

Messdaten zur Lüftung in einem Schulgebäude zeigen CO₂-Aufnahme von Betonbauteilen

Unserem Kollegen Prof. Dr.-Ing. Anton Maas anlässlich seiner Verabschiedung von der Universität Kassel gewidmet

Im Rahmen des Monitorings der Lüftung in einem Schulgebäude wurde festgestellt, dass die gemessenen CO₂-Innenraumkonzentrationen zeitweise deutlich unterhalb der CO₂-Außenluftkonzentration liegen. Im Folgenden wird dargelegt, dass dieser Umstand auf die CO₂-Aufnahme von Betonbauteilen zurückgeführt werden kann. Es wird ermittelt, in welcher Größenordnung die CO₂-Aufnahme (Carbonatisierung) der eingebauten Deckenplatten (Holzfaser-Zement-Verbund) liegt und welche Konsequenzen sich daraus für die Betriebsweise der CO₂-geführten Lüftung und somit für die Luftqualität in den Innenräumen ergeben können.

Stichworte Mechanische Lüftung; Raumluftqualität; CO₂-Konzentration; Carbonatisierung; Betonbauteile

1 Einleitung

Wie bei Neubauten in der Regel üblich, wurde der Erweiterungsbau der Auefeldschule in Kassel (Bild 1) mit einer mechanischen Lüftungsanlage ausgestattet. Als Besonderheit wurde ein semizentrales Lüftungssystem umgesetzt, das im Rahmen des vom BMW geförderten Forschungsprojekts *Semizentrale Lüftung und intelligentes Betriebsmonitoring* FKZ 03EN1005A durch ein umfangreiches Monitoring messtechnisch begleitet wird. Der Erweiterungsbau der Grundschule ist seit Ende August 2023 in Nutzung (siehe Tab. 1) und seitdem findet die kontinuierliche Aufzeichnung und Auswertung



Bild 1 Gebäudeansicht Erweiterungsbau (Quelle: Anderhalten Architekten GmbH)
Building view extension

Ventilation measurement data of a school building show CO₂ absorption of concrete elements

During monitoring of the ventilation system in a school building, it was found that the measured indoor CO₂ concentrations were at times significantly below the outdoor CO₂ concentration. In the following, it is shown that this circumstance can be attributed to the CO₂ absorption of concrete components. The order of magnitude of the CO₂ absorption (carbonation) of the installed ceiling panels (wood-fiber-cement composite) is determined, along with the consequences this may have for the operation of CO₂-controlled ventilation and thus for indoor air quality.

Keywords mechanical ventilation; indoor air quality; CO₂-concentration; carbonation; concrete building components

des Lüftungstechnischen Betriebsverhaltens statt. Das umfasst u. a. auch die Messung und Auswertung der CO₂-Konzentrationen in dem Gebäude.

Tab. 1 Gebäudedaten Schulneubau
Building data for new school building

Bauherrin	Stadt Kassel
Architekturbüro	Anderhalten Architekten GmbH, Berlin
Lüftungsplanung	edl Ingenieurbüro für Energie- und Umwelttechnik GmbH, Großalmerode
Bauzeit	2021–2023
Fertigstellung Gebäude, Start Gebäudenutzung	August 2023
Bauweise	Holzbauweise, mit Betonelementen: Sichtbetonwand, Betonwerkstein auf dem Fußboden, Zementgebundene Akustikdeckenplatten (Bild 5)
Nettogrundfläche	1641 m ²
Nennluftmenge Mechanische Lüftung	9300 m ³ /h

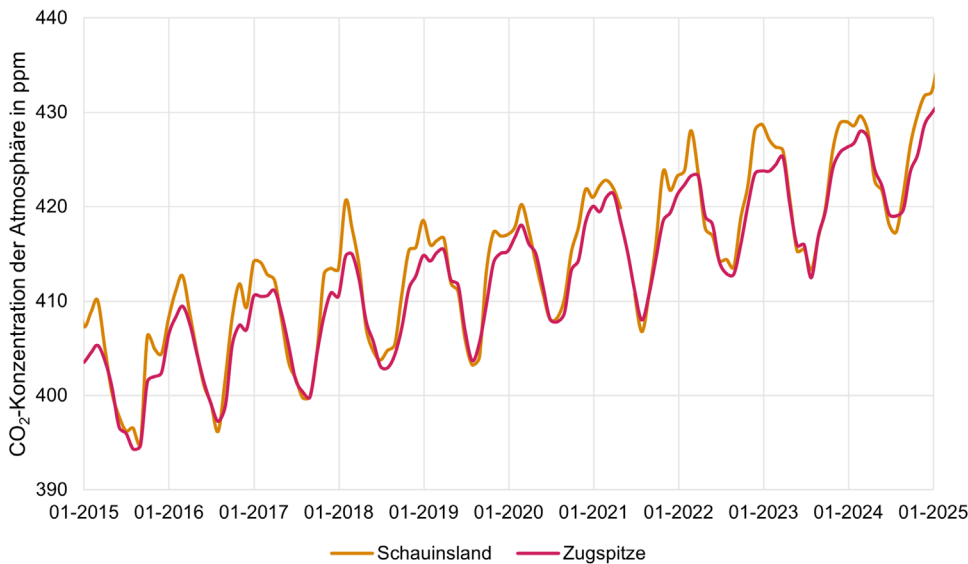


Bild 2 Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration der Außenluft zweier Messstationen in Deutschland [1]
Temporal progression of CO₂-concentration in outdoor air at two measuring stations in Germany [1]

Die CO₂-Konzentration in Innenräumen entspricht üblicherweise mindestens der CO₂-Außenluftkonzentration, bzw. liegt bei Personenbelegung oberhalb der Außenluftkonzentration. Messdaten des Umweltbundesamts [1] zeigen den Verlauf der CO₂-Außenluftkonzentration der letzten Jahre in Deutschland (Bild 2). Für das Jahr 2024 wurde im Mittel eine CO₂-Außenluftkonzentration von ca. 430 ppm gemessen.

2 Messdaten aus dem Schulneubau

In dem Schulgebäude werden CO₂-Konzentrationen sowohl in den Räumen als auch im zentralen Lüftungsggerät gemessen. Die Erfassung und Speicherung der Daten erfolgen in einem Intervall von sechs Minuten. Die in den Räumen gemessenen CO₂-Werte (Sensor: NOVOS 3, Fa. Thermokon, siehe Tab. 2) dienen dabei als Regelgröße für das Lüftungssystem, während die aus dem Zentralgerät stammenden CO₂-Daten (Sensor: LK+, Fa. Thermokon)

als ergänzende Informationen herangezogen werden. Zur Überprüfung der CO₂-Messwerte der Raumsensoren wurden im Sommer 2024 mehrere Vergleichsmessungen über Zeiträume von bis zu zwei Wochen mit CO₂-Sensoren eines anderen Herstellers durchgeführt (Sensor: HOBO MX1102A, Fa. Onset Computer Corporation). Die Vergleichsmessungen bestätigen die Messdaten der fest installierten Raumsensoren (Abweichung von max. +/-80 ppm).

Bei Betrachtung der in dem Schulgebäude aufgezeichneten CO₂-Messdaten fällt auf, dass die gemessenen CO₂-Raumkonzentrationen teilweise unterhalb der CO₂-Außenluftkonzentration liegen. In Bild 3 ist die Unterschreitung der CO₂-Außenluftkonzentration in den Innenräumen des Schulgebäudes zu sehen. Der Verlauf lässt sich in drei Charakteristika unterteilen:

- Bild 3a) Nachts oder am Wochenende, wenn die Lüftungsanlage abgeschaltet ist, sinken die CO₂-Werte

Tab. 2 Übersicht der verwendeten CO₂-Sensoren
Overview of CO₂ sensors used

Messgerätbezeichnung	NOVOS 3 CO ₂ +VOC Temp_rH weiß RS485 Modbus	LK+ CO ₂ +VOC Temp_rH RS485 Modbus Kanalfühler	HOBO MX CO ₂ logger
Artikelnummer	735568	662192	onset-MX1102A
Messgerät-Hersteller	Thermokon	Thermokon	Onset Computer Corporation
CO ₂ -Sensortyp	Sensirion SCD30, NDIR (nicht dispersiv, infrarot)	Unbekannt, NDIR (nicht dispersiv, infrarot)	Unbekannt, NDIR (nicht dispersiv, infrarot)
CO ₂ -Genauigkeit	±50 ppm +3 % des Messwerts (typ. bei 21 °C, 50 % rH, 1015 Pa) Bspw. Messwert 400 ppm ±62 ppm	±50 ppm +3 % des Messwerts (typ. bei 21 °C, 50 % rH, 1015 Pa)	±50 ppm ±5 % des Messwerts (bei 25 °C, < 90 % rH, 1013 Pa) Bspw. Messwert 400 ppm ±70 ppm
CO ₂ -Kalibriervorgang	Selbstkalibrierung Dual-Channel	Selbstkalibrierung Dual-Channel	Automatisch oder manuell auf 400 ppm (manuell durchgeführt und Automatik deaktiviert)

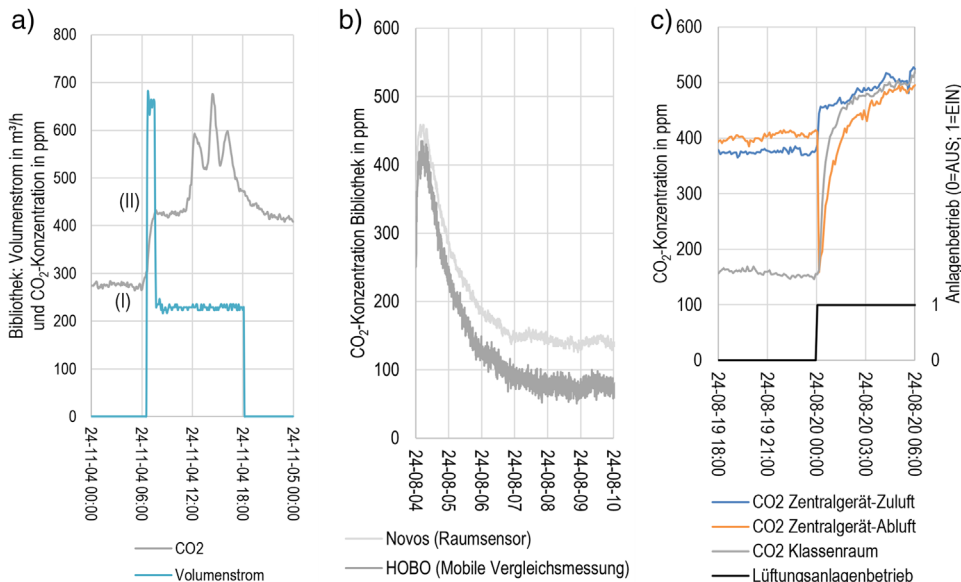


Bild 3 CO₂-Messdaten aus dem Schulneubau; a) gewöhnlicher Schultag in der Bibliothek, b) während der Schulferien in der Bibliothek, c) bei Inbetriebnahme nach den Schulferien
CO₂ measurement data from the new school building; a) standard school day in the library, b) during school vacations in the library, c) starting operation after the vacations

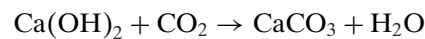
- in den Räumen auf Werte von bis zu 230 ppm ab. Hier beispielhaft abgebildet sind die Messdaten der Bibliothek (hellgraue Linie, Absinken auf ca. 270 ppm, siehe Bereich I). Beim täglichen Start des Lüftungs-betriebs (morgendliches Spülen/Nachtlüftung) steigen die CO₂-Raumwerte sprunghaft auf Werte, die der Außenluftkonzentration entsprechen, an (Bereich II).
- Bild 3b) Bei längerer Nicht-Betriebszeit der Anlage sinken die CO₂-Raumkonzentrationen auf minimal ≈100 ppm ab. Diese minimalen Werte wurden in den Sommerferien im August 2024 gemessen, als die mechanische Lüftungsanlage über einen Zeitraum von 2,5 Wochen außer Betrieb war und keine Personen anwesend waren. Hier abgebildet sind Messdaten im Raum Bibliothek: Messdaten des Raumsensors Novos (hellgraue Linie) und Messdaten des Hobo-Datenlogger als Vergleichsmessung (dunkelgraue Linie).
 - Bild 3c) Bei Anlagenstart nach den Ferien (schwarze Linie) wurden die niedrigen CO₂-Konzentrationen vom Kanalfühler in der Abluft bestätigt: Die im Zentralgerät gemessene CO₂-Abluftkonzentration (orangene Linie) sinkt kurzzeitig auf einen Wert unter 200 ppm ab, auf die sich über die Ferien ergebende niedrige Raumkonzentration (hellgraue Linie).

Die verschiedenen Sensoren zeigen wiederholt die niedrigen CO₂-Konzentrationen, wodurch ein Messfehler ausgeschlossen werden kann. Als Ursache wird die Carbonatisierung von Betonelementen im Gebäude vermutet. Bestehende Literaturquellen zum Einfluss der Carbonatisierung auf die CO₂-Konzentration der Raumluft konnten nicht gefunden werden.

3 Carbonatisierung von Beton

„Carbonatisierung bezeichnet die chemische Reaktion zwischen Kohlenstoffdioxid [in der Luft] auf der einen Seite und Calciumhydroxid und hydratisiertem Calciumsi-

licat im Beton auf der anderen Seite zur Bildung von Calciumcarbonaten, was zur Sequestrierung [Einlagerung] von CO₂ führt“ [2].



Die CO₂-Aufnahme von Betonbauteilen ist also grundsätzlich bekannt. Auch bekannt ist, dass die CO₂-Aufnahme von Beton während der Nutzungsphase von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird. Nach [3] zeigt sich insbesondere, dass trockener Beton bzw. Innenelemente in Umgebungen mit einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 50% und 70% die höchsten Geschwindigkeiten der Carbonatisierung aufweisen. Ebenso spielt die Geometrie der Bauteile eine wesentliche Rolle: Elemente mit einem großen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen weisen eine deutlich höhere CO₂-Aufnahmekapazität auf als kompakte Bauteile. Zudem fördert ein hoher Wasserzementwert, der mit einer niedrigeren Betondruckfestigkeit einhergeht, die Carbonatisierungsrate. Auch die Art des verwendeten Bindemittels, wie etwa CEM I, das einen hohen Anteil an Zementklinker beinhaltet, kann die CO₂-Aufnahmekapazität erhöhen. [3]

Zu berücksichtigen ist außerdem der zeitliche Verlauf der Carbonatisierung. Wie in Bild 4 ersichtlich ist der Effekt der Carbonatisierung zu Beginn der Nutzungsphase am größten und nimmt im zeitlichen Verlauf ab.

Das Wissen über die CO₂-Aufnahme von Betonbauteilen wird in diesem Artikel mit dem messbaren Effekt auf die CO₂-Luftkonzentration in Innenräumen verknüpft.

4 Betonkomponenten im Schulgebäude

In dem in Holzbauweise errichtetem Schulgebäude sind drei unterschiedliche Betonbauteile/-komponenten im

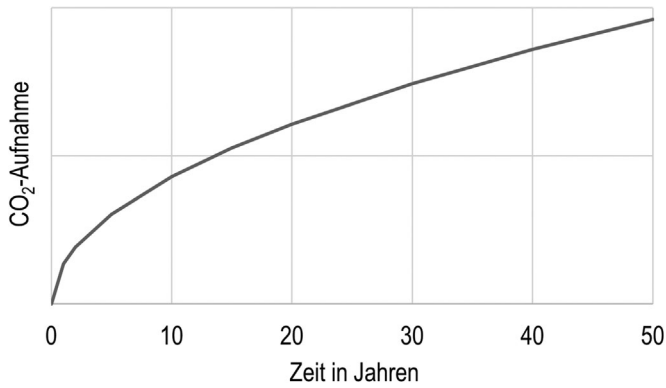


Bild 4 Qualitativer Verlauf der CO₂-Aufnahme von Zement (CEM I) nach [4]
Qualitative progression of CO₂ absorption for cement (CEM I) according to [4]

Einsatz: eine große Betonwand in der Gebäudemitte, der Boden-Betonwerkstein in der Mensa, sowie die Akustikdeckenplatten, welche fast im gesamten Gebäude vorzufinden sind (Bild 5). Mehrere Gegebenheiten in dem Schulgebäude sind günstig für eine hohe Carbonatisierung: Es handelt sich um einen Neubau (kurze Nutzungsdauer) und die Raumtemperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit liegen in dem Schulgebäude die meiste Zeit in dem in [3] und [5] genannten „optimalen“ Bereich für die Carbonatisierung. Zudem weisen die Betonkomponenten im Schulgebäude aufgrund ihres großen Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen eine hohe CO₂-Aufnahmekapazität auf. Insbesondere die Deckenplatten (siehe Tab. 3) besitzen aufgrund ihrer Faserstruktur eine große spezifische Oberfläche. Im Weiteren wird nur die Carbonatisierung der Deckenplatten betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass die Carbonatisierung des Bodens und der Wand im Vergleich gering ist.

Die Akustikplatten aus Holzfaser-Zement-Verbund des Herstellers Troldekt (Tab. 3) sind auf Basis des Zementtyps FUTURECEM hergestellt. Laut Hersteller kommt dieser Zementtyp mit einem geringeren Anteil an gebranntem Klinker aus, wodurch der Zement einen um ca. 30 % geringeren CO₂-Fußabdruck erzeugt als übliche Zementtypen. Nach Herstellerinformation absorbiert die Akustikplatte bis zu 140 g CO₂ pro Kilogramm Zement [während einer 50-jährigen Nutzungsphase] [6].

Tab. 3 Angaben zu Deckenplatten [7]
Information on ceiling panels

Bezeichnung	Troldekt 25 mm Natural Grey based on FUTURECEM
Hersteller	Troldekt
Maße	0,6 × 1,2 × 0,025 m
Dichte	463 kg/m ³
Gewicht	8,3 kg
Zementanteil	62,2 %

5 Plausibilisierungsmessung in Klimakammer

In zwei Messreihen wurde untersucht, ob die Deckenplatten tatsächlich für eine Reduktion der CO₂-Konzentration in der Raumluft verantwortlich sein können. Hierfür wurden Messungen mit einer der Deckenplatten nach Tab. 3 in einem 1 m³-Klimaschrank durchgeführt. Der Klimaschrank ist ein Gerät mit abgeschlossenem Luftvolumen, in dem die gewünschten Luftbedingungen (Temperatur und Feuchte) erzeugt und erhalten bleiben können. Für die Versuchsmessungen wurde die Temperatur auf 23 °C und eine rel. Feuchte von 65 % eingestellt. Die beiden durchgeführten Messreihen unterscheiden sich in der Start-CO₂-Konzentration: Die erste Messreihe wurde bei leicht erhöhter Außenluft-CO₂-Konzentration (~550 ppm) gestartet (Bild 6, blau), wohingegen die zweite Messreihe bei stark erhöhter CO₂-Konzentration gestartet wurde (> 2500 ppm, Bild 6, grün). Es wurde jeweils eine Kontrollmessung durchgeführt, bei der die CO₂-Konzentration innerhalb des Klimaschranks ohne Beisein der Deckenplatte aufgezeichnet wurde (Bild 6, grau-blau, grau-grün).

Auch in den beiden Kontrollmessungen ist eine langsame Abnahme der CO₂-Konzentration ersichtlich, dies kann auf die Undichtigkeit des Klimaschranks zurückgeführt werden. In den Versuchsmessungen wird jedoch offensichtlich, dass die CO₂-Konzentration durch das Beisein der Deckenplatte stark abnimmt. Es werden Messwerte unterhalb der üblichen CO₂-Außenluftkonzentration erreicht. Die Deckenplatten führen also zu einer messbaren Absenkung der CO₂-Luftkonzentration.

Im Vergleich mit den Messdaten aus dem Schulgebäude sind u. a. folgende Punkte zu berücksichtigen:

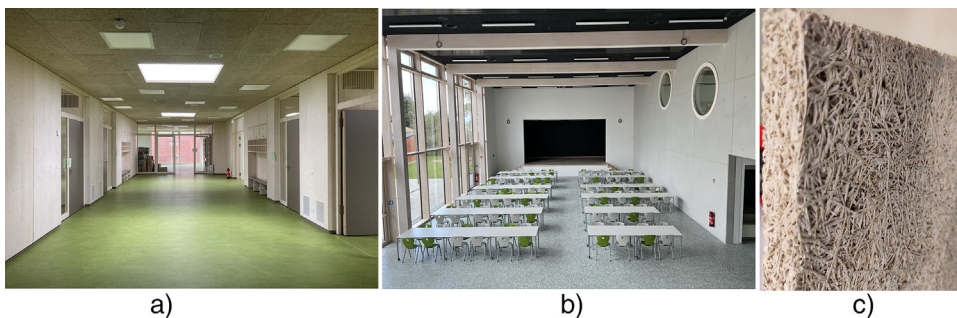


Bild 5 Betonwerkstoffe in dem Schulgebäude; a) zementgebundene Deckenplatten im Forum, b) zementgebundene Deckenplatten mit schwarzem Farbanstrich an der Mensadecke, Betonwand (mit Rundfenstern) und Betonwerkstein auf dem Fußboden der Mensa, c) Holzfaser-Struktur der Deckenplatten
Concrete materials in the school building; a) cement-bonded ceiling panels in the forum, b) cement-bonded ceiling panels with black paint on the cafeteria ceiling, concrete wall (with round windows) and cast stone on the floor of the cafeteria, c) wood fiber structure of the ceiling panels

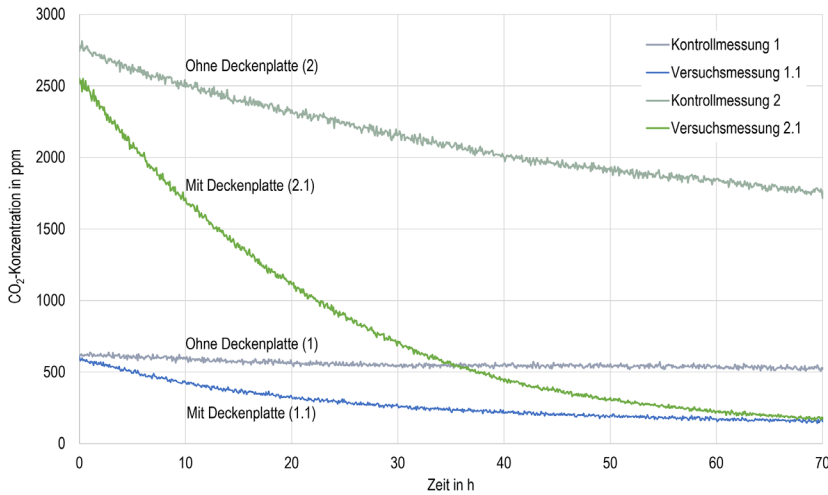


Bild 6 CO₂-Messdaten der beiden Versuchsreihen im Klimaschrank (blau: Messreihe 1 – bei Startbedingung ca. 550 ppm; grün: Messreihe 2 – bei Startbedingung >2500 ppm)
CO₂ measurement data from the two test series in the climate chamber (blue: measurement series 1 – at starting condition approx. 550 ppm; green: measurement series 2 – at starting condition >2,500 ppm)

Die Deckenplatte im Klimaschrank ist beidseitig gleichmäßig exponiert, während bei der Deckenmontage im Gebäude eine Seite nicht der gleichen Exposition unterliegt. Im Klimaschrank wird eine hohe Luftbewegung durch die Ventilatoren erzeugt, wohingegen die Luft im Gebäude bei abgeschalteter Lüftungsanlage nahezu ruht. Des Weiteren bestehen große Unterschiede im Verhältnis von Platte zu umgebendem Luftvolumen (Klimaschrank: 1 Platte/m³_{Luft}; Schulräume: 0,24...0,39 Platte/m³_{Luft}).

6 Berechnungen

6.1 CO₂-Aufnahme einer Deckenplatte

Aus den Klimaschrankmessungen kann die von einer Deckenplatte aufgenommene CO₂-Menge berechnet werden. Die gemessene CO₂-Konzentrationsänderung der Luft im Klimaschrank setzt sich zusammen aus der von der Platte aufgenommenen CO₂-Menge und der aufgrund der Undichtheit des Klimaschranks absinkenden CO₂-Menge. Somit ergibt sich die von der Platte aufgenommene CO₂-Menge aus der Konzentrationsänderung der Luft abzüglich der CO₂-Änderung aufgrund der Undichtheit des Klimaschranks.

$$\Delta m_{CO_2 \text{ Platten}} = \Delta m_{CO_2 \text{ Luft}} - \Delta m_{CO_2 \text{ Undichtheit}}$$

Unter Berücksichtigung des Luftvolumens und der Plattenanzahl im Klimaschrank wird aus der Änderung der CO₂-Konzentration der Luft Δc_{CO_2} die CO₂-Aufnahmerate einer Deckenplatte d_{CO_2} in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration der Luft c_{CO_2} berechnet.

$$d_{CO_2} = \left(\frac{\Delta c_{CO_2, \text{mitPlatte}} - \Delta c_{CO_2, \text{ohnePlatte}}}{x} \cdot V \cdot \rho_{CO_2} \cdot 10^{-3} \right) / n_{\text{Platte}}$$

mit

$$d_{CO_2} \left[\frac{g_{CO_2}}{h \cdot \text{Platte}} \right]$$

CO₂-Aufnahmerate einer Deckenplatte pro Stunde in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration der Luft

$$\Delta c_{CO_2, \text{mitPlatte}} \text{ [ppm]}$$

Änderung der CO₂-Konzentration im Klimaschrank bei Beisein der Platte im Zeitschritt x

$$\Delta c_{CO_2, \text{ohnePlatte}} \text{ [ppm]}$$

Änderung der CO₂-Konzentration im Klimaschrank ohne Beisein der Platte im Zeitschritt x

$$x \text{ [h]}$$

Zeitschritt in dem die CO₂-Konzentrationsänderung Δc_{CO_2} auftritt

$$V \text{ [m}^3 \text{ Luft]}$$

Luftvolumen Klimaschrank

$$\rho_{CO_2} \left[\frac{kg_{CO_2}}{m^3_{CO_2}} \right]$$

Dichte CO₂ (1,8 $\frac{kg_{CO_2}}{m^3_{CO_2}}$ bei 20 °C; 1 bar [8])

$$n_{\text{Platte}}$$

Anzahl der Deckenplatten im Klimaschrank

Die Aufnahmerate einer Deckenplatte d_{CO_2} ist in Bild 7 in Abhängigkeit von der CO₂-Luftkonzentration

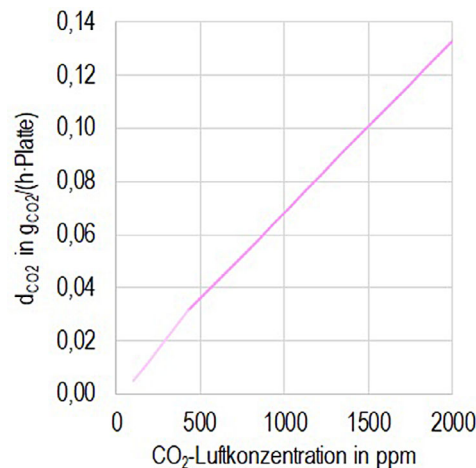


Bild 7 Ermittelte CO₂-Aufnahmerate einer Deckenplatte in Abhängigkeit von der CO₂-Konzentration der Luft
Determined CO₂ absorption rate of a ceiling tile as a function of the CO₂ concentration in the air

Tab. 4 CO₂-Quelle und -Senke im Klassenraum im Vergleich
CO₂ source and sink in the classroom in comparison

CO ₂ -Senke	CO ₂ -Quelle
Klassenraum 80 Stk. Deckenplatten	1 Kind
3,2 g _{CO2} /h (bei 600 ppm) bis 5,6 g _{CO2} /h (bei 1100 ppm)	10,8 l _{CO2} /h [9] = 21,4 g _{CO2} /h

aufgetragen. Die berechnete Aufnahmerate teilt sich in zwei Bereiche auf: Für CO₂-Konzentrationen über 430 ppm (mittlere CO₂-Außenluftkonzentration) wird die Undichtheit des Klimaschranks berücksichtigt, für CO₂-Konzentrationen unter 430 ppm wird die Undichtheit vernachlässigt.

Auch wenn weitere Messungen wünschenswert wären, kann aus den Messdaten eine Größenordnung der CO₂-Aufnahme durch die Deckenplatten abgeschätzt und ins Verhältnis gesetzt werden mit den im Gebäude auftretenden CO₂-Emissionen der Personen.

6.2 Verhältnis von CO₂-Aufnahme der Deckenplatten zur CO₂-Abgabe der Personen

Für einen typischen Klassenraum mit 80 Deckenplatten und einem Raumvolumen von 210m³ ergibt sich bei Verwendung der in Bild 7 abgebildeten CO₂-Aufnahmerate bei 600 ppm eine CO₂-Aufnahme von 80 Platten · 0,04 g_{CO2}/h_{Platte} = 3,2 g_{CO2}/h. Für eine CO₂-Raumluftkonzentration von 1100 ppm ergibt sich eine CO₂-Aufnahmerate von 0,07 g_{CO2}/h_{Platte} und für den Raum eine CO₂-Aufnahme in Höhe von 5,6 g_{CO2}/h.

Die CO₂-Emissionen eines Schulkindes betragen im Vergleich dazu nach [9] 21,4 g_{CO2}/h. Somit entspricht die CO₂-Aufnahme der Deckenplatten des Klassenraums in etwa 1/4 bis 1/6 der CO₂-Emissionen eines (Schul-)Kindes (siehe Tabelle 4).

Tab. 5 Aus Herstellerangabe und Literaturwert berechnete CO₂-Aufnahmemengen einer Platte
CO₂ absorption quantities of a plate calculated from the manufacturer's specifications and literature values

	Angabe des Deckenplatten-Herstellers zur CO ₂ -Aufnahme, aus [7]; 140 g _{CO2} /50a je kg Zement	Literaturwert zur CO ₂ -Aufnahme von Beton, aus [3] 3,84 kg _{CO2} /50a je m ² Beton (Beton: überdacht/vor Regen geschützt, Festigkeit C30/37, Zementgehalt 320 kg/m ³)
	mit x _{Cement} = 62, 2 % Cement/Platte [7] m _{Platte} = 8,3 kg	mit A _{Platte} = 2 · 0,72 m ²
CO ₂ -Aufnahmemenge in 50 Jahren pro Platte	0,73 $\frac{\text{kgCO}_2}{50\text{a}}$	5,53 $\frac{\text{kgCO}_2}{50\text{a}}$
CO ₂ -Aufnahmemenge in einem Jahr (dem ersten Nutzungsjahr) pro Platte	0,10 $\frac{\text{kgCO}_2}{1\text{a}}$	0,78 $\frac{\text{kgCO}_2}{1\text{a}}$

6.3 Innerhalb eines Jahres aufgenommene CO₂-Menge und Literaturvergleich

Zur Plausibilisierung und Einordnung der Messergebnisse werden diese auf Jahreswerte hochgerechnet und mit den Angaben des Deckenplatten-Herstellers sowie einem Literaturwert verglichen.

Aus den messtechnisch ermittelten Aufnahmeraten lässt sich die von einer Platte während eines Jahres aufgenommene CO₂-Masse berechnen. Bei Annahme, dass im Mittel über ein Jahr 0,04 g_{CO2}/h pro Platte aufgenommen werden (bei einer Luftkonzentration von 600 ppm, siehe Bild 7), ergibt sich die Jahresmenge 0,35 kg_{CO2}/Jahr je Platte.

In der Herstellerangabe [7] sowie in [3] sind Werte für die von Beton (Zement) innerhalb von 50 Nutzungsjahren aufgenommene CO₂-Masse genannt (Tab. 5, grüne Zellen). Die Werte werden umgerechnet und auf eine Deckenplatte bezogen (Tabelle 5, blaue Zellen).

Angelehnt an Abschnitt 6.2.4 aus [3] wird aus den beiden Literaturwerten die CO₂-Aufnahmemenge CO_{2, uptake} zum jeweiligen Zeitpunkt *t* berechnet (mit *x* = CO₂-Aufnahmemenge in 50 Jahren):

$$\text{CO}_{2, \text{ uptake}}(t) = \sqrt{t} \cdot \frac{x}{\sqrt{50}}$$

Für *t* = 1 Jahr ergeben sich Aufnahmemengen von 0,10 $\frac{\text{kgCO}_2}{1\text{a}}$ (aus der Herstellerangabe) und 0,78 $\frac{\text{kgCO}_2}{1\text{a}}$ (aus dem Literaturwert) für eine Platte (Tabelle 5, gelbe Zellen). Die aus den Messdaten ermittelte Aufnahmemenge liegt mit 0,35 kg_{CO2}/Jahr je Platte im Größenbereich der beiden berechneten Werte und ist somit plausibel.

7 Fazit

CO₂-Messdaten aus dem Erweiterungsbau der Auefeldschule in Kassel zeigen, dass außerhalb der Nutzungszeit und bei abgeschalteter Lüftungsanlage CO₂-Werte deutlich unterhalb der Außenluftkonzentration liegen. Da Messfehler als Ursache ausgeschlossen werden können,

wird die These aufgestellt, dass dies auf Carbonatisierungsvorgänge in Betonwerkstoffen und die damit einhergehende Aufnahme von CO₂ aus der Raumluft zurückzuführen ist. Dies konnte durch Messungen mit einer Faserzementplatte in einer Klimakammer prinzipiell bestätigt werden. Die aus den Plausibilisierungsmessungen ermittelte CO₂-Aufnahmerate durch Carbonatisierung liegt in einem Klassenraum (ca. 70 m², 80 Platten) in der Größenordnung von 3,2 g_{CO2} (bei CO₂-Konzentration der Luft von 600 ppm) bis 5,6 g_{CO2} (bei 1.100 ppm) je Stunde. Zum Vergleich: Die CO₂-Abgabe eines Schulkindes beträgt etwa 21 g_{CO2}/h, die einer erwachsenen Person etwa 33 g_{CO2}/h [9]. In einem unbelüfteten, luftdichten Raum (Volumen 210 m³) ohne anwesende Personen würde die CO₂-Konzentration bei den hier ermittelten Carbonatisierungsraten der Faserzementplatten um 24 ppm bis 42 ppm pro Stunde (bei CO₂-Konzentration der Luft von 600 ppm bis 1100 ppm) sinken. Bei einer Betrachtung des realen Gebäudes ist auch die Carbonatisierung der weiteren Betonkomponenten (Sichtbetonwand, Fußboden) mit einzubeziehen. Besonders deutlich sind die Auswirkungen auf die CO₂-Konzentration bei Neubauten mit dichten Gebäudehüllen und mit für die Carbonatisierung optimalen Temperatur- und Feuchtebedingungen in den Innenräumen. Beides ist in dem hier analysierten Gebäude, der Auefeldschule, gegeben, sodass Carbonatisierungsprozesse als Grund für die gemessenen geringen CO₂-Messwerte angesehen werden können.

Es stellt sich die Frage, ob und welche Auswirkungen die Carbonatisierung für mechanische Lüftungsanlagen mit einer CO₂-geführter Volumenstromregelung hat. Hier sind folgende Punkte zu nennen:

- CO₂ dient als Regelgröße für die bedarfsgerechte Volumenstromanpassung bei mechanischen Lüftungsanlagen. CO₂ ist eine „Indikatorgröße“ für die Anzahl der Personen im Raum und damit für die von diesen zugeführten Luftverunreinigungen. Wird CO₂ von Betonbauteilen aufgenommen, verschiebt sich der Zusammenhang zwischen der Konzentration von CO₂ und der Konzentration von Luftverunreinigungen. Die

Luftqualität wird in dem Fall über den Indikator CO₂ u. U. fehlerhaft bewertet.

- Durch die Carbonatisierung wird die CO₂-bewertete Luftqualität in einem Raum als zu gut eingeschätzt. Durch die von der Lüftungsregelung verringerte Zuluftmenge werden weniger Gerüchen und Luftschadstoffe abgeführt, sodass die Raumluftqualität abnimmt.
- In den hier betrachteten Klassenräumen mit üblicherweise 26 Kindern und einer Lehrperson sind die Auswirkungen auf die Luftqualität gering. Anders kann sich die Situation in Räumen mit geringer Personenbelegung darstellen, wie Büros oder Bibliotheken.
- Ist die Ausgabe der CO₂-Sensoren auf Werte ≥ 400 ppm begrenzt (je nach Hersteller teilweise üblich), ist der Effekt in den Messdaten nicht sichtbar.
- Insbesondere kann sich die Carbonatisierung bei Sensoren mit integrierter Automatic Background Calibration auswirken. Bei dieser automatischen Rekalibrierung wird der niedrigste innerhalb eines gewissen Zeitraums gemessenen CO₂-Wert mit der Außenluftkonzentration gleichgesetzt (z. B. 400 ppm). Sinkt die CO₂-Konzentration bei abgeschalteter Lüftungsanlage außerhalb der Nutzungszeit durch Carbonatisierung z. B. auf einen Wert von 250 ppm, wird die Rekalibrierung mit einem Fehler von 150 ppm durchgeführt. Ein CO₂-Sollwert von 1000 ppm würde dann einer realen Konzentration von 850 ppm entsprechen, wodurch höhere Außenluftmengen von der Lüftungsanlage gefördert würden.

Die hier durchgeführten Messungen und die analysierte Literatur können die Carbonatisierung als Grund für die CO₂-Messwerten unterhalb der Außenluftkonzentration belegen. Sie erlauben eine erste Einschätzung der Größenordnung des Effektes. Die CO₂-Aufnahmerate durch Carbonatisierung ist jedoch von diversen Faktoren abhängig: Insbesondere von der Art der Betonbauteile, dem Betonalter, dem Verhältnis von Betonoberfläche zu Raumluftvolumen, der Raumtemperatur und der Raumfeuchte [3, 5]. Um die CO₂-Aufnahmerate und die Einflussparameter verlässlich quantifizieren zu können, sind weitere messtechnische Untersuchungen erforderlich.

Literatur

- [1] Umweltbundesamt (2025) *Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen* [online]. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt /NOAA Global Monitoring Division and Scripps Institution of Oceanography / World Meteorological Organization. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid-> [Zugriff am: 27.10.25]
- [2] DIN EN 16757:2023-03 (2023) *Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente (EN 16757:2022)*. Berlin: DIN Media.
- [3] LPI Ingenieurgesellschaft mbH Hannover (2022) *Gesamtheitliche CO₂-Bilanzierung der Betonbauweise unter besonderer Berücksichtigung der (Nach-)Nutzungsphase*. Hannover: Stiftung der Bauindustrie Niedersachsen-Bremen [Auftragnehmer]; LPI Ingenieurgesellschaft mbH Hannover.
- [4] Nygaard, P. V.; Leemann A. (2012) *Schlussbericht Cemsuisse Projekt 201106 Kohlendioxidaufnahme von Stahlbetonbauten durch Karbonatisierung*. Dübendorf (Schweiz): EMPA.
- [5] Stark, J.; Wicht, B. (2013) *Karbonatisierung von Beton. Dauerhaftigkeit von Beton*. Springer Vieweg, S. 103-160. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35278-2_3
- [6] Troldekt A/S (2023) *Information Troldekt Natural Acoustic Solutions*. 2. Ausg. Hamburg: Troldekt A/S.
- [7] IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V. (2022) *Environmental product declaration Acoustic panels – unpainted Troldekt 25 mm Natural Grey based on FUTURECEM*. Berlin: IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V.
- [8] Span, R. (2018) *Thermophysikalische Stoffwerte von Kohlendioxid*. 12. Auflage des VDI-Wärmeatlas. Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52991-1_15-1
- [9] Persily, A.; de Jonge, L. (2017) *Carbon dioxide generation rates for building occupants*. *Indoor Air* Volume 27. John Wiley & Sons Ltd, S. 868-879. <https://doi.org/10.1111/ina.12383>

Autor:innen

Verena Stutrucker, M.Sc.
Universität Kassel
Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung
Gottschalkstraße 28a
34127 Kassel

Prof. Dr.-Ing. Jens Knissel (Korrespondenzautor:in)
knissel@uni-kassel.de
Universität Kassel
Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung
Gottschalkstraße 28a
34127 Kassel

Zitieren Sie diesen Beitrag

Stutrucker, V.; Knissel, J. (2026) *Messdaten zur Lüftung in einem Schulgebäude zeigen CO₂-Aufnahme von Betonbauteilen*. Bauphysik 48, H. 1, S. 9–16.
<https://doi.org/10.1002/bapi.70023>