

Monitoring der Raumluftqualität: positionsabhängige Messung der CO₂-Konzentration

Autor*innen: Julian Huber[↓], Silvia Öttl[↓], Sascha Hammes[★], Daniel Plörer[★], Martin Schiestl[↓], Michael Schmidt[↓], Mauriz Trautmann[×], Robert Hahn[×], Ronald Stärz[×]

Institutionen: [↓]Management Center Innsbruck, [★]Universität Innsbruck – Arbeitsbereich Energieeffizientes Bauen, [×]Infineon Technologies AG

Abstract. Eine zu hohe CO₂-Konzentration in Räumen kann negative Auswirkungen auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit haben. Die empfohlenen Grenzwerte werden in vielen Kontexten regelmäßig weit überschritten. Um dem entgegenzuwirken, haben sich verschiedene Normen und Richtlinien entwickelt. Als Messposition ist dabei häufig die Raummitte, z.B. 1,5 m über dem Boden festgelegt. Diese Messposition ist in vielen Räumen nur begrenzt umsetzbar. Für die praktische CO₂-Messung stellt sich in der Praxis demnach die Frage, inwiefern Messungen an anderen Raumpositionen zu einem abweichenden Ergebnis führen. Um diese Frage zu beantworten, werden zwei Seminarräume einer Fachhochschule mit jeweils vier CO₂-Sensoren an verschiedenen Positionen ausgestattet und diverse Kontrollvariablen erhoben. Die ersten Ergebnisse zeigen, dass sich die CO₂-Konzentrationen im Zeitmittel je nach Sensorposition kaum systematisch unterscheiden. Detailauswertungen zeigen insbesondere während Übergangszuständen, basierend auf eventbasierten Systemeinflüssen (Fensteröffnung, Belegungsänderungen), positionsbezogene Abweichungen zwischen den Sensoren auf. Eine weitere Auswertung der Daten wird Rückschlüsse darauf zulassen, welche Faktoren die Messabweichung durch eine nicht normgerechte Positionierung erklären (z.B. Position, Raumluftparameter, Belegung). Dies kann in Zukunft eine Offsetabschätzung mittels Korrekturfaktoren für nicht optimal platzierte CO₂-Sensoren ermöglichen.

Keywords: Innenluftqualität, Messung, Kohlenstoffdioxid

1 EINLEITUNG

Eine zu hohe Konzentration an Kohlenstoffdioxid (CO₂) in Räumen kann direkte negative Auswirkungen auf die Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit haben (1). Zudem dient sie als indirekter Indikator für die Luftqualität (1) und für das Ansteckungsrisiko mit Infektionskrankheiten (2). Ab 1.000 ppm CO₂ wird Raumluftqualität als sehr niedrig angegeben (frische Außenluft liegt bei 400 ppm (3)). Empfohlene Werte werden regelmäßig weit überschritten – insbesondere in Bildungseinrichtungen (4). Um dem entgegenzuwirken, haben sich verschiedene Normen und Richtlinien entwickelt. Beispielsweise gibt die Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft ein Ziel von 1.000 ppm CO₂ für Unterrichtsräume und Büros an. Als Messposition ist dabei die Raummitte, 1,5 Meter über dem Boden, bestimmt (1), (5). Solche Messpositionen sind oft nur begrenzt umsetzbar, da die Raummitte meist zweckgebunden genutzt oder dem Bewegungsraum der Raumnutzer:innen zugesprochen wird. Für eine unverfälschte Messung wird zudem

ein Abstand von einem Meter zu möglichen Emittenten vorgeschlagen (1). Eine Verkabelung der Sensoren in der Raummitte ist meist erschwert, insbesondere, wenn die Sensoren im Bestand nachgerüstet werden. Es stellt sich demnach die Frage, inwiefern Messungen an anderen Raumpositionen zu Messabweichungen führen. Die Konzentration von CO₂ ist meist ungleichmäßig verteilt und von verschiedenen Faktoren abhängig (6), (7), (8). Um diese Einflüsse zu untersuchen wurden zwei Seminarräume einer österreichischen Fachhochschule mit jeweils vier Sensoren an verschiedenen Positionen ausgestattet. Die Räume unterscheiden sich in Raumhöhe und Maximalbelegung.

Dieses Papier stellt den Versuchsaufbau und die ersten Ergebnisse einer Analyse über etwa einen Monat dar. Die Erkenntnisse geben einen Einblick in den Verlauf der CO₂-Konzentration der Raumluft in Bildungseinrichtungen. Kapitel 2 fasst verwandte Arbeiten zu den Themen Ausbreitung und Messung von CO₂ in Innenräumen zusammen. Das dritte Kapitel beschreibt den Versuchsaufbau und die dafür eingesetzten Sensoren. Kapitel 4 präsentiert die Ergebnisse, welche in Kapitel 5 diskutiert werden.

2 VERWANDTE ARBEITEN

Die Literaturarbeit von (9) zeigt, dass viele Untersuchungen einen negativen Effekt erhöhter CO₂-Konzentration auf die kognitive Leistungsfähigkeit finden. Bereits in (10) wurde dabei jedoch die Uneinheitlichkeit der Erfassung von CO₂-Konzentration kritisiert, welche es erschwert die Auswirkungen genau zu bewerten.

Die Verteilung der CO₂-Konzentrationen innerhalb eines Raums ist von verschiedenen Effekten abhängig: Grundsätzlich gibt es einen positiven Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration und der Zeit, in der sich Personen in einem Raum aufhalten, da diese CO₂ emittieren. Die CO₂-Konzentration wird dabei insbesondere durch Raumvolumen, Anzahl der Personen im Raum und Luftwechselrate bestimmt (14). Weitere Einflussfaktoren sind Raumhöhe, Art der Belüftung, Wärme der Atemluft und Bewegungsintensität der Anwesenden (6) (7), (8). In der Analyse von (12) konnte eine Höhenabhängigkeit in einem natürlich belüfteten Raum beobachtet werden. Besonders relevant ist jedoch die Atemluftzone zwischen 1,12 m und 1,8 m (13), (14).

Die Raumluftqualität wird in gültigen Normen über den Indikator CO₂-Konzentration definiert (EN16798-1). Dabei werden keine Absolutwerte, sondern Konzentrationsdifferenzen zur Außenluft angegeben. Abweichungen kleiner 550 ppm erzielen die beste Kategorie. Auch die ASR A3.6 - Lüftung (ASR: Technische Regeln für Arbeitsstätten) empfiehlt niedrige Konzentrationen für eine hohe Luftqualität. Konzentrationen über 2.000 ppm werden als hygienisch inakzeptabel bezeichnet, 1.000 bis 2.000 ppm als hygienisch auffällig. Es zeigt sich jedoch, dass gerade in Bildungseinrichtungen empfohlene Richtwerte oftmals verletzt werden. In (19) wurden 363 Klassenräume von 111 deutschen Schulen untersucht. In etwa 50% der Unterrichtsstunden wurden Werte von 2.000 ppm überschritten. Untersuchungen in Österreich kommen zu ähnlichen Ergebnissen (4). Solch hohe Konzentration können einen negativen Einfluss auf Produktivität, Gesundheit und Komfort haben (1).

Genannte Studien und Normen bestärken die Relevanz geringer CO₂-Konzentrationen und heben hervor, wie stark derzeit Zielsetzungen der Raumluftqualität (insbesondere in

Bildungseinrichtungen) verfehlt werden. Eine systematische Erfassung der CO₂-Konzentration scheint demnach geboten. Aktuell ist eine Installation von CO₂-Sensoren noch kein Standard. Eine Positionierung in der Raummitte auf Kopfhöhe ist zu empfehlen, kann aber zu Sicht-Einschränkungen führen und die Messung durch die Nähe zu den Emittenten verzerren. Zudem können damit verbundene Montageaufwände in hohen Installationskosten resultieren. Es ergibt sich somit die Fragestellung einer repräsentativen Positionierung der CO₂-Sensorik.

3 METHODEN

Um die Frage nach dem Einfluss der Sensorpositionierung zu beantworten, werden mehrere Seminarräume einer Fachhochschule mit jeweils vier Sensoren (Infineon XENSIV™ PAS CO₂) zur Überwachung des Raumklimas an verschiedenen Positionen ausgestattet. Neben der vordergründigen Messung der CO₂-Konzentration (0 bis 5.000 ppm, +/-30 ppm) werden auch Raumlufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck aufgezeichnet. Die Messwerterfassung erfolgt zyklisch pro Minute. Die Räume unterscheiden sich insbesondere in Raumhöhe, Fensterfläche und Belegungsraten. Tabelle 1 fasst die Charakteristika der beiden Räume zusammen. Die Räume verfügen über keine automatisierte Lüftung. In Raum A wurde ein Stativ im Bereich des Pults der Vortragenden (Messhöhen: 70, 150, 360 und 427 cm) installiert; in Raum B in der Raummitte (Messhöhen: 100, 150, 240 und 299 cm).

Tabelle 1: Beschreibung der untersuchten Seminarräume

	Raum A	Raum B
Raumhöhe	440 cm	303 cm
Breite	725 cm	570 cm
Länge	1280 cm	760 cm
Volumen	408 m ³	131 m ³
Max. Belegung	50 Personen	25 Personen
Anzahl Türen	1	1
Anzahl Fenster	3x (nicht kippbar)	3x (kipperbar)

Zudem wurden noch weitere Kontrollvariablen erhoben, deren Auswertung zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist. So wurden alle Türen und Fenster der Studienräume zusätzlich mit Kontaktschaltern ausgestattet, um Öffnungen und Schließungen zu registrieren. Dabei wird differenziert zwischen einem gekippten und gänzlich geöffneten Fensterzustand. Die Belegung der Räume wird in erster Näherung über die interne Stundenplanung und damit verbundenen Gruppengrößen erfasst.

Die CO₂-Sensoren arbeiten nach dem Prinzip der photo-akustischen Spektroskopie (20) und wurden vor Beginn der Messungen mittels eines Infrarot-Absorptionssensors unter Laborbedingungen kalibriert und in einer Messkammer im Messbereich zwischen 400 und 1.800 ppm überprüft. Der Messfehler nimmt mit CO₂-Konzentration linear zu und liegt bei bis zu 5%. Grundsätzlich sind die Sensoren damit vergleichbar oder genauer als viele in vergleichbaren Untersuchungen eingesetzte Sensoren (z.B. 5% bei (19)).

4 ERGEBNISSE

Um potentielle Höhenabhängigkeiten der CO₂-Konzentrationen zu veranschaulichen, beschränken sich die folgenden Darstellungen auf den Raum A (größere Gesamthöhe). In Abbildung 1 ist die Abweichung zweier Sensoren (mittlere Position bei 150 cm und der höchstgelegene Sensor bei 427 cm) zum Mittelwert aller Sensoren im Raum gemeinsam mit ihrer konzentrationsabhängigen absoluten Messunsicherheit zu sehen. Meistens bewegt sich die Abweichung der Sensoren vom Mittelwert in derselben Größenordnung wie ihre Messunsicherheit. Die Ausreißer nach oben können bis zu 1.000 ppm betragen und ereignen sich zu Zeiten mit aktiver Fensterlüftung.

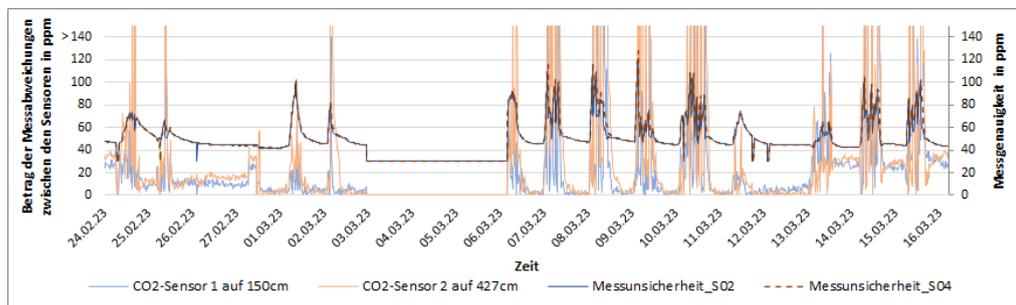


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf der Abweichung des Mittelwertes für den hohen (S02) und mittleren Sensor (S04) sowie die Darstellung der CO₂-Konzentrations-abhängigen Messunsicherheit für den Zeitraum 27.02.-15.03.2023.

Über die vier in unterschiedlichen Höhen installierten Sensoren wurde ein linearer Verlauf der gemessenen Werte interpoliert. Der Höhengradient ist dabei nahe Null während der Nacht und während ansteigender Flanken der CO₂-Konzentration. Ein merklicher Höhengradient stellt sich nur bei fallenden Flanken ein, was auf den ungleichmäßigen Luftwechsel im Zuge der Fensterlüftung zurückzuführen ist. Da die Außenluft im betrachteten Zeitraum deutlich kälter ist als die Raumtemperatur sammelt sich die frische Luft zunächst in Bodennähe, weshalb die CO₂-Konzentration bei tiefliegenden Sensoren schneller sinkt als bei Höherliegenden. Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf des höchstgelegenen und des mittleren Sensors in Raum A sowie den Höhengradienten mit zugehöriger Unsicherheit. Lediglich während Event-getriggelter Zustandsänderungen lassen sich starke Höhenabhängigkeiten der CO₂-Konzentration im Raum feststellen.

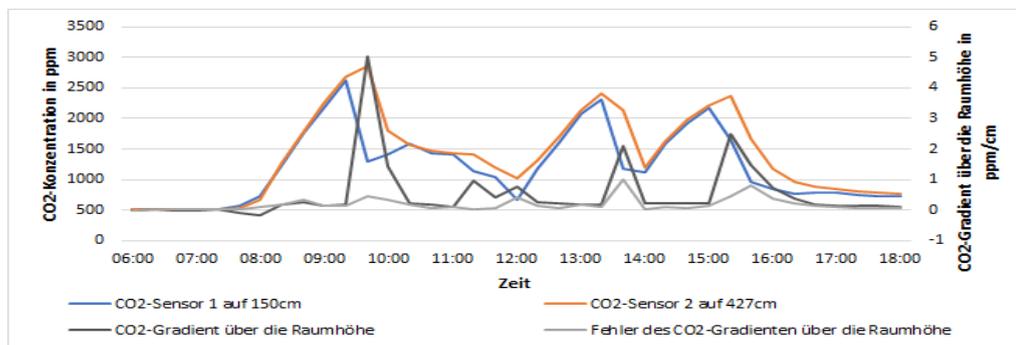


Abbildung 2: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration des Sensors in mittlerer Höhe und des Sensors an der Raumdecke im Raum A und des CO₂-Konzentrationsgradienten über die Höhe inkl. zugehöriger Unsicherheit

Der Sensor in mittlerer Höhe misst fast immer geringere Konzentrationswerte als der höher gelegene Sensor. Die Fälle in denen dies umgekehrt ist finden zumeist in der Nacht statt, wie in Abbildung 3 zu sehen, wobei die Abweichung nur in einzelnen Ausreißern (sechs Messpunkte im betrachteten Zeitraum) größer ist als die Messunsicherheit.

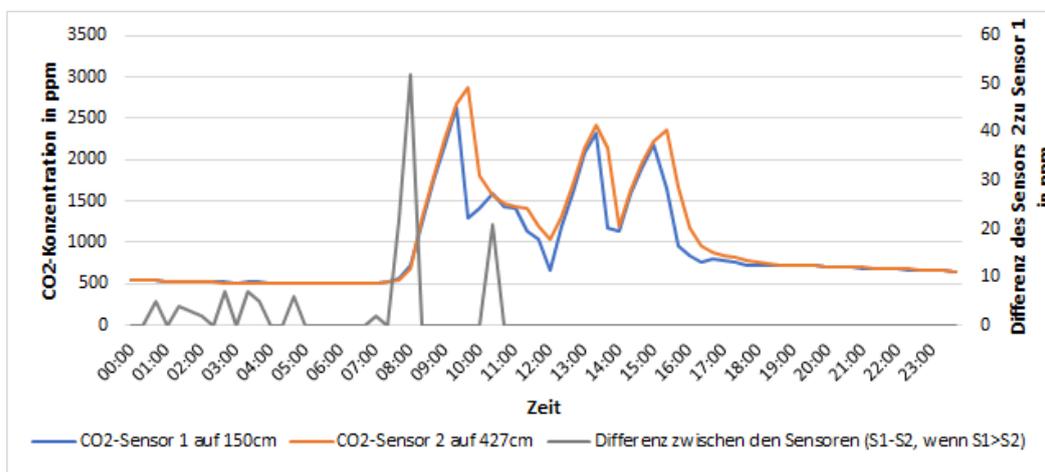


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der CO₂-Konzentration des Sensors in mittlerer Höhe und des Sensors an der Raumdecke im Raum A, sowie die Differenz des Sensors an der Raumdecke zum Sensor in mittlerer Höhe

5 CONCLUSIO

Die Datenauswertung führt auf, dass in den hier untersuchten Seminarräumen die empfohlenen Grenzwerte zu fast allen Zeitpunkten bei vorhandener Belegung verletzt werden. Insbesondere steigt im kleineren der beiden Räume die CO₂-Konzentration deutlich schneller. Ebenfalls wird offensichtlich, dass die CO₂-Konzentration sehr stark von verschiedenen Effekten, wie Anzahl der Personen im Raum, Dauer der Veranstaltung und Öffnungsraten von Fenster und Türen, beeinflusst wird. Höhenbezogene Unterschiede unterliegen im zeitlichen Mittel der Messgenauigkeit der Sensoren (Betrachtung: über den Messzeitraum 27.02.2023-15.03.2023). Um für die in den untersuchten Räumen angewandte Fensterlüftung einen Schwellwert zu detektieren, spielt es keine Rolle, ob der Sensor an der Decke oder in mittlerer Höhe (wie von Normen vorgeschlagen) positioniert wird, da zu Zeiten, in denen die Fensterlüftung nicht aktiv ist, keine relevante Schichtung der CO₂-Konzentration in den untersuchten Räumen zu beobachten ist. Ob sich diese Aussage auf andere Lüftungsarten verallgemeinern lässt, bedarf weiterer Untersuchungen. Nachfolgende Auswertungen sollen die zusätzlichen Variablen, wie u.a. Fensteröffnungen und Belegungsraten in die Analyse einbeziehen, um die Gewichtung dieser Einflussfaktoren in Bezug zur Höhenabhängigkeit der Sensorpositionierung zu bewerten.

6 REFERENZEN

1. **Tappler, Peter, et al.** Kohlenstoffdioxid as Lüftungsparameter - Aktualisierte Fassung 2017. *Richtlinie zur Bewertung der Innenluft*. s.l. : Ministerium für ein lebenswertes Österreich, 2017.

2. **Peng, Z., & Jimenez, J. L.** Exhaled CO₂ as a COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities. *Environmental Science & Technology Letters*. 2021, S. 392-397.
3. **ÖNORM.** EN 16798-3 - Energetische Bewertung von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 3: Lüftung von Nichtwohngebäuden - Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage und Raumkühlsysteme (Module M5-1, M5-4). 15. 12 2017.
4. *Raumluftqualität in österreichischen Schulen.* **Tappler, D. P., Twrdik, D. F., & Damberger, D. B.** Wien : s.n., 2006. 1. Fachgespräch „Innenraum und Gesundheit“.
5. **ASTM.** Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation. *ASTM D6245-18*. 2018.
6. **Pei, G., Rim, D., Schiavon, S. und Vannucci, M.** Effect of sensor position on the performance of CO₂-based demand controlled ventilation. *Energy and Buildings*. 2019.
7. **Borodinets, A., Palcikovskis, A., & Jacnevs, V.** Indoor Air CO₂ Sensors and Possible Uncertainties of Measurements: A Review and an Example of Practical Measurements. *Energies*. 2022.
8. **Mahyuddinab, Norhayati und Awbia, Hazim.** The spatial distribution of carbon dioxide in an environmental test chamber. *Building and Environment*. 2010.
9. **Tyler A. Jacobson, Jasdeep S. Kler, Michael T. Hernke, Rudolf K. Braun, Keith C. Meyer, William E. Funk.** Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*. 2019.
10. **Kajtar, L. & Herczeg, L.** Influence of carbon-dioxide concentration on human well-being and intensity of mental work. *Idojaras*. 2012.
11. **T. Teleszewski, K. Gładyszewska-Fiedoruk.** The concentration of carbon dioxide in conference rooms: a simplified model and experimental verification. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2019.
12. **Álvaro Muelas, Pilar Remacha, Antonio Pina, Eduardo Tizné, Said El-Kadmiri, Ana Ruiz, Diego Aranda, Javier Ballester.** Analysis of different ventilation strategies and CO₂ distribution in a naturally ventilated classroom. *Atmospheric Environment*. 2022.
13. **M. Bivolarova, J. Ondráček, A. Melikov, V. Ždímal.** A comparison between tracer gas and aerosol particles distribution indoors: The impact of ventilation rate, interaction of airflows, and presence of objects. *Indoor Air*. 2017.
14. **Son H. Ho, Luis Rosario, Muhammad M. Rahman.** Three-dimensional analysis for hospital operating room thermal comfort and contaminant removal. *Applied Thermal Engineering*. 2009.
15. **HD Neumann, M Buxtrup.** Beurteilung der CO₂-Konzentration in Klassenräumen. *Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft*. 2014.
16. **Infineon Technologies AG.** XENSIVTM PAS CO₂ Datasheet. www.infineon.com. [Online] 2023. https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-PASCO2V01-DataSheet-v01_03-DataSheet-v01_03-EN.pdf?fileId=8ac78c8c80027ecd01809278f1af1ba2.
17. **A Seppänen, W J Fisk, M J Mendell.** Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*. 1999.
18. **Hua-Yan Deng, Zhuangbo Feng, Shi-Jie Cao.** Influence of air change rates on indoor CO₂ stratification in terms of Richardson number and vorticity. *Building and Environment*. 2018.
19. **ÖNORM.** EN ISO 16000-26: Innenraumluftverunreinigungen - Teil 26: Probenahmestrategie. 2013.
20. **Joseph G Allen, Piers MacNaughton, Usha Satish, Suresh Santanam, Jose Vallarino, John D Spengler.** Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments. *Environ Health Perspect*. 2016.
21. **Usha Satish, Mark J Mendell, Krishnamurthy Shekhar, Toshifumi Hotchi, Douglas Sullivan, Siegfried Streufert, William J Fisk.** Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environ Health Perspect*. 2012.