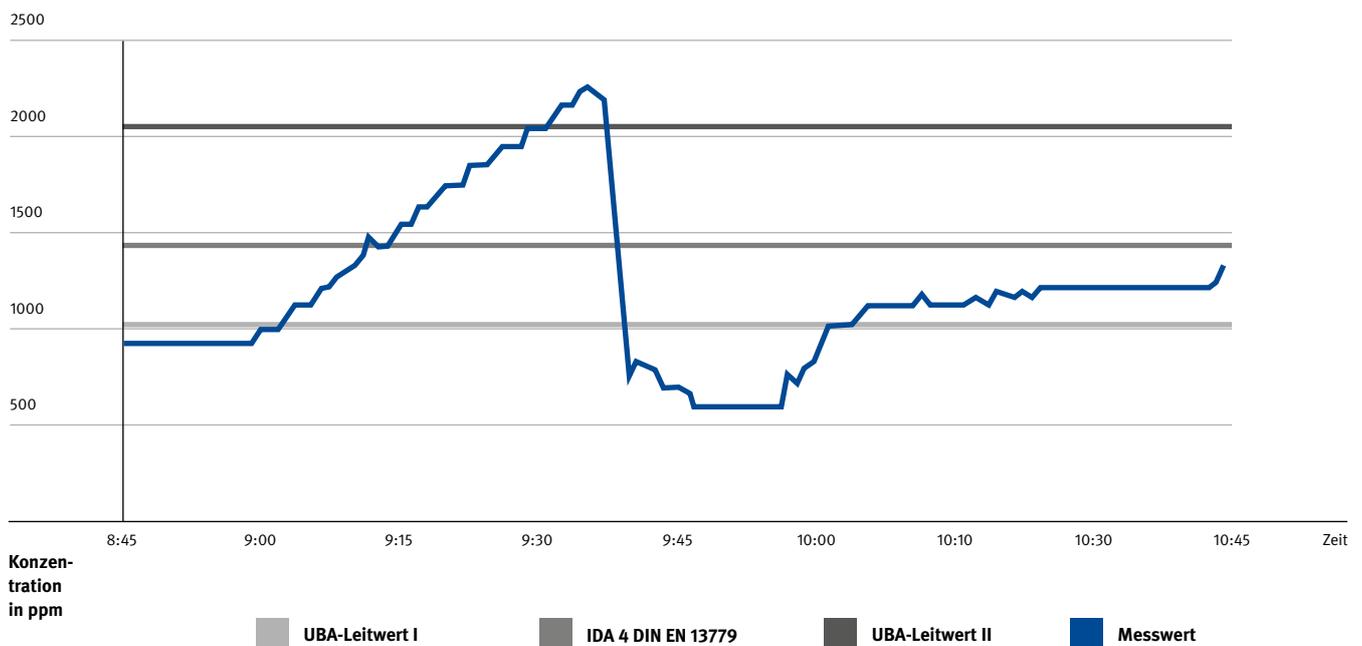
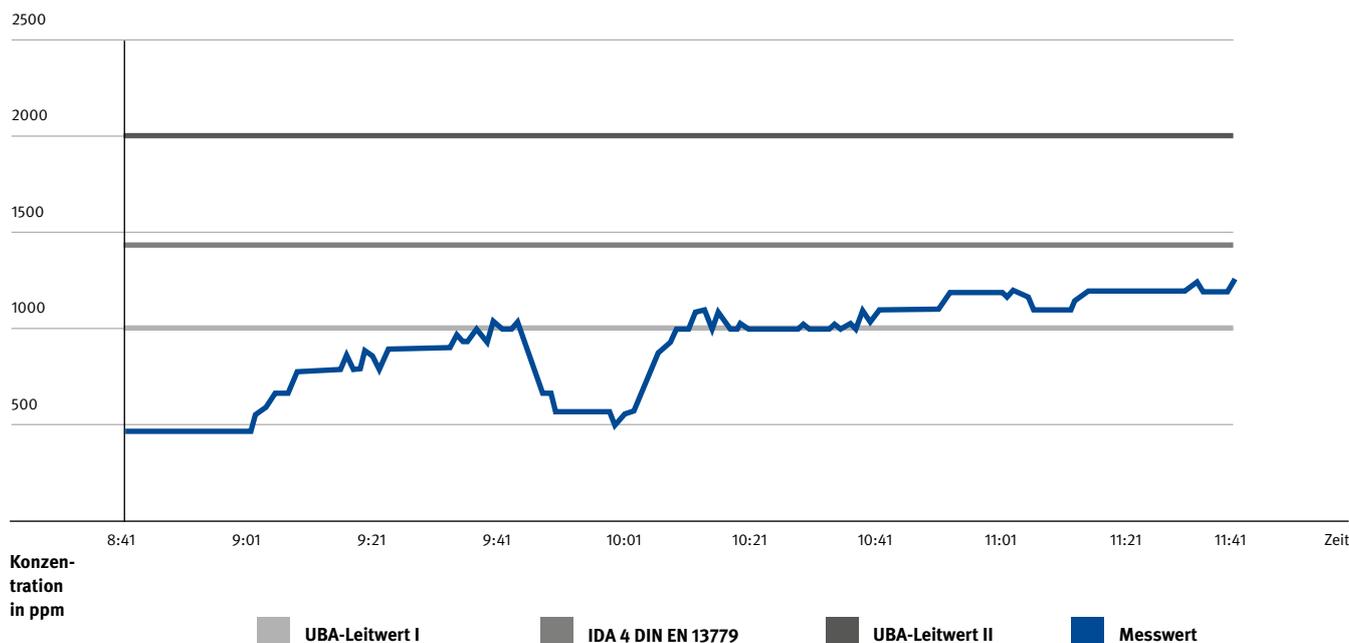


Abb. 45: CO₂-Konzentrationen in einer vollklimatisierten Grundschule in Passiv-Bauweise mit eingeschalteter Lüftung und Stoßlüftung in der Pause



Zu vergleichbaren Ergebnissen führte auch eine Untersuchung von Passivhausschulen in Frankfurt [26]. In zwei Schulen wurde während des Winters in jeweils zwei Klassenräumen über eine Unterrichtswoche die Kohlendioxid-Belastung gemessen. Die Daten wurden mit den Ergebnissen aus zwei Schulen in konventioneller Bauweise verglichen. Der Mittelwert der CO₂-Konzentrationen betrug in den konventionellen Schulen 1473 ppm und in den Passivbauschulen 1124 ppm. Die Maximalwerte lagen in konventionellen Schulen bei 4850 ppm 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 Wirkung der Raumluftanlagen in den überprüften Schulen scheint weniger wirkungsvoll gewesen zu sein, wie die Ergebnisse der hier überprüften Schule zeigen.

Alternativ zu Raumklimaanlagen kommen auch dezentrale Lüftungsgeräte zur Unterstützung der Fensterlüftung in Betracht. Im Zuge der Gestaltung von zwei Musterklassenzimmern in NRW und in Sachsen wurden drei von vier Heizkörpern im Raum durch CO₂-Sensorgesteuerte Lüftungsgeräte ersetzt [27]. Zusätzlich wurde ein Plan aufgestellt, anhand dessen die großen Pausen zum Lüften durch weites Öffnen der Fenster genutzt wurden. Bei Einsatz der Geräte nahm im Laufe des Unterrichts die CO₂-Konzentration von rund 700 ppm auf 1600 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.

4.2 Diskussion der Messungen zu den raumklimatischen Verhältnissen

Mindestanforderungen an die Raumtemperaturen sind in der ASR A3.5 „Raumtemperatur“ [28] beschrieben. Wenngleich diese Richtlinien zur Arbeitsstättenverordnung nur für Beschäftigte und somit nur für Lehrkräfte gilt, sollten sie auch zum Schutz der Schülerinnen und Schüler dienen. Demnach sind als Mindestwert der Lufttemperatur in Arbeitsräumen für Tätigkeiten mit mittlerer Arbeitsschwere im Sitzen und leichter Tätigkeit im Stehen oder Gehen 19 °C notwendig. In Klassenräumen mit normaler Fensterausstattung kann davon ausgegangen werden, dass diese Anforderungen auch auf die operative Temperatur übertragen werden kann. Es hat sich bei den Messungen gezeigt, dass diese Temperatur in etwa zehn Prozent der Fälle nicht erreicht wurde (abgesehen von den Sommermonaten). Der Wert von 20 °C wurde in den Wintermonaten sogar nur in etwa 50 Prozent der Fälle überschritten. Nach dem Eintreten der Schülerinnen und Schüler erreichten die Raumtemperatur dann recht schnell die Mindesttemperatur von mehr als 20 °C. Naturgemäß sinken die Temperaturen dann nach Stoßlüftung in den Wintermonaten in 50 Prozent der Fälle auf unter 20 °C ab. Bei Kipplüftung konnte das Temperaturniveau von 19 bis 20 °C jedoch in der Regel gehalten werden.

Als Höchsttemperatur wird in der Arbeitsstättenrichtlinie der Wert von 26 °C angegeben, der nicht überschritten werden soll. Bei hohen Außenlufttemperaturen über 26 °C sind Ausnahmen möglich. Die Ergebnisse zeigen, dass in der Unterrichtssituation ohne Lüftung dieser Höchstwert in 90 Prozent der Fälle eingehalten wird. Die Höchstwerte erreichen in den Sommermonaten maximal 31,1 °C. Durch Kipplüftung wurden die Maximaltemperaturen leicht abgesenkt. Die Maximaltemperatur betrug hier 30,1 °C im Mai und Juni. Abgesehen von diesem Monatssegment lagen die Temperaturen insgesamt unter dem Höchstwert von 26 °C.

Das Temperaturniveau entspricht insofern in etwa den Ergebnissen aus den anderen Studien. In der bayrischen Studie [14] wurden Temperaturen zwischen 21 und 29 °C im Sommer ermittelt. Das 90-Perzentil lag hier analog zu den eigenen Werten bei 27 °C. Die Werte im Winter lagen zwischen 18 °C und 25 °C bei einem 90-Perzentil von 23 °C und einem Median von 22 °C. Zwischen 22 und 26 °C lag das Temperaturniveau bei den Messungen in Berlin [15]. In Niedersachsen [16] lag das 95-Perzentil im Sommer bei 24,1 °C und im Winter bei 22,5 °C bei Mittelwerten von 22,9 °C im Sommer und 20,9 °C im Winter. In den Frankfurter Schulen [26] lagen die Werte in den konventionellen Schulen bei 20,0 +/- 2,0 °C und in den Passivhausschulen bei 23 +/- 1,3 °C.

In Einzelfällen kann das Arbeiten bei über +26 °C zu einer Gesundheitsgefährdung führen. Dieses gilt insbesondere für besonders schutzbedürftige Beschäftigte wie z. B. Jugendliche, Schwangere, oder stillende Mütter [28]. Daher sollen bei Überschreitung der Außenlufttemperatur von +26 °C unter der Voraussetzung der Verwendung geeigneter Sonnenschutzmaßnahmen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden [28]. Bei Überschreitung der Lufttemperatur im Raum von +30 °C müssen wirksame Maßnahmen ergriffen werden, welche die Beanspruchung der Beschäftigten reduzieren. Solche Maßnahmen sind zum Beispiel:

- effektive Steuerung des Sonnenschutzes (z. B. Jalousien auch nach der Unterrichtszeit geschlossen halten)
- effektive Steuerung der Lüftungseinrichtungen (z. B. Nachtauskühlung)
- Reduzierung der inneren thermischen Lasten (z. B. elektrische Geräte nur bei Bedarf betreiben)
- Lüftung in den frühen Morgenstunden
- Nutzung von Gleitzeitregelungen zur Arbeitszeitverlagerung
- Bereitstellung geeigneter Getränke (z. B. Trinkwasser).

Die Ergebnisse zeigen, dass in Unterrichtsräumen mit freier Lüftung im Sommer häufiger die Situation gegeben ist, in der die genannten weitergehenden Maßnahmen ergriffen werden sollen. Abgesehen von der Erteilung von „hitzefrei“ dürften dabei Veränderungen der Arbeitszeit, wie in anderen Arbeitsbereichen möglich, aufgrund des feststehenden Stundenplans jedoch eher die Ausnahme sein. Auch die Nachtauskühlung und die Lüftung in den frühen Morgenstunden sind in Schulen nicht leicht zu realisieren. Dennoch empfiehlt das Umweltbundesamt, in Warmwetterperioden unter Berücksichtigung des Schutzes vor Einbrüchen die Oberlichter oder Kippfenster nachts geöffnet zu lassen, damit eine bessere Auskühlung der Räume erreicht wird [23]. Die Bereitstellung von kalten Getränken im Lehrerzimmer sollte für Lehrkräfte problemlos möglich sein. Für Schülerinnen und Schüler ist diese Maßnahme im Regelfall jedoch nicht vorgesehen. Wenngleich die Arbeitsstättenrichtlinie für diese Personengruppe nicht gilt, wären solche Maßnahmen dennoch angebracht. Schließlich sind Jugendliche in der Arbeitsstättenrichtlinie als besonders schutzbedürftig benannt [28]. Das sollte somit wohl erst recht für Kinder gelten. Die Temperatur von 35 °C darf in Klassenräumen nicht überschritten werden. Dann gelten die Anforderungen für Hitze Arbeitsplätze.

Angaben zu maximalen relativen Luftfeuchtigkeiten sind in der Arbeitsstättenrichtlinie „Lüftung“ dargestellt [19]. Demnach sollte die relative Luftfeuchtigkeit bei einer Lufttemperatur von 20 °C 80 Prozent nicht überschreiten und bei einer Lufttemperatur von 26 °C 55 Prozent. Witterungsbedingte Feuchtigkeitsschwankungen bleiben hierbei unberücksichtigt.

Betrachtet man die Unterrichtsstunden mit Schülern, so ist festzustellen, dass die relativen Luftfeuchtigkeiten in der ungelüfteten Unterrichtssituation in 90 Prozent der Fälle unter 72 Prozent liegen. Der Maximalwert liegt bei 78 Prozent. Insbesondere in den Sommermonaten ist diese Luftfeuchtigkeit aber durch die Belastung der Außenluft bestimmt, was sich in der Steigerung der relativen Luftfeuchtigkeit bis auf 89 Prozent ausdrückt. So sind auch in der Unterrichtssituation mit Kipplüftung die relativen Luftfeuchtigkeiten etwas niedriger als in der ungelüfteten Situation. In 90 Prozent der Fälle wird der Maximalwert von 70 Prozent, der bei einer Lufttemperatur von 22 °C nicht überschritten werden soll, eingehalten. Die Maximalwerte sind wiederum durch das Außenklima bestimmt.

Zu den Mindestanforderungen zur Luftfeuchtigkeit in Räumen gibt es keine gesicherten Angaben [29]. Eine niedrige Luftfeuchtigkeit ist insbesondere in der Heizperiode bei niedrigen Außenlufttemperaturen zu erwarten. Dieses ist auch in den Ergebnissen dieser Studie zu entnehmen, da die relative Luftfeuchtigkeit in den Unterrichtssituationen mit Schülerinnen und Schülern im Einzelfall bis auf 15 Prozent abfällt. In 90 Prozent

der Fälle beträgt die relative Luftfeuchtigkeit auch in den Wintermonaten mehr als 20 Prozent und liegt so, gesehen über das ganze Jahr, im Mittel in einem Bereich zwischen 40 und 60 Prozent, was raumlufthygienisch als akzeptabel anzusehen ist.

Die Ergebnisse der Messung der relativen Luftfeuchtigkeit in den anderen Studien kommen den eigenen Ergebnissen nahe. So lagen die relativen Luftfeuchtigkeiten in Bayern [14] im Sommer zwischen 32 Prozent und 70 Prozent bei einem Medianwert von 51 Prozent und im Winter zwischen 22 Prozent und 60 Prozent bei einem Medianwert von 38 Prozent. In Berlin lag die relative Luftfeuchtigkeit während der Messkampagne zwischen 20 Prozent und 60 Prozent [15].

Im niedersächsischen Schulprojekt [16] lagen die mittleren relativen Luftfeuchtigkeitswerte im Winter bei 48,5 Prozent und im Sommer bei 54,3 Prozent. Zu 95 Prozent lagen die Werte in Niedersachsen unter 58,1 Prozent und im Winter unter 53,2 Prozent.

Bei den Wintermessungen in den konventionellen Schulen in Frankfurt schwankten die Mittelwerte in einem Bereich von 28,3 Prozent bis 57,5 Prozent bei einem Minimalwert von 23,3 Prozent und einem Maximalwert von 63,8 Prozent. In den Passivhausschulen lag die relative Luftfeuchtigkeit relativ konstant in einem Bereich zwischen 40 und 50 Prozent [26].

Die Beurteilung der Behaglichkeit in Räumen kann im Sinne von DIN EN ISO 7730 [4] durch das vorausgesagte mittlere Votum (PMV-Index) bestimmt werden. Daraus lässt sich dann der vorausgesagte Prozentsatz Unzufriedener (PPD-Index) ableiten. Der PMV-Wertebereich 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. Dieser Bereich ist im Sinne von DIN EN 15521[17] und im Report „Innenraumarbeitsplätze“ [30] als Zielbereich anzusehen. Selbst bei einem PMV-Wert von 0 (neutral) ist noch mit einem Anteil von fünf Prozent Unzufriedenen zu rechnen. Wie man in den Ergebnissen der Unterrichtssituation ohne Lüftung entnehmen kann, liegt der Bereich zwischen dem 10-Perzentil und dem 90-Perzentil in der Heizperiode in diesem Zielkorridor. In 50 Prozent der Fälle wird auch der obere Wert des Zielkorridors nicht überschritten. In den Monaten von März bis Oktober liegt der obere PMV-Wert jedoch zwischen 0,8 und 1,2, sodass das Raumklima in diesen Monaten in einigen Fällen als etwas zu warm empfunden wird. Diese Situation kann dann durch Kipplüftung erträglicher gestaltet werden. Bis auf wenige heiße Tage im Sommer liegen die PMV-Werte zwischen dem 10-Perzentil und dem 90-Perzentil in dem Zielkorridor von -0,5 und +0,5. Bemerkenswert ist auch das 10-Perzentil des PMV-Index in den Wintermonaten. Dieses liegt nur in dem Monatssegment Januar und Februar mit -0,7 leicht unter dem unteren Zielwert von -0,5. Es ist also festzustellen, dass in annähernd 90 Prozent der Fälle das Raumklima in Klassenräumen auch bei Kipplüftung nicht als zu kühl empfunden wird, wenngleich lokale Zuglufterscheinungen in der Nähe der Fensteröffnungen nicht auszuschließen sind. Insofern kann man die Kipplüftung auch unter Raumklimaaspekten in den Wintermonaten als durchaus praktikables Element der Raumklimaverbesserung ansehen.

5 Zusammenfassung

Klassenräume sind wegen der hohen Zahl der Nutzerinnen und Nutzer und deren regelmäßigen langen Aufenthaltszeiten hinsichtlich ihrer CO₂-Konzentration besonders kritisch zu betrachten. Wenngleich der Arbeitsplatzgrenzwert in Höhe von 5000 ppm als Achtstundenmittelwert im Regelfall nicht erreicht wird, so belegen doch zahlreiche Studien, dass die in Schulen bei mangelhafter Lüftung auftretenden CO₂-Konzentrationen in Klassenräumen nachteilige Wirkungen hervorrufen können.

Um einen Überblick über die CO₂-Belastung im Unterricht bei geschlossenen Fenstern und die Möglichkeiten der Lüftungsinterventionen in Klassenräumen des allgemeinbildenden Unterrichts zu erhalten, wurden in Nordrhein-Westfalen in 363 Klassenräumen von 111 Schulen verschiedener Schulformen CO₂- und Raumklimamessungen durchgeführt. Die Messungen erfolgten in der Unterrichtssituation „mit Schülerinnen und Schülern ohne Lüftungsmaßnahmen“, in der Situation „nach Stoßlüftung“ und in der „Unterrichtssituation bei in Kippstellung geöffneten Fenstern“. Die Grundbelastung vor dem Unterricht war dabei in allen Schulformen mit circa 600 ppm in etwa gleich. Die höchsten Anstiege der CO₂-Konzentrationen ergaben sich in Gymnasien mit einem Mittelwert der Endkonzentration von 2403 ppm. 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 CO₂-Konzentration bewegte sich hier im Unterricht bei geschlossenen Fenstern im Mittel und als Median in dem vom Umweltbundesamt als hygienisch auffällig bezeichneten Bereich zwischen 1000 und 2000 ppm. Anders betrachtet, ist in der Unterrichtsstunde ohne Lüftung häufig von einer Überschreitung des Leitwertes von 2000 ppm auszugehen, dessen Überschreitung laut Umweltbundesamt als hygienisch inakzeptabel gilt. In den anderen Schulformen wurde dieser Wert im Regelfall überschritten. Der Wert von 1400 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, wenngleich das Startniveau von 600 ppm durch Lüftung in den Fünf-Minuten-Pausen nicht wieder erreicht wird. In der Unterrichtssituation mit darauf folgender Kipplüftung wird die CO₂-Konzentration von 1000 ppm dann in allen Schulformen nicht mehr wesentlich überschritten. Der Anstieg ist dabei im Winterhalbjahr mit dem Mittelwert von 780 ppm höher als im Sommer mit einem Mittelwert von 500 ppm. Die geöffnete Fensterfläche war im Winterhalbjahr dabei halb so groß wie im Sommerhalbjahr. Trotz der Kipplüftung sank das Temperaturniveau in den Klassenräumen nicht deutlich ab. Es lag in einem Bereich zwischen 19 und 20 °C. Auch das vorausgesagte mittlere Votum (PMV-Index) als Qualitätsparameter für die Raumklimaempfindung lag am Messort bei Kipplüftung in den Wintermonaten mit -0,7 nur selten unter dem unteren Zielwert von -0,5. So sollte das Raumklima in annähernd 90 Prozent der Fälle auch bei Kipplüftung im Winter als nicht zu kühl empfunden werden. Die Kipplüftung ist somit in den Sommermonaten eine durchaus geeignete Lüftungsmaßnahme. Auch in den Wintermonaten kann man durch Kipplüftung als Ergänzung zur Stoßlüftung eine deutliche Verbesserung der Luftqualität herbeiführen, wie in einer Modellrechnung dargestellt wurde. Die Kipplüftung sollte spätestens 20 Minuten vor dem Ende der Unterrichtsstunde beginnen.

Im Rahmen der Studie wurden auch unterschiedliche Einflussfaktoren auf die CO₂-Konzentration in Klassenräumen betrachtet. Dabei zeigte sich zum Beispiel, dass die zu Lüftungszwecken geöffnete Fensterfläche nicht der alleinige Maßstab für die Luft-

qualität in Klassenräumen ist. Wichtige Einflussfaktoren sind auch die Raumgröße, die Anzahl der Raumnutzerinnen und -nutzer, die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen sowie der Wind. 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 wurde ein möglicher Tagesgang für die CO₂-Konzentration in Klassenräumen dargestellt. Ferner wurden die schulform-spezifischen CO₂-Anstiege pro Person in einer Schulstunde ermittelt. Die Verwendung dieser Werte zur Berechnung des möglichen CO₂-Anstiegs in ungelüfteten Räumen im Vergleich zu anderen Modellrechnungen zeigt, dass die ermittelten Werte für die schulformspezifische Abschätzung des CO₂-Anstiegs in einer Unterrichtsstunde durchaus geeignet sind. Durch Multiplikation der ermittelten Werte mit der Zahl der Raumnutzerinnen und -nutzer ergibt sich ein einfaches Modell zur Abschätzung der CO₂-Konzentration. Wie durch Anwendung des Modells ferner gezeigt werden konnte, lässt sich selbst unter Betrachtung eines Worst-Case-Szenarios der Zielkorridor im Sinne der Arbeitsstättenrichtlinien und der UBA-Leitlinien zwischen 1000 und 2000 ppm durch geeignete Kombination von Stoßlüftung und Kipplüftung weitgehend einhalten.

Abschließend ist festzustellen, dass die hygienischen Mindestanforderungen des Umweltbundesamtes und der Arbeitsstättenrichtlinien an die CO₂-Konzentrationen in Arbeitsräumen bei fehlender Lüftung im Unterricht in vielen Fällen nicht eingehalten werden. Durch intensive Stoßlüftung in den Pausen und Kipplüftung während des Unterrichts lässt sich jedoch eine akzeptable Raumluftqualität erreichen. Alternativ zu diesen Lüftungsmaßnahmen lässt sich auch durch raumluftechnische Anlagen eine gute Raumluftqualität realisieren.

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 11 (2008), S. 1358-1369
- [2] Neumann, H.-D.: Luftqualität und Lüftung in Schulen. Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 71 (2011) Nr. 11/12, S. 495-497
- [3] VDI 4300 Blatt 9: Messen von Innenraumluftverunreinigungen – Messstrategie für Kohlendioxid (CO₂), Beuth (2003), Berlin
- [4] 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 (Mai 2006). Beuth, Berlin; und Berichtigung 1 (Juni 2007)
- [5] Technische Regel für Gefahrstoffe (TGRS) 900: Arbeitsplatzgrenzwerte (1/20063). BArBl. (2006) Nr. 1, S. 41-55; zul. geänd. GMBL. (2011) Nr. 10, S. 193-194
- [6] Kajtár, L.; Herczeg, L.; Láng, E.; et al. (2006): Influence of carbon-dioxide pollutant on human well-being and work intensity. Proc Healthy Buildings Conf '06 1:85-90
- [7] Myhrvold, AN; Olsen, E.; Lauridsen, O.; (1996): Indoor environment in schools – pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations. Proc Indoor Air '96 4:369-374
- [8] Tiesler, G.; Schönwälder, H.-G.; Ströver, F.; (2008): Gesundheitsfördernde Einflüsse auf das Leistungsvermögen im schulischen Unterricht. ISF – Institut für interdisziplinäre Schulforschung, Universität Bremen. Forschungsvorhaben im Auftrag des Gemeindeunfallversicherungsverbandes Hannover und der Unfallkasse Hessen
- [9] Wargocki, P.; Wyon, D. P.; (2006): Research report on effects of HVAC on student performance. ASHRAE JI 48 (October 2006):23-26
- [10] Voronova BZ, Veremkovich LV, E'lkovskaia EA (1989) Optimal air conditioning in the classrooms of secondary schools as a factor of improving health status of schoolchildren. Gig Sanit Nov: 19–22
- [11] Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, et al. (2004) Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. Indoor Air 14:333–341
- [12] ECA (1992) Guidelines for ventilation requirements in buildings. European Collaborative Action Indoor Air Quality & its Impact on Man. Report no. 11. EUR 14449
- [13] Bebersdorf, J.: Untersuchungen zu Raumluftqualität an Erfurter Schulen. Jena, Universität, Dissertation (2010)

[14] Fromme, H.; Heitmann, D.; Dietrich, S. et al.: Raumluftqualität in Schulen – Belastung von Klassenräumen mit Kohlendioxid (CO₂), flüchtigen organischen Verbindungen (VOC), Aldehyden, Endotoxinen und Katzenallergenen. Gesundheitswesen 70 (2008); S. 88-97

[15] 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)

[16] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.; (2003): Aufatmen in Schulen – Untersuchungsergebnisse und Modellierungsansätze zur Raumluftqualität in Schulen. Gesundheitswesen 64:447-456

[17] DIN EN 15251: Eingangsparemeter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung von Gebäuden – Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik (12.12), Beuth, Berlin 2012

[18] Grams, H.; Hehl, O.; Dreesman, J.; Niedersächsisches Schulmessprogramm – Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Raumluftqualität in Klassenräumen sowie Modellierung von Kohlendioxidverläufen. Niedersächsisches Landesgesundheitsamt Hannover (Hrsg.), 2003, aktualisiert 2005

[19] Arbeitsstätten-Richtlinie (ASR) A.3.6 – Lüftung, Ausgabe: Januar 2012 GMBI 2012, S. 92, Erste Änderung GMBI 2013, S. 359

[20] DIN EN 13779 Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlageanlagen und Raumkühlssysteme (2007-09). Beuth, Berlin

[21] Neumann, H. D.; Buxtrup, M.; Benitez, S., Breuer, D.; Hahn, J.-H.: Gesunde Luft in Schulen – VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen. Bericht, Unfallkasse Nordrhein-Westfalen: Düsseldorf 2013; Bestellnummer S. 63), http://www.unfallkasse-nrw.de/fileadmin/server/download/Sonderschriften/S_63.pdf (Zugriff am 25. März 2014)

[22] Neumann, H. D.; Buxtrup, M.; Benitez, S.; Hahn, J.-H.: Gesunde Luft in Schulen – VOC- und Aldehydkonzentrationen in beschwerdefreien Klassenräumen unter unterschiedlichen Nutzungs- und Lüftungsbedingungen. Gefahrstoffe Reinhalt. Luft 74 (2014) Nr. 3, S.85-94

[23] UBA: (2008) Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulen. Innenraumlufthygiene-Kommission des Umweltbundesamtes. Umweltbundesamt (Hrsg.), Berlin

[24] Standardlehraussagen – intellexi – Institut für Kommunikation, Psychotraumatologie & Notfallmanagement, Geldern (2011), http://www.intellexi.de/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=2:informationen-rettungsdienst-a-notfallmanagement&Itemid=4 (Zugriff am 25. März 2014)

[25] Simulationsprogramm zur Berechnung von CO₂ Konzentrationen in Schulen. Innenraum Mess- und Beratungsservice (Herausgeber) im Auftrag des österreichischen Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Wien), <http://www.raumluft.org/rlt-anlagen/co2-rechner> (Zugriff am 25. April 2014)

[26] Heudorf, U.: Raumlufthygienische Probleme in Schulen – Bringen Passivhausschulen die Lösung? *Umweltmed Forsch Prax* 13(4), S. 219-226 (2008)

[27] Report: Das ergonomische Klassenzimmer als Beitrag zur guten gesunden Schule; Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung – DGUV (Herausgeber), Berlin (2013)

[28] Arbeitsstätten-Richtlinie (ASR) A 3.5: Raumtemperaturen, GMBI 2010, S. 751, Ergänzung GMBI 2012, S. 660

[29] von Hahn, N.: „Trockene Luft“ und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit – Ergebnisse einer Literaturstudie GRdL 2007-03, S. 103-107

[30] Report: Innenraumarbeitsplätze – Vorgehensempfehlung für die Ermittlungen zum Arbeitsumfeld. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung – DGUV (Herausgeber), Berlin (2013)

Impressum

Herausgeber

Unfallkasse Nordrhein-Westfalen
Sankt-Franziskus-Straße 146
40470 Düsseldorf
Telefon 0211 9024-0
E-Mail info@unfallkasse-nrw.de
Internet www.unfallkasse-nrw.de

Autoren

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

Redaktion

Karin Winkes-Glüssenkamp

Gestaltung

Gathmann Michaelis und Freunde, Essen

Druck

Düssel-Druck, Düsseldorf

Bildnachweis

Unfallkasse Nordrhein-Westfalen, shutterstock.de, istockphoto.com

1. Auflage Juni 2014

1.000 Exemplare

Bestellnummer

PIN 57

Danksagung

Die Autoren möchten an dieser Stelle allen Beteiligten, die an dieser Studie teilgenommen haben, einen herzlichen Dank aussprechen. Unserer 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.

Unfallkasse Nordrhein-Westfalen

Sankt-Franziskus-Str. 146
40470 Düsseldorf
Telefon 0211 9024-0
Telefax 0211 9024-355