

Bewertung der Luftqualität in Messehallen mit örtlich aufgelösten CO₂-Konzentrationsmessungen

Tobias Maria Burgholz^{1,2}, Dennis Derwein¹, Kai Rewitz¹, Dirk Müller^{1,2}

¹ Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

² Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Aachen



This work is licensed under a
[Creative Commons Attribution 3.0 Germany License](https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/de/).

Please cite this article as:

T. M. Burgholz, D. Derwein, K. Rewitz, D. Müller *Bewertung der Luftqualität in Messehallen mit örtlich aufgelösten CO₂-Konzentrationsmessungen*, White Paper, RWTH-EBC 2022-004, Aachen, 2022, DOI: [10.18154/RWTH-2022-01845](https://doi.org/10.18154/RWTH-2022-01845)

RWTH Aachen University
E.ON Energy Research Center
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC)
Mathieustr. 10, 52074 Aachen

T +49 241 80-49760, F +49 241 80-49769,
ebc-office@eonerc.rwth-aachen.de, www.eonerc.rwth-aachen.de/ebc

Bewertung der Luftqualität in Messehallen mit örtlich aufgelösten CO₂-Konzentrationsmessungen

Tobias Maria Burgholz^{1,2}, Dennis Derwein¹, Kai Rewitz¹, Dirk Müller^{1,2}

¹Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energieforschungszentrum, RWTH Aachen

²Heinz Trox Wissenschafts gGmbH, Aachen

Zusammenfassung

Aufgrund der SARS-CoV-2-Pandemie wurden Veranstaltungen in öffentlich zugänglichen Räumen zunächst vielerorts kategorisch ausgesetzt. Individuelle technische Ausstattungen und vorhandene Lüftungsanlagen wurden dabei oft nicht berücksichtigt, obwohl das Infektionsrisiko durch Lüftung und Luftreinigung deutlich gesenkt werden kann. Die Veranstaltung von Messen war in den letzten zwei Jahren fast nicht möglich, obwohl Deutschland über viele Messehallen mit aufwendigen raumluftechnischen Anlagen verfügt. Im Rahmen einer Feldstudie wird untersucht, wie stark durch die menschliche Atmung abgegebene Belastungen in der Raumluft typischer Messehallen verdünnt werden und ob es zu lokalen Aufkonzentrationen kommt. Dabei wird die CO₂-Konzentration als Indikator für diese Belastungen gewählt, da auch die in der Pandemie bedeutsamen und potentiell mit Viren belasteten Aerosole analog zu CO₂ bei der Atmung abgegeben werden.

In den Messehallen der Messe Frankfurt konnten in der zweiten Jahreshälfte 2021 drei Messveranstaltungen messtechnisch begleitet werden. Die Messungen erfolgten in der Zu- und Abluft der raumluftechnischen Anlagen und zusätzlich mit weiteren 22 Sensoren kontinuierlich während des Messebetriebs an Säulen in Gang- und Standnähe sowie in Randbereichen der Hallen.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass es in allen hier untersuchten Messehallen zu einer guten Mischung der Raumluft ohne erkennbare lokale Anreicherungen oder vertikale Schichtungseffekte kommt. Die CO₂-Konzentrationen an den einzelnen Messstellen und in der Abluft unterscheiden sich nur geringfügig, es handelt sich daher um eine nahezu ideale Mischlüftung. Mit einem Maximalwert von 835 ppm am besucherstärksten Tag kann außerdem nachgewiesen werden, dass mit den durch die Messegesellschaft vorgegebenen Luftmengen eine gute und hygienisch unbedenkliche Luftqualität über die Messetage garantiert werden kann. Mit ergänzenden Schutzmaßnahmen kann daher auch während einer Pandemie von einem sicheren Messebetrieb ausgegangen werden. Ein Vergleich der örtlichen Messungen mit der jeweiligen Messung der CO₂-Konzentration in der Abluft macht deutlich, dass die Abluftkonzentration eine gute Referenz der mittleren CO₂-Konzentration im Aufenthaltsbereich darstellt. Eine aufwendige Messung örtlicher CO₂-Konzentrationen ist daher in diesen Messehallen nicht notwendig. Ergänzend wird ein Verfahren zur Berechnung der Anwesenheitszahlen auf Basis der gemessenen CO₂-Konzentration in Außen- und Abluft vorgestellt. Mit diesem Verfahren kann die Belegung einer Messehalle zeitaufgelöst abgeschätzt werden, so dass der Verlauf von Besucherströmen rekonstruiert werden kann.

Schlagwörter

COVID-19 — ideale Mischlüftung — Messehallen — Großveranstaltungen — Luftwechselrate

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorstellung der Messkampagne und Methodik	2
2.1	Veranstaltungen	2
2.2	Verwendete Sensorik	3
2.3	Ein-Punkt-Kalibrierung der Sensorik	3
2.4	Messpositionen	4
2.5	Auswerteverfahren	6
2.6	Abschätzung der Hallenbelegung	7
2.7	Abschätzung des Umluftanteils	10
3	Ergebnisse	10
3.1	Lokale Verteilung der CO ₂ -Konzentration	11
3.2	Vertikale CO ₂ -Schichtung	17
3.3	Abschätzung der Hallenbelegung	17
4	Zusammenfassung	18

1 Einleitung

Zur Eindämmung des Infektionsgeschehens der SARS-CoV-2-Pandemie kam es zu einem kategorischen Aussetzen von (Groß-)Veranstaltungen. Neben Maßnahmen wie dem Tragen von Mund-Nasen-Bedeckungen und der Einhaltung von Abstandsregeln sowie der allgemeinen Nies- und Hustenetikette kann in Innenräumen die Bereitstellung guter Luftqualität zur Minderung des Infektionsgeschehens beitragen. Basierend auf raumluftechnischen Parametern ist es möglich, das Infektionsrisiko in Innenräumen mithilfe von Risikomodellen abzuschätzen [5, 9]. Anhand des Infektionsrisikos können dann Hygienekonzepte definiert werden, um eine risikoarme Durchfüh-

rung von Veranstaltungen in Innenräumen zu ermöglichen.

Eine Abschätzung des (relativen) Infektionsrisikos erfordert eine Bewertung des Lüftungskonzeptes, wobei unter anderem Annahmen bezüglich der Raumluchtströmung getroffen werden müssen. In der Regel wird in den meisten Berechnungsmodellen eine ideale Mischung der Raumlucht angenommen. Eine ideale Mischlüftung bedeutet, dass alle in die Raumlucht eingebrachten Verunreinigungen sofort mit der gesamten im Raum verfügbaren Luft verdünnt werden. Im Raum gibt es somit keine Konzentrationsunterschiede, wodurch alle Gase und Aerosole gleichmäßig in der Raumlucht verteilt sind. In einem Raum mit idealer Mischlüftung gibt es daher auch nur einen Wert für die CO₂-Konzentration.

Insbesondere in größeren Räumen mit lokalen Quellen (hier Personen) muss diese Annahme kritisch überprüft werden, da nur bei einer ausreichenden Bewegung der Raumlucht von einer fast vollständigen Mischung ausgegangen werden kann. Kommt es in Stagnationsgebieten zu einer Anreicherung von Verunreinigungen, kann die Luftqualität in diesen Zonen sinken und das Infektionsrisiko steigen.

Ziel dieser Studie ist es, die Gültigkeit der Annahme einer idealen Mischung der Raumlucht in großen Innenräumen experimentell zu überprüfen. Dazu wurde im Herbst 2021 auf drei Veranstaltungen der Messe Frankfurt eine Messkampagne während fünf Messetagen durchgeführt, wobei jeweils die zeitlich und lokal aufgelösten CO₂-Konzentrationen mit insgesamt 24 CO₂-Sensoren gemessen wurden. Auf Basis dieser Messungen soll die Mischung der Raumlucht in Messehallen während des tatsächlichen Veranstaltungsbetriebes bewertet werden.

Weiterhin sollen etwaige vertikale Konzentrationsschichtungen oder lokale Anreicherungen in unterschiedlichen Zonen der Messehallen ermittelt werden, welche ebenfalls zur kritischen Überprüfung der Annahme einer idealen Mischlüftung beitragen können.

Auf Basis der CO₂-Messungen wird abschließend eine modellbasierte Abschätzung der zeitlich aufgelösten Raumbelastung durchgeführt.

2 Vorstellung der Messkampagne und Methodik

Nachfolgend werden die Veranstaltungen und räumlichen Gegebenheiten vorgestellt, die untersucht wurden. Anschließend werden die Messmethode und die verwendete Sensorik beschrieben sowie die Methodik zur Abschätzung der mittleren Besucherzahlen und des Umluftanteils auf Basis der gemessenen CO₂-Konzentrationen in der RLT-Anlage.

2.1 Veranstaltungen

Um die Durchmischung der Raumlucht in Messehallen während Veranstaltungen zu untersuchen, wurden drei Veranstaltungen im Herbst 2021 messtechnisch begleitet, die nachfolgend vorgestellt werden. Eine Übersicht über die jeweiligen Sensorpositionen folgt in Kapitel 2.4.

Die **IndoorAir 2021** ist eine in Frankfurt am Main vom 5. bis 7. Oktober 2021 einmalig ausgerichtete Fachmesse für Lüftung und Luftqualität im deutschsprachigen Raum. Auf der Messe präsentierte die Klima- und Lüftungsindustrie einem Fachpublikum aus Planern, Entscheidern und Betreibern von Anlagen und Gebäuden im öffentlichen und privaten Raum relevante Strategien, Technologien und Produkte rund um gesunde Luft in Innenräumen [7]. Ausgerichtet wurde die Veranstaltung in Halle 12.0 der Messe Frankfurt.

Vom 16. bis zum 19. November 2021 fand mit der **Formnext 2021** die führende Branchenplattform für additive Fertigung und industriellen 3D-Druck statt [6]. Während auf der IndoorAir-Messe über die gesamte Dauer der Veranstaltung gemessen wurde, konzentriert sich die Messung hier auf Mittwoch, den 17. November 2021, als Tag mit den meisten erwarteten Anwesenden, da bei einer Zwischenauswertung der ersten Veranstaltung keine signifikanten Unterschiede zwischen

den einzelnen Veranstaltungstagen festgestellt werden konnten. Um möglichst vergleichbare Sensorpositionen zu wählen, findet die Messung auch hier in Ebene 0 der Halle 12 statt.

Die Messe **Food Ingredients Europe 2021** in Frankfurt (im Folgenden kurz FI Europe) ist eine internationale Messe für Lebensmittel-Zusatzstoffe. Zahlreiche nationale und internationale Aussteller präsentieren Produkte rund um Lebensmittelinhalts- und Zusatzstoffe sowie Labortechnik, Produktsicherheit und Qualitätssicherung [8]. Im Gegensatz zu den anderen beiden Veranstaltungen fand die Messung in Halle 3.0 der Messe Frankfurt statt. Auch hier wird mit Dienstag, dem 30. November 2021, der Tag mit der größten erwarteten Besucherzahl gewählt.

Die Eckdaten der im Rahmen der Messkampagne betrachteten Veranstaltungen sind in Tabelle 1 gegeben. Bei den Angaben zu den tatsächlichen Zahlen der Anwesenden ist zu berücksichtigen, dass hier alle Veranstaltungstage und Hallen bzw. -ebenen einbezogen sind.

Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die Abmaße der untersuchten Hallenebenen sowie die jeweiligen Gesamtluftmengen und die Betriebsart der jeweiligen raumlufttechnischen Anlagen. Die Werte beziehen sich dabei jeweils nur auf die betrachtete Halle und Ebene, die jeweils fettgedruckt hervorgehoben ist.

2.2 Verwendete Sensorik

Für die Messungen kommen jeweils 24 Handgeräte des Typs testo 440 dP (Herstellernummer 0560-4402) in Verbindung mit kabelgebundenen digitalen CO₂-Sonden (Herstellernummer 0632-1552) desselben Herstellers zum Einsatz, die neben der CO₂-Konzentration die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit und den Absolutdruck aufnehmen. Der Messbereich der CO₂-Konzentration beträgt 0 bis 10 000 ppm mit einer Genauigkeit von $\pm (50 \text{ ppm} + 3 \% \text{ v. Mw.})$ im für diesen Anwendungsfall relevanten Messbereich von 0 bis 5000 ppm [12].

Die Sonden werden vom Hersteller vor der Auslieferung bei CO₂-Konzentration von etwa 1000 ppm und 4600 ppm zweipunktkalibriert. Da die eingesetzten Handgeräte keine Möglichkeit bieten, diese Kalibrierdaten zu speichern, wird eine manuelle Korrektur im Zuge der Auswertung durchgeführt. Tabelle 3 zeigt für die bei Berücksichtigung der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit die zulässigen Toleranzen und Ausgabebereiche.

Tabelle 3 – Zulässige Abweichungen und Ausgabebereiche der CO₂-Konzentration gemäß Herstellerangaben [12]

tatsächliche Konzentration (ppm)	zulässige Abweichung (ppm)	Ausgabebereich (ppm)
400	± 62	338 – 462
600	± 68	532 – 668
800	± 74	726 – 874
1000	± 80	920 – 1080
4600	± 188	4412 – 4788

2.3 Manuelle relative Ein-Punkt-Kalibrierung der CO₂-Sensorik

Um die Zwei-Punkt-Werkskalibrierung zu überprüfen und alle Sensoren gegebenenfalls abzugleichen, werden diese gleichzeitig in eine zuvor mit Außenluft geflutete Kunststoffbox der Größe 710 x 440 x 310 mm³ und einem Volumen von etwa 97 l gegeben. Anschließend werden die Box luftdicht verschlossen und über 45 Minuten die Konzentrationen minütlich aufgezeichnet.

Die entsprechenden Verläufe der CO₂-Konzentrationen während der Kalibrierung sind in Abbildung 1 auf der linken Seite dargestellt: Während die meisten Sensoren mit Werten um 440 ppm näherungsweise die zu erwartende CO₂-Außenluftkonzentration messen, geben zwei Sensoren mit etwa 510 ppm deutlich höhere Werte aus. Zwei weitere Sensoren liegen mit etwa 340 ppm und 390 ppm dagegen deutlich

Tabelle 1 – Übersicht der untersuchten Messen

	Hallen und Ebenen	Zeitraum der Veranstaltung	Tage der Messung	Besuchende (geplant) pro Tag	Anwesende (tatsächlich) insgesamt
IndoorAir	12.0	05.11. (Di) – 07.11. (Do)	Di/Mi/Do	1666 – 2000	nicht bekannt
FormNext	11.0/12.0/12.1	16.11. (Di) – 19.11. (Fr)	Mi	4200 – 9000	38.314
FI Europe	3.0/3.1/4.1	30.11. (Di) – 02.12. (Do)	Di	10.000 – 11.000	47.581

Tabelle 2 – Übersicht der Messehallen und raumlufttechnischen Anlagen

	Hallen und Ebenen	Raumgeometrie			RLT	
		Fläche (m ²)	Höhe (m)	Volumen (m ³)	Gesamtluftmenge (m ³ /h)	Umluftanteil
IndoorAir	12.0	16.800	10	168.000	418.500	nein
FormNext	11.0/ 12.0 /12.1	16.800	10	168.000	418.500	nein
FI Europe	3.0/3.1/4.1	18.495	14	258.930	470.000	ja

unterhalb der Umgebungsbedingungen. Da aufgrund der hohen Außenluftmengen von geringen CO₂-Konzentrationen während der Messtage ausgegangen werden kann, ist eine Kalibrierung der Sensoren bei Außenluftkonzentration sinnvoll.

Zum Abgleich wird die mediane Konzentration \tilde{c} aller Sensoren über den gesamten Zeitraum zu 441 ppm ermittelt. Der Korrekturwert bzw. das Offset eines jeden Sensors ergibt sich gemäß Formel 1 dann aus der Differenz zwischen der zeitgemittelten CO₂-Konzentration \bar{c}_i des Sensors i und dem Median \tilde{c} aller 24 Sensoren:

$$c_{i,\text{Offset}} = \bar{c}_i - \tilde{c} \quad (1)$$

Abbildung 2 zeigt die entsprechenden Korrekturwerte $c_{i,\text{Offset}}$. Diese werden entsprechend zur Auswertung gemäß Gleichung 2 zu jedem Zeitschritt vom gemessenen Wert c_i subtrahiert:

$$c_{i,\text{cal}} = c_i - c_{i,\text{Offset}} \quad (2)$$

Nach Berücksichtigung der sensorbezogenen Korrekturwerte $c_{i,\text{Offset}}$ ergibt sich für die Kalibrierung der in Abbildung 1 auf der rechten Seite dargestellte Verlauf.

Die Kalibrierung wurde direkt im Anschluss an die Messkampagne durchgeführt. Aufgrund der bereits genannten Erwartungen an die gemessenen Konzentrationen deutlich unterhalb von 1000 ppm, wurde im Gegensatz zur Zwei-Punkt-Werkskalibrierung lediglich eine Ein-Punkt-Kalibrierung durchgeführt.

2.4 Messpositionen

Zur örtlich aufgelösten Erfassung der CO₂-Konzentration wird die eingesetzte Sensorik jeweils am Vorabend der zu betrachtenden Messtage an verschiedenen Messpositionen und -höhen über die gesamte Ausstellungsfläche verteilt installiert. Tabelle 4 gibt einen allgemeinen Überblick über die verschiedenen Messorte.

Tabelle 4 – Installationsorte und -höhen der Sensoren

Installationsort der Sensorik	Höhe (m)
RLT-Anlage (Filter)	1,4
Aufsteller	1,8
Säule	2,0
Säule	3,2

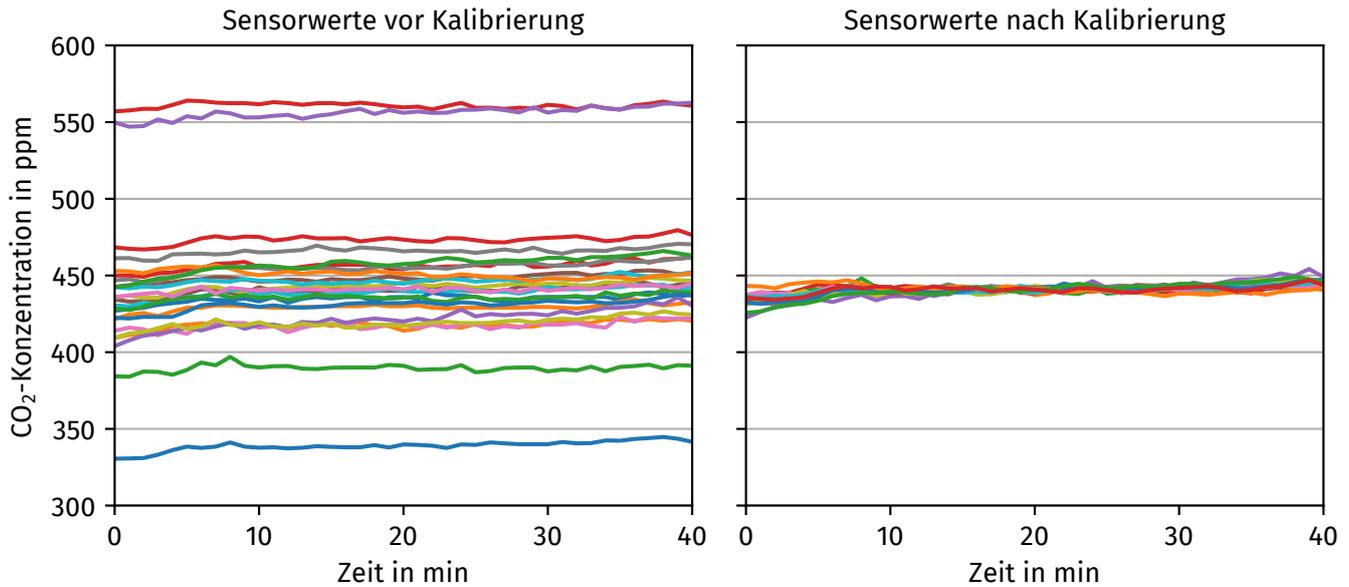


Abbildung 1 – Zeitliche CO₂-Verläufe vor der Kalibrierungsmessung und nach der Kalibrierung

Um die CO₂-Konzentration der dem Veranstaltungsraum zu- und abgeführten Luft zu erfassen, werden Sensoren entsprechend Abbildung 4 (a) in jeweils einer der **raumluftechnischen Anlagen** installiert. Hierzu wird eine Anlage gewählt, die auf die Länge der Halle bezogen möglichst zentral gelegen ist. Gemäß Tabelle 4 erfolgt die Installation auf einer Höhe von 1,4 m am Filter zentriert im Luftkanal.

Auf allen drei Messen kann die Installation eines Sensors direkt im Abluftkanal erfolgen. Auf den Veranstaltungen der IndoorAir und Form-Next, die beide in Halle 12 stattfinden, wird die CO₂-Konzentration unmittelbar nach der Ansaugung der Außenluft gemessen. In Halle 3, in der die FoodIngredients stattfindet, war dagegen der Bereich der Außenluftansaugung zum Zeitpunkt der Messung nicht zugänglich. Stattdessen wurde die in Abbildung 3 schematisch dargestellte Messposition hinter der Mischkammer gewählt. Im Gegensatz zu den anderen Veranstaltungen wurde hier der Zuluft ein Teil der Abluft beige-mischt, wobei die Position der Außenluftklappe nach Angaben der Betreiber bei 70 % lag. Die Güte der Mischung von Außenluft und Abluft kann in dieser Studie nicht bewertet werden. Es wird daher von einer idealen Mischung ausgegangen. Die Ermittlung des Umluftanteils wird in

Abschnitt 2.7 eingeführt und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

Ein Großteil der Sensoren im Publikumsbereich wird an **Säulen** installiert, die sich über die gesamte Grundfläche der Hallen erstrecken. Mit Ausnahme von Säulen, die bereits in Standaufbauten integriert und nicht mehr zugänglich waren, eignen sich diese zur direkten Installation der Sensorik. Sensoren und Handgeräte werden hierzu mitsamt einer Powerbank in schwarzen Taschen mithilfe von Spanngurten an den Säulen befestigt. Die Powerbanks werden vor jeder Messe vollständig aufgeladen und gewähren mit einer vom Hersteller angegebenen Kapazität von 30 000 mA h eine unterbrechungsfreie Stromversorgung für mehrere Tage. Auf eine zusätzliche kabelgebundene Stromversorgung kann somit verzichtet werden.

Die Sensoren an den Säulen werden in 2 m Höhe und somit etwas oberhalb der in DIN EN ISO 7736 empfohlenen Kopfhöhe stehender Personen von 1,7 m installiert [4]. Es wird angenommen, dass auf dieser Höhe die Messung hinreichend nahe des Aufenthaltsbereiches durchgeführt und gleichzeitig das Risiko unabsichtlicher oder vorsätzlicher Fremdeinwirkung verringert wird. Zusätzlich werden an ausgewählten Säulen weitere Sensoren in 3,2 m Höhe mit jeweils derselben

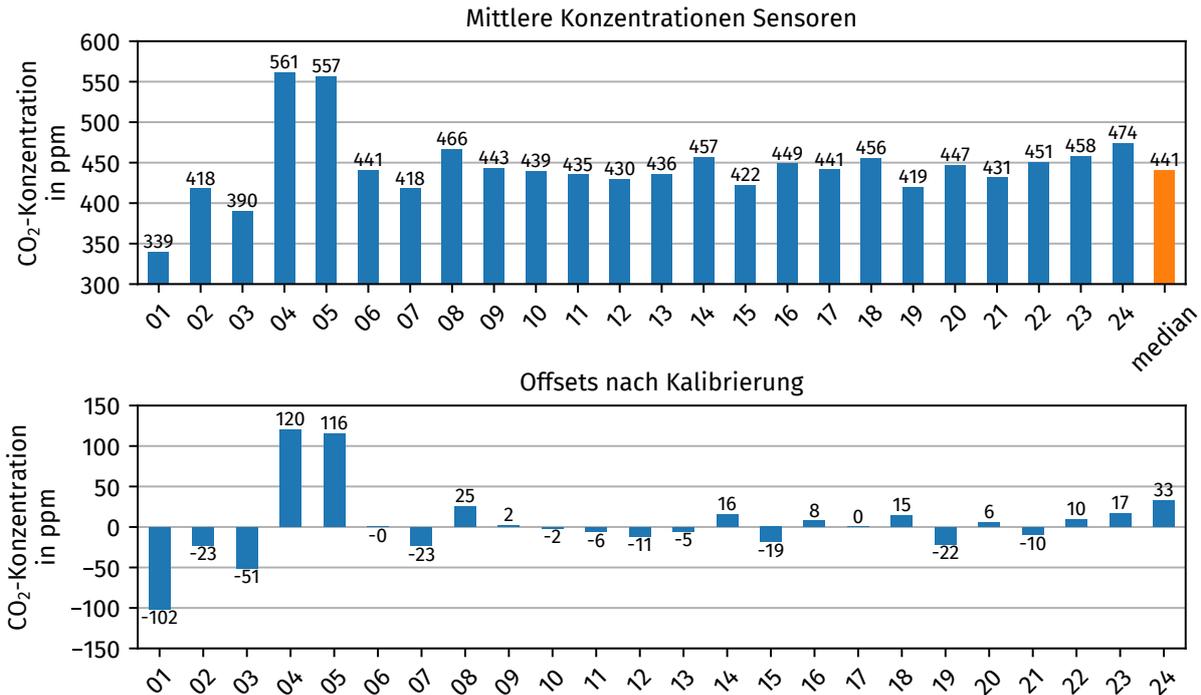


Abbildung 2 – Mittlere CO₂-Konzentrationen vor der Kalibrierung (oben) und Offsets für die Ein-Punkt-Kalibrierung (unten)

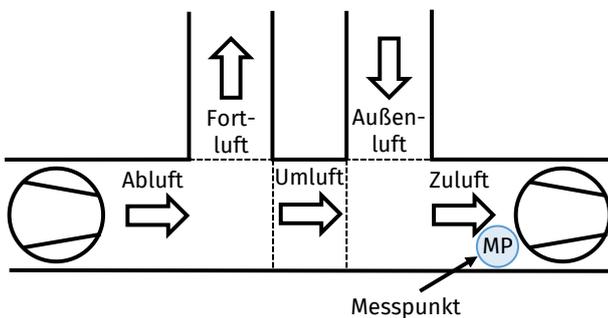


Abbildung 3 – Skizze der Messposition in der Mischkammer (Halle 3.0, FI Europe)

Ausrichtung installiert, um neben lokalen Konzentrationsunterschieden auch eine potentielle vertikale Schichtung der CO₂-Konzentration untersuchen zu können. Abbildung 4 (b) zeigt exemplarisch einen entsprechenden Aufbau mit zwei Messhöhen.

Um weitere Messpositionen frei im Raum wählen zu können, werden zusätzliche **Aufsteller** in Wand-, Gang- und Aufenthaltsbereichen positioniert. Die in Abbildung 4 (c) gezeigten Aufsteller

verfügen über einen Aufdruck mit Motiven der Messehallen und Betonsockel, weshalb sie als über die Dauer der Messung ortsfest angenommen werden. Die Messhöhe an diesen Messstellen beträgt etwa 1,8 m.

Abbildungen 5 und 6 zeigen schematisch die Standaufbauten sowie die Sensorpositionen. Messpositionen an Aufstellern sind grau gekennzeichnet, jene an Säulen in 2 m Höhe in rot, zusätzliche Sensoren in 3,2 m Höhe in grün. Die Ausrichtung der Sensoren wird durch die blauen Pfeile gekennzeichnet. Tabelle 5 fasst alle Messpositionen und Ausrichtungen der untersuchten Veranstaltungen zusammen.

2.5 Auswerteverfahren

Im Anschluss an die Messetage und nachdem die Anwesenden die Veranstaltung verlassen haben, werden die Logdaten von den Handgeräten gespeichert. Anschließend werden jeweils folgende Schritte durchgeführt:



(a) RLT-Anlage

(b) Säule

(c) Aufsteller

Abbildung 4 – Sensorpositionen

1. Manuelles Ausschließen von Zeitschritten mit erhöhter CO₂-Konzentration zu Beginn oder am Ende des Messzeitraumes, die auf direktes Ausatmen bei Installation bzw. Abbau zurückzuführen sind.
2. Korrektur der gemessenen Konzentrationen gemäß relativer Ein-Punkt-Kalibrierung aus Kapitel 2.3 entsprechend Gleichung 1 und 2.
3. Glättung der Messwerte mit rollendem Mittelwert über jeweils 10 Zeitintervalle (entspricht Zeitfenster von 10 Minuten) mit anschließender Zentrierung der Kurve.

2.6 Abschätzung der Hallenbelegung anhand der CO₂-Konzentrationen

Basierend auf den Zuluftvolumenströmen sowie den gemessenen CO₂-Konzentrationen in der Messehalle, der Ab- und Zuluft der RLT-Anlage wird eine Abschätzung der Hallenbelegung durchgeführt. Dafür wird ein Berechnungsverfahren eingesetzt, das von Calì et al. [2] und Nienaber et al. [10] für die Abschätzung der Belegung von Büroräumen auf Basis der gemessenen CO₂-Konzentrationen entwickelt und validiert wurde. Grundlage dieses Berechnungsverfahrens ist wieder die Annahme einer idealen

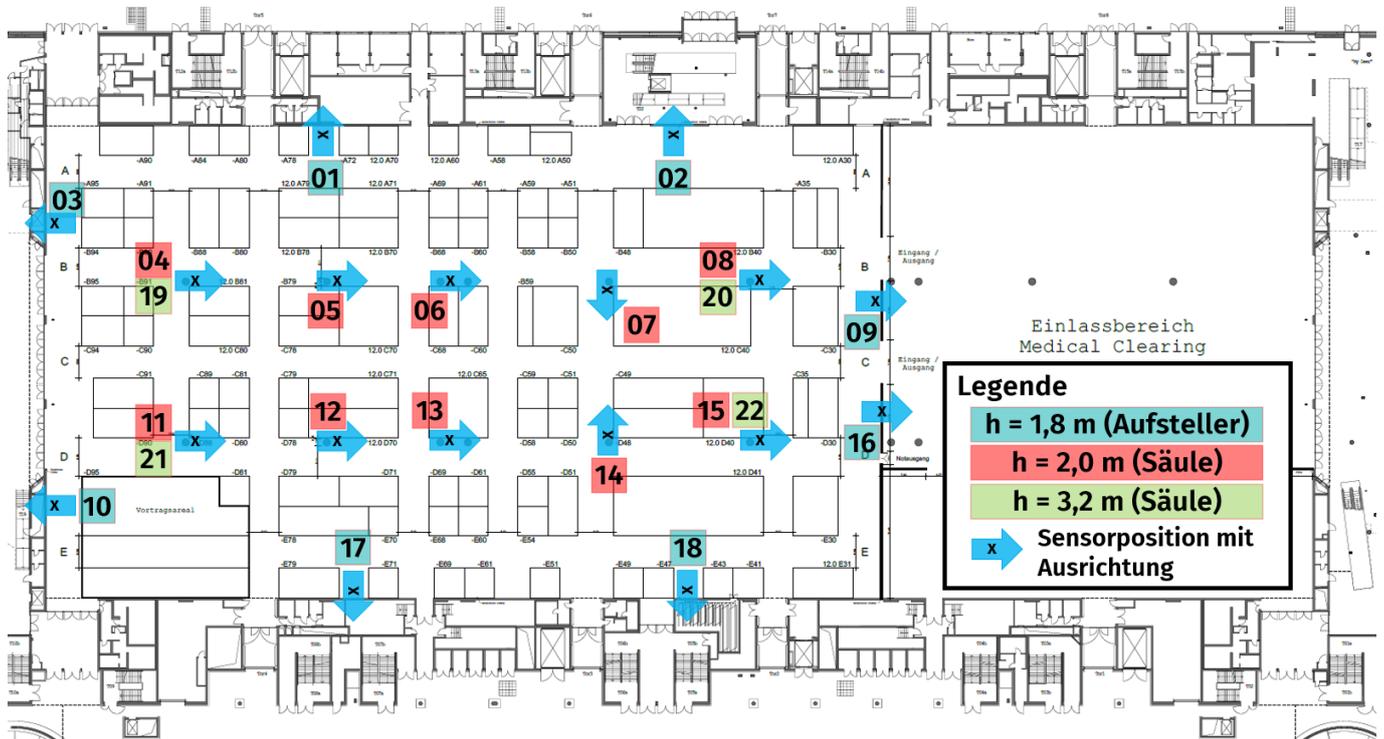
Mischung der Raumluft. Weiterhin wird angenommen, dass eine zeitlich konstante personenspezifische CO₂-Produktionsrate \dot{m}_{Prod} vorliegt und der Luftaustausch nur durch den lüftungswirksamen Luftvolumenstrom \dot{V}_{R} stattfindet. Somit kann die CO₂-Konzentration in einem Raum c_{R} durch die instationäre Massenbilanz in Gleichung 3 beschrieben werden.

$$V_{\text{R}} \frac{dc_{\text{R}}}{dt} = \dot{V}_{\text{R}} \cdot [c_{\text{Zu}}(t) - c_{\text{R}}(t)] + n_{\text{Pers}} \cdot \dot{m}_{\text{Prod}} \quad (3)$$

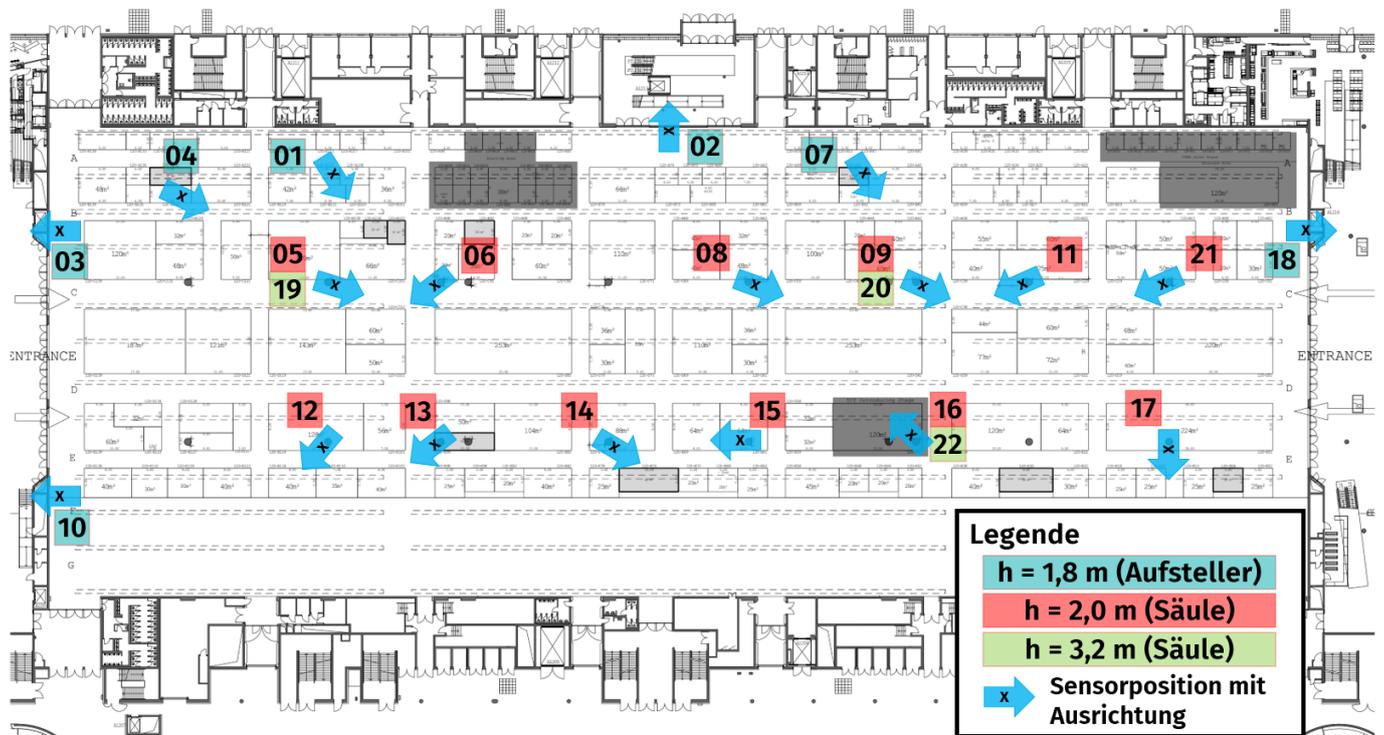
Hierbei entspricht V_{R} dem Volumen des Raumes, c_{Zu} der CO₂-Konzentration der Zuluft und n_{Pers} der Anzahl sich im Raum befindender Personen. Mithilfe des expliziten Euler-Verfahrens kann die Differentialgleichung aus Gleichung 3 diskretisiert werden [3], wodurch sich Gleichung 4 ergibt.

$$V_{\text{R}} \frac{c_{i+1,\text{R}} - c_{i,\text{R}}}{\Delta t} = \dot{V}_{\text{R}} \cdot (c_{i,\text{Zu}} - c_{i,\text{R}}) + n_{i,\text{Pers}} \cdot \dot{m}_{\text{Prod}} \quad (4)$$

Durch Umstellen von Gleichung 4 kann zunächst die CO₂-Konzentration $c_{i+1,\text{R,BF}}$ zum Zeitpunkt $i+1$ für die Annahme eines belegungsfreien



(a) IndoorAir 2021



(b) FormNext 2021

Abbildung 5 – Belegungspläne und Sensorpositionen in Halle 12.0

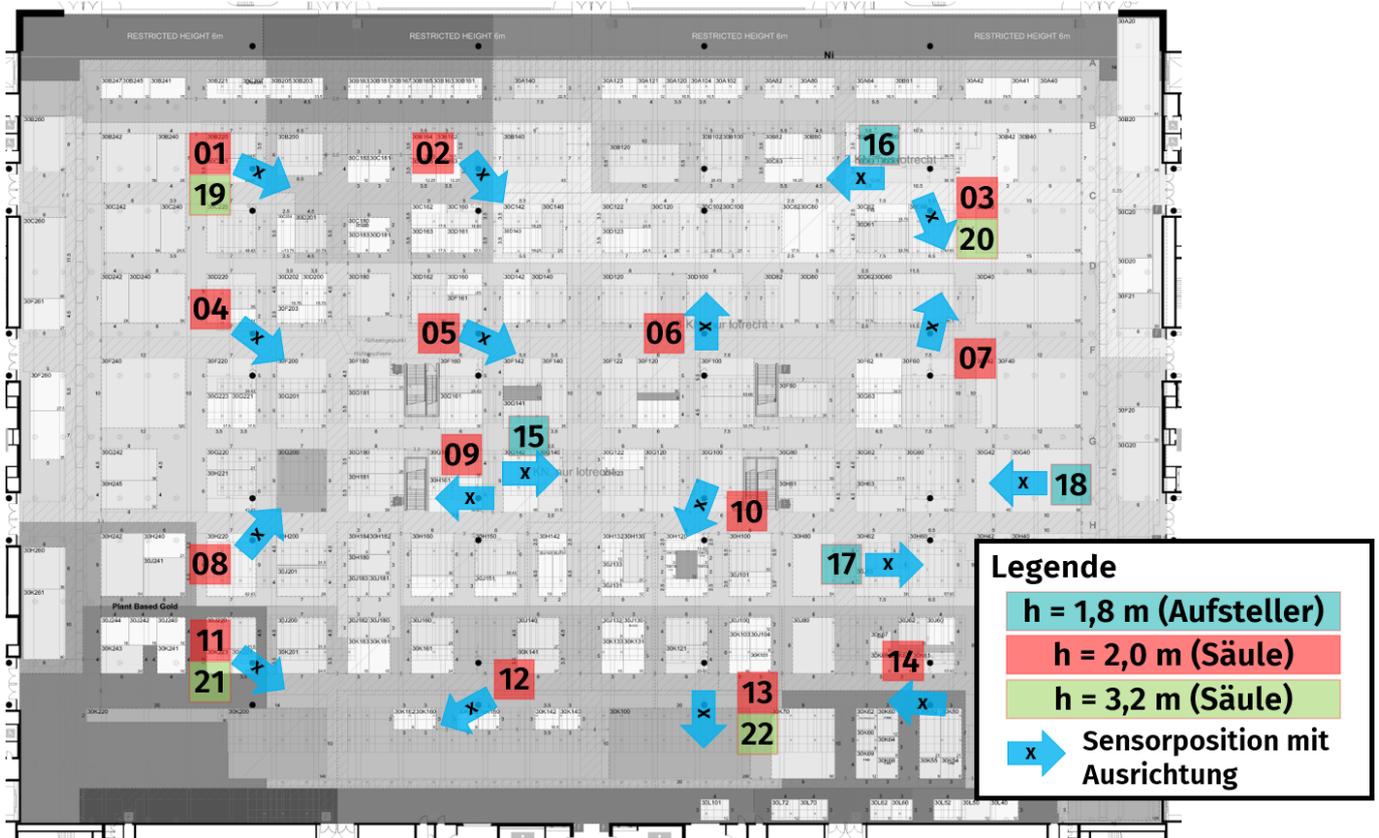


Abbildung 6 – Belegungsplan und Sensorpositionen auf der FI Europe 2021 in Halle 3.0

Raumes zum Zeitpunkt i (also $n_{i, \text{Pers}} = 0$) in Gleichung 5 berechnet werden.

$$c_{i+1, \text{R}, \text{BF}} = \frac{\dot{V}_{\text{R}}}{V_{\text{R}}} \Delta t \cdot (c_{i, \text{Zu}} - c_{i, \text{R}}) + c_{i, \text{R}} \quad (5)$$

Die Differenz der tatsächlich gemessenen CO_2 -Konzentration $c_{i+1, \text{R}}$ und der CO_2 -Konzentration $c_{i+1, \text{R}, \text{BF}}$ kann mithilfe von Gleichung 6 in die abgeschätzte Raumbelugung $n_{i, \text{Pers}}$ umgerechnet werden.

$$n_{i, \text{Pers}} = \frac{c_{i+1, \text{R}} - c_{i+1, \text{R}, \text{BF}}}{\frac{\dot{m}_{\text{Prod}} \Delta t}{V_{\text{R}}}} \quad (6)$$

In der Arbeit von Nienaber et al. [10] wird für die personenspezifische CO_2 -Produktionsrate \dot{m}_{Prod} ein mittlerer Wert von 1 kg/Tag (=0,0417 kg/h) angenommen. Durch die Annahme eines mittleren Wertes werden jedoch Parameter wie Geschlecht, Alter und körperliche Aktivität der Personen vernachlässigt, wodurch es zu Ungenauigkeiten kommt.

Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf Daten von Persily und de Jonge [11] zurückgegriffen, um die CO_2 -Produktionsrate \dot{m}_{Prod} in Abhängigkeit von Geschlecht, Alter und körperlicher Aktivität ermitteln zu können. Für die Anwesenden einer Messe wird ein mittleres Alter von 40 Jahren und eine geschlechtliche Gleichverteilung angenommen. Für die körperliche Aktivität wird nach Müller et al. [9] angenommen, dass 10 % der Anwesenden stehen (Gruppe 1) und dass sich 90 % der Personen gehend durch die Halle bewegen (Gruppe 2). Daraus ergibt sich ein körperlicher Aktivitätslevel von 1,6 met für die stehenden bzw. 2,8 met für die gehenden Personen. Auf Basis der Daten von Persily und de Jonge [11] ergeben sich für Gruppe 1 bzw. Gruppe 2 eine personenspezifische CO_2 -Produktionsrate \dot{m}_{Prod} von 0,0366 kg/h bzw. 0,0641 kg/h und daraus resultierend eine mittlere personenspezifische CO_2 -Produktionsrate \dot{m}_{Prod} von 0,0613 kg/h. Eine Übersicht über die Gruppenzusammensetzung und die resultierenden Werte für \dot{m}_{Prod} liefert Tabelle 6.

Tabelle 5 – Messpositionen

ID	IndoorAir				FormNext				FI Europe			
	ID*	Pos	h	Ausrichtung	ID*	Pos	h	Ausrichtung	ID*	Pos	h	Ausrichtung
01	–	A	1,8	Wand	–	A	1,8	Sitzbereich	19	S	2,0	Gangkreuz
02	–	A	1,8	Wand/Tür	–	A	1,8	Wand/Tür	–	S	2,0	Gangkreuz
03	–	A	1,8	Wand/Tür	–	A	1,8	Wand/Tür	20	S	2,0	Sitzbereich
04	19	S	2,0	Längsgang	–	A	1,8	Sitzbereich	–	S	2,0	Gangkreuz
05	–	S	2,0	Standaufbau	19	S	2,0	Längsgang	–	S	2,0	Gangkreuz
06	–	S	2,0	Standaufbau	–	S	2,0	Gangkreuz	–	S	2,0	Stand
07	–	S	2,0	Quergang	–	A	1,8	Sitzbereich	–	S	2,0	Stand
08	20	S	2,0	Quergang	–	S	2,0	Gangkreuz	–	S	2,0	Gangkreuz
09	–	A	1,8	Wand	20	S	2,0	Gangkreuz	–	S	2,0	Sitzbereich
10	–	A	1,8	Wand/Tür	–	A	1,8	Wand/Tür	–	S	2,0	Gang
11	21	S	2,0	Längsgang	–	S	2,0	Längsgang	21	S	2,0	Gangkreuz
12	–	S	2,0	Längsgang	–	S	2,0	Längsgang	–	S	2,0	Leerbereich
13	–	S	2,0	Längsgang	–	S	2,0	Gangkreuz	22	S	2,0	Bestuhlung
14	–	S	2,0	Quergang	–	S	2,0	Längsgang	–	S	2,0	Gangkreuz
15	22	S	2,0	Gangkreuz	–	S	2,0	Stand	–	A	1,8	Wand
16	–	A	1,8	Wand/Tür	22	S	2,0	Sitzbereich	–	A	1,8	Sitzbereich
17	–	A	1,8	Wand	–	S	2,0	Gang	–	A	1,8	Sitzbereich
18	–	A	1,8	Wand	–	A	1,8	Wand/Tür	–	A	1,8	Sitzbereich
19	04	S	3,2	Längsgang	05	S	3,2	Längsgang	01	S	3,2	Gangkreuz
20	08	S	3,2	Quergang	09	S	3,2	Gangkreuz	03	S	3,2	Sitzbereich
21	11	S	3,2	Längsgang	–	S	2,0	Längsgang	11	S	3,2	Gangkreuz
22	15	S	3,2	Gangkreuz	16	S	3,2	Sitzbereich	13	S	3,2	Bestuhlung
23	–	AU	1,4	Filter	–	AU	1,4	Filter	–	ZU	1,4	Filter
24	–	AB	1,4	Filter	–	AB	1,4	Filter	–	AB	1,2	Filter

- **ID***: zusätzlicher Sensor an derselben Säule auf anderer Höhe
- **Pos** (Sensorposition): **A** (Aufsteller), **S** (Säule); **AU** (Außenluft), **AB** (Abluft), **ZU** (Zuluft)
- **h**: Installationshöhe bezogen auf Sensor Spitze in m

2.7 Abschätzung des Umluftanteils

$$X_{UL} = \frac{\dot{V}_{UL}}{\dot{V}_{ZU}} = \frac{c_{ZU} - c_{AU}}{c_{AB} - c_{AU}} \quad (7)$$

In der Messehalle 3 der FI Europe wurde während des Messebetriebes die RLT-Anlage im Umlufbetrieb betrieben. Auf Basis des Zuluftvolumenstromes und der gemessenen CO₂-Konzentrationen kann der Umluftanteil rechnerisch ermittelt werden. Dafür wird eine Massenbilanz für das in der Luft gemischte CO₂ um die Umluftmischkammer gebildet und entsprechend Gleichung 7 nach dem Umluftanteil der Volumenströme X_{UL} umgestellt.

Analog zu Abbildung 3 entspricht c_{ZU} der CO₂-Zuluftkonzentration, c_{AB} der CO₂-Abluftkonzentration und c_{AU} der CO₂-Außenluftkonzentration.

3 Ergebnisse

Zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen werden Richtwerte des Umweltbundesam-

Tabelle 6 – Annahmen für die CO₂-Produktionsrate \dot{m}_{Prod}

	Gruppe 1 (10 %)	Gruppe 2 (90 %)	Mittelwert
körperliche Aktivität [9]	Stehen	Gehen	–
metabolische Rate in met [9]	1,60	2,80	2,68
\dot{m}_{Prod} in kg/h [11]	0,0366	0,0641	0,0613

tes herangezogen, die sich auch in den Technischen Regeln für Arbeitsstätten wiederfinden. ASR A3.6 führt entsprechend Tabelle 7 Leitwerte zur Beurteilung der CO₂-Konzentration an [1]. Die ergänzende hygienische Beurteilung erfolgt in Anlehnung an den Leitfaden für die Innenraumhygiene in Schulgebäuden des Umweltbundesamtes [13]. Es wird vorausgesetzt, dass die CO₂-Konzentration in der Außenluft bei etwa 410 ppm liegt [14].

Die Ergebnisse der Messkampagne sind in Abbildungen 7 bis 9 dargestellt und werden pro Messsetag auf folgende Weise visualisiert:

- zeitliche CO₂-Konzentrationsverläufe
- nach Installationsort gruppiertes Boxplot-Diagramm
- zeitlicher Verlauf der modellierten mittleren Hallenbelegung der letzten 10 Minuten

Bei den Diagrammen zur mittleren Hallenbelegung sei auf die unterschiedlichen Achsenskalierungen hingewiesen. Im Falle der IndoorAir-Messe beschränkt sich die Auswertung auf den zweiten Veranstaltungstag. Die Besuchszeiten liegen in allen betrachteten Fällen zwischen 9:00 und 18:00 Uhr. Alle Positionen zu den in den nachfolgenden Diagrammen angeführten Sensornummern können Abbildungen 5 und 6 sowie Tabelle 5 entnommen werden.

3.1 Lokale Verteilung der CO₂-Konzentration

3.1.1 IndoorAir 2021

Abbildung 7 zeigt die Ergebnisse des zweiten Tages der **IndoorAir-Messe**. Die zeitlichen Konzentrationsverläufe spiegeln dabei näherungsweise die Belegung der Halle wider. Bereits um 9:00 Uhr und zu Beginn der Besuchszeit liegen die CO₂-Konzentrationen um 40 bis 100 ppm oberhalb der gestrichelt dargestellten Außenluftkonzentration von 400 ppm, was auf das vorzeitige Eintreffen des Standpersonals und die Anwesenheit von Sicherheits- und Reinigungspersonal zurückzuführen ist. Bis zur Mittagszeit um 12:00 Uhr steigen die Konzentrationen auf durchschnittlich etwa 520 ppm an. Die höchste gemessene Konzentration von 556 ppm trat an Sensor 1 an einem Aufsteller in Wandnähe zwischen zwei Standaufbauten auf. Im Gegensatz zu Sensoren in Gangnähe, an denen Besucher häufig lediglich vorbeigehen, sind hier Gespräche und längere Verweilzeiten von Anwesenden an den beiden benachbarten Ständen wahrscheinlich. Dies gilt ebenso für die lokal geringfügig höhere Konzentration an Sensorposition 15, die in Richtung eines Standaufbaus statt zum Gang hin ausgerichtet war. Über den Nachmittag fallen die CO₂-Konzentrationen bis zum Ende der Besuchszeit um 18:00 Uhr wieder auf ihr Anfangsniveau zurück.

In Anbetracht der Messgenauigkeit der Sensoren, die gemäß Herstellerangaben bei 550 ppm eine Abweichung um ± 66 ppm mit entsprechendem Ausgabebereich von 484 bis 616 ppm zulässt, sind darüber hinaus keine signifikanten lokalen Konzentrationsunterschiede zu erkennen. Es ist zu beachten, dass trotz des teilweise abgetrennten Einlass- bzw. Medical-Clearing-Bereiches ohne Standaufbauten die gesamte Halle durchgehend maschinell belüftet wurde. Entsprechend wird auch die gesamte Halle als ein zusammenhängendes Luftvolumen betrachtet, obwohl der Einlassbereich nur als Durchgangsbereich genutzt wird, in dem sich Personen nicht län-

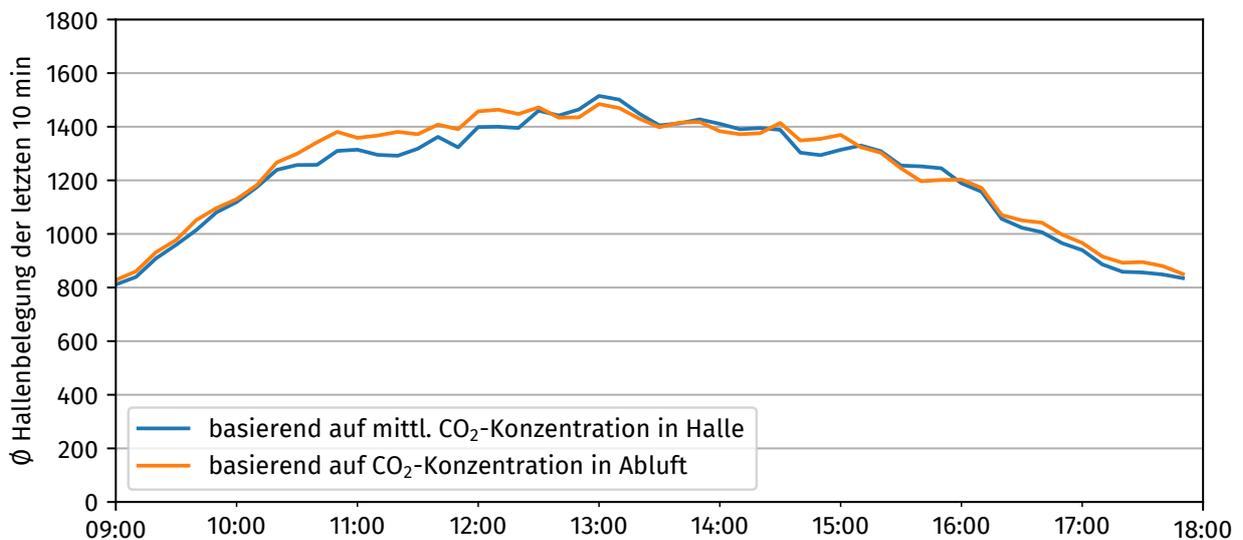
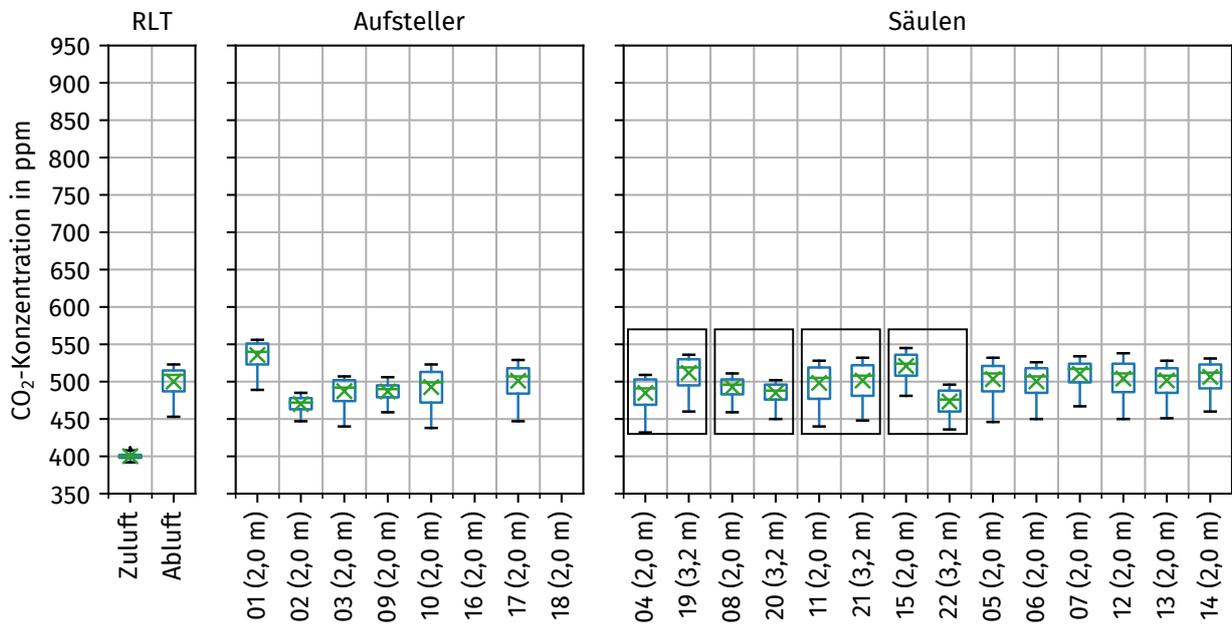
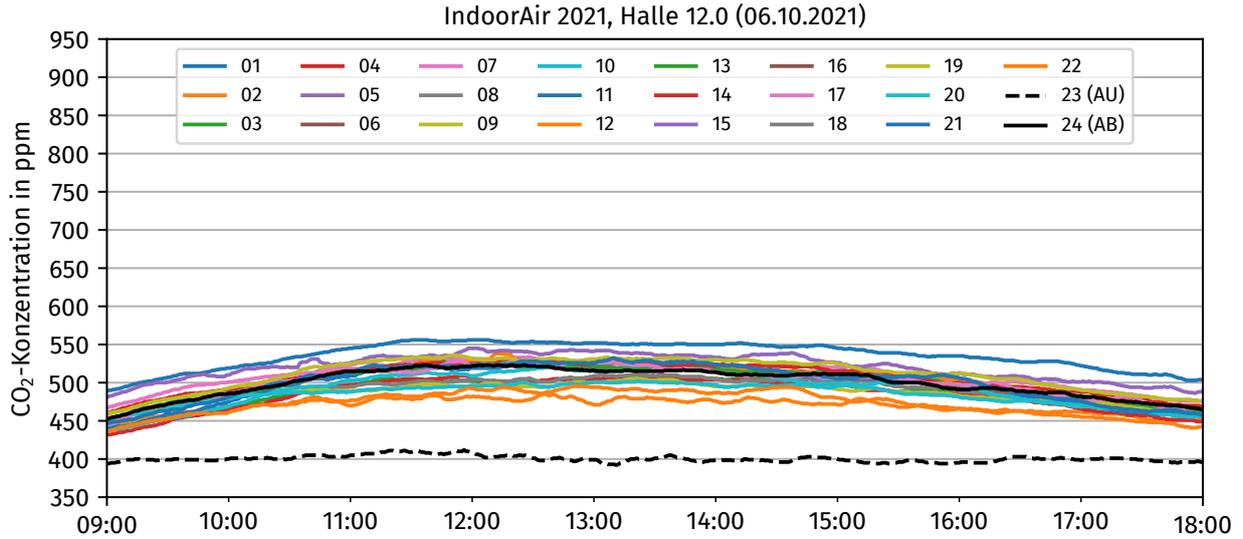


Abbildung 7 – CO₂-Verlauf, Boxplot und abgeschätzte mittlere Belegung (IndoorAir 2021, Tag 2)

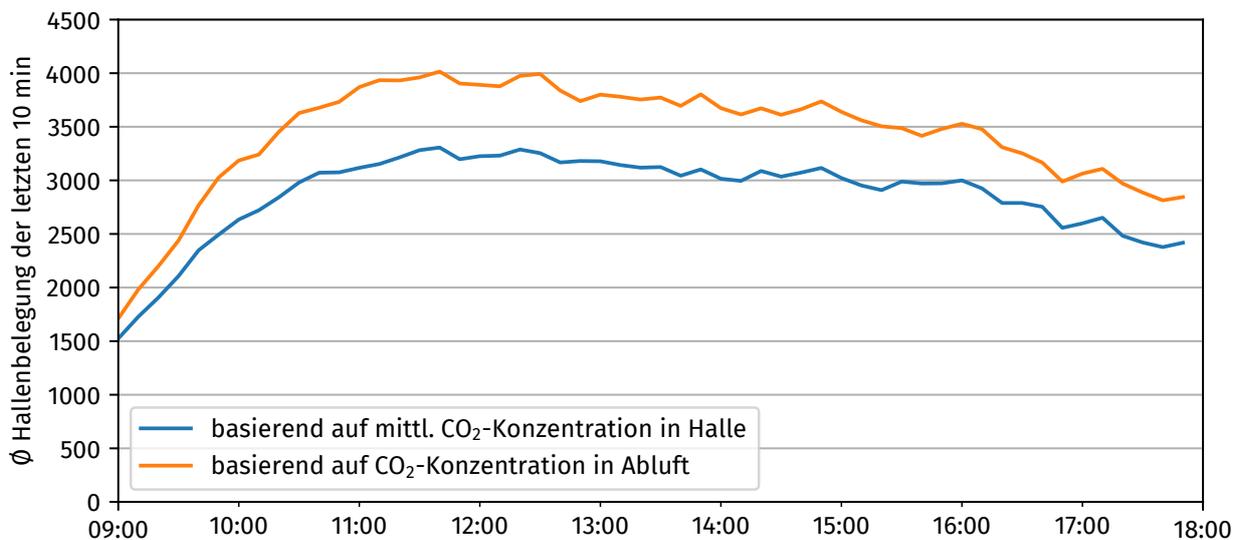
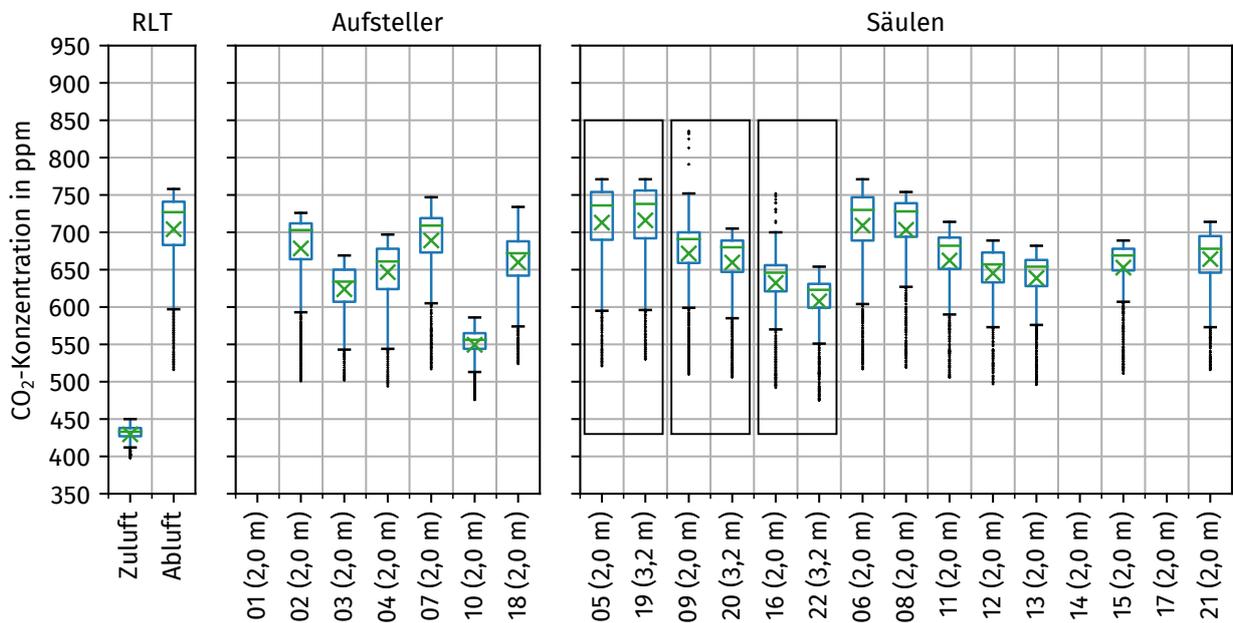
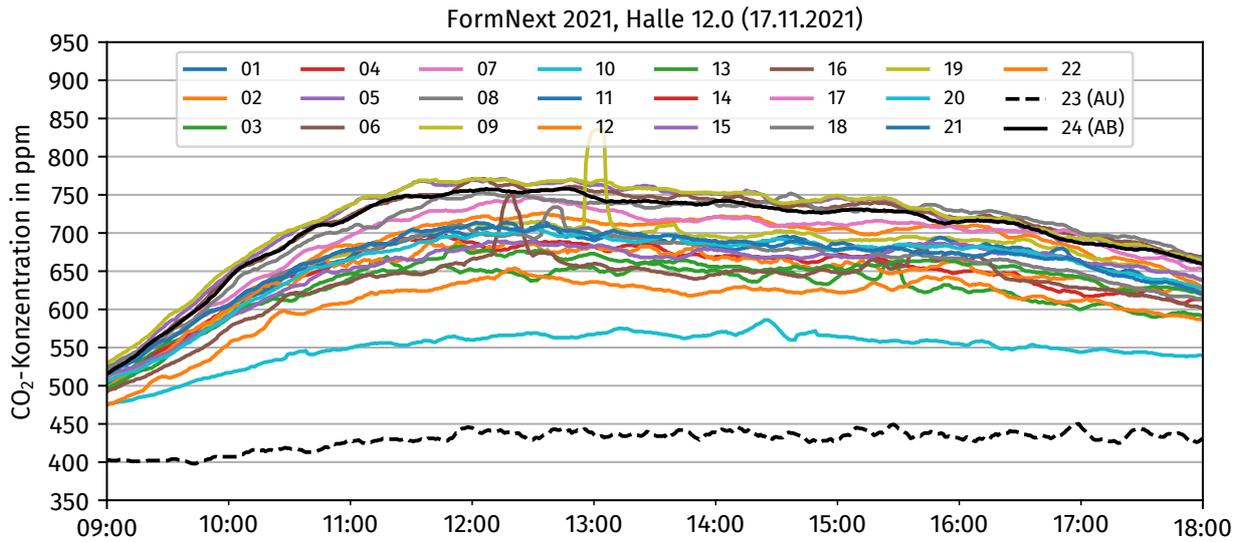


Abbildung 8 – CO₂-Verlauf, Boxplot und abgeschätzte mittlere Belegung (FormNext 2021, Tag 2)

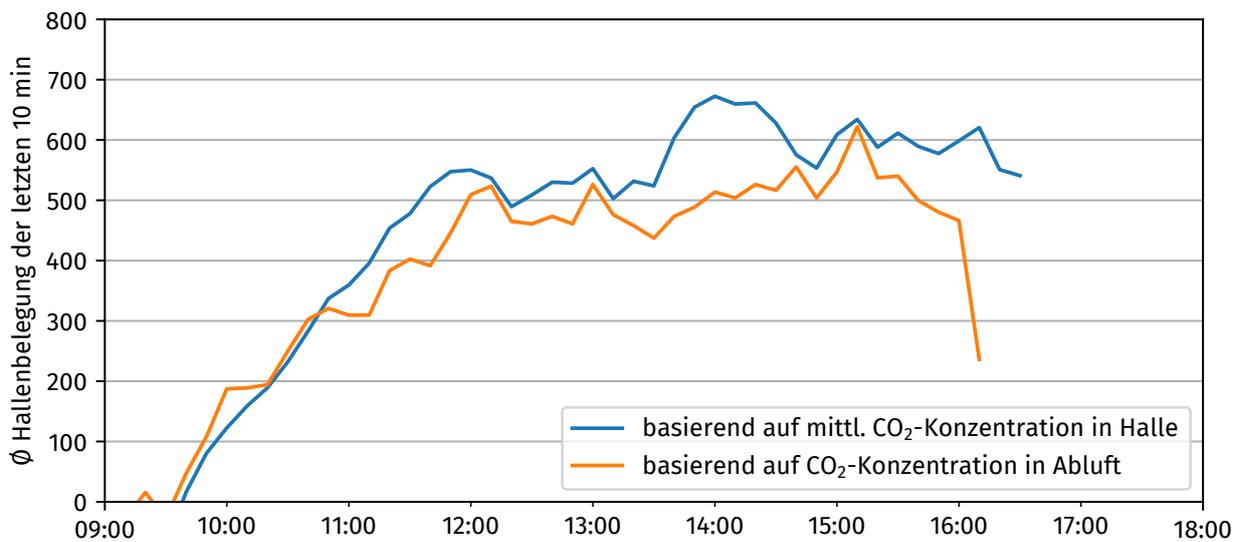
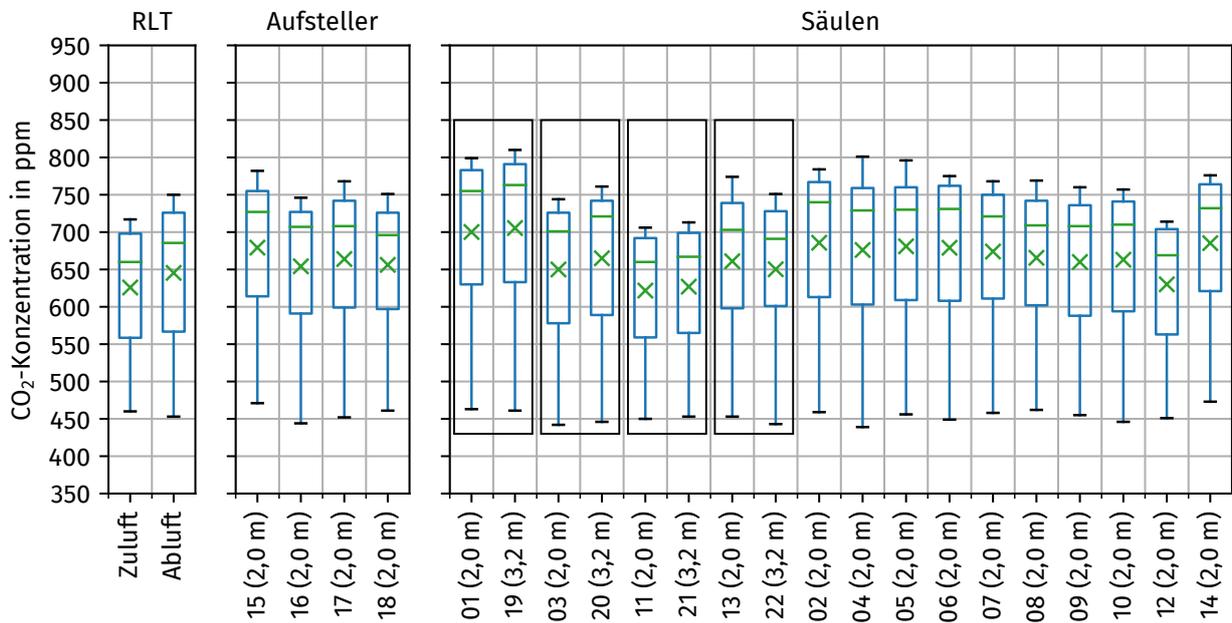
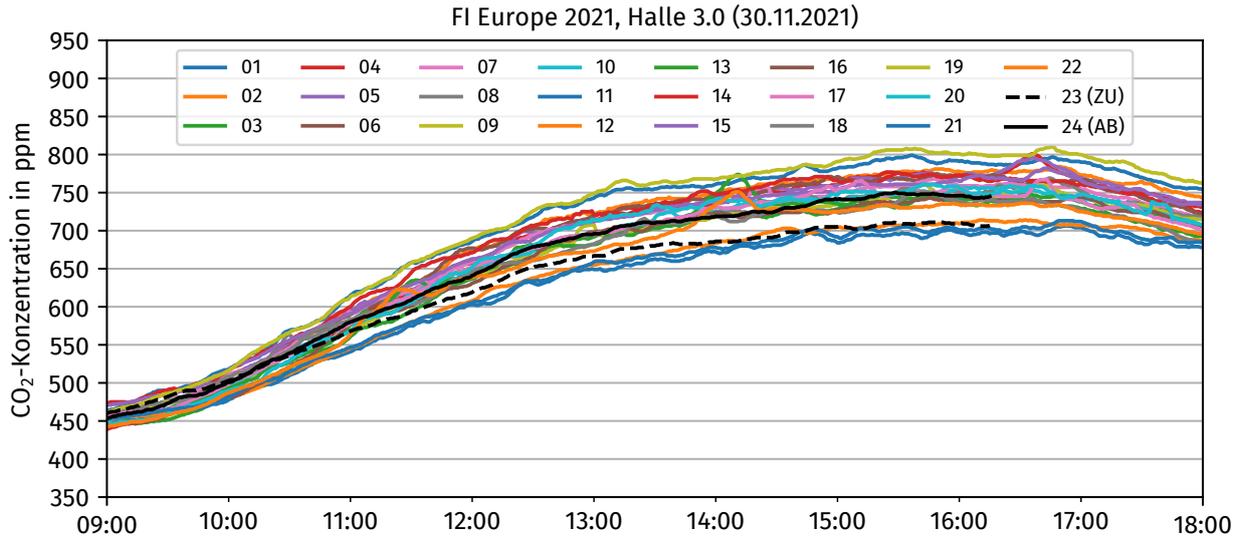


Abbildung 9 – CO₂-Verlauf, Boxplot und abgeschätzte mittlere Belegung (FI Europe 2021, Tag 1)

Tabelle 7 – CO₂-Konzentration als Indikator für die Raumluftqualität [1]

CO ₂ (ppm)	Hygienische Bewertung	Empfohlene Maßnahmen
< 1000	unbedenklich	• keine weiteren Maßnahmen erforderlich
1000 – 2000	auffällig	• Lüftungsverhalten überprüfen/verbessern • Lüftungsplan aufstellen • Lüftungsmaßnahmen (z. B. Luftwechsel erhöhen)
> 2000	inakzeptabel	• weitergehende Maßnahmen erforderlich

gerfristig aufhalten. Im Vergleich zur FormNext-Messe ohne abgetrennten Einlassbereich werden daher größere personenspezifische Luftvolumenströme erwartet. Insgesamt repräsentiert die Konzentration in der Abluft im Mittel zu jeder Zeit die Gegebenheiten im Aufenthaltsbereich der Halle.

3.1.2 FormNext 2021

Im Gegensatz zur kleiner angelegten und nur in Halle 12.0 ausgerichteten IndoorAir-Messe wurde für die internationale **FormNext-Messe** mit deutlich höheren Besucherzahlen gerechnet, was sich in Abbildung 8 anhand höherer CO₂-Konzentrationen widerspiegelt. Ähnlich wie auf der ersten betrachteten Messe steigen ab Beginn der Besuchszeiten die Konzentrationen von 475 und 540 ppm an, bis sie gegen 12:00 Uhr Werte zwischen etwa 650 und 771 ppm erreichen.

Auffällig ist der Verlauf von Sensor 10. Die gemessenen Konzentrationen dieses Sensors liegen mit einer maximalen Konzentration von 586 ppm deutlich unterhalb der gemessenen Konzentrationen der restlichen in der Halle verteilten Sensoren. Die deutlich niedrigeren Konzentrationen können durch die Position des Sensors in der Nähe der Tür am Westeingang erklärt werden, siehe Abbildung 5 (b). Möglicherweise werden durch das Einströmen von Außenluft durch die Eingangstüren deutlich geringere Konzentrationen erreicht. Da die gemessenen Konzentrationen von Sensor 3 an der anderen Seite des Türbereiches am Westeingang bzw. die von Sensor 18 am gegenüberliegenden Osteingang, siehe Abbildung 5 (b), jedoch eher im Bereich der mittleren

Hallenkonzentrationen liegen, kann der Konzentrationsunterschied durch eine mögliche asymmetrische Einströmung der Außenluft durch den Westeingang begründet sein. Weiterhin ist zu beachten, dass Sensor 10 nahe des unteren abgetrennten Hallenbereiches in einem Eckbereich liegt, während Sensor 3 zwischen den viel frequentierten Längsgängen C und D gelegen ist.

Weiterhin sind vereinzelt Spitzen in den Konzentrationsverläufen in Abbildung 8 für die Sensoren 9 und 16 zwischen 12:00 und 13:00 Uhr erkennbar. In beiden Fällen handelt es sich um Sensoren an Säulen in 2 m Höhe (siehe Abbildung 5). Trotz der Positionierung leicht oberhalb der Kopfhöhe kann es zu direkten Einwirkungen durch Personen kommen, die die Sensorik aus nächster Nähe betrachten und durch die Atemluft einen deutlichen Konzentrationsanstieg bewirken. Diese Konzentrationsspitzen sind jedoch nur von kurzer Dauer und beeinflussen die weiteren Verläufe nicht. Dass entsprechende Konzentrationsspitzen nur sehr vereinzelt auftreten, zeigt, dass die Installation der Sensorik im Aufenthaltsbereich während des Messebetriebes von den Anwesenden kaum wahrgenommen wurde. Diese Schlussfolgerung wird auch von Rückmeldungen des Standpersonals und einiger Anwesenden bestätigt.

Die CO₂-Konzentration der Außenluft liegt über die gesamte Besuchszeit gemittelt bei 430 ppm, während die der Abluft durchgehend einen guten Anhaltswert für die obere Konzentration im Aufenthaltsbereich darstellt. Insgesamt deuten die absolut höheren Werte bei dieser Veranstaltung auf größere Anwesenheitszahlen hin. Es ist allerdings weiterhin zu beachten, dass

gemäß Abbildung 5 und anders als bei der IndoorAir-Messe, kein Einlass- bzw. Medical-Clearing-Bereich abgetrennt wurde, sondern die gesamte Grundfläche der Halle 12.0 für Standaufbauten und den Publikumsbetrieb genutzt wurde. Dadurch ist ein entsprechend niedrigerer personenbezogener Luftvolumenstrom im Vergleich zur IndoorAir-Messe zu erwarten.

Auch während dieser Veranstaltung lag die mittlere CO₂-Konzentration in der Halle mit maximal 700 ppm zur Mittagszeit gemäß Vorgaben des Umweltbundesamtes im hygienisch unbedenklichen Bereich [13]. Gemäß Herstellerangaben ergeben sich hierfür eine zulässige Abweichung von ± 71 ppm und somit ein zulässiger Ausgabebereich zwischen 629 und 771 ppm. Tatsächlich liegen alle Konzentrationen zu dieser Zeit im Bereich von 650 und 750 ppm und somit - trotz der im Vergleich zur IndoorAir-Messe höheren absoluten Werte und Spannweite - im Bereich der Messgenauigkeit. Aus diesem Grund kann auch in diesem Fall die Interpretation potentieller lokaler Konzentrationsunterschiede nur unter Vorbehalt erfolgen und kein signifikanter Unterschied erkannt werden.

3.1.3 FI Europe 2021

Bei der dritten betrachteten Veranstaltung **FI Europe** steigen die CO₂-Konzentrationen entsprechend Abbildung 9 von etwa 460 ppm zu Beginn der Besuchszeit bis nachmittags um 16:00 Uhr an. Hier werden Werte zwischen 700 und 800 ppm erreicht, die bei derselben Spannweite von 100 ppm absolut um 50 ppm höher liegen als bei der FormNext-Messe. Das spätere Erreichen der maximalen Konzentration in der Halle im Nachmittag könnte darauf zurückzuführen sein, dass gemäß Tabelle 1 auf dieser Messe der erste und nicht der zweite Veranstaltungstag messtechnisch begleitet wurde und so möglicherweise einige Anwesende erst im Laufe des Tages angereist sind.

Leicht unterhalb des Mittelwerts liegende Konzentrationen traten an Positionen 12, 11 und 21 auf, wobei die letzteren beiden an derselben

Säule auf unterschiedlichen Höhen installiert waren. Diese Sensoren befinden sich in der Nähe eines kleinen Sitzbereiches und zeigen zum angrenzenden Gangkreuz. Sensor 12 zeigte während der Messung vom Gangbereich weg zu einer nicht besetzten und mit zwei Trennwänden teilweise abgegrenzten Leerfläche ohne Sitzgelegenheiten, was für die geringeren CO₂-Konzentrationen verantwortlich sein könnte. Geringfügig höhere Konzentrationen als im Mittel traten dagegen an einer am Rande eines Standaufbaus und direkt neben einer Sitzgelegenheit mit Sofa gelegenen Säule an Sensoren 1 und 19 auf, die zudem direkt zum Gang ausgerichtet waren.

Weiterhin fällt auf, dass die gestrichelte Linie nicht wie bei den vorherigen Messungen die Außenluftkonzentration repräsentiert. Stattdessen handelt es sich um die Zuluftkonzentration an der in Abbildung 3 dargestellten Messposition nach der Mischkammer der RLT-Anlage. Die Differenz der CO₂-Konzentration zwischen Zu- und Abluftkonzentration ist bei dieser Anlage sehr gering. Zwischen 9:00 und 10:00 Uhr scheint die Zuluftkonzentration sogar geringfügig oberhalb der Abluftkonzentration zu liegen, was in dieser Studie auf die beschränkte Messgenauigkeit der eingesetzten Sensoren zurückgeführt wird. Gegen 10:30 Uhr kreuzen sich die beiden Kurvenverläufe und divergieren, bis im Nachmittagsbereich eine maximale Differenz von etwa 39 ppm erreicht ist. Dass beide Kurvenverläufe gegen 16:30 Uhr enden, ist auf einen frühzeitigen Abbau der Sensorik in der RLT-Anlage aus organisatorischen Gründen zurückzuführen.

Bei dieser Messe wurde die RLT-Anlage im Umluftbetrieb betrieben. Laut Betreiber waren während des Betriebes die Außenluftklappen um 70 % geöffnet. Mithilfe von Gleichung 7 wird der Umluftanteil über den Tag gemittelt zu etwa 90 % berechnet. Hier sei zu beachten, dass die tatsächliche Außenluft-CO₂-Konzentration in diesem Fall nicht gemessen wurde und hier ein Wert von 410 ppm angenommen wird [14]. Trotz des somit sehr geringen Außenluftanteiles lag die Konzentration über den gesamten Tag verteilt

gemäß Umweltbundesamt im hygienisch unbedenklichen Bereich [13].

Wird die in der Abluft gemessene CO₂-Konzentration zur Regelung des Außenluftvolumenstromes genutzt, kann ein zusätzlicher Umluftanteil, der selber nicht zum Absenken der CO₂-Konzentration beiträgt, den Gesamtluftvolumenstrom und somit den Impulseintrag in die Raumluftströmung erhöhen, was zum Einstellen einer Mischlüftung beiträgt.

3.2 Vertikale CO₂-Schichtung

Um eine potentielle vertikale Luftschichtung festzustellen, werden die Boxplot-Diagramme in Abbildungen 7 bis 9 herangezogen, in denen die jeweils an derselben Säule auf verschiedenen Höhen installierten Sensoren gruppiert dargestellt sind.

Einige der Sensorpaare befinden sich in unmittelbarer Nähe zu **Sitzgelegenheiten** und *rest areas*. Sensorpaar 16/22 auf der Formnext zeigt entsprechend in Richtung eines von Standaufbauten freien Bereiches mit zahlreichen länglichen Sitzgelegenheiten in einer sog. *introducing stage*. Die Entfernung zum nächstgelegenen Sitzplatz beträgt etwa 2 m. Bei der FI Europe wurde Sensorpaar 01/19 neben dem Sofa eines Standaufbaus installiert, während direkt an der Säule von Sensorpaar 03/20 unmittelbar unterhalb der Sensoren ein Sitz positioniert war. Beide Positionen waren während der Messe über lange Zeiten von Personen besetzt. Sensorpaar 13/22 der FI Europe wurde weiterhin direkt auf einen fest bestuhlten **Vortragsbereich** mit Podium ausgerichtet. Gemäß Tabelle 5 wurden weiterhin Ausrichtungen zu **Längs- und Quergängen** sowie zu **Gangkreuzen** gewählt, um möglichst viele verschiedene für einen Messebetrieb charakteristische Bereiche abzudecken.

Bei einem globalen Vergleich der Sensorpaare fällt auf, dass in Gangbereichen geringfügig höhere Konzentrationen auftreten als in designierten Sitzbereichen, wobei die Ergebnisse der IndoorAir wegen der sehr geringen absoluten Kon-

zentrationen hier ausgeklammert sind. Grund hierfür könnte der im Vergleich zu sitzenden Personen geringere Abstand zwischen Sensoren und der Kopfhöhe gehender Personen sein. Ein Vergleich der Sensoren auf 2,0 und 3,2 m Höhe pro Säule zeigt dagegen keine eindeutige vertikale Konzentrationsschichtung über der Raumhöhe – auch dann nicht, wenn die verschiedenen Installationsorte und Ausrichtungen zu Stand- bzw. Gangbereichen berücksichtigt werden. Während an einigen Säulen in 3,2 m Höhe geringfügig niedrigere Konzentrationen als auf 2 m verzeichnet werden, zeigt sich an anderen ein gegenläufiger Trend.

Vor dem Hintergrund der bereits erwähnten Messgenauigkeit und der vergleichsweise geringen absoluten Konzentrationen sind somit keine eindeutigen Schichtungseffekte feststellbar und die Ergebnisse bekräftigen eine insgesamt gute Mischung der Luft innerhalb des untersuchten Aufenthaltsbereiches.

3.3 Abschätzung der Hallenbelegungen anhand der CO₂-Konzentrationen

Voraussetzung für die in Abschnitt 2.6 vorgestellte Methodik zur Abschätzung der mittleren Hallenbelegung ist eine ideale Mischung der Luft in der Messehalle, die entsprechend der in Abschnitten 3.1 und 3.2 vorgestellten Ergebnisse als hinreichend gegeben angesehen wird.

In Abbildungen 7 bis 9 sind jeweils unten die durchschnittlichen Hallenbelegungen der letzten 10 Minuten dargestellt, wobei für die Berechnung einmal die gemessene mittlere CO₂-Konzentration und zum Vergleich die der Abluft gemessene Konzentration herangezogen wird. Während auf der IndoorAir- und FormNext-Messe die RLT-Anlagen gemäß Tabelle 2 mit 100 % Außenluft betrieben wurden, fand während der FI Europe ein Umluftbetrieb mit einem in Abschnitt 3.1 zu etwa 10 % berechneten Außenluftanteil statt.

Die berechneten Anwesenheitszahlen der **IndoorAir** liegen für beide betrachteten CO₂-

Konzentrationsverläufe dicht beieinander, da die Konzentration in der Abluft näherungsweise der mittleren Hallenkonzentration entspricht. Mit den zu Beginn der Besuchszeit für 9:00 Uhr berechneten 800 Anwesenden dürfte dabei die tatsächliche Belegung etwas überschätzt werden. Insgesamt steigt die modellierte Hallenbelegung bis zum Mittag an und fällt anschließend analog zur mittleren CO₂-Konzentration zum Tagesende wieder auf ihr Anfangsniveau ab. Die im frühen Nachmittag erreichte Maximalbelegung von etwa 1484 Anwesenden stimmt gut mit den geplanten Besuchszahlen von insgesamt etwa 5000 Personen für die dreitägige Veranstaltung überein. Genaue Angaben für die tatsächlichen Anwesenheitszahlen liegen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nicht vor. Wird das gesamte Luftvolumen der Halle 12.0 einschließlich des abgetrennten Einlass- bzw. Medical-Clearing-Bereiches betrachtet, ergibt sich bei 1500 Anwesenden ein personenbezogener Luftvolumenstrom von 282 m³/h bzw. 78,3 L/s.

Für die **FormNext-Messe** liegt die für die Abluftkonzentration berechnete Anwesenheit im Vergleich zu der der mittleren CO₂-Konzentration durchgehend etwas höher, da die Abluftkonzentration, wie an den zeitlichen Konzentrationsverläufen erkennbar ist, am oberen Ende der Spannweite liegt. Gleichzeitig bedeutet dies, dass der im Abluftkanal gemessene Wert in diesem Fall zu einer konservativen Abschätzung der Hallenbelegung führt. Auch bei dieser Veranstaltung deckt sich die durch den Betreiber erwartete Hallenbelegung mit dem auf Basis der CO₂-Konzentration abgeschätzten Anwesenheitsprofil. Bis zum Mittag steigt die Anwesenheit an und fällt anschließend etwas langsamer als bei der IndoorAir wieder ab, ohne bis zum Ende der offiziellen Besuchszeit das Anfangsniveau zu erreichen. Die maximale Hallenbelegung von etwa 4015 Personen gegen Mittag entspricht einem personenbezogenen Volumenstrom von etwa 105 m³/h bzw. 29 L/s und stimmt ebenfalls mit den geplanten und tatsächlichen Anwesenheitszahlen in Tabelle 1 überein. Diese Zahlen umfassen alle drei Hal-

lenebenen und vier Messetage und können somit nicht genauer aufgeschlüsselt werden.

Während der **FI Europe** war die direkte Messung der Außenluftkonzentration nicht möglich. Weiterhin wurden die RLT-Anlagen mit Umluftanteil betrieben, der gemäß Formel 7 zu 90 % berechnet wurde. Zusammen mit den sich gegen 10:00 Uhr kreuzenden Kurvenverläufen der Zu- und Abluftkonzentration sowie der sehr geringen Spannweite von maximal 39 ppm konnte entsprechend Abbildung 9 kein die tatsächlichen Gegebenheiten widerspiegelnder Verlauf der Hallenbelegung modelliert werden. Die abgeschätzte Hallenbelegung mit maximal 621 bis 672 Personen unterschätzt in diesem Fall die tatsächliche Hallenbelegung.

Für die ersten beiden betrachteten Messen, für die IndoorAir und die FormNext, konnte mit der vorgestellten Modellierung die Hallenbelegung trotz zahlreicher getroffener Annahmen schlüssig und annähernd den tatsächlichen Gegebenheiten entsprechend abgeschätzt werden. Die Abschätzung kann dabei umso genauer stattfinden, je mehr Erfahrungswerte und Informationen bezüglich durchschnittlicher Aufenthaltsdauern sowie der Anteile sitzender, stehender und gehender Personen den Veranstaltern bekannt sind.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen einer Messkampagne auf dem Gelände der Messe Frankfurt wurden im Herbst 2021 drei verschiedene Veranstaltungen messtechnisch untersucht. Während aller Veranstaltungen wurde an 24 Messstellen in Gang-, Stand-, Wand- und Aufenthaltsbereichen sowie den raumlufttechnischen Anlagen die CO₂-Konzentration gemessen, die als Indikator für die vom Menschen verursachte Verunreinigung der Luft in Innenräumen genutzt werden kann. Auf Basis dieser in situ erfassten Daten, die mit regulärem Publikumsbetrieb gewonnen wurden, können die Mischung der Raumlufte und somit die potentiellen Kon-

zentrationsschichtungen im Aufenthaltsbereich in sehr großen Hallen bewertet werden.

Die Ergebnisse zeigen eine gute Mischung der Hallenluft während der drei untersuchten Veranstaltungen. Während an Messpositionen in weniger frequentierten Randbereichen oder nahe von Türen zu Außenbereichen leicht geringere Werte festgestellt wurden, ließen sich insgesamt keine signifikanten Unterschiede der CO₂-Konzentrationen innerhalb des Aufenthaltsbereiches feststellen. Auch eine zusätzliche Messung oberhalb des Aufenthaltsbereiches in 3,2 m Höhe zeigte keine eindeutigen vertikalen Schichtungseffekte.

Eine Messung der CO₂-Konzentration in der Abluft einer RLT-Anlage kann für diesen Fall daher die Luftqualität im Aufenthaltsbereich – und somit auch die zu erwartende von Anwesenden verursachte Aerosolkonzentration – gut widerspiegeln. Ein Nachrüsten von hochwertiger CO₂-Sensorik in der Abluft der RLT-Anlagen ist kostengünstig und nachträglich zu realisieren. Eine regelmäßige Überprüfung der Sensoren ist auf Basis der gemachten Erfahrungen zu empfehlen. Die in der Abluft gemessene CO₂-Konzentration kann auch für die Regelung des Außenluftvolumenstromes einer RLT-Anlage eingesetzt werden.

Alle während der drei Messen gemessenen CO₂-Konzentrationen lagen mit maximal 835 ppm durchgehend und deutlich unterhalb von 1000 ppm, womit die Luftqualität gemäß aller bekannten Vorgaben und Normen als hygienisch unbedenklich einzustufen ist. In Verbindung mit weiteren Maßnahmen aus einem abgestimmten Hygienekonzept spricht daher aus lüftungstechnischer Sicht nichts gegen eine Durchführung von Messen. Die Luftqualität kann und sollte dabei immer durch Messung der CO₂-Konzentration kontinuierlich überwacht werden.

Für zwei der Messen (IndoorAir und FormNext) konnte gezeigt werden, dass auf Basis der CO₂-Außenluft- und Abluftkonzentration sowie des Gesamtvolumenstromes der raumlufttechnischen Anlagen eine zeitaufgelöste Berechnung

der Besucherzahlen zu plausiblen Ergebnissen führt. Diese Methodik erlaubt es, eine gewünschte oder als kritisch angesehene Besucherdichte in einer Messehalle zu überwachen. Außerdem kann auf Basis dieser berechneten Besucheranzahl eine genaue Einhaltung einer personenbezogenen Außenluftmenge regelungstechnisch umgesetzt werden.

Danksagung und Finanzierung

Die Verantwortung für den Inhalt liegt allein bei den Autoren. Alle Messungen wurden vom Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH Aachen gemeinsam mit der Heinz Trox Wissenschafts gGmbH durchgeführt.

Die dreitägige Messkampagne auf der IndoorAir 2021 wurde durch die Heinz Trox Wissenschafts gGmbH gefördert. Mit den jeweils eintägigen Messungen auf der FormNext 2021 und der FI Europe 2021 wurde die RWTH Aachen von der Messe Frankfurt beauftragt.

Literatur

- [1] Bundesministerium für Arbeit und Soziales. Technische Regeln für Arbeitsstätten – Lüftung – ASR A3.6, 2012.
- [2] Cali, D., Matthes, P., Huchtemann, K., Streblow, R., und Müller, D. CO₂ based occupancy detection algorithm: Experimental analysis and validation for office and residential buildings. *Building and Environment*, 86:39–49, 2015. ISSN 03601323. doi:[10.1016/j.buildenv.2014.12.011](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.011).
- [3] Dahmen, W. und Reusken, A. *Numerik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin und Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-76492-2.
- [4] DIN EN ISO 7726. Umgebungsklima – Instrumente zur Messung physikalischer Größen. Norm, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2021.

- [5] Kriegel, M., Buchholz, U., Gastmeier, P., Birschhoff, P., Abdelgawad, I., und Hartmann, A. Predicted Infection Risk for Aerosol Transmission of SARS-CoV-2. 2020. doi:10.1101/2020.10.08.20209106.
- [6] Mesago. Formnext – Where ideas take shape., 2021. URL <https://formnext.mesago.com/frankfurt/de.html>.
- [7] Messe Frankfurt. Die Indoor-Air 2021, 2021. URL <https://indoorair.messefrankfurt.com/frankfurt/de.html>.
- [8] Messen.de. Food Ingredients Europe Frankfurt, 2021. URL <https://www.messen.de/de/600/frankfurt-am-main/food-ingredients-europe-frankfurt/info>.
- [9] Müller, D., Rewitz, K., Derwein, D., Burgholz, T. M., Schweiker, M., Bardey, J., und Tappler, P. Vereinfachte Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen (2. überarbeitete und korrigierte Auflage). 2021. doi:10.18154/RWTH-2021-02417.
- [10] Nienaber, F., Wolf, S., Wesseling, M., Calì, D., Müller, D., und Madsen, H. Validation, optimisation and comparison of carbon dioxide-based occupancy estimation algorithms. *Indoor and Built Environment*, 29(6):820–834, 2020. ISSN 1420-326X. doi:10.1177/1420326X19871332.
- [11] Persily, A. und de Jonge, L. Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor air*, 27(5):868–879, 2017. ISSN 0905-6947. doi:10.1111/ina.12383.
- [12] Testo. *Klima-Messgeräte. Datenblatt testo 440 und testo 440 dP*, 2021. URL <https://static-int.testo.com/media/d1/bo/3ccc561e5bff/testo-440-Datasheet-1980-1211-15.pdf>.
- [13] Umweltbundesamt. Leitfaden für die Innenraumlufthygiene in Schulgebäuden, 2008. URL <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3689.pdf>.
- [14] Umweltbundesamt. Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen: Kohlendioxid, 2020. URL <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen/>.