

Praktische Bedeutung von CO₂ als Indikator für die Innenraumluftqualität und die relative inhalierte Dosis virenbeladener Partikel

Zusammenfassung

Die CO₂-Konzentration wird bereits seit mehr als 150 Jahren als Indikator für die Innenraumluftqualität verwendet. Entsprechende Grenzwerte sind in der Gesetzgebung (z. B. Arbeitsstättenrichtlinie (ASR) 3.6) vorgeschrieben. Bei einem längeren Aufenthalt hängt die CO₂-Konzentration mit der Personenanzahl, der Dauer des Aufenthalts und der dem Raum zugeführten Außenluftmenge zusammen. Für kürzere Aufenthalte spielt auch das Raumvolumen eine Rolle.

Zusätzlich bieten die CO₂-Konzentration sowie die daraus folgende angenommene mögliche inhalierte CO₂-Dosis die Möglichkeit, verschiedene Situationen hinsichtlich eines relativen Infektionsrisikos durch luftgetragene Pathogene miteinander zu vergleichen. Neben CO₂ geben Personen mit einer viralen respiratorischen Infektion auch virenbeladene Partikel ab, die von anderen Personen im Raum eingeatmet werden. Für die gleiche Menge inhalierter virenbeladener Aerosolpartikel ist bei Verdoppelung der Aufenthaltszeit im stationären Zustand eine Halbierung der CO₂-Konzentration (Differenz zwischen der Innenraum- und Außenluftkonzentration) notwendig. Dies hebt die Bedeutung des Lüftens bzw. des Austauschs der zugeführten Außenluftmenge noch einmal deutlich hervor.

CO₂-Konzentration und Innenraumluftqualität

Die Innenraumluftqualität hat aufgrund der Coronavirus Disease 2019-(COVID-19-)Pandemie in den vergangenen Jahren erhöhte Aufmerksamkeit auch in der breiten Öffentlichkeit erfahren. Bereits 1858 untersuchte Max von Pettenkofer¹ die Luftqualität in Klassenräumen und empfahl eine maximal zulässige CO₂-Konzentration in Innenräumen. In Deutschland werden diese aktuell zum Beispiel durch die ASR 3.6² vorgeschrieben.

Menschen geben über die Ausatemluft CO₂ ab. Während die Außenluft eine nahezu konstante CO₂-Konzentration aufweist, kann diese in Innenräumen je nach Lüftung, Aufenthaltszeit, Personenanzahl und Raumgröße schnell ansteigen. Ein ungünstiges Zusammenspiel der genannten Einflussfaktoren,³ wie es z. B. in schlecht gelüfteten Besprechungsräumen oder Klassenzimmern auftreten kann, führt schnell zu hohen CO₂-Konzentrationen.⁴

Erhöhte CO₂-Konzentrationen und damit eine verschlechterte Luftqualität zeigen in verschiedenen Studien Auswirkungen auf gesundheitsbedingte Arbeitsausfälle^{5,6} sowie auf Produktivität und Gesundheit.^{7,8} Eine steigende CO₂-Konzentration wird dabei mit gesundheitlichen Folgen wie Kopfschmerzen und einer Reizung der Schleimhäute sowie mit einer Verringerung der Geschwindigkeit bei der Bearbeitung von Aufgaben assoziiert.

Einfluss verschiedener Lüftungsmaßnahmen

In einer Literaturrecherche von Jendrossek et al.⁹ wurde der Einfluss verschiedener Lüftungsmaßnahmen auf die Luftqualität und das daraus resultierende Infektionsrisiko analysiert. Die Autorinnen und Autoren zeigen, dass eine Erhöhung des Luftwechsels zu einer Verdünnung der luftgetragenen Krankheitserreger (infektiöse Tröpfchen und Aerosole) in der Raumluft führt. Damit kann die inhalierte Dosis von Krankheitserregern sinken und das Infektionsrisiko wird reduziert. Die Autorinnen und Autoren empfehlen eine Reduktion der CO₂-Konzentration auf eine maximale Konzentration von 1.000 ppm (parts per milion), auch wenn keine eindeutige Korrelation zum Infektionsrisiko nachgewiesen werden konnte.

Hiwar et al.¹⁰ weisen auf einen Zusammenhang zwischen verschiedenen Luftqualitätsparametern wie

z. B. Temperatur oder CO₂-Konzentration und der Konzentration von luftgetragenen Mikroorganismen hin. Eine steigende CO₂-Konzentration resultiert in einer leichten aber signifikanten Erhöhung von luftgetragenen Mikroorganismen, hat aber keinen signifikanten Einfluss auf luftgetragene Pilze. Sie weisen aber auch darauf hin, dass die Luftqualitätsparameter nur in wenigen Studien erfasst wurden, weshalb nur eine geringe Anzahl an Datensätzen zur Verfügung steht. Die Bildung einer eindeutigen Korrelation ist daher nicht möglich.

Aktuelle maschinelle Lüftungsanlagen sind auf die Einhaltung der Grenzwerte gemäß ASR² (max. CO₂-Konzentration 1.000 ppm) ausgelegt und leisten so einen Beitrag zur Steigerung des Wohlbefindens, der Gesundheit sowie der Produktivität. Im Gegensatz zur Fensterlüftung kann mit Hilfe von Außenluftfiltern durch maschinelle Lüftungsanlagen zusätzlich der Eintrag von Partikeln aus der Außenluft (z. B. Feinstaub PM_{2,5}^{*}, Pollen etc.) in Innenräume reduziert werden. Maschinelle Lüftungsanlagen sollten dabei deutlich von Umluftfiltergeräten unterschieden werden. Während maschinelle Lüftungsanlagen den Raum mit Außenluft versorgen, dienen Umluftfiltergeräte ausschließlich der Reinigung von Partikeln aus der Raumluft. Sie haben keinen Einfluss auf die CO₂-Konzentration im Raum.

Grundsätzlich ist eine Außenluftversorgung von Innenräumen auch über Fensterlüftung möglich. Die ASR-Grenzwerte hinsichtlich der CO₂-Konzentration gelten nicht für Räume, die über Fenster belüftet werden. Zur Vermeidung von Infektionen ist deren Einhaltung dennoch sinnvoll. Die Zufuhr von Außenluft über Fenster ist abhängig von Innen- und Außenbedingungen wie Temperaturdifferenz zwischen innen und außen sowie Wind. Im Sommer sind daher längere Lüftungsintervalle nötig, während im Winter meist kürzere Lüftungsintervalle ausreichen. CO₂-Ampeln können zusätzlich einen Beitrag zum richtigen Lüften leisten. Notwendig für deren einwandfreie Funktion sind allerdings die korrekte Positionierung der Sensoren auf Höhe der Atemebene (aber außerhalb des unmittelbaren Atembereiches) und die regelmäßige Kalibrierung.

Zusammenhang zwischen CO₂-Konzentration und inhalierter Dosis virenbeladener Aerosolpartikel

Bei Anwesenheit einer infektiösen Person im Raum, deren Krankheitserreger über die Luft übertragen werden können, gibt diese Person neben CO₂ auch luftgetragene virenbeladene Partikel ab, die sich gemeinsam mit dem CO₂ im Raum verteilen. Die infizierte Person trägt ebenso wie alle anderen Anwesenden zur Erhöhung der CO₂-Konzentration im Raum bei. Sowohl die Abgabe von CO₂ als auch die Abgabe von virenbeladenen Partikeln hängt von der Atemaktivität der Person ab, die wiederum z. B. durch Größe, Gewicht und Geschlecht beeinflusst wird.¹¹⁻¹³ Eine direkte Korrelation zwischen der abgegebenen CO₂-Menge und der abgegebenen Menge virenbeladener Partikel kann daher nicht hergestellt werden, weshalb auch ein Rückschluss auf ein absolutes Infektionsrisiko** schwierig ist. Die CO₂-Konzentration stellt aufgrund der Korrelation mit dem Luftwechsel im Raum einen guten Indikator für die Luftqualität und das Infektionsrisiko dar. Im Gegensatz zu (virenbeladenen) Partikeln kann die CO₂-Konzentration einfach und kontinuierlich gemessen werden. Es muss im Folgenden berücksichtigt werden, dass mit einer mittleren CO₂-Konzentration von 40.000 ppm¹⁴ in der Ausatemluft und einer mittleren Atemaktivität der infizierten Person gerechnet wird (keine größere körperliche Anstrengung). Somit sind nur Aussagen für Personengruppen mit einer mittleren Atemaktivität, nicht aber für Einzelpersonen mit abweichenden erhöhten Atemaktivitäten (z. B. im Rahmen von Sport) möglich.

Andere im Raum anwesende Personen atmen die Raumluft ein. In dieser Luft enthalten sind neben dem von den Anwesenden abgegebenen CO₂ auch die von der infektiösen Person abgegebenen virenbeladenen Partikel. Eine erhöhte CO₂-Konzentration korreliert im Fall eines konkreten Raumes mit gleichen Bedingungen (wie z. B. Anzahl anwesender Personen und Außenluftzufuhr) also auch mit einer

* Die als Feinstaub (PM_{2,5}) bezeichnete Staubfraktion enthält 50 % der Teilchen mit einem Durchmesser von 2,5 µm¹¹

** Ein absolutes Infektionsrisiko gibt die Wahrscheinlichkeit an mit der sich aus einer Gruppe von Personen, Personen infizieren.

erhöhten Menge virenbeladener Partikel in der Luft und daher einem erhöhten Infektionsrisiko.

Neben der aktuellen bzw. stationären CO₂-Konzentration kann insbesondere bei dauerhaftem CO₂-Monitoring die inhalierte CO₂-Dosis eine gute Aussage über die inhalierte Partikeldosis und ein mögliches Infektionsrisiko geben. Relevant ist dabei nicht die absolute gemessene CO₂-Konzentration, sondern die Differenz zwischen der gemessenen CO₂-Konzentration im Raum und in der Außenluft, da davon ausgegangen werden kann, dass in der Außenluft keine virenbeladenen Partikel zu finden sind. Je länger der gemeinsame Aufenthalt mit einer infektiösen Person in einem Raum stattfindet, umso mehr atmen die weiteren Personen im Raum die von dieser Person ausgeatmete Luft ein.¹⁵ Die Menge des darin enthaltenen CO₂, die inhalierte CO₂-Dosis, korreliert daher über einen insbesondere bei neuen Krankheitserregern zunächst unbekannt, personen- und krankheitserregerspezifischen Korrelationsfaktor mit der Menge der inhalierten Dosis virenbeladener Partikel.

Auch ohne ein absolutes Infektionsrisiko quantifizieren zu können, kann die CO₂-Konzentration dennoch genutzt werden, um verschiedene Situationen miteinander zu vergleichen und konkrete präventive Maßnahmen abzuleiten.

Vergleich verschiedener Situationen

In einer Studie von Hartmann et al.¹⁶, die auf der Veröffentlichung von Kriegel et al.¹⁷ basiert, werden die für den Vergleich des relativen Infektionsrisikos* in verschiedenen Situationen notwendigen Formeln und Diagramme zusammengefasst. Das relative Infektionsrisiko lässt dabei keine direkten Rückschlüsse auf die Wahrscheinlichkeit einer Infektion zu. Sie dient dem Vergleich verschiedener Situationen. Nur wenn für eine der zu vergleichenden Situationen ein absolutes Infektionsrisiko ermittelt wurde, kann aus dem relativen Infektionsrisiko ein absolutes Infektionsrisiko bestimmt werden. Der Vergleich basiert auf der Annahme, dass eine infektiöse Person in den verschiedenen Situationen die gleiche Menge virenbeladener Aerosolpartikel abgibt. Das bedeutet also, dass diese Person sich zum gleichen Zeitpunkt des Infektionsverlaufs befindet. Das

relative Infektionsrisiko bietet allerdings die Möglichkeit zu vergleichen, wie sich die Lüftung oder die Dauer des Aufenthalts auf das Infektionsrisiko auswirkt.

Eine Verdoppelung der Aufenthaltszeit bewirkt dabei eine Verdoppelung des relativen Infektionsrisikos ebenso wie eine Verdoppelung der Differenz zwischen der CO₂-Konzentration im Raum und in der Außenluft. Es muss berücksichtigt werden, dass das absolute Risiko von verschiedenen virologischen, immunologischen und physikalischen Einflüssen abhängt, aber eine Verbesserung der Luftqualität oder eine Verringerung der Aufenthaltszeit in jedem Fall zu einer Reduktion des Infektionsrisikos beiträgt, da die inhalierte Dosis entsprechend verringert wird. Sobald die CO₂-Konzentration im Raum konstant ist, also ein stationärer Zustand im Raum erreicht ist, bedeutet eine Verdoppelung der Aufenthaltszeit auch eine Verdoppelung der in der zusätzlichen Aufenthaltszeit inhalierten Dosis. Einschränkend ist hierbei zu beachten, dass die CO₂-Konzentration beim Betreten des Raumes deutlich geringer ist und mit der Zeit ansteigt. Während dieses Anstiegs und auch unmittelbar danach bewirkt eine Verdoppelung der Aufenthaltszeit keine Verdoppelung der inhalierten Dosis. In diesem Fall wird das relative Infektionsrisiko durch die Annahme einer Verdoppelung der inhalierten Dosis überschätzt – in Realität liegt es darunter. Für die Betrachtung von kritischen Szenarien (viele Personen, langer Aufenthalt) kann diese Schätzung aber dennoch hilfreich sein.

* Das relative Infektionsrisiko ermöglicht den Vergleich verschiedener Situationen unter ansonsten identischen Randbedingungen (z. B. Infektiosität). Ein relatives Infektionsrisiko von 2 bedeutet, dass es in dieser Situation doppelt so wahrscheinlich ist infiziert zu werden wie in der Referenzsituation. Nur, wenn für die Referenzsituation ein absolutes Risiko bekannt ist, kann es auch für die aktuelle Situation bestimmt werden.

Praktische Bedeutung und Handlungsempfehlungen

Das CO₂-Monitoring bietet nicht nur für die Ermittlung der Luftqualität im traditionellen Sinn Vorteile (Wohlbefinden, Gesundheit, Leistungsfähigkeit), sondern lässt auch Rückschlüsse auf das relative Infektionsrisiko durch luftgetragene Krankheitserreger zu. Eine Erhöhung der Aufenthaltszeit hat genauso wie eine Erhöhung der CO₂-Konzentration oberhalb der Außenluftkonzentration eine Erhöhung des relativen Infektionsrisikos zur Folge.

Auch wenn damit keine Aussagen über das absolute Infektionsrisiko möglich sind, ist so der Vergleich verschiedener Situationen, wie z. B. dem Aufenthalt in einem Büro oder einem Klassenzimmer möglich. Eine Verkürzung der Aufenthaltszeit sowie eine Erhöhung der Luftzufuhr reduzieren in einer vergleichbaren Situation das Risiko einer Infektion. Daraus lassen sich sowohl aktuell als auch in Zukunft für luftgetragene Krankheitserreger konkrete Handlungsempfehlungen ableiten. Mögliche Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Belüftung von Räumen sind die Einhaltung bestimmter CO₂-Kon-

zentrationen oder Außenluftvolumenströme. Diese Maßnahmen können durch eine Verringerung der Aufenthaltszeit oder der Anzahl der im Raum anwesenden Personen unterstützt werden. Die konkreten Handlungsempfehlungen hängen dabei sowohl vom Krankheitserreger als auch von personenspezifischen Parametern ab (Zeitpunkt während der Infektion für die infizierte Person, Immunantwort der potenziell zu infizierenden Personen). Für eine solide Datenbasis wäre daher die gleichzeitige Erfassung der abgegebenen Virenmenge, der CO₂-Konzentration, der Raumparameter (Größe, Luftvolumenstrom) und situationsbezogener Parameter (Anzahl anwesender Personen, Aufenthaltszeit, aufgetretene Anzahl vom Neuinfektionen) notwendig. Da Ausbrüche nicht vorher bekannt sind, stehen derart detaillierte Angaben für gewöhnlich nicht zur Verfügung, sondern werden aus mehreren nachträglichen Teiluntersuchungen (nachträgliche Untersuchung des Raumes, nachträgliche Messungen der Partikel und CO₂-Abgabe der Personen) zusammengesetzt. Die tatsächliche Situation (z. B. Zeitpunkt im Verlauf der Infektion) kann dann nur annähernd erfasst werden.

Literatur

- 1 M. v. Pettenkofer, Ueber Luft in den Schulen und Ermittlung der Grenze zwischen guter und schlechter Zimmerluft, München: <https://mdz-nbn-resolving.de/details:bsb10764782>
- 2 Ausschuss für Arbeitsstätten, Technische Regeln für Arbeitsstätten – Lüftung - ASR 3.6, 2012; zuletzt geändert GMBI 2018, S. 474.
- 3 Y. Li, P. Cheng und W. Jia, „Poor ventilation worsens short-range airborne transmission of respiratory infection,“ *Indoor Air*, p. e12946, 2022 32(1).
- 4 R. T. Hellwig, F. Antretter, A. Holm und K. Sedlbauer, „Untersuchungen zum Raumklima und zur Fensterlüftung in Schulen,“ *Bauphysik*, Vol. 31, pp. 89-98, 2009.
- 5 D. K. Milton, P. M. Glencross und M. D. Walters, „Risk of Sick Leave Associated with Outdoor Air Supply Rate, Humidification, and Occupant Complaints,“ *Indoor Air*, 10(4):212–221, 2000.
- 6 M. J. Mendell, E. A. Eliseeva, M. M. Davies, M. Spears, A. Lobscheid, W. J. Fisk und M. G. Apte, „Association of classroom ventilation with reduced illness absence: A prospective study in California elementary schools,“ *Indoor Air*, 23(6):515–528, 2013.
- 7 U. Satish, M. J. Mendell, K. Shekhar, T. Hotchi, D. Sullivan, S. Streufert und W. J. Fisk, „Is CO₂ an Indoor Pollutant? Direct Effects of Low-to-Moderate CO₂ Concentration on Human Decision-Making Performance,“ *Environ. Health Perspect.* 120, doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>, pp. 1671-1677, 2012.

- 8 B. Du, M. C. Tandoc, M. L. Lack und J. A. Siegel, „Indoor CO₂ concentration and cognitive function: A critical review,“ *Indoor Air* 20, doi: <https://doi.org/10.1111/ina.12706>, pp. 1067-1082, 2020.
- 9 S. N. Jendrossek, L. A. Jurk, K. Remmers, Y. E. Cetin, W. Sunder, M. Kriegel und P. Gastmeier, „The Influence of Ventilation Measures on the Airborne Risk of Infection in Schools: A Scoping Review,“ *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Bd. 20, Nr. 3746, <https://www.mdpi.com/1660-4601/20/4/3746>, 2023.
- 10 W. Hiwar, M.-F. King, F. Shuweihdi, L. Fletcher, S. Dancer und C. Noakes, „What is the relationship between indoor air quality parameters and airborne microorganisms in hospital environments? A systematic review and meta-analysis,“ *Indoor Air*, pp. 1308-1322, 2021; 31.
- 11 N. Good, K. M. Fedak, D. Goble, A. Keisling, C. L'Orange, E. Morton, R. Phillips, K. Tanner und J. Volckens, „Respiratory Aerosol Emissions from Vocalization: Age and Sex Differences Are Explained by Volume and Exhaled CO₂,“ *Environ. Sci. Technol. Lett.*, pp. 1071-1076, 8, 12 2021.
- 12 D. Mürbe, M. Kriegel, J. Lange, H. Rotheudt und M. Fleischer, Aerosol emission is increased in professional singing, Berlin: <https://osf.io/preprints/osf/znjeh>, 2020.
- 13 G. Bagheri, O. Schlenczek, L. Turco, B. Thiede, K. Stieger, J. M. Kosub, S. Clauberg, M. L. Pöhlker, C. Pöhlker, J. Moláček, S. Scheithauer und E. Bodenschatz, „Size, concentration, and origin of human exhaled particles and their dependence on human factors with implications on infection transmission,“ *Journal of Aerosol Science* (168), p. 106102, 2023.
- 14 A. Mehlis, „Einsatz von Lüftungsampeln zur Verbesserung der Luftqualität in Kindertageseinrichtungen und Schulen“, *Epid Bull* 2017;42:477-481, DOI: 10.17886/EpiBull-2017-055.
- 15 A. Iwasaki, „Another Way to Protect against COVID beyond Masking and Social Distancing – Boosting indoor humidity in winter can hinder transmission of the virus,“ *Scientific America*, 19 01 2021.
- 16 A. Hartmann, Y. E. Cetin, C. Kopic und M. Kriegel, Supplementary calculations regarding the practical application of CO₂ as a proxy for the ventilation rate used as a parameter in dose-response models considering airborne infection risks, PrePrint <https://doi.org/10.14279/depositon-17403>, 2023.

- 17 M. Kriegel, A. Hartmann, U. Buchholz, J. Seifried, S. Baumgarte und P. Gastmeier, „SARS-CoV-2 Aerosol Transmission Indoors: A Closer Look at Viral Load, Infectivity, the Effectiveness of Preventive Measures and a Simple Approach for Practical Recommendations,“ Preprint MedRxiv, DOI: <https://doi.org/10.1101/2021.11.04.21265910>, 2021.

Autorinnen und Autoren

^{a)} Anne Hartmann | ^{a)} Dr. Yunus Emre Cetin |

^{b)} Prof. Dr. Petra Gastmeier | ^{a)} Prof. Dr. Martin Kriegel

^{a)} TU Berlin, Hermann-Rietschel-Institut

^{b)} Charité Universitätsmedizin, Berlin, Institut für Hygiene und Umweltmedizin

Korrespondenz: kontakt@hri.tu-berlin.de

Vorgeschlagene Zitierweise

Hartmann A, Cetin YE, Gastmeier P, Kriegel M: Praktische Bedeutung von CO₂ als Indikator für die Innenraumlufthausqualität und die relative inhalierte Dosis virenbeladener Partikel

Epid Bull 2024;8:3-7 | DOI 10.25646/11950

Interessenkonflikt

Die Autorinnen und Autoren geben an, dass kein Interessenskonflikt vorliegt.

Danksagung

Die Untersuchung wurde als Bestandteil des Projektes SAVE unter dem Förderkennzeichen SWD-10.08.18.7-20.02 vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.