



# Verbesserung der Luftqualität in Schulen (ImpAQS): eine Längsschnittstudie zur Belüftung und Innen- raumluftqualität in österreichischen Klassenräumen - Endbericht

Hrsg. Robert Scot McLeod, Christina Johanna Hopfe




## Danksagung zur Finanzierung

Die Mittel für dieses Projekt wurden vom österreichischen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF) im Jahr 2023 bereitgestellt. Dieses Ministerium wurde inzwischen umstrukturiert, und 2025 wurde das österreichische Bundesministerium für Bildung (BMB) gegründet. Wir danken dem BMB und seinem Vorgänger, dem BMBWF, für die Unterstützung dieser Forschungsstudie, die im Rahmen der Initiative #TruSD: „Vertrauen in Wissenschaft und Demokratie“ durchgeführt wurde.

## Haftungsausschluss

Dieser Bericht wird dem Bundesministerium für Bildung (BMB) der österreichischen Regierung im Namen des ImpAQS-Projektteams an der Technischen Universität Graz (TU Graz) (zusammenfassend als „Projekt“ bezeichnet) zur Verfügung gestellt. Jedes Mitglied des Projekts lehnt ausdrücklich Zusicherung oder Gewährleistung hinsichtlich der Richtigkeit oder Vollständigkeit der in diesem Bericht enthaltenen Materialien und Informationen ab, und keines der Mitglieder haftet, unabhängig von Fahrlässigkeit oder Verschulden, für in diesem Bericht enthaltene Aussagen oder für Auslassungen in diesem Bericht. Unter keinen Umständen haftet das Projekt (oder die TU Graz) für Schäden, Ansprüche, Klagen, Verluste, Rechtskosten oder sonstige Kosten, die sich aus der Verwendung dieses Berichts oder eines Teils davon oder aus der Verwendung anderer Daten oder Informationen, die in Verbindung mit dem Projekt oder dem Bericht erstellt wurden, ergeben.

 **Bundesministerium  
Bildung, Wissenschaft  
und Forschung**

 **Bundesministerium  
Bildung**

Verbesserung der Luftqualität in Schulen (ImpAQS): eine Längsschnittstudie zur Belüftung und Innenraumluftqualität in österreichischen Klassenräumen - Endbericht

Version v 1.0 (28. Mai 2025)

Diesen Bericht zitieren als:

McLeod, R.S., Hopfe, C.J., Villanova, L., Pollozhani, F., Gustin, M., Perkovic, T., Aznira, M. (2025) Verbesserung der Luftqualität in Schulen (ImpAQS): eine Längsschnittstudie zur Belüftung und Innenraumluftqualität in österreichischen Klassenräumen - Endbericht. Graz, Österreich: Technische Universität Graz.

ISBN 978-3-99161-056-4, DOI 10.3217/978-3-99161-056-4

Verfügbar unter <https://www.tugraz.at/en/institutes/ibpsc/research/research-projects/completed-projects>.

Herausgeber*innen:	Robert Scot McLeod, ORCID 0000-0001-7204-6268 Christina Johanna Hopfe, ORCID 0000-0002-8921-2098
Redaktionelle Unterstützung:	Fatos Pollozhani
Autor*innen:	Robert S McLeod, Christina J Hopfe, Laura Villanova, Fatos Pollozhani, Matej Gustin, Tijana Perkovic, Meita Aznira
Gestaltung:	Robert Scot McLeod
Titelbild:	Shutterstock ID: 466062413, Ground Picture Seriennummer: US-071A032A5-1

2025 Verlag der Technischen Universität Graz

[www.tugraz-verlag.at](http://www.tugraz-verlag.at)

ISBN 978-3-99161-056-4

DOI 10.3217/978-3-99161-056-4



Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0) Lizenz.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.en>

Diese CC-Lizenz gilt nicht für das Cover, Material von Dritten (die anderen Quellen zugeschrieben werden) und anderweitig gekennzeichnete Inhalte.



## Kurzfassung

**ImpAQS (Improving Air Quality in Schools)** untersuchte im Schuljahr 2023/24 die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die Belüftungsraten sowie die Umweltdaten in Innenräumen und im Freien in 1200 österreichischen Klassenzimmern, die über die 9 Bundesländer Österreichs verteilt sind. Im Rahmen der Studie wurde auch der Nutzen der Installation von CO<sub>2</sub>-Sensoren in Klassenzimmern zur Verbesserung der Lüftungspraktiken und zur Verringerung des Risikos von luftübertragenen Krankheiten untersucht. Die Studie wurde vom BMBWF finanziert und ist eine der größten und umfassendsten Studien zu Belüftung und Luftqualität, die bisher an österreichischen Schulen durchgeführt wurden.

Die im Rahmen des ImpAQS-Projekts erfassten CO<sub>2</sub>-Daten deuten darauf hin, *dass die bestehenden europäischen und österreichischen Lüftungsrichtlinien in Schulen weitestgehend nicht eingehalten werden*. Die Ergebnisse zeigten, dass weniger als 25 % der Schulen in der Lage sind, eine jährliche tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration unter dem bestehenden Richtwert von 1000 ppm (BMK, 2024) zu halten. In mehr als einem Viertel des Schuljahres wurde der empfohlene Mindestluftvolumenstrom von 4 l/(s·Person) (ÖNORM EN 16798-1:2024) nicht eingehalten. Im Winter ist die Situation noch schlimmer: In weniger als 12 % der Schulen lag die tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration unter dem Schwellenwert von 1000 ppm.

Es gibt erhebliche Unterschiede zwischen den Schulen. Der tägliche Mittelwert zwischen den 10 besten und den 10 schlechtesten Schulen im Winter betrug mehr als 1000 ppm. Auch je nach Schultyp, Bundesland und Lüftungsart wurden erhebliche Unterschiede festgestellt. Bemerkenswert ist, dass es keine einzige Schule gab, die das ganze Jahr über die bestehenden Richtlinien einhielt. In den schlimmsten Fällen lagen die stündlichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werte in einigen Unterrichtsstunden fast siebenmal über dem Richtwert (über 6900 ppm), wobei in kürzeren Zeitabständen noch höhere Werte gemessen wurden.

Qualitative Umfragen, die parallel zur quantitativen Überwachung durchgeführt wurden, zeigten, dass die Lüftungspraktiken stark von zwei Hauptfaktoren beeinflusst werden: der Raumlufttemperatur und dem Außenlärm. In vielen Fällen wurde festgestellt, dass physische Hindernisse eine angemessene natürliche Belüftung behindern (z. B. Fensterbegrenzer oder ungesicherte, nach innen öffnende Fenster, die mit den Tischen kollidieren).

Zu den Faktoren, die die Einhaltung der CO<sub>2</sub>-Ziele beeinflussen, gehören die Belegungsdichte (Anzahl der Schüler\*innen pro Klassenzimmer), die Außen- und Innenlufttemperaturen sowie die Lüftungsmethode (mechanisch oder natürlich). Beispielsweise weisen mechanisch belüftete Klassenzimmer bei Außenlufttemperaturen von 10 °C oder darunter im Durchschnitt 450–600 ppm niedrigere tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf als natürlich belüftete Schulen. Während mechanisch belüftete Schulen insgesamt besser abschnitten, gehörten drei natürlich belüftete Schulen zu den zehn leistungsstärksten Schulen. Ihre niedrigen CO<sub>2</sub>-Werte lassen sich auf das sorgfältige Öffnen der Fenster durch die Nutzenden, eine überdurchschnittlich hohe räumliche Dichte in den Klassenzimmern (mehr als 3,2 m<sup>2</sup> pro Schüler\*in) und große, uneingeschränkt zu öffnende Fenster zurückführen.

Es sollte auch beachtet werden, dass in einigen Fällen mechanische Lüftungssysteme aufgrund hoher Betriebskosten dauerhaft abgeschaltet waren, was auf ein großes Hindernis für ihren Einsatz in finanziell benachteiligten Schulen hinweist.

Vier wichtige Außenluftschadstoffe ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$ ) wurden in der Nähe der ImpAQS-Schulen anhand von Daten des Umweltbundesamtes (UBA) bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Mehrheit der Messstationen die Referenzwerte der Weltgesundheitsorganisation (WHO) für jeden Schadstoff überschritt, wobei einige Standorte Mittelwerte über den Schwellenwerten aufwiesen, die nicht mehr als dreimal pro Jahr überschritten werden sollten. Trotz dieser Ergebnisse gaben die Lehrer\*innen an, dass die Luftverschmutzung im Freien kein großes Hindernis für das Öffnen der Fenster darstelle. Diese Situation legt nahe, dass die Verwendung einer mechanischen Belüftung mit geeigneten Partikel- und/oder Aktivkohlefiltern empfohlen werden sollte, um die Gesundheit der Schüler\*innen und Lehrkörper in den am stärksten betroffenen Schulen zu schützen.

Eine analytische Modellierung des Infektionsrisikos durch das SARS-CoV-2-Virus hat gezeigt, dass Klassenzimmer mit niedrigeren jährlichen mittleren  $CO_2$ -Raten (und entsprechend höheren Luftwechselraten) ein viel geringeres Infektionsrisiko über das ganze Jahr hinweg aufwiesen. Die Ergebnisse zeigten, dass eine Erhöhung des Außenluftvolumenstroms von  $7,4 \text{ l/(s}\cdot\text{Person)}$ , dem jährlichen Mittelwert der täglichen Außenluftvolumenströme in der Stichprobe, auf  $14 \text{ l/(s}\cdot\text{Person)}$  das Risiko, dass mindestens eine Person im Klassenzimmer während des Schultags infiziert wird, um etwa 30 % senken könnte. Dieses Risiko könnte weiter um ca. 45 % reduziert werden, wenn höhere „gesundheitsbasierte“ Luftvolumenströme genutzt werden (wie sie in der ASHRAE-Norm 241 empfohlen werden). Diese empfiehlt einen minimalen äquivalenten Luftvolumenstrom von  $20 \text{ l/(s}\cdot\text{Person)}$ , wobei ein Teil dieses Luftstroms auch aus Umluft stammen kann, die durch HEPA-Filter gereinigt wird. Diese Berechnungen basieren auf der Annahme, dass sich eine infizierte Person in einem Klassenzimmer mit 25 Personen befindet. Hierbei handelt es sich um ein Worst-Case-Szenario, das nur unter bestimmten Bedingungen eintreten würde, beispielsweise während einer Hochphase einer COVID-19-Welle. In diesem Sinne stellen diese Schätzungen potenzielle Risiken dar und nicht die tatsächlichen täglichen Wahrscheinlichkeiten. Die Pearson-Korrelationsanalyse ergab eine moderate Assoziation zwischen Infektionsrisiko und Fehlzeiten (0,554) während des gesamten Schuljahres. Dieses Ergebnis könnte durch den reduzierten Datensatz zu Fehlzeiten (bei dem nur 40 % der Schulen Daten übermittelten) und durch die Tatsache beeinflusst worden sein, dass nur Assoziationen mit SARS-CoV-2 untersucht wurden, nicht jedoch mit anderen zirkulierenden luftübertragenen Viren.

Der Einsatz von sichtbaren  $CO_2$ -Monitoren und Lüftungsempfehlungen machte einen signifikanten Unterschied bei den Lüftungspraktiken in natürlich belüfteten Klassenzimmern im Vergleich zu ähnlichen Klassenzimmern ohne sichtbare Informationen. Im Jänner meldete ein Viertel der natürlich belüfteten Klassen (mit sichtbaren  $CO_2$ -Monitoren)  $CO_2$ -Konzentrationen, die 500 ppm niedriger waren als in den entsprechenden Klassenzimmern ohne sichtbare Sensoren. Dieses Ergebnis zeigt den Mehrwert des Einsatzes von  $CO_2$ -Sensoren in natürlich belüfteten Klassenzimmern (mit sichtbaren Ampelsystemen), insbesondere in den kälteren Monaten.

Im Allgemeinen wurde die Installation von CO<sub>2</sub>-Sensoren von der Mehrheit der Klassenlehrer\*innen und Schuldirektor\*innen sehr positiv aufgenommen. Während der Projektlaufzeit stieg die Zahl der CO<sub>2</sub>-Champions in den Klassenzimmern (Schüler\*in, die ihre Lehrer\*in auf regelmäßiges Lüften aufmerksam machen). Es ist zu beachten, dass die teilnehmenden Klassen keine zusätzliche Schulung zum korrekten Umgang mit dem CO<sub>2</sub>-Sensor oder zu Lüftungsstrategien erhielten. Daher ist davon auszugehen, dass bei entsprechender Schulung der Nutzen für Schüler\*innen und Lehrkörper, die sich am Lüftungsprozess beteiligen, wahrscheinlich viel größer sein wird als in den Ergebnissen dieser Studie gezeigt.

Die Ergebnisse der ImpAQS-Studie sind von nationaler und europäischer Bedeutung, da sie das Bewusstsein für die dringende Notwendigkeit schärfen, die Belüftung und Luftqualität in Schulen zu verbessern. Die Ergebnisse liefern umsetzbare Informationen, die zur Verbesserung der Lernergebnisse, der Gesundheit und des Wohlbefindens von Schüler\*innen und Lehrkräften in ganz Österreich genutzt werden sollten. Die Einhaltung bestehender Richtlinien und Standards sollte als erster Schritt in eine Zukunft gesehen werden, in der „gesundheitsorientierte“ Lüftungspraktiken eine Selbstverständlichkeit sind. Um weitere Ungleichheiten bei den bestehenden Lüftungspraktiken zu vermeiden, sind die Autor\*innen der Meinung, dass die Verantwortung für diesen Übergang nicht an einzelne Schulen delegiert werden kann, sondern Teil eines national koordinierten Prozesses sein muss.



Die Kurzfassung dieses Textes ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0) Lizenz. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

DOI 10.3217/978-3-99161-056-4-001





## Inhaltsverzeichnis

Danksagung zur Finanzierung.....	2
Haftungsausschluss .....	2
Kurzfassung .....	5
Inhaltsverzeichnis.....	9
Abkürzungen, Symbole und Nomenklatur.....	13
1 Einleitung.....	17
1.1 Zweck und Umfang dieses Berichts .....	17
1.2 Faktoren und Hindernisse für die Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen von Schulen.....	18
1.3 Übergeordnete Ziele der ImpAQS-Studie .....	22
1.4 Forschungsfragen .....	23
2 Literaturrecherche – normative Standards und Studien zu Belüftung und Innenraumluftqualität in Schulen .....	25
2.1 Österreichische Schulstudien und verwandte Forschung .....	25
2.2 Europäische Schulstudien und damit zusammenhängende Forschung.....	27
2.3 Internationale Schulstudien und damit zusammenhängende Forschung .....	34
2.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der wissenschaftlichen Literaturrecherche .....	39
2.5 Raumlufqualität und Belüftung – normative Standards, Leitfäden und Gesetze .....	40
2.5.1 Österreichische Normen, Richtlinien und offizielle Rechtsakte.....	40
2.5.2 Europäische (CEN) Normen.....	47
2.5.3 Beispiele bewährter Verfahren in anderen europäischen Ländern.....	52
2.5.4 Internationale Standards.....	54
2.5.5 Zusammenfassung europäischer und internationaler normativer Standards und Richtlinien.....	58
2.5.6 Gesundheitsbasierte Belüftungsstandards.....	61
2.5.7 Zusammenfassung der gesundheitsbasierten Lüftungsstandards.....	66
3 Studiendesign und Forschungsmethoden .....	69
3.1 Überblick über die Forschungsmethodik.....	69
3.2 Projektdauer und Überwachungszeitraum.....	70
3.3 Teilnehmende Schulen .....	71
3.3.1 Berechnung der Stichprobengröße .....	72
3.3.2 Stichprobenauswahl und geografische Verteilung .....	72
3.3.3 Teilnehmerrekrutierung .....	74

3.4	Theoretische Grundlagen – Berechnungsverfahren und Datenverarbeitung .....	74
3.4.1	Berechnung der Belüftungsrate .....	74
3.4.2	Messdaten – Reinigungs-, Aggregations- und Analysezeiträume .....	77
3.5	Messgeräte und Datenverwaltung .....	79
3.5.1	Ausrüstung – Sensormessungen, Messunsicherheit und Aufzeichnungsintervall .....	79
3.5.2	Ausrüstung – Sensordatenübertragung und -speicherung .....	80
3.5.3	Kohlendioxidensoren – Kalibrierung und Höhenkompensation .....	81
3.5.4	Installationsprozess der Ausrüstung .....	86
3.5.5	Test- und Kontroll-Klassenzimmer –CO <sub>2</sub> -Displays, Schwellenwerte und Belüftungshinweise .....	91
3.5.6	Messdaten – Qualitätssicherungsverfahren .....	92
3.6	Datenprotokolle der Klassenraumerhebung .....	92
3.7	CO <sub>2</sub> -Referenzwerte für den Außenbereich und UBA-Luftverschmutzungsdaten .....	94
3.7.1	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ) in der Umgebungsluft – Auswirkungen auf die Gesundheit und Referenzwerte .....	95
3.7.2	Feinstaub (PM <sub>2,5</sub> ) – gesundheitliche Auswirkungen und normative Referenzwerte .....	97
3.7.3	Feinstaub (PM <sub>10</sub> ) – Auswirkungen auf die Gesundheit und normative Referenzwerte .....	98
3.7.4	Stickstoffdioxid (NO <sub>2</sub> ) – Auswirkungen auf die Gesundheit und normative Referenzwerte .....	98
3.7.5	Ozon (O <sub>3</sub> ) – gesundheitliche Auswirkungen und normative Referenzwerte .....	98
3.7.6	Zusammenfassung der Grenzwerte für Schadstoffe im Freien der EU und der WHO .....	99
3.7.7	Zuordnung der UBA-Luftqualitätsmessstationen zu den Schulstandorten .....	101
3.8	Analytische Infektionsrisikomodelle .....	101
3.9	Fehlzeiten .....	102
3.10	Österreichische SARS-CoV-2-RNA-Abwasserdaten .....	103
3.11	Qualitative Umfragen (von Direktor*innen und LuL) und deren statistische Analyse .....	104
4	Quantitative Ergebnisse und analytische Untersuchungen .....	109
4.1	Teilnehmende Schulen .....	110
4.1.1	Stichprobenauswahl und geografische Verteilung .....	110
4.2	Überblick über die Angemessenheit der Lüftungspraktiken in österreichischen Schulen .....	111
4.2.1	Physische Merkmale österreichischer Schulen und Klassenzimmer .....	112
4.2.2	Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )-Konzentrationen in österreichischen Schulen .....	123
4.2.3	Lüftungsraten in österreichischen Klassenzimmern .....	142
4.3	Einfluss lokaler Umweltqualitätsfaktoren auf die CO <sub>2</sub> -Konzentration in Innenräumen .....	155
4.3.1	CO <sub>2</sub> -Messungen im Freien .....	155
4.3.2	Schadstoffkonzentrationen in der Außenluft (PM <sub>2,5</sub> , PM <sub>10</sub> , NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> ) .....	156

4.3.3	Zusammenhang zwischen CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in Innenräumen und Außen- und Innentemperaturen.....	160
4.4	Auswirkungen von CO <sub>2</sub> -Überwachungsgeräten und Lüftungsempfehlungen auf die Belüftungsergebnisse in Klassenzimmern .....	162
4.4.1	Vergleichende Analyse der Vorzeichenunterschiede im Zeitverlauf (jährlich, saisonal und monatlich) .....	163
4.4.2	Vergleichende Analyse der relativen Vorzeichenunterschiede im Zeitverlauf (jährlich, saisonal und monatlich).....	165
4.5	Einfluss der Luftqualität in Innenräumen auf das Risiko von durch die Luft übertragenen Krankheiten .....	168
4.5.1	Infektionsrisiken durch die Luft und Belüftung .....	168
4.5.2	Zeitliche Schwankungen des Infektionsrisikos, abgeleitet aus den Daten der CO <sub>2</sub> -Überwachung .....	171
4.5.3	Zusammenhang zwischen Fehlzeiten und Umweltvariablen.....	182
4.6	Zusammenfassung und Konsolidierung der Ergebnisse der quantitativen Analyse .....	184
4.6.1	Antwort auf Forschungsfrage 1 .....	184
4.6.2	Antwort auf Forschungsfrage 2 .....	185
4.6.3	Antwort auf Forschungsfrage 3 .....	186
4.6.4	Antwort auf Forschungsfrage 4 .....	187
5	Qualitative Umfrageantworten .....	189
5.1	Befragung der Schulleiter*innen .....	189
5.1.1	Erste Umfrage – Ergebnisse .....	189
5.1.2	Zusätzliche Kommentare – offene Fragen .....	192
5.1.3	Zweite Umfrage – Ergebnisse .....	193
5.1.4	Unterschiede in den Antworten .....	196
5.2	Befragung der Lehrer*innen .....	199
5.2.1	Erste Umfrage (Winter) – Ergebnisse .....	199
5.2.2	Offene Antworten – Winterumfrage .....	202
5.2.3	Zweite Umfrage (Sommer) – Ergebnisse .....	209
5.2.4	Offene Antworten – Sommerumfrage.....	213
5.3	Zusammenfassung und Konsolidierung der Ergebnisse der qualitativen Analyse .....	220
5.3.1	Antwort auf die Forschungsfrage 5 .....	221
6	Diskussion.....	223
6.1	Kontextualisierung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf frühere Studien und europäische Normen.....	223
6.2	Berücksichtigung der Ergebnisse im Zusammenhang mit der neuen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsrichtlinie.....	225

6.3	Kosten-Nutzen-Analyse der Verbesserung von Lüftungsstandards in Schulen .....	227
6.4	Bewertung des Nutzens von CO <sub>2</sub> -Sensoren.....	228
6.5	Berücksichtigung der Ergebnisse in Bezug auf Schadstoffe im Freien.....	230
6.6	Kontextualisierung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf die qualitativen (Umfrage-) Ergebnisse .....	232
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen .....	237
7.1	Schlussfolgerungen .....	237
7.1.1	Einhaltung bestehender europäischer und österreichischer Standards.....	237
7.1.2	Einhaltung der „gesundheitsbasierten“ Richtwerte .....	238
7.1.3	Vorteile des Einsatzes von CO <sub>2</sub> -Sensoren.....	238
7.1.4	Luftverschmutzung im Freien.....	239
7.1.5	Übertragung von Krankheitserregern über die Luft .....	240
7.2	Empfehlungen .....	240
7.2.1	Empfehlungen für die Praxis.....	240
7.2.2	Empfehlungen für Richtlinien.....	244
7.3	Einschränkungen der Studie und weitere Arbeiten.....	246
7.3.1	Einschränkungen .....	246
7.3.2	Empfehlungen für weitere Arbeiten.....	247
8	Danksagung.....	249
	Quellenangaben .....	251
	Anhang .....	265

## Abkürzungen, Symbole und Nomenklatur

### Liste der Abkürzungen

Abkürzung	Definition
Abb.	Abbildung
ACH	Luftwechselrate
AStV	Rechtsvorschrift für Arbeitsstättenverordnung
BMB	Bundesministerium für Bildung
BMBWF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BMSGPK	Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz
CFD	Computational fluid dynamics (Deutsch: numerische Strömungsmechanik-Modellierungen)
COVID-19	Corona Virus-Krankheit 2019
EUA	Europäische Umweltagentur
EW	Einwohner*innenwert
Gl.	Gleichung
HEPA	Hochleistungs-Schwebstofffilter
ImpAQS	Improving air quality in schools (Deutsch: Verbesserung der Luftqualität in Schulen)
IA	krankheitsbedingten Fehlzeiten
IAQ	Innenraumlufqualität
IEQ	Raumlufqualität
IQR	Interquartilsabstand
IQS	Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen
IRMM	Infektionsrisikomanagementmodell
JMW	Jahresmittelwerte
K	Kontroll-Klassenzimmer
KI	Konfidenzintervall
LuL	Lehrerinnen und Lehrer
MEMS	Mikro-Elektromechanische Systeme
MPIC	Max-Planck-Institut für Chemie
MV	Mechanische Lüftung
MW8	Achtstundenmittelwert
NADR	nicht-infektiösen Luftzufuhrdaten
NFC	Nahfeldkommunikation
NDIR	Nicht-dispersive Infrarotsensoren
NV	Natürliche Lüftung
ODA	Klassifizierung der Außenluftqualität (Englisch: Outdoor Air Quality)
PM	Feinstaub ( Englisch: Particulate matter)
PNC	Partikelanzahlkonzentration
RAG	Rote, gelbe und grüne Anzeige (Englisch: Red, Amber, Green indicator)

REGIONEN:	
1. BUR	1. Burgenland
2. KÄR	2. Kärnten
3. NIE	3. Niederösterreich
4. OBE	4. Oberösterreich
5. SAL	5. Salzburg
6. STE	6. Steiermark
7. TIR	7. Tirol
8. VOR	8. Vorarlberg
9. WIE	9. Wien
RH	Relative Luftfeuchtigkeit
RR	Relative Risiko
SARS-CoV-2	Schweres Akutes Respiratorisches Syndrom Corona Virus 2
SAT	Schulautonome Tage
SCHULTYP:	
1. ABHS	1. Allgemein bildende höhere Schule
2. KMS	2. Kaufmännische mittlere oder höhere Schule
3. MS	3. Mittelschule
4. SS	4. Sonderschule
5. TGS	5. Technische und gewerbliche mittlere oder höhere Schule
6. VS	6. Volksschule
7. WS	7. Wirtschaftsberufliche mittlere oder höhere Schule
SBS	Sick Building Syndrom
SuS	Schülerinnen und Schüler
T	Test-Klassenzimmer
Tab.	Tabelle
TMW	Tagesmittelwerte
VR	Personenbezogener Außenluftvolumenstrom oder Belüftungsrate
VOC	Flüchtige organische Verbindungen
TVOC	Gesamte flüchtige organische Verbindungen
UBA	Umweltbundesamt
UFAD-CDR	Unterflur- und Deckenverdrängungslüftung
UFP	Ultrafeine Partikel
USD	United States Dollar
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

#### Liste der chemischen Nomenklatur

Abkürzung	Definition
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
NO <sub>2</sub>	Stickstoffdioxid
O <sub>3</sub>	Ozon
PM <sub>1</sub>	Feinstaub ≤ 1 Mikrometer Durchmesser
PM <sub>2,5</sub>	Feinstaub ≤ 2,5 Mikrometer Durchmesser
PM <sub>10</sub>	Feinstaub ≤ 10 Mikrometer Durchmesser

### Liste der Symbole und Nomenklatur

Symbole und Nomenklatur	Definition
$\pm$	Plus oder minus
$\Delta$	Differenz zwischen zwei Werten
$\int$	Integrale
$\Sigma$	Summe
$\cdot$	Multiplikation
$^\circ$	Grad
C	CO <sub>2</sub> -Konzentration im Raum
C <sub>out</sub>	CO <sub>2</sub> -Konzentration in der Außenluft
C <sub>ss</sub>	Stationäre CO <sub>2</sub> -Konzentration im Raum
c <sub>v</sub>	Viren Konzentration
d	Ableitung
D <sub>50</sub>	Infektiöse Dosis [-]
$\epsilon_v$	Lüftungseffektivität [-]
G	Menschliche CO <sub>2</sub> -Emissionsrate [l/s]
vol%	Volumenprozent
P <sub>RNA</sub>	Infektionsrisiko für ein einzelnes Viruspartikel [-]
Q	Zuluftvolumenstrom [l/s]
t	Zeit [h]
t <sub>virus</sub>	Lebensdauer des Virus im Aerosol [h]
V	Raumvolumen [l]

### Liste der Einheiten

Einheit	Definition
°C	Grad Celsius
Genkopien pro EW/Tag·10 <sup>6</sup>	Genkopien pro Einwohnerin pro Tag·(in Millionen)
hPA	Luftdruck in Hektopascal
l/(h·Person)	CO <sub>2</sub> -Emission in Liter pro Stunde und Person
l/(s·m <sup>2</sup> )	Luftdurchsatz in Litern pro Sekunde und Quadratmeter
l/(s·Person)	Luftdurchsatz in Litern pro Sekunde und Person
l/(m <sup>2</sup> ·h)	Luftdurchsatz in Litern pro Quadratmeter und Stunde
m <sup>2</sup> /Person	Belegung in Quadratmetern pro Person
m <sup>3</sup> /h	Luftdurchsatz in Kubikmetern pro Stunde
ppb	Konzentration in Teilen pro Billion
ppm	Konzentration in Teilen pro Million
µm	Mikrometer
µg/m <sup>3</sup>	Konzentration in Mikrogramm pro Kubikmeter
µmol/mol	Volumenanteil in Mikromol pro Mol





## 1 Einleitung

Es gibt viele Gründe, warum es wichtig ist, die Luftqualität im Zusammenhang mit der Belüftung und den Umweltbedingungen in Innenräumen von Schulen besser zu verstehen. In Kombination beeinflussen diese Faktoren die Qualität der Lernumgebung sowie die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistung von Schülerinnen und Schülern (SuS) sowie Lehrerinnen und Lehrer (LuL) erheblich. Durch die Überwachung und Analyse von Daten aus einer großen Anzahl von Schulen in ganz Österreich sollte die ImpAQS-Studie ein besseres Verständnis dieser Probleme auf nationaler und regionaler Ebene ermöglichen. Die Verknüpfung dieser Umweltdaten mit den persönlichen Erkenntnissen von Schulleiter\*innen und LuL ermöglicht ein differenzierteres und umfassenderes Verständnis der komplexen sozialen Faktoren, die die Daten beeinflussen. Die gleichzeitige Bewertung dieser sozialen und technischen Perspektiven führt zu einem tieferen Verständnis der Ursachen und potenziellen Lösungen für diese komplexen Probleme. Dieser evidenzbasierte Ansatz liefert die Informationen, die für die Entwicklung fundierter Antworten erforderlich sind, die wiederum für die Umsetzung erfolgreicher langfristiger Ergebnisse unerlässlich sind.

### 1.1 Zweck und Umfang dieses Berichts

Dieser Bericht markiert die letzte Phase der ImpAQS-Forschungsstudie (Improving Air Quality in Schools), die durch das ehemalige Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF), jetzt Bundesministerium für Bildung (BMB), finanziert wurde. Der Bericht vermeidet bewusst die Nennung der einzelnen Schulen, die an der Studie teilgenommen haben, ein Aspekt, der den teilnehmenden Schulen vor Beginn der Studie mitgeteilt wurde. Eine unnötige Debatte darüber, welche Schulen „besser“ oder „schlechter“ als andere abgeschnitten haben, wäre wenig sinnvoll und könnte dazu führen, dass Schulen von der Teilnahme an weiteren Forschungsarbeiten und der Durchführung von Abhilfemaßnahmen abgehalten werden. Die teilnehmenden Schulleiter\*innen erhalten anschließend vom BMB maßgeschneiderte Berichte, in denen sie über die Ergebnisse ihrer Schule informiert und über empfohlene Abhilfemaßnahmen beraten werden. Das Hauptziel dieser Forschungsstudie besteht darin, nützliche Schlussfolgerungen auf nationaler und regionaler Ebene zu ziehen und allgemeine Empfehlungen zur Luftqualität und zu Lüftungspraktiken in österreichischen Schulen abzugeben. Diese Informationen werden benötigt, um wirksame Richtlinien und Programme zu entwickeln, die den Übergang zu einer einheitlich hohen Luftqualität in allen österreichischen Schulen unterstützen.

ImpAQS ist die erste Längsschnittstudie, die die Belüftung und die Luftqualität in Innenräumen (IAQ) in einer großen Stichprobe österreichischer Schulklassen untersucht. Das Projekt umfasst die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, Temperaturen und relativen Luftfeuchtigkeit (RH) über einen Zeitraum von 12 Monaten (von September 2023 bis September 2024) in 1.200 Klassenzimmern sowie Außenbereichen in 120 Schulen, die über die 9 Bundesländer Österreichs verteilt sind. Dies entspricht etwa 240.000 Schultagen und über 570 Millionen einzelnen Datenpunkten. Zur Ergänzung dieser Informationen wurde eine Analyse der Luftschadstoffe im Freien in der Nähe der Schulen durchgeführt, die auf der Analyse von vier wichtigen Schadstoffen (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub> und NO<sub>2</sub>) basiert und Daten des österreichischen Umweltbundesamtes (UBA) verwendet. Es wurden zusätzliche Daten zu Schulfehlzeiten anonym gesammelt, um ein besseres Verständnis der Beziehung zwischen der Luftqualität in Innenräumen, der Belüftung und der Anwesenheit auf Schul- und Klassenebene zu erlangen. Die empirischen Daten wurden weiter mit analytischen und numerischen Modellen

ausgewertet, um Sekundärvariablen abzuleiten, darunter die Belüftungsluftstromraten in jedem Klassenzimmer und Informationen über das relative Risiko der Übertragung von Infektionskrankheiten durch die Luft. Zusätzlich zu den oben beschriebenen quantitativen Daten wurden qualitative Daten durch vier gezielte Umfragen (unter Beteiligung von Schulleiter\*innen und LuL) erhoben, um die Perspektive der Endnutzer\*innen einzubeziehen.

Dieser Bericht richtet sich in erster Linie an relevante politische Entscheidungsträger\*innen auf österreichischer Bundesebene und ihre europäischen Amtskolleg\*innen sowie an die regionalen und lokalen Behörden, die für die Überwachung der Luftqualität in den einzelnen Schulbezirken zuständig sind. Auf der Ebene der einzelnen Schulen sollten sich die Schulhausverwalter\*innen und Lehrer\*innen (zuständig für die tägliche Wartung und den Betrieb der Lüftungsanlagen und die Überwachung der Innenraumluftqualität) sowie die Schulleiter\*innen (zuständig für die Gesundheit und das Wohlbefinden ihrer LuL und SuS) für diesen Bericht und die daraus resultierenden individuellen Schulberichte interessieren. Eine weitere Zielgruppe, die von den Erkenntnissen und Empfehlungen dieser Studie profitieren kann, sind Schulbesitzer\*innen, Gebäudedesigner\*innen und –verwalter\*innen (, die für die Planung, den Bau, die Renovierung und die Instandhaltung von Schulgebäuden und den dazugehörigen Lüftungssystemen verantwortlich sind). Schließlich sollte dieser Bericht auch für die SuS von Interesse sein, die einen großen Teil ihres Wachlebens in Schulgebäuden verbringen, sowie für ihre Eltern und Erziehungsberechtigten.

Der Umfang der hier behandelten Arbeit umfasst die Arbeitspakete AP3 – AP6 (Anhang A1), wie im ImpAQS-Projektvorschlag dargelegt. Aus Gründen der Vollständigkeit und des Verständnisses gibt es in diesem Bericht und im Zwischenbericht des ImpAQS-Projekts (McLeod et al., 2023) einige geringfügige Überschneidungen bei der Beschreibung der Projektplanung, der Gerätekalibrierung und der Qualitätssicherungsprozesse. Dies ist beabsichtigt und wurde so konzipiert, dass der Abschlussbericht unabhängig vom Zwischenbericht gelesen werden kann. Die wichtigsten Phasen des Projekts werden in Abschnitt 3 beschrieben und sind in Abb. 3-2 dargestellt.

## 1.2 Faktoren und Hindernisse für die Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen von Schulen

Schulen sind so konzipiert, dass sie ein optimales Umfeld für die intellektuelle, emotionale und körperliche Entwicklung von Kindern und Jugendlichen schaffen. SuS und LuL verbringen in der Regel etwa 12–15 % ihres Lebens in einem Schulgebäude (EPA, 2009; Parinduri, 2014), was mehr ist als an jedem anderen Ort außer ihrem Zuhause. Es ist bekannt, dass eine gute Raumluftqualität (IAQ) die kurz- und langfristige Leistung, Konzentration, den akademischen Erfolg, die Gesundheit und das Wohlbefinden von SuS und Lehrkräften beeinflusst (Mendell und Heath, 2005; Sadrizadeh et al., 2022). Trotz dieses Bewusstseins ist die Bereitstellung einer guten IAQ in vielen Klassenzimmern nach wie vor ein Problem. Dies liegt zum Teil daran, dass Klassenzimmer dichter belegt sind als fast jeder andere Arbeitsplatz, wobei die Belegungsdichte etwa viermal höher ist als in einem typischen Bürogebäude (Katafygiotou und Serghides, 2014). Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die meisten europäischen Schulen natürlich belüftet sind (Annesi-Maesano et al., 2014) und daher in der Regel über keine automatisierten Mittel zur Regulierung oder Überwachung der Frischluftzufuhr verfügen. Darüber hinaus gibt es nur wenige und oft widersprüchliche Leitlinien für die Gewährleistung einer guten Luftqualität in Schulen; außerdem fehlen Regulierungsmechanismen, mit denen bewährte Verfahren sichergestellt werden können.

In zahlreichen Studien wurde versucht, die negativen Auswirkungen einer schlechten Innenraumluftqualität auf die menschliche Gesundheit, das Wohlbefinden und die Produktivität in der bebauten Umwelt zu quantifizieren (Seppänen et al., 2006; Morawska, Marks und Monty 2022; LBNL 2024). Die Bedeutung der Luftqualität und Belüftung in Schulgebäuden für die Gesundheit und schulische Leistung von SuS wurde ebenfalls umfassend untersucht (Mendell, 2005; Mendell et al., 2013; Annesi-Maesano et al. 2014; Csobod, 2014; Haverinen-Shaughnessy et al. 2015; Petersen et al., 2016; Wargocki et al., 2020). Fisk fasste die Ergebnisse von mehr als 20 von Expert\*innen begutachteten Studien zusammen, in denen Zusammenhänge zwischen Gesundheit, Leistung und Fehlzeiten mit Belüftungsraten und/oder Kohlendioxidkonzentrationen untersucht wurden, und kam zu dem Schluss, dass *“There is compelling evidence, from both cross-sectional and intervention studies, of an association of increased student performance with increased ventilation rates.”* [es überzeugende Belege sowohl aus Querschnitts- als auch aus Interventionsstudien für einen Zusammenhang zwischen einer höheren SuS\*innenleistung und höheren Belüftungsraten gibt.] Fisk stellte außerdem fest: *“There is evidence that reduced respiratory health effects and reduced student absence are associated with increased ventilation rates.”* [Es gibt Hinweise darauf, dass eine geringere Belastung der Atemwege und weniger Fehlzeiten von SuS mit höheren Lüftungsraten zusammenhängen.]

Seit Beginn der COVID-19-Pandemie im Jahr 2019 kam es in Europa und dem größten Teil der Welt immer wieder zu Krankheitswellen. Trotz der Vermutung, dass das Schwere Akute Respiratorische Syndrom Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) irgendwann ein saisonales Muster annehmen (ähnlich wie die Grippe) und an Intensität verlieren würde, ist dies bisher nicht eingetreten und das Virus hat sich weiter verändert und entwickelt. Während die meisten wiederkehrenden SARS-CoV-2-Infektionen „mild“ oder asymptomatisch verlaufen, können einige Kinder nach einer COVID-19-Infektion eine schwere Erkrankung entwickeln, einschließlich des Multisystem-Inflammatorischen Syndroms bei Kindern (MIS-C) (ECDC, 2023). Post-COVID-Erkrankungen (d. h. Long-COVID) können auch Menschen jeden Alters betreffen, und die Prävalenz derjenigen, die 18 Monate nach einer SARS-CoV-2-Infektion über ein oder mehrere Symptome berichten, wird auf etwa 10 % geschätzt (Hastie et al., 2023). Darüber hinaus legen die langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen im Zusammenhang mit wiederholten SARS-CoV-2-Infektionen, zu denen ein erhöhtes Risiko für chronische Atemwegs-, Herz-Kreislauf-, neuropsychiatrische und Autoimmunerkrankungen gehört (Greer et al., 2022; Wrona und Skrypnik, 2022; Heidemann et al., 2023), nahe, dass Vorsicht geboten ist, um wiederholte Infektionen zu minimieren. Die Daten des österreichischen Bundes-Abwasserüberwachungssystems (BSGPK, 2024) deuten derzeit darauf hin, dass im Durchschnitt zwei oder mehr Wellen pro Jahr auftreten, wobei der bisher höchste Spitzenwert Ende 2023 erreicht wurde (Abb. 1-1).

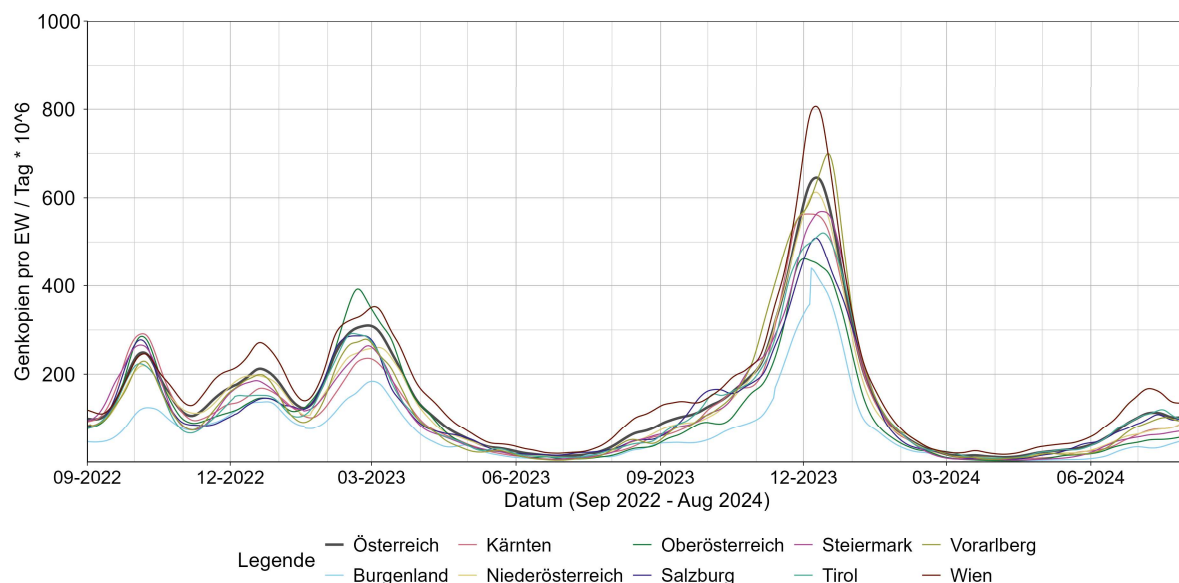


Abbildung 1-1 Personengewichtete Trends der SARS-CoV-2-Abwasserkonzentrationen in Österreich (Sept. 2022–Sept. 2024) (BSGPK, 2024)

Laut Barcellini et al. (2021) spiegelt das Ausmaß der SARS-CoV-2-Infektionen bei SuS und Lehrkräften das Gesamtübertragungsniveau in der breiteren Gemeinschaft wider. Das Europäische Zentrum für die Prävention und die Kontrolle von Krankheiten (ECDC) räumt ein, dass *“Transmission of SARS-CoV-2 in schools appears to be affected by how widespread the virus is in the broader community as well as the measures introduced in schools to mitigate SARS-CoV-2 transmission”* [die Übertragung von SARS-CoV-2 in Schulen offenbar davon beeinflusst wird, wie weit verbreitet das Virus in der breiteren Gemeinschaft ist, sowie von den Maßnahmen, die in Schulen zur Eindämmung der SARS-CoV-2-Übertragung ergriffen werden] (ECDC, 2024). Mathematische Modelle deuten jedoch darauf hin, dass Schulen tatsächlich ein entscheidender Faktor für die Übertragung in der Gemeinschaft sein könnten (Johnson et al., 2021) und dass die schnelle Kinetik der SARS-CoV-2-Übertragung erklären könnte, warum die Prävalenz in Schulen und in der Gemeinschaft schnell konvergiert (White et al., 2022).

Die Konzentration von luftgetragenen Krankheitserregern in Innenräumen kann durch drei grundlegende Maßnahmen reduziert werden: (i) *Quellensteuerung* – durch Reduzierung der Anzahl der Personen und/oder durch das Tragen von filtrierendem Gesichtsschutz (d. h. Masken mit FFP-Einstufung) (ii) *Verdünnung* – durch die Bereitstellung von Frischluft bei hohen Luftaustauschraten und (iii) *Reinigung* – durch den Einsatz von Luftreinigungsgeräten (d. h. Geräten, die Krankheitserreger aus der Luft filtern oder eine viruzide Wirkung haben) (Uhde et al., 2022). Einzelmaßnahmen, die isoliert eingesetzt werden, reichen jedoch oft nicht aus, um die Ausbreitung von durch die Luft übertragenen Krankheiten zu verhindern (McLeod et al., 2022). Im Zusammenhang mit einem Fitnessstudio zeigten Blocken et al. (2021), dass weder Belüftung (mit  $2,2 \text{ h}^{-1}$ ) noch Luftfilterung (allein) die Ausbreitung von Virus aerosolen ausreichend reduzieren können. In Kombination könnten Belüftung und Luftreinigung die Aerosolpartikelkonzentration jedoch um 80 bis 90 % senken.

In Bezug auf die Prophylaxe von Infektionen durch Tröpfcheninfektion in Schulen haben mehrere groß angelegte Studien bestätigt, dass Belüftung und Luftreinigung eine Schlüsselrolle bei der Eindämmung der Ausbreitung von Krankheiten spielen können. In einer Studie, an der mehr als 10.000 Klassenzimmer in Italien teilnahmen (Buonanno et al., 2022), wurde festgestellt, dass das relative

Risiko (RR) einer SARS-CoV-2-Infektion in Abhängigkeit von der Belüftungsrate abnahm, wobei in mechanisch belüfteten Klassenzimmern mit Belüftungsraten von mehr als 10 l/(s·Person) eine maximale RR-Reduktion von 80 % erreicht wurde. Ein ähnlicher Befund wurde in einer Schweizer Studie mit 150 Grundschulklassen bestätigt, bei der festgestellt wurde, dass sich in schlecht belüfteten Klassenzimmern deutlich mehr Personen mit SARS-CoV-2 infizierten (EMPA, 2021).

In jüngerer Zeit haben transiente numerische Strömungsmechanik-Modellierungen (CFD) gezeigt, dass die Gestaltung des Lüftungssystems selbst und nicht nur die Luftwechselrate (ACH) eine entscheidende Rolle bei der effektiven Entfernung von Atemwegspartikeln aus der Raumluft spielt. Durch die Verwendung eines verbesserten Lüftungskonzepts, das eine Unterflur- und Deckenverdrängungslüftung (UFAD-CDR) für einen Universitätsraum vorsieht, konnten Zabihi et al. (2024) zeigen, dass bei gleicher Luftstromrate die maximale Dichte von Atemwegspartikeln je nach spezifischer Auslegung des Lüftungssystems um bis zu 85 % reduziert werden kann. Ähnliche Ergebnisse wurden experimentell in Bezug auf ein kostengünstiges mechanisches Abluftsystem nachgewiesen, das vom Max-Planck-Institut für Chemie (MPIC) in Deutschland entwickelt wurde und die Entfernung von Aerosolen aus der Raumluft von Klassenzimmern verbessern soll, ohne sie wieder in den Raum zurückzuführen (Klimach et al., 2021).

Trotz der gut dokumentierten gesundheitlichen und akademischen Vorteile einer guten Belüftung und Luftqualität in Innenräumen wird die Qualität der Luft in Klassenzimmern an europäischen Schulen weitgehend nicht überwacht und ist nicht reguliert. Es bleibt oft dem Ermessen der einzelnen Schulen und LuL überlassen, ihre eigenen Lüftungspraktiken zu verwalten. In Österreich werden die meisten Schulen natürlich belüftet (durch manuelles Fensterlüften), aber das Schulpersonal erhält nur wenig oder gar keine Schulung in Bezug auf angemessene Lüftungspraktiken. Bisher wurden nur wenige Studien zur Überwachung der Luftqualität in Innenräumen durchgeführt, und es gibt keine Berichterstattung auf regionaler oder nationaler Ebene über die Luftqualität in Innenräumen oder die Belüftung in Schulen. Daher liegen nur sehr wenige quantitative oder qualitative Längsschnittdaten über die Luftqualität in Innenräumen und die Lüftungspraktiken in österreichischen Schulen vor.

Im Zusammenhang mit natürlich belüfteten Klassenzimmern wird die Luftqualität durch eine Reihe von interagierenden Faktoren beeinflusst (Abb. 1-2). Zu diesen Faktoren gehören physische Einschränkungen (z. B. die Art des Lüftungssystems und der Grad der externen Luftverschmutzung), aber viele können durch Design- und Betriebsentscheidungen (in Bezug auf die Gebäudetechnik und das Öffnen von Fenstern) kontrolliert oder zumindest beeinflusst werden. Gleichzeitig stehen Schulleiter\*innen, LuL und andere Endnutzer\*innen vor zahlreichen Hindernissen, wenn es darum geht, eine optimale Luftqualität und Belüftung zu erreichen. Diese Herausforderungen reichen von mangelndem Wissen über gute Lüftungspraktiken bis hin zu praktischen Problemen bei der Regulierung von Fensteröffnungen unter Beibehaltung eines akzeptablen thermischen Komforts. In vielen Fällen gibt es weitere widersprüchliche Faktoren, die ebenfalls berücksichtigt werden müssen, darunter Schulrichtlinien (in Bezug auf Energieverbrauch und Raumtemperatur) sowie externe Faktoren (einschließlich Lärm und Luftverschmutzung).

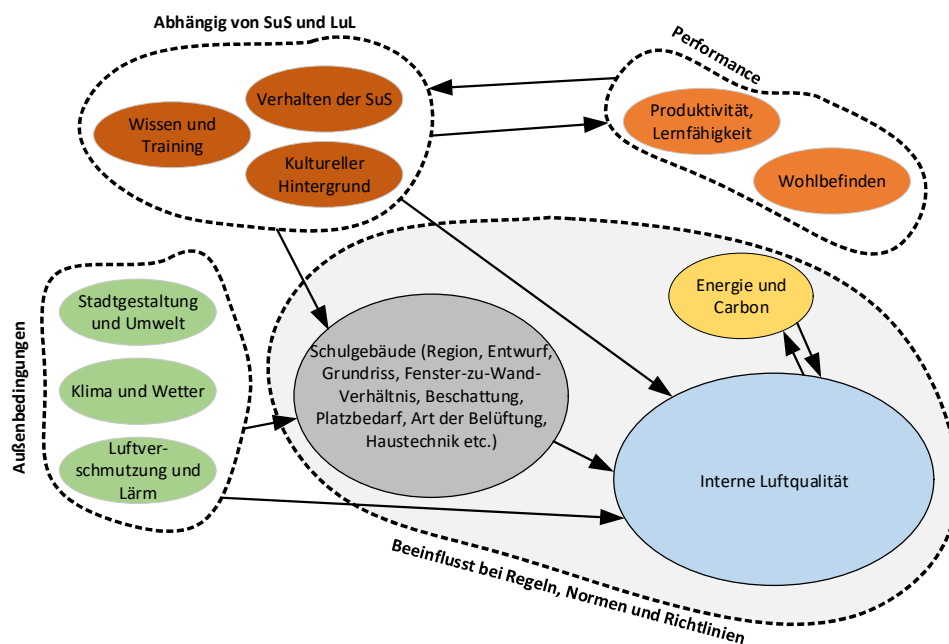


Abbildung 1-2 Faktoren, die die Belüftung und die Luftqualität in Schulen beeinflussen

Es ist wichtig zu beachten, dass die Luftverschmutzung in Innenräumen und die Übertragung von Krankheiten durch die Luft in Schulen nicht nur die SuS, sondern auch das dort tätige Personal betrifft (das oft über längere Zeiträume exponiert ist). Die Analyse von Kohortendaten hat gezeigt, dass LuL in Schulen ein erhöhtes Risiko für Asthma und andere Atemwegserkrankungen haben (Tak et al., 2011; Csobod, 2014; Burge et al., 2021) und eine der höchsten COVID-19-Fallraten aller Berufsgruppen aufweisen (Rhodes et al., 2022; Kvalsvig et al., 2023). Es ist erwähnenswert, dass die Zufriedenheit der LuL mit ihrem Arbeitsumfeld auch von der Raumluftqualität (IEQ) ihrer Schule beeinflusst wird, wobei die Luftqualität als ein wichtiger Parameter gilt (Sadick und Issa, 2018).

### 1.3 Übergeordnete Ziele der ImpAQS-Studie

Das übergeordnete Ziel der ImpAQS-Studie besteht darin, die Wirksamkeit der aktuellen Lüftungspraktiken in österreichischen Schulen zu verstehen und den Nutzen der Installation von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten in Klassenzimmern zu bewerten, um die Lüftungspraktiken zu verbessern, die Luftqualität in Innenräumen zu erhöhen und das Risiko der Übertragung von Krankheiten durch die Luft zu verringern.

Es wird angenommen, dass der Einsatz von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten (mit visuellen RAG-Ampelanzeigen) zusammen mit grundlegenden Anweisungen zu angemessenen Lüftungsprozessen die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration senken und die Luftqualität in Klassenzimmern messbar verbessern kann. Es ist jedoch nicht bekannt, ob eine solche Maßnahme nennenswerte Vorteile in Bezug auf die Innenraumluftqualität und die Lüftungsrate bringen kann, und auch die Akzeptanz solcher Maßnahmen beim Menschen ist nicht gut dokumentiert.

## 1.4 Forschungsfragen

Um die übergeordneten Ziele dieses Projekts zu erreichen, wurde eine Reihe von Forschungsfragen formuliert, die die Grundlage der Primärforschung bilden:

1. Wie viel Prozent der österreichischen Klassenzimmer werden gemäß den bestehenden Normen und den neuen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsrichtlinien angemessen bzw. unzureichend belüftet?  
→ Diese Frage wird in Abschnitt 4.2 beantwortet.
2. Hängen die Ergebnisse für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern und die Lüftungspraktiken von der Jahreszeit und/oder anderen lokalen Umweltfaktoren (z. B. Lärm, thermische Behaglichkeit, externe Luftverschmutzung usw.) ab?  
→ Diese Frage wird in Abschnitten 4.2, 4.3 und 5.0 beantwortet.
3. Erzielen Klassenzimmer, die mit CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und grundlegenden Lüftungsanleitungen ausgestattet sind, bessere Lüftungsergebnisse (eine geringere CO<sub>2</sub>-Konzentration) als solche ohne Überwachungsgeräte oder Schulungen?  
→ Diese Frage wird in Abschnitt 4.4 beantwortet.
4. Bietet die Verbesserung der Raumluftqualität in Klassenzimmern einen statistisch signifikanten Vorteil in Bezug auf die Verringerung des Risikos einer durch die Luft übertragenen Infektionskrankheit?  
→ Diese Frage wird in Abschnitt 4.5 beantwortet.
5. Nehmen LuL die Installation und Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren positiv, negativ oder gleichgültig wahr? Und wenn positiv oder negativ, was sind die größten Treiber und Hindernisse für die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und die Umsetzung angemessener Lüftungspraktiken in Klassenzimmern?  
→ Diese Frage wird in Abschnitt 5.0 beantwortet.

Diese Fragen und eine Reihe damit zusammenhängender Fragen werden aus soziotechnischer Forschungsperspektive umfassend untersucht, wobei die kombinierten Erkenntnisse aus den quantitativen Messungen und analytischen Untersuchungen (Abschnitt 4) und den qualitativen Umfrageantworten (Abschnitt 5) verwendet werden. Eine Zusammenfassung der konsolidierten Analyseergebnisse für die quantitative Analyse befindet sich in Abschnitt 4-6 und für die qualitative Analyse in Abschnitt 5-3.





## 2 Literaturrecherche – normative Standards und Studien zu Belüftung und Innenraumluftqualität in Schulen

Dieser Abschnitt des Berichts enthält wichtige Hintergrundinformationen, die den Kontext für die ImpAQS-Studie bilden. Er fasst verschiedene Literaturquellen zusammen, die über aktuelle Praktiken in Bezug auf die Innenraumluftqualität und Belüftung in Schulen informieren. Dazu gehören relevante Informationen aus normativen Leitfäden, Gesetzen und Standards sowie die Ergebnisse ähnlicher Forschungsstudien, die an anderer Stelle durchgeführt wurden. Es werden zusätzliche Informationen zur Beschreibung der wissenschaftlichen Grundlage für die Bewertung der Luftqualität in Innenräumen und ihres Zusammenhangs mit Gesundheit, Wohlbefinden und schulischen Leistungen präsentiert, sofern sie für die Interpretation der Forschungsergebnisse relevant sind. Darüber hinaus werden Fallstudien zu bewährten Verfahren aus anderen europäischen Ländern und die Auswirkungen neuer „gesundheitsbasierter“ Lüftungsstandards erörtert.

Diese Übersicht soll das aktuelle Wissen zusammenfassen und auf Bereiche hinweisen, in denen es noch erhebliche Lücken in der vorhandenen Wissensbasis gibt. Aufgrund der enormen Menge an neuer Forschung auf diesem Gebiet ist sie nicht als umfassende Literaturübersicht gedacht.

Die Nutzung der ISO & ÖNORM Inhalte in diesem Bericht erfolgt mit freundlicher Genehmigung der Austrian Standards plus GmbH als Tochtergesellschaft des ISO-Mitglieds Austrian Standards International, Wien.

### 2.1 Österreichische Schulstudien und verwandte Forschung

Bisher wurden nur wenige Studien durchgeführt, die sich mit den aktuellen Praktiken und Ergebnissen in Bezug auf Belüftung und Raumluftqualität in österreichischen Schulen und Bildungsgebäuden befassen. Die meisten der dokumentierten empirischen Studien haben nur eine relativ kleine Anzahl von Klassenräumen untersucht und/oder Kurzzeitstudien durchgeführt, aus denen sich nur schwer verallgemeinern lässt. Andere Studien haben dieses Thema aus einer politischen Perspektive beleuchtet, ohne jedoch primäre Belege für die bestehende Situation vorzulegen. Dennoch dienen die Ergebnisse dieser früheren Studien als wertvoller Bezugsrahmen für die ImpAQS-Studie und heben bereits bestehende Probleme hervor, die für den österreichischen Kontext spezifisch sind.

**Brandl et al., 2001** – Vor dieser Studie waren die Daten zur Belüftung und zur Schadstoffsituation in Innenräumen österreichischer Schulen sehr spärlich. Die wenigen Messungen der Innenraumumgebung, die vor diesem Zeitpunkt durchgeführt wurden, deuteten darauf hin, dass *„die notwendige Frischluftmengen häufig um mehr als eine Größenordnung unterschritten wurden“* (Brandl, 2001). Obwohl es zu diesem Zeitpunkt keine spezifischen Vorschriften bezüglich der für Schulkinder erforderlichen Luftqualität gab, galten die Vorschriften der österreichischen Arbeitsstättenverordnung (AST-VO 1998) (Republik Österreich, 1998) für das Schulpersonal.

In dieser Studie überwachten die Autor\*innen die Innenraumluftqualität in 20 Klassenräumen (in 4 Volksschulen, 4 weiterführenden Schulen und 2 allgemeinbildenden weiterführenden Schulen), in denen Formaldehyd und flüchtige organische Verbindungen (TVOC) gemessen und CO<sub>2</sub> während mehrerer Unterrichtsstunden kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Die Ergebnisse zeigten, dass Formaldehyd zwar größtenteils innerhalb der (damaligen) Grenzwerte der WHO-Richtlinien lag, in

vielen Klassenzimmern jedoch erhöhte TVOC-Werte (Mittelwert  $830 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , Median  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) vorlagen und in drei Klassenzimmern die TVOC-Werte  $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  überstiegen. Die durchschnittliche  $\text{CO}_2$ -Konzentration in allen Klassenzimmern lag bei über 1000 ppm (0,1 Vol.-%) und in vielen Fällen wurde dieser Wert über längere Zeiträume überschritten. In einem Klassenzimmer wurde eine maximale  $\text{CO}_2$ -Konzentration von 6700 ppm (0,67 Vol.-%) gemessen. Die Autor\*innen stellten fest, dass *“bei gekippten Fenstern in den Klassen, in denen eine Querlüftung möglich war, eine signifikante Senkung des Anstieges bzw. ein Gleichbleiben der Konzentration an  $\text{CO}_2$  beobachtet wurde. Bei Klassenräumen, in denen keine Querlüftung möglich war, wurde durch gekippte Fenster der Anstieg nur geringfügig reduziert.”* (Brandl, 2001, S. 10).

**Hohenblum, 2008** – dieser Bericht fasst die Ergebnisse des Projekts „LUKI: Luft und Kinder – Einfluss der Innenraumluft auf die Gesundheit von Kindern in Ganztagschulen“ zusammen. Ziel der Studie war es, umfassend zu untersuchen, inwieweit Kinder (6 bis 10 Jahre) in ihrer Schule verschiedenen Umweltfaktoren ausgesetzt sind. Insgesamt nahmen 9 Schulen an der Studie teil (darunter 7 Ganztagschulen in Wien, St. Pölten und Graz sowie zwei Schulen mit Ganztagsbetreuung in Klagenfurt und Villach). Insgesamt wurden 252 gas- und partikelförmige Luftschadstoffe (in Proben von Hausstaub, Feinstaub und in der Luft) sowie die  $\text{CO}_2$ -Konzentration gemessen. Zusätzliche Tests beinhalteten die Analyse von Schwermetallen auf der Grundlage von Haar- und Zahnproben, die von den SuS entnommen wurden. Ein standardisierter kognitiver Test wurde durchgeführt, um die Einflüsse von Schadstoffen auf die geistige Leistungsfähigkeit der SuS zu ermitteln. Darüber hinaus wurden die Wohnumgebung und der Gesundheitszustand der Kinder (insbesondere ihrer Atemwege) mithilfe eines Elternfragebogens und Lungenfunktionstests erfasst.

Die Ergebnisse zeigten, dass Feinstaubmessungen in Klassenzimmern (oder angrenzenden Räumen) teilweise durch die Außenluft (d. h. durch Belüftung) beeinflusst wurden, was sich auch in den gemessenen  $\text{NO}_2$ -Konzentrationen widerspiegelte. Größere Partikel, einschließlich  $\text{PM}_{10}$ -Verschmutzung, stammten jedoch hauptsächlich aus internen Quellen (z. B. Kreidestaub, Klassenaktivität). Sowohl im Hausstaub ( $\text{PM}_{10}$ ) als auch im Feinstaub ( $\text{PM}_{2,5}$ ) wurden regelmäßig zahlreiche toxische VOC-Verbindungen nachgewiesen. Erhöhte Konzentrationen bestimmter Schadstoffe (einschließlich Ethylbenzol, Xylol, Formaldehyd, Benzylbutylphthalat, PBDE 196 und Trisphosphat TDCPP) zeigten eine Korrelation mit einer Abnahme der Lungenfunktion. Die Ergebnisse der Lungenfunktions- und kognitiven Leistungstests deuteten darauf hin, dass die weitere Umgebung der Kinder wahrscheinlich einen Einfluss auf diese beiden Faktoren hatte. Insbesondere wurde festgestellt, dass Schimmel in der Wohnung und (Passiv-)Rauchen mit einer verminderten Lungenfunktion in Zusammenhang stehen.

$\text{NO}_2$ -Werte werden häufig als Tracer für Verkehrsemissionen verwendet und lagen in dieser Studie in einem relativ engen Bereich von  $8,7$  bis  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (als Durchschnitt über 4–14 Tage Exposition). Diese Werte liegen deutlich innerhalb der Richtwerte, die von der Ad-hoc-Arbeitsgruppe der Innenraumluftkommission (von  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) zu diesem Zeitpunkt festgelegt wurden (Hohenblum, 2008). Es ist jedoch bemerkenswert, dass die WHO den Schwellenwert für den 1-Tages-Durchschnitt (bewertet am 99. Perzentil des Tagesmittelwerts) in den Luftgüteleitlinien von 2021 auf  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  gesenkt und eine jährliche Stickstoffdioxid-Luftqualitätsrichtlinie (AQG) von  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  empfohlen hat (WHO, 2021b).

In den untersuchten Klassenzimmern wurde eine signifikant erhöhte  $\text{CO}_2$ -Konzentration festgestellt. In 16 der 18 untersuchten Klassen wurde ein maximaler gleitender Stundenmittelwert von 1.400 ppm

CO<sub>2</sub> überschritten, während in 15 der 18 untersuchten Klassen absolute Höchstwerte über 1.900 ppm gemeldet wurden. In nur einer der 18 untersuchten Klassen wurden alle Anforderungen der Richtlinie zur Bewertung von CO<sub>2</sub> erfüllt, was darauf hindeutet, dass in der überwiegenden Mehrheit der Klassenräume keine ausreichende Frischluftzufuhr vorhanden war, um hygienische Bedingungen aufrechtzuerhalten (Hohenblum, 2008).

**Altrichter und Helm, 2022** – dieser Artikel berichtet über die COVID-bezogene Bildungsforschung in Österreich und gibt einen umfassenden Überblick über die österreichischen Maßnahmen zur Pandemiebekämpfung im Schulbereich von 2020 bis Anfang 2022. Die Studie (Altrichter, 2022) konzentriert sich in erster Linie auf die Auswirkungen von Schulschließungen und COVID-19-Präventionsmaßnahmen auf das Lernen und das Wohlbefinden von Kindern und Jugendlichen. Die Studie beschreibt zwar die wichtigsten Prophylaxestrategien, die im „4-Punkte-Plan“ der Ministerien (BMBWF, 2021) festgelegt wurden (darunter Abwasserüberwachung, PCR- und Antigentests an Schulen, Impfbusse und Mittel zur Unterstützung der Anschaffung von Raumlufthereinigern), versucht jedoch nicht, den Erfolg dieser Maßnahmen in Bezug auf die Verbesserung der Gesundheit und Sicherheit von SuS und Schulpersonal oder die Eindämmung von SARS-CoV-2 in österreichischen Schulen zu bewerten.

**Pollozhani et al., 2024** – untersuchten die Auswirkungen verschiedener Lüftungsstrategien auf die Energieeffizienz, die Qualität der Innenraumluft und die SARS-Cov-2-Virusübertragung in einem österreichischen Universitätsseminarräume. Diese numerische und analytische Studie (Pollozhani, 2024) kam zu dem Schluss, dass höhere Lüftungsraten durch hybride und mechanische Lüftungssysteme das Risiko einer weiträumigen Übertragung von Viren über die Luft zwar deutlich verringern, das Risiko jedoch ohne zusätzliche prophylaktische Maßnahmen (d. h. Maskentragen) nicht ausgeschlossen werden kann. Insgesamt wurde festgestellt, dass hybride Lüftung und raumbezogene mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung den besten Kompromiss zwischen Endenergieverbrauch, thermischem Komfort, Raumlufqualität und Infektionsrisiko bieten.

## 2.2 Europäische Schulstudien und damit zusammenhängende Forschung

Zwar wurde in einer Reihe von Studien die Wirksamkeit der aktuellen Richtlinien und Praktiken in Bezug auf die langfristige Bereitstellung einer angemessenen Belüftung und Raumlufqualität in europäischen Schulen untersucht, doch nur ein kleiner Teil davon wurde in einem ausreichenden Umfang durchgeführt, um verlässliche Rückschlüsse auf nationaler und/oder europäischer Ebene zu ziehen. Zu den gemeinsamen Einschränkungen vieler Studien gehören kleine Stichprobenumfänge und Stichprobenverfahren (die in der Regel die Heterogenität der Schularten und die Merkmale der Lüftungssysteme nicht berücksichtigen) sowie die kurze Dauer vieler Studien (die die ganzjährige Performance natürlich belüfteter Schulen nicht erfassen). Dennoch werden hier einige Studien aufgeführt, da sie besonders aufschlussreiche Erkenntnisse liefern, und zwar in Bezug auf den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Sensoren, verbesserte Lüftungspraktiken in verschiedenen Jahreszeiten und Schularten sowie den Einfluss der Lüftungsraten auf die Lernergebnisse und die Anwesenheit.

**Geelen et al., 2008** – untersuchten die Wirksamkeit des Einsatzes von CO<sub>2</sub>-Sensoren als Mittel zur Verbesserung der Lüftungsergebnisse in 20 niederländischen Grundschulen über einen Zeitraum von neun Wochen. Es wurden nur Klassenräume mit natürlicher Belüftung (z. B. Fenster, Lüftungsgitter) einbezogen, so dass der Luftstrom vom Lüftungsverhalten abhing. Die Autor\*innen berichteten, dass die Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Warngeräts und eines begleitenden Informationspakets wirksame

Instrumente zur Verbesserung des Lüftungsverhaltens und der Luftqualität in den Klassenräumen zu sein schienen. Umgekehrt stellten sie fest, dass die Erteilung von klassenbezogenen Lüftungsempfehlungen ohne jegliche Hilfsmittel unwirksam war. Die Autoren dieser Studie weisen darauf hin, dass die Belüftung zwar deutlich verbessert wurde (durch Verhaltensänderungen und den Einsatz eines CO<sub>2</sub>-Sensors), die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenzimmern aber immer noch während mehr als 40 % des Schultages über 1000 ppm lag. Folglich kam die Studie zu dem Schluss, dass ein CO<sub>2</sub>-Warngerät und ein Informationspaket für den Unterricht zwar nützliche Hilfsmittel zur Verbesserung des Lüftungsverhaltens und der Luftqualität in den Klassenzimmern sind, dass aber letztlich die Lüftungsanlagen aufgerüstet werden müssen (Geelen, 2008).

**Wargocki und Wyon, 2013** – fassen die Ergebnisse einer Reihe von Experimenten zu den Auswirkungen schlechter Raumluftqualität und Belüftung auf die Leistung von Schulkindern zusammen. Sie kommen zu dem Schluss, dass Klassenzimmertemperaturen über 20–22 °C (aus Lernperspektive) suboptimal sind. Die Autor\*innen schätzen, dass Versuche, Heizenergie in Schulen durch Reduzierung der Lüftungsraten einzusparen, die schulischen Leistungen der Kinder um bis zu 30 % verringern können (Wargocki & Wyon, 2013).

**Csobod, 2014** – Die SINPHONIE-Studie gilt als wegweisende Studie zur Innenraumluftqualität in europäischen Schulen und Kindertagesstätten. Die Studie hatte drei Hauptziele: (i) Beitrag zur besseren Charakterisierung der Innenraumluftqualität in EU-Schulen; (ii) Ausarbeitung von Empfehlungen für Abhilfemaßnahmen (iii) Verbreitung von Leitlinien für politische Entscheidungsträger\*innen. Die Studie erfasste eine Vielzahl von physikalischen und Komfortparametern (einschließlich Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Belüftungsrate) sowie wichtige chemische und biologische Schadstoffe (einschließlich von der WHO und der Europäischen Kommission anerkannter prioritärer Verbindungen) in 114 Schulen und Kindertagesstätten in 23 teilnehmenden Ländern.

Die Ergebnisse zeigten, dass mehr als 85 % der Schulkinder einer PM<sub>2,5</sub>-Konzentration von über 10 µg/m<sup>3</sup> ausgesetzt waren (der damalige Jahresmittelwert der WHO-Richtlinie, der inzwischen auf 5 µg/m<sup>3</sup> gesenkt wurde). Die Expositionsgrenzwerte für zahlreiche andere wichtige Schadstoffe wie Radon, Benzol und Formaldehyd wurden von einem erheblichen Prozentsatz der SuS überschritten. Bemerkenswert ist, dass 50 % der Kinder und LuL auch hohen Konzentrationen von Endotoxinen und Mikroben (die typischerweise in feuchten, schlecht belüfteten Gebäuden vorkommen) ausgesetzt waren, und zwar in höheren Konzentrationen als im Freien. Die Konzentrationen verkehrsbedingter Schadstoffe (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>) waren in der Nähe vieler Schulen erhöht, und 58 % der Schulen waren Straßenlärm ausgesetzt.

Die mittleren und medianen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen lagen sowohl in Volksschulen als auch in Kindergärten bei über 1.000 ppm, wobei Schulen in Mittel-, Ost- und Südeuropa durchschnittliche Konzentrationen von über 1.500 ppm aufwiesen. Die Mehrheit (86 %) der Lüftungsraten in Klassenzimmern lag unter dem (zu diesem Zeitpunkt) empfohlenen Zielwert von 4 l/(s·Person), ein Wert, der deutlich unter dem aktuellen EN-Standard 16798-1 (Tab. 2-9) und der ÖNORM H 6039 (Tab. 2-3) liegt. Der Bericht führt dieses Ergebnis auf die hohe Belegungsdichte in vielen Klassenzimmern zurück (20 % der Klassenzimmer verfügten über eine Bodenfläche von weniger als 2 m<sup>2</sup> pro Kind) und auf die unangemessene Art und Weise, in der die Belüftungsraten oft angegeben wurden (d. h. in Form von Luftwechseln pro Stunde (ACH) statt in Litern pro Sekunde und Person).

Was die gesundheitlichen Auswirkungen der Luftverschmutzung betrifft, so wurde festgestellt, dass Kinder in Schulen mit erhöhten Konzentrationen chemischer Luftschadstoffe einem höheren Risiko ausgesetzt sind, an aktuellen Symptomen im Zusammenhang mit verschiedenen Atemwegserkrankungen zu leiden. 3,6 % der Schulkinder hatten in der Schule Asthmaanfälle. Die Ergebnisse des SINPHONIE-Projekts zeigen, dass Asthma in der Schule etwa 100.000 Kinder in Europa betreffen könnte. Auch LuL hatten Atemwegsprobleme: 17 % gaben an, an Husten oder Schleim zu leiden, 27 % an einer Nasenallergie (zu irgendeinem Zeitpunkt in ihrem Leben) und 9 % hatten die ärztliche Diagnose Asthma erhalten. Trotz der umfassenden Richtlinien, die im Rahmen der SINPHONIE-Studie erstellt wurden und für die Planungs-, Entwurfs-, Bau- und Betriebsphasen neuer und bestehender Schulen relevant sind, ist nicht bekannt, inwieweit diese Richtlinien umgesetzt wurden (Annesi-Maesano, 2014).

**Wargocki und Da Silva, 2015** – verwendeten CO<sub>2</sub>-Sensoren mit visuellen Anzeigen in Klassenzimmern während des normalen Schulbetriebs. Während eines Zeitraums von zwei Wochen wurden LuL und SuS angewiesen, die Fenster als Reaktion auf das visuelle CO<sub>2</sub>-Feedback eine Woche lang zu öffnen und sie dann in der anderen Woche so zu öffnen, wie sie es normalerweise tun würden, ohne visuelles Feedback. Die Ergebnisse zeigten, dass die Bereitstellung eines visuellen CO<sub>2</sub>-Feedbacks die CO<sub>2</sub>-Werte im Klassenzimmer senkte, da mehr Fenster geöffnet wurden, was zu einem höheren Energieverbrauch für die Heizung im Winter und einem geringeren Kühlbedarf im Sommer führte (Wargocki und Da Silva 2015).

**Canha et al., 2016** – charakterisierten die Beziehung zwischen Belüftung und Innenraumlufthausqualität in 51 französischen Klassenzimmern in 17 Schulen durch die Überwachung einer Reihe von Parametern (einschließlich CO<sub>2</sub>, flüchtige organische Verbindungen (VOC), Aldehyde und Feinstaub sowie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit). Die Studie untersuchte den Einfluss der Jahreszeit (Heizung oder Nicht-Heizung), der Schulart und der Belüftungsrate auf die Innenraumlufthausqualität. Ausgehend vom Mindestwert von 4,2 l/(s·Person), der (zu diesem Zeitpunkt) in der französischen Gesetzgebung für mechanisch belüftete Klassenzimmer vorgeschrieben war, wurde festgestellt, dass 91 % der Klassenzimmer unzureichend belüftet waren. Die Belüftungsrate (VR) war in mechanisch belüfteten Klassenzimmern deutlich höher als in natürlich belüfteten Räumen. Die Korrelationen zwischen Innenraumlufthausqualität und Belüftung variierten je nach Lage der Hauptquelle jedes Schadstoffs (d.h. außen vs. innen) und bei Innenquellen je nachdem, ob sie mit Aktivitäten der Nutzer\*innen oder mit kontinuierlichen Emissionen in Verbindung standen (Canha, 2016).

**Petersen et al., 2016** – untersuchten die Auswirkungen erhöhter Belüftungsraten in Klassenzimmern auf die Leistung von Kindern im Alter von 10 bis 12 Jahren. Es wurde eine doppelblinde 2 × 2-Crossover-Studie durchgeführt, bei der vier Klassenzimmer an zwei verschiedenen Schulen in der Nähe von Aarhus (Dänemark) verwendet wurden, die sich in einem Umkreis von 1 km befanden. Es wurden vier verschiedene Tests durchgeführt, um die kurzfristige Konzentration und das logische Denken bei unterschiedlichen Belüftungsraten zu bewerten. Die Analyse der Ergebnisse zeigte, dass sich die Anzahl der richtigen Antworten in vier von vier Leistungstests, Addition (6,3 %), Zahlenvergleich (4,8 %), grammatikalisches Denken (3,2 %) und Lesen und Verstehen (7,4 %), signifikant verbesserte, wenn die Außenluftfrate von durchschnittlich 1,7 auf 6,6 l/(s·Person) erhöht wurde (Petersen, 2016).

**Stabile et al., 2017** – analysierten die Innenraumlufthausqualität (basierend auf der CO<sub>2</sub>- und Feinstaubkonzentration) in 5 natürlich belüfteten Klassenzimmern in 3 Schulen in Mittelitalien. Die

Messungen wurden sowohl in der Heizperiode als auch in der Nicht-Heizperiode durchgeführt. Die Ergebnisse zeigten, dass die in Innenräumen erzeugten Schadstoffe (z.B. CO<sub>2</sub>) in kalten Zeiten deutlich höher waren als in warmen Zeiten des Jahres. Dies wurde auf die kürzeren Lüftungszeiten im Winter zurückgeführt. In einer ausgewählten Klasse wurde bei Messungen unter verschiedenen Lüftungsstrategien festgestellt, dass eine längere Lüftungsdauer die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen sowie andere in Innenräumen erzeugte gasförmige Schadstoffe reduzierte. Umgekehrt wurden in Innenräumen aufgrund der längeren Lüftungsdauer höhere Konzentrationen an ultrafeinen Partikeln (und anderen verkehrsbedingten Schadstoffen) gemessen. Die Studie (Stabile et al., 2017) hebt die Herausforderungen des manuellen Lüftens von Räumen bei kaltem Wetter hervor und zeigt auch die Grenzen der natürlichen Belüftung in bestimmten Umgebungen auf, in denen hohe Konzentrationen an externen Schadstoffen vorhanden sind.

**Carrer et al., 2018** – fassen die Ergebnisse des HealthVent-Projekts (Seppänen et al., 2012) zusammen, dessen Ziel es war, gesundheitsbasierte Lüftungsrichtlinien für öffentliche Gebäude und Wohngebäude zu entwickeln und durch diesen Prozess zur Weiterentwicklung von Richtlinien und Leitlinien für die Luftqualität in Innenräumen (IAQ) beizutragen. Der HealthVent-Rahmen basiert auf drei Grundsätzen: (i) Annahme von Kriterien für zulässige Konzentrationen bestimmter Luftschadstoffe, die von Gesundheitsbehörden festgelegt wurden und eingehalten werden müssen; (ii) Lüftungsstrategien müssen durch Methoden zur Kontrolle der Schadstoffquellen ergänzt werden, um die Freisetzung schädlicher Verunreinigungen zu begrenzen; (iii) Die Grundlüftungsraten müssen ausreichen, um die Emissionen der Bewohner\*innen (d. h. Bioabwässer) zu entfernen. Die HealthVent-Schwellenwerte wurden unter der Annahme abgeleitet, dass die Außenluft den Luftqualitätsrichtlinien der Weltgesundheitsorganisation (WHO) entspricht, in denen vorgeschlagen wird, die Grundlüftungsrate auf 4 l/(s·Person) festzulegen. An zahlreichen europäischen Standorten wird diese Annahme jedoch nicht routinemäßig erfüllt. In solchen Fällen sieht der HealthVent-Leitfaden vor, dass höhere Lüftungsraten verwendet werden müssen. In Bezug auf die Auslegung des HealthVent-Rahmens in Bezug auf gesundheitsbasierte Lüftungsergebnisse ist anzumerken, dass diese Leitlinien vor der COVID-19-Pandemie erstellt wurden. Darüber hinaus empfehlen die Autor\*innen in Bezug auf die praktische Anwendung des Rahmens, dass *„studies are also needed to examine the effectiveness of the approach and to validate its use“* [ auch Studien erforderlich sind, um die Wirksamkeit des Ansatzes zu untersuchen und die Anwendung zu validieren ] (Carrer, 2018).

**Greenpeace, 2018** – In Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Buro Blauw und Projektpartnern führte Greenpeace Belgien in 222 Volksschulen in Belgien (46 % der Schulen befanden sich in ländlichen Gebieten und 54 % in städtischen oder urbanisierten Gebieten) eine Luftqualitätsüberwachung durch. Die Studie konzentrierte sich auf die Überwachung von NO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>, um die Auswirkungen von Straßen in der Nähe von Schulen zu bewerten. Luftproben wurden auf dem Schulhof (außerhalb der Schule), im Eingangsbereich der Schule und in einem repräsentativen Klassenzimmer entnommen. In Bezug auf NO<sub>2</sub> ergab die Studie, dass es kaum einen Unterschied zwischen der Straße und dem Schulhof gab (unabhängig davon, ob sich der Schulhof an der Vorder- oder Rückseite der Schule befand). Die in den Klassenzimmern gemessenen NO<sub>2</sub>-Jahresmittelwerte waren erhöht und lagen in der Mehrheit der Schulen über 20 µg/m<sup>3</sup>, wobei 5 Schulen den gesetzlichen EU-Grenzwert von 40 µg/m<sup>3</sup> überschritten. Die Schadstoffkonzentrationen waren in Schulen, die in einer „städtischen Schlucht“ lagen (d. h. in einer von hohen Gebäuden gesäumten Straße, in der sich die Luftverschmutzung nicht leicht verteilen kann), am stärksten ausgeprägt. Ein interessantes Ergebnis dieser Studie ist, dass in Klassenzimmern mit mechanischer Belüftung höhere NO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen wurden als in natürlich belüfteten Klassenzimmern (was darauf

hindeutet, dass die mechanischen Belüftungssysteme verschmutzte Luft aus der angrenzenden Straße ansaugten). Obwohl in natürlich belüfteten Klassenzimmern niedrigere NO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen wurden als auf der Straße, spiegelt dieses Ergebnis lediglich die Tatsache wider, dass die natürlich belüfteten Klassenzimmer im Allgemeinen schlecht belüftet waren (dieses Ergebnis wurde durch vergleichende CO<sub>2</sub>-Messungen bestätigt). Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in den untersuchten Klassenzimmern lag im Durchschnitt bei 1250 ppm, während die durchschnittlichen Konzentrationswerte über einen Zeitraum von zwei Stunden zwischen 1500 und 1700 ppm lagen. Es ist zu beachten, dass diese Studie über einen Zeitraum von drei Wochen im November und Dezember 2017 durchgeführt wurde, zu einer Zeit, in der die Fenster der Klassenzimmer aufgrund der kalten Außentemperaturen oft geschlossen waren (Greenpeace, 2018).

**Wargocki et al., 2020** – prüften die Literatur zu Belüftung, schulischer Leistung und Schulfehltagen (vor der Covid-19-Pandemie) und verwendeten dabei CO<sub>2</sub> als Messgröße für die Belüftung. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Erhöhung der Belüftungsrate in Klassenzimmern im Bereich von 2 l/(s·Person) bis zu 10 l/(s·Person) zu erheblichen Leistungsverbesserungen führen kann, und zwar in Bezug auf das Ergebnis psychologischer Tests und die Geschwindigkeit, mit der Aufgaben ausgeführt werden, sowie auf die Verbesserung der Anwesenheit. Es lagen jedoch keine Daten vor, um die Vorteile höherer Belüftungsraten (d.h., mehr als 10 l/(s·Person)) zu untersuchen (Wargocki, 2020).

**Avella et al., 2021** – führten eine dreiwöchige Überwachungsstudie in vier Schulen in Südtirol durch, um die Auswirkungen der Verwendung eines CO<sub>2</sub>-basierten visuellen Warnsystems zur Verbesserung der Innenraumluftqualität in historischen Schulklassenräumen zu untersuchen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein visuelles Warnsystem, das anzeigt, wann Fenster geöffnet werden sollten, die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenzimmer um bis zu 42 % senken kann. Die besten Ergebnisse wurden bei milden Außenbedingungen erzielt (Avella, 2021).

**Di Gilio et al., 2021** – führten nach dem COVID-19-Lockdown eine Echtzeitüberwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (als Indikator für das SARS-CoV-2-Übertragungsrisiko) in 11 Klassenzimmern an 9 Schulen in der Region Apulien (Süditalien) durch. Sie zeigten, dass die Umsetzung detaillierter Lüftungsprotokolle, die auf spezifischen Maßnahmen und gleichzeitiger Echtzeit-Visualisierung der CO<sub>2</sub>-Werte basieren, zu einer allgemeinen Verbesserung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen führte, wobei jedoch in der Mehrzahl der Klassenzimmer mittlere CO<sub>2</sub>-Werte von über 1000 ppm gemessen wurden, obwohl ein Grenzwert von 700 ppm empfohlen wurde (Di Gilio, 2021).

**EMPA, 2021** – Die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) überwachte die CO<sub>2</sub>-Konzentration in 150 Klassenzimmern an 59 Schulen und stellte fest, dass in 60 % der Klassenzimmer die CO<sub>2</sub>-Konzentration von 2000 ppm überschritten wurde. Darüber hinaus wurde ein statistischer Zusammenhang zwischen der Anzahl der wöchentlichen COVID-19-Fälle und der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentration festgestellt, mit dem Ergebnis, dass sich in unzureichend belüfteten Klassenzimmern deutlich mehr SuS mit SARS-CoV-2 infizierten (EMPA, 2021).

**Buonanno et al., 2022** – belegten den positiven Einfluss höherer Luftwechselraten durch mechanische Lüftungssysteme (MVS) auf das Infektionsrisiko mit SARS-CoV-2 in 1.419 Schulen in der italienischen Region La Marche, indem sie insgesamt 10.411 Klassenzimmer im Zeitraum von September 2021 bis Ende Januar 2022 überwachten. Die Wahrscheinlichkeit einer SARS-CoV-2-Infektion in mechanisch belüfteten Klassenzimmern war im Vergleich zu Klassenzimmern mit natürlicher Belüftung um

mindestens 74 % reduziert. Bei mechanischen Belüftungsraten von über 10 l/(s·Person) wurde das Risiko einer Übertragung durch die Luft auf bis zu 80 % reduziert (Buonanno, 2022).

**Zhang, Ding und Bluysen, 2022** – führten eine Labor- und Feldstudie durch, die den Einfluss verschiedener CO<sub>2</sub>-Sensorpositionen in einem Klassenzimmer unter verschiedenen Lüftungsbedingungen aufzeigt. Durch die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in einem Versuchsklassenzimmer an 18 verschiedenen Stellen wurde nachgewiesen, dass die Konzentration zwischen verschiedenen Stellen im selben Raum stark variierte, insbesondere bei natürlicher Belüftung. Die Ergebnisse zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen an mehreren Stellen in einem Klassenzimmer überwacht werden müssen, um Messunsicherheiten zu reduzieren. Bei guter Durchmischung (z. B. in mechanisch belüfteten Klassenzimmern) scheint jedoch eine einzige Messposition ausreichend zu sein. Es wurde auch festgestellt, dass die Wand gegenüber den Fenstern und die Vorderwand (in der Nähe des Lehrkörpers) die repräsentativsten Stellen für die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration waren (Zhang, 2022).

**Rowe et al., 2022** – leiteten die zeitliche Entwicklung der Quantenkonzentration des SARS-CoV-2-Virus in der Luft unter stationären Bedingungen für einen gut durchmischten Raum ab und verknüpften diese dann mit der überwachten CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum, um die Risikowahrscheinlichkeiten für die Übertragung durch die Luft zu bestimmen. Anhand eines Dosis-Wirkungs-Modells veranschaulichten die Autor\*innen, dass der Unterschied in den Quantenproduktionsraten zwischen verschiedenen Virusvarianten eine enorme Rolle bei der Dosiskonzentration und damit bei der Infektionswahrscheinlichkeit spielt. Sie betonten auch, dass die Dauer der Exposition und die Belüftungsrate (pro Person) einen erheblichen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit einer Übertragung von Viren über die Luft haben. Auf dieser Grundlage führten sie eine Risikoanalyse für eine Vielzahl von Situationen auf der Grundlage überwachter CO<sub>2</sub>-Zeitreihenbeobachtungen durch. Als Ergebnis dieser Überwachung kommen sie zu dem Schluss, dass die derzeitigen Normen in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte, die zur Minimierung der Risiken einer Übertragung über die Luft erforderlich sind, *“insufficient and not respected”* sind [unzureichend sind und nicht eingehalten werden]. Sie weisen darauf hin, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen allein ein unzuverlässiger Indikator für das Infektionsrisiko ist und dass die Angabe von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten als einzelner deterministischer Wert (z. B. 1000 ppm) irreführend ist, da sie den kritischen Faktor der Expositionszeit außer Acht lässt. Auf dieser Grundlage empfehlen sie, dass ein viel niedrigerer Schwellenwert von 600 ppm erforderlich ist, um die Risiken in nicht maskierten Umgebungen, einschließlich Schulen, weiter zu reduzieren (Rowe, 2022), allerdings werden nur wenige Belege für diese Behauptung angeführt.

**Schwarzbauer, 2022** – verglich die Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden in 244 Klassenzimmern über einen Zeitraum von einem Jahr (insgesamt 37.000 Schultage) in der Region Bayern in Deutschland. Es wurden mehrere Lüftungsmethoden (einschließlich natürlicher Lüftung – auch in Kombination mit mobilen Luftreinigern, ventilatorunterstützter Fensterlüftung sowie zentralen und dezentralen mechanischen Lüftungsgeräten (AHUs)) untersucht. Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen lagen bei natürlicher Belüftung in 24 % der Fälle über 1000 ppm, bei Fensterlüftung mit Ventilatorunterstützung in 16 %, bei dezentralen Lüftungsanlagen in 11 % und bei zentralen Lüftungsanlagen in 21 % der Fälle. Die mediane CO<sub>2</sub>-Konzentration betrug 776 ppm bei zentralen Lüftungsanlagen, 764 ppm bei Fensterlüftung in Kombination mit mobilen Luftreinigern, 750 ppm bei Fensterlüftung, 710 ppm bei (Hybrid-)Lüftung mit Ventilator und 706 ppm bei dezentralen (raumbezogenen) Lüftungsanlagen. Diese relativ niedrigen Medianwerte könnten durch die erhöhte Lüftungsvigilanz in der Anfangsphase der COVID-19-Pandemie beeinflusst worden sein.



Es wurde auch eine Abhängigkeit von der Jahreszeit beobachtet, wobei in der warmen Jahreszeit niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen gemessen wurden als in der kalten Jahreszeit, was auf die längeren Lüftungszeiten bei wärmeren Temperaturen zurückzuführen war. Durch die Definition eines Referenzklassenzimmers wurde ein standardisierter Virusdosisfaktor (VDF) für die luftgetragene Übertragung von SARS-CoV-2 und Influenza A erstellt (unter Verwendung analytischer Gleichungen zur Bestimmung der eingeatmeten Virusdosis für ein Standardklassenzimmer, wobei ein gut durchmischter Luftaustausch mit einer Rate von 3 ACH angenommen wurde). Der VDF-Referenzwert (von 1) wurde für 40 % der gesamten Unterrichtszeit überschritten und war in Klassenzimmern mit natürlicher Belüftung am ungünstigsten. Durch die Kombination von freier Fensterlüftung und mobilen Luftreinigern konnte die VDF deutlich reduziert werden, die Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte blieben jedoch unverändert (Schwarzbauer, 2022).

**Uhde et al., 2022** – untersuchten die Wirksamkeit verschiedener luftreinigender Maßnahmen (einschließlich Fensterlüftung und Luftreiniger) zur Reduzierung der Bioaerosolexposition in Schulklassenräumen. Bakteriophagen (Typ MS2) wurden verwendet, um eine Reihe von Maßnahmen zu testen, darunter: die Erhöhung der Luftwechselraten (durch Fensterventilatoren und mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung), die Verwendung mobiler Luftreiniger und die Desinfektion durch Einbringen von aktiven Wirkstoffen in die Innenraumluft von Klassenzimmern. Die Autor\*innen liefern Belege dafür, dass sowohl eine verstärkte Belüftung (z. B. durch Fensterventilatoren) als auch der Einsatz tragbarer Luftreiniger die Anzahl lebensfähiger Viren im Raum wirksam reduzieren. Im Gegensatz zu einer Studie von Blocken et al. (2021) wurde jedoch festgestellt, dass die Kombination der beiden Maßnahmen nicht zuverlässig zu einer weiteren Verbesserung der Luftqualität führte (Uhde, 2022).

**Burridge et al., 2023** – Untersuchten Schwankungen der Belüftung in Klassenzimmern während der COVID-19-Pandemie. Sie überwachten die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und die Lufttemperatur in 36 natürlich belüfteten Klassenzimmern an zwei Volksschulen und zwei weiterführenden Schulen in England im Jahr 2021. Die Autor\*innen stellten fest, dass die CO<sub>2</sub>-Werte in den Klassenzimmern im Vergleich zu den britischen Richtlinien für die Luftqualität in Schulen (Education and Skills Funding Agency, 2018) in Zeiten wärmeren Wetters relativ niedrig blieben, während in der kalten Jahreszeit erhöhte CO<sub>2</sub>-Werte zu verzeichnen waren. Die Forscher fanden heraus, dass die CO<sub>2</sub>-Daten zwischen den Schulen und zwischen den Klassenzimmern derselben Schule erheblich variierten, und wiesen darauf hin, dass weitere Untersuchungen erforderlich sind, um die Ursachen für unterschiedliche Lüftungsverhalten in Klassenzimmern zu ermitteln. Sie stellten außerdem fest, dass die Lüftungsraten in der kalten Jahreszeit im späteren Verlauf des Jahres 2021 deutlich niedriger waren als in einer ähnlich kalten Wetterperiode zu Beginn des Jahres, was im Widerspruch zu den Erwartungen der Forschenden stand, die nach einem Jahr intensiver öffentlicher Berichterstattung über COVID-19 geäußert worden waren (Burridge, 2023).

**Helleis et al., 2023** – Forschende des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz berichten über die Entwicklung eines hybriden mechanischen Abluftsystems (MEV). Sie verglichen ausführlich die Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden zur Verbesserung der Luftqualität und Infektionskontrolle in Klassenzimmern und zeigen, dass die Fensterlüftung mit einfacher technischer Unterstützung wie Abluftventilatoren und CO<sub>2</sub>-Sensoren eine kostengünstige Methode zur Verbesserung der Raumluftqualität und zur Verringerung der Aerosolübertragung von Infektionskrankheiten wie COVID 19 oder Influenza darstellt (Helleis, 2023).

**Haddrell et al., 2024** – analysierten die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Atemwegs-Aerosolen, die die Stabilität und Infektiosität von Viren beeinflussen. Sie zeigten, dass eine signifikante Erhöhung der SARS-CoV-2-Aerostabilität bereits durch einen moderaten Anstieg der atmosphärischen  $\text{CO}_2$ -Konzentration (z. B. von 500 ppm auf 800 ppm) erreicht wird. Unabhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit zeigen sie, dass eine Erhöhung des  $\text{CO}_2$ -Gehalts den pH-Wert eines alkalischen Atemtröpfchens bis zu einem gewissen Grad in Richtung pH-Neutralität treibt. Infolgedessen wird bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % und darunter gezeigt, dass moderate Erhöhungen des  $\text{CO}_2$ -Gehalts die aerogene Stabilität von Viren erhöhen. Diese Erkenntnis liefert einen Anscheinsbeweis dafür, dass  $\text{CO}_2$  nicht nur ein Indikator für schlechte Belüftung ist, sondern eine direkte Rolle bei der viralen Infektiosität spielt. Die Studie unterstreicht die entscheidende Bedeutung von Frischluft und die Notwendigkeit, niedrige  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Innenräumen aufrechtzuerhalten, um die Übertragung von Viruserkrankungen durch die Luft zu verringern (Haddrell, 2024).

**Wood et al., 2024** – berichteten über die Pro-Kopf-Lüftungsraten, die aus  $\text{CO}_2$ -Daten abgeleitet wurden, die in 322 britischen Schulen (während des Herbsttrimesters 2023) im Rahmen des bürgerwissenschaftlichen Projekts „School's Air Quality Monitoring for Health and Education (SAMHE)“ gemessen wurden. Sie bestätigten, dass die tägliche Einhaltung der bestehenden britischen  $\text{CO}_2$ -Richtlinien für Schulen (Education and Skills Funding Agency, 2018) stark von der durchschnittlichen Außentemperatur abhängt. Genauer gesagt haben sie erkannt, dass die durchschnittliche Belüftungsrate insgesamt bei 5,3 l/s (Person) lag; bei wärmerem Wetter stieg sie auf 6,8 l/s (Person) und bei kälterem Wetter fiel sie auf 3,8 l/s (Person). Sie stellten außerdem fest, dass die  $\text{CO}_2$ -Werte in Klassenzimmern in privaten (gebührenpflichtigen) Schulen und in Schulen in wohlhabenderen Gegenden im Durchschnitt niedriger waren. In Klassenzimmern mit SuS unter elf Jahren wurde ein niedrigerer  $\text{CO}_2$ -Gehalt festgestellt, obwohl die Belüftungsraten denen älterer Klassen ähnelten. Es überrascht nicht, dass Schulen mit mehr SuS als ursprünglich vorgesehen einen höheren  $\text{CO}_2$ -Gehalt in den Klassenzimmern aufwiesen (Wood, 2024).

### 2.3 Internationale Schulstudien und damit zusammenhängende Forschung

**Shendell et al., 2004** – untersuchten die Zusammenhänge zwischen der  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Klassenzimmer und der Anwesenheit der SuS. Die Daten zu Fehlzeiten und  $\text{CO}_2$  wurden in 409 traditionellen und 25 mobilen Klassenzimmern von 22 Schulen in sechs Schulbezirken in den Bundesstaaten Washington und Idaho erhoben. Die Klassenzimmer der Studie verfügten über individuelle Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK), mit Ausnahme von zwei Klassenzimmern (die natürlich belüftet wurden). In 45 % der untersuchten Klassenräume lag die kurzfristige  $\text{CO}_2$ -Konzentration in Innenräumen über 1000 ppm. Die Studie ergab, dass ein Anstieg von 1000 ppm  $\text{CO}_2$  mit einem Rückgang der jährlichen durchschnittlichen täglichen Anwesenheit um 0,5–0,9 % verbunden war ( $p < 0,05$ ), was einem relativen Anstieg der Abwesenheiten von SuS um 10–20 % entspricht. Aufgrund dieser Ergebnisse empfehlen die Autor\*innen, dass *“Adequate or enhanced ventilation may be achieved, for example, with educational training programs for teachers and facilities staff on ventilation system operation and maintenance”* [eine angemessene oder verbesserte Belüftung beispielsweise durch Schulungsprogramme für LuL und Mitarbeitende der Einrichtungen zum Betrieb und zur Wartung von Belüftungssystemen erreicht werden kann]. Sie raten außerdem dazu, dass *“technological interventions such as improved automated control systems could provide continuous ventilation during occupied times, regardless of occupant thermal comfort demands.”* [technologische Maßnahmen wie verbesserte automatisierte Steuerungssysteme eine kontinuierliche

*Belüftung während der Nutzungszeiten gewährleisten könnten, unabhängig von den Anforderungen der Nutzer\*innen an den thermischen Komfort].*

**Mendell et al., 2013** – untersuchten über einen Zeitraum von zwei Jahren die Zusammenhänge zwischen VRs und krankheitsbedingten Fehlzeiten in 162 Klassenräumen (3. bis 5. Klasse) in 28 kalifornischen Volksschulen in drei Schulbezirken. Der Zusammenhang zwischen täglicher Fehlzeiten und Belüftungsrate (VR) wurde anhand von Echtzeit-CO<sub>2</sub>-Messungen in jedem Klassenzimmer geschätzt. Es wurde festgestellt, dass der Medianwert der VR in allen Schulbezirken unter dem Mindestwert von 7,1 l/(s·Person) lag, der in der kalifornischen Norm Title 24 (California Energy Commission, 2012) festgelegt ist. Bei jedem zusätzlichen Anstieg der VR um 1 l/(s·Person) wurde die Fehlzeiten in den Modellen für die kombinierten Bezirke um -1,6 % reduziert ( $p < 0,05$ ). Dieses Ergebnis folgt demselben Trend, der in der oben genannten früheren Arbeit von Shendell et al. (2004) gezeigt wurde, obwohl der in der früheren Studie berichtete Effekt zwei- bis fünfmal größer ist als die von Mendell et al. (2013) berichteten Ergebnisse. Die Studie verglich auch die Vorteile der Luftqualität und die Energiekosten erhöhter Belüftungsraten und zeigte, dass eine Erhöhung der Belüftungsraten in Klassenzimmern vom aktuellen kalifornischen Schuldurchschnitt (4 l/(s·Person)) auf den staatlichen Standard (7,1 l/(s·Person)) die Fehlzeiten um 3,4 % senken würde, wodurch die anwesenheitsgebundenen Mittel für Schulen um 33 Millionen US-Dollar pro Jahr steigen würden, während die Betriebskosten nur um 4 Millionen US-Dollar steigen würden. Die Ergebnisse (die noch bestätigt werden müssen) deuten darauf hin, dass eine Erhöhung der VR in Klassenzimmern über den kalifornischen Standard hinaus die Krankheitsausfallraten erheblich senken und gleichzeitig signifikante wirtschaftliche Vorteile bringen würde (Mendell, 2013).

**Laiman et al., 2014** – untersuchten Veränderungen der Partikelanzahlkonzentration (PNC), die von lokalen Quellen (entweder innerhalb oder neben den Klassenzimmern) über einen Zeitraum von zwei Wochen in natürlich belüfteten Grundschulklassenzimmern in 25 Schulen in Brisbane, Australien, herrühren. Messungen der PNC und von CO<sub>2</sub> wurden sowohl im Freien als auch in zwei ausgewählten Klassenzimmern durchgeführt. Die Luftwechselraten (ACH) in jedem Klassenzimmer wurden anhand eines exponentiellen Zerfallsmodells für die CO<sub>2</sub>-Konzentration von einer Spitzenzerfallskonzentration vor und während der Mittagspause geschätzt. Diese Methode beruht auf der Annahme, dass die Fensterlüftungsmuster während der Mittagspause den Mustern während der Belegungszeit ähneln. Basierend auf dieser Methode betrug die mediane Luftwechselrate während der Schulstunden 1,0 h<sup>-1</sup>, wobei die wärmeren Monate höher waren als die kälteren Monate. Dieser Wert wurde auf etwa 43 % höher als der zu diesem Zeitpunkt geltende ANSI/ASHRAE-Standard 62.1 (2013) geschätzt. Die mediane CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen während der Schulzeit betrug 430 ppm, im Vergleich zu einem Mittelwert von 373 ppm im Freien. Dieser Wert ist extrem niedrig (im Vergleich zu anderen Studien) und würde einem medianen Innenraumwert von 480 ppm (im Vergleich zu einem medianen Außenwert von 423 ppm) zum gegenwärtigen Zeitpunkt (2024) entsprechen. In einigen Klassenzimmern wurden kurzfristige Überschreitungen des Schwellenwerts von 1000 ppm gemeldet, die auf eine überdurchschnittlich hohe Belegungsichte in diesen Räumen zurückzuführen waren. Die Studie ergab außerdem, dass Partikel sowohl durch Luftaustausch als auch durch Ablagerung entfernt wurden, hauptsächlich durch Belüftung, wenn  $ACH > 0,7 \text{ h}^{-1}$ , und durch Ablagerung, wenn  $ACH < 0,7 \text{ h}^{-1}$ , was zeigt, dass höhere Belüftungsraten eine wichtige Rolle bei der Entfernung von intern erzeugten Feinpartikeln spielen können (Laiman, 2014).

**Bruns, 2023** – führte eine Kosten-Nutzen-Analyse durch, in der die Betriebskosten verschiedener Gebäudetypen unter normalen Betriebsbedingungen mit dem Infektionsrisikomanagementmodell

(IRMM) nach ASHRAE-Standard 241 ‚Control of Infectious Aerosols‘ (Kontrolle von infektiösen Aerosolen) (ASHRAE, 2023) verglichen wurden. Die Analyse wurde unter der Annahme durchgeführt, dass die Atemwegsvirus-Saison 112 Tage im Jahr dauert und dass jeden Tag 1 % der Bevölkerung infektiös ist. Die Berechnung des monetarisierten Nutzens basierte auf der Verwendung des Wells-Riley-Modells zur Schätzung der Veränderung der Infektionswahrscheinlichkeit in jedem Raum als Folge von Veränderungen der äquivalenten sauberen Luftstromrate ( $ECA_i$ ). Die Infektionsreduzierung wurde mit der Methodik des US-Gesundheitsministeriums (das jedes gewonnene Lebensjahr mit etwa 500.000 US-Dollar bewertet) in US-Dollar beziffert, während der Wert der Verhinderung eines Todesfalls auf 4 Millionen US-Dollar geschätzt wurde. Auf der Grundlage dieser Annahmen und unter Verwendung von Raumgeometrie- und Belegungsdaten, die aus den ASHRAE-Standards (62.1, 62.2 und 170) stammen, wurden die geschätzten Kosten und der monetarisierte Nutzen der COVID-19-Reduzierung für eine Vielzahl von Gebäude- und Raumtypen berechnet. Für Schulklassenräume (basierend auf einer Standardbelegung von 30 Personen) wird die Anzahl der verhinderten Infektionen auf 3,8 geschätzt, das einem monetären Wert von 7.000 USD und Implementierungskosten von 820 USD entspricht. Für einen Hörsaal (mit einer Belegung von 150 Personen) wird der monetarisierte Wert auf 25.000 \$ (USD) und die Kosten auf 7.500 \$ (USD) geschätzt. Basierend auf den verwendeten Annahmen ergibt sich ein klarer finanzieller und menschlicher Nutzen aus der Umsetzung des ASHRAE-Standards während der Zeit der Atemwegsviren. Es ist jedoch nicht klar, wie das Risiko der Übertragung über kurze Distanzen angegangen wurde (in Bezug auf die modellierte Gesamtrisikoreduzierung).

**Andamon et al., 2023** – überwachten ein Jahr lang die Innenraumluftqualität in 10 Klassenräumen von Volks- und weiterführenden Schulen in Victoria, Australien. Die Klassenräume wurden natürlich belüftet, wobei zusätzliche Klimaanlage für Heizung und Kühlung sorgten. Alle 10 Klassenräume der Studie überschritten den in Australien empfohlenen Medianwert für  $CO_2$  von 850 ppm, wobei 70 % der Klassenräume Medianwerte über 1000 ppm aufwiesen. Unter Verwendung der durchschnittlichen  $CO_2$ -Spitzenkonzentrationen aus einjährigen Messungen lag die geschätzte mittlere Belüftungsrate bei 4,08 l/(s·Person), was etwa 60 % unter den in den australischen Richtlinien empfohlenen 10-12 l/(s·Person) liegt (Andamon, 2023).

**Kurnitski et al., 2023** – entwickelten eine neue Methodik für die „gesundheitsbasierte“ Lüftungsplanung nach COVID. Die Methodik in diesem Papier untermauert die REHVA-Methode ‚Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases‘ (Gesundheitsbasierte Ziel-Lüftungsraten und Planungsmethode zur Reduzierung der Exposition gegenüber luftübertragenen Atemwegserkrankungen) (REHVA, 2022). Die Autor\*innen weisen auf die Einschränkungen der aktuellen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsrichtlinien in Bezug auf Viruslastdaten, Risikokontrollmethoden und unvollständige Luftvermischung hin, die ihrer Meinung nach zu Empfehlungen geführt haben, bei denen die Raumaktivität und die raumspezifische Viruslast sowie tatsächliche Luftverteilungssysteme, die von einer vollständigen Vermischung abweichen, nicht berücksichtigt werden. Um diese Einschränkungen zu überwinden, wird eine neue, auf dem Infektionsrisiko basierende Lüftungsgestaltungsmethode vorgeschlagen, die mit raumkategoriespezifischen Ziellüftungsraten und der Wirksamkeit der Punktquellenlüftung arbeitet. Ihre analytischen Ergebnisse deuten darauf hin, dass in Klassenzimmern und Büros die bestehende Belüftung nach EN 16798-1 Kategorie 1 in vielen Fällen ausreicht, während in Besprechungsräumen, Restaurants und Fitnessstudios eine höhere Außenluftvolumenströme erforderlich ist (Kurnitski, 2023).

**Zhang et al., 2023** – untersuchten die Umweltbedingungen in Innenräumen in einem Vorlesungssaal einer Universität in Peking, China. Sie zeichneten die Innentemperatur, die relative Luftfeuchtigkeit sowie die CO<sub>2</sub>- und VOC- Konzentration auf, während der Raum belegt war. Die Temperaturen wurden im Bereich von  $21,2 \pm 0,8$  °C bis  $26,8 \pm 0,7$  °C aufgezeichnet. Sie berichteten von mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Bereich von 1.291–1.833 ppm und Gesamtkonzentrationen flüchtiger organischer Verbindungen (TVOC) im Bereich von 159–1.178 ppb. Sie fassten zusammen, dass die subjektive Bewertung der Raumluftqualität bei 27 °C schlechter war als bei 24 °C. Sie stellten außerdem fest, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionsrate der SuS um 0,54 l/(h Person) pro 1 °C Anstieg der Raumtemperatur ebenfalls anstieg. Sie berechneten, dass die Außenluftzufuhr um 0,25 l/(s Person) erhöht werden müsste, um die Temperaturerhöhung auszugleichen, damit die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum 1.000 ppm nicht überschreitet (Zhang, 2023).

**Mendell et al., 2024** – prüften die Literatur auf Richtlinien zur Verwendung von CO<sub>2</sub> als Indikator für die Innenraumluftqualität und unterstützende Beweise. Von den 43 in der Studie identifizierten Richtlinien legten 35 einzelne CO<sub>2</sub>-Konzentrationsgrenzwerte und acht mehrstufige Grenzwerte fest. Die CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte in Innenräumen variierten zwischen 550 ppm und 1750 ppm, wobei der häufigste Grenzwert bei 1000 ppm lag. 13 Richtlinien spezifizierten maximale CO<sub>2</sub>-Grenzwerte als zeitgewichtete Mittelwerte, aber keine lieferte Belege für einen Zusammenhang zwischen den gemittelten Grenzwerten und den Auswirkungen auf die Nutzer\*innen. 18 Richtlinien führten Belege zur Unterstützung der festgelegten Grenzwerte an, aber nur acht davon wurden als überzeugend angesehen. Von diesen acht Richtlinien legten sieben Grenzwerte zur Kontrolle der Geruchswahrnehmung fest, während eine Richtlinie 17 wissenschaftlich fundierte CO<sub>2</sub>-Grenzwerte (zwischen 486 und 1535 ppm) für bestimmte Beispiele für Raumnutzung und -belegung (Afshari et al., 2023) vorsah, um die Übertragung von COVID-19 über große Entfernungen in Innenräumen zu kontrollieren. Die Autor\*innen argumentieren, dass *“No scientific basis is apparent for setting one CO<sub>2</sub> limit for IAQ across all buildings, setting a CO<sub>2</sub> limit for IAQ as an extended time-weighted average, or using any arbitrary one-time CO<sub>2</sub> measurement to verify a desired VR”* [es keine wissenschaftliche Grundlage dafür gibt, einen CO<sub>2</sub>-Grenzwert für die Innenraumluftqualität in allen Gebäuden festzulegen, einen CO<sub>2</sub>-Grenzwert für die Innenraumluftqualität als zeitlich gewichteten Durchschnitt festzulegen oder eine beliebige einmalige CO<sub>2</sub>-Messung zur Überprüfung einer gewünschten VR zu verwenden] (Mendell, 2024, S. 1). Um die Probleme mit den aktuellen CO<sub>2</sub>-Richtlinien anzugehen, empfehlen die Autor\*innen, CO<sub>2</sub>-Richtlinien zu erstellen, die je nach Bedarf auf unterschiedliche Raumnutzungen zugeschnitten sind, z. B. basierend auf den erwarteten Belegungs- und Aktivitätsniveaus, wie in den aktuellen ASHRAE- und europäischen VR-Standards, und auf die wissenschaftliche Unterstützung und die Unsicherheiten bei den festgelegten CO<sub>2</sub>-Grenzwerten zu verweisen. Als gutes Beispiel für eine CO<sub>2</sub>-Richtlinie empfehlen sie die von der Nordic Ventilation Group (Afshari, 2023) erstellte Richtlinie und die REHVA-Richtlinien für luftgetragene Infektionen (REHVA, 2021; REHVA, 2022; Kurnitski, 2023).

**Morawska et al., 2024** – fassten die Lehren aus der COVID-19-Pandemie für die Belüftung und die Luftqualität in Innenräumen auf der Grundlage einer Literaturrecherche und von Expert\*innenmeinungen zusammen. Sie weisen darauf hin, dass eine der Folgen der Vernachlässigung der Luftqualität in Innenräumen das Vorhandensein pathogener Viren in der Raumluft ist, einschließlich lokaler Ausbrüche von Erkältungen und saisonaler Grippe sowie Epidemien und Pandemien, die durch neuartige Viren verursacht werden. Um dieses weit verbreitete Problem anzugehen, haben die Autor\*innen sieben Lehren von besonderer Bedeutung identifiziert (Tab. 2-1).

Die Bedeutung der Belüftung (in Bezug auf die menschliche Gesundheit und andere Prioritäten) wird nach Ansicht der Autor\*innen nach wie vor nur unzureichend verstanden. Sie bemerken, dass *“Even in the middle of the pandemic, there were controversial discussions in Central and Northern Europe, for example, about whether ventilation makes sense given possible heat loss and the risk of colds”* [selbst mitten in der Pandemie in Mittel- und Nordeuropa kontroverse Diskussionen darüber geführt wurden, ob eine Belüftung angesichts des möglichen Wärmeverlusts und des Risikos von Erkältungen sinnvoll ist] (Morawska et al., 2024a, S. 1). Dieses Versäumnis, „der Wissenschaft zu folgen“, wird auf die Definition von „Expert\*innenwissen“ zurückgeführt. Obwohl die WHO bestätigte, dass sie während der Pandemie von Expert\*innen beraten wurde, handelte es sich dabei überwiegend um Expert\*innen für öffentliche Gesundheit, während der Wert von physikalischem, chemischem, technischem und anderem relevantem Fachwissen als weniger relevant angesehen wurde.

Tabelle 2-1 Wichtige Lehren aus der COVID-19-Pandemie in Bezug auf die Belüftung in Innenräumen (Morawska, 2024)

Lektion Nummer	Wichtige Erkenntnisse und Lehren (zusammengefasst)
1	Interdisziplinäres Expert*innenwissen sollte der Leitfaktor bei der Kontrolle des Infektionsrisikos und dem IAQ-Management sein.
2	Die Belüftung muss weit über den Ratschlag „Fenster öffnen“ hinausgehen.
3	Bessere Gebäudekonzepte, die die Belüftungsleistung optimieren und bei denen die Raumluftqualität im Mittelpunkt steht, sollten das Leitprinzip bei der Planung zukünftiger Gebäude sein.
4	Eine gleichwertige Belüftung (z. B. HEPA-Filter oder UV-C-Geräte) ist als Ergänzung in Räumen ohne ausreichende Belüftung nützlich.
5	Die Steuerung der Belüftung mithilfe von Risikobewertungsinstrumenten spielt bei der Gebäudeplanung eine Rolle.
6	Die Belüftungsleistung sollte jederzeit überwacht werden, wenn Gebäude genutzt werden.
7	Die Luftqualität in Innenräumen muss reguliert werden, um die menschliche Gesundheit in öffentlichen Räumen zu schützen.

Die Autor\*innen führen zahlreiche Gründe an (einschließlich thermischer Komfort, Außenlärm und Luftverschmutzung), warum das Öffnen von Fenstern als primäres Mittel der Belüftung in der Praxis oft versagt. Sie behaupten, dass eine der wichtigsten Lehren aus der jüngsten Pandemie darin besteht, dass *“modern society cannot rely solely on natural ventilation in buildings that are not designed to provide sufficient and effective air supply under all meteorological conditions”* [die moderne Gesellschaft sich nicht allein auf die natürliche Belüftung in Gebäuden verlassen kann, die nicht dafür ausgelegt sind, unter allen meteorologischen Bedingungen eine ausreichende und effektive Luftzufuhr zu gewährleisten] (Morawska et al., 2024a, S. 2).

Unabhängig vom verwendeten Lüftungssystem plädieren die Autor\*innen dafür, die Lüftungsleistung zu überwachen, wenn ein Gebäude belegt ist, um die Lüftungssteuerung dynamisch an die Belegung und Nutzung des Gebäudes anzupassen. Die Autor\*innen erkennen an, dass es verschiedene Vorschläge dafür gibt, welche CO<sub>2</sub>-Werte auf übermäßige Schadstoffkonzentrationen hinweisen, und schlagen vor, dass ein Grenzwert von weniger als 800 ppm durch wissenschaftlichen Konsens empfohlen wurde (Morawska et al., 2024b). Mendell et al. (2024) weisen jedoch darauf hin, dass die Verwendung eines einzigen CO<sub>2</sub>-Grenzwerts in allen Raumtypen und in unterschiedlichen Nutzungskontexten zahlreiche Einschränkungen mit sich bringt.

## 2.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse der wissenschaftlichen Literaturrecherche

Die Literatur, die Zusammenhänge zwischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern und Belüftung und deren Auswirkungen auf die Innenraumluftqualität, Gesundheit und Fehlzeiten dokumentiert, erstreckt sich über sämtliche Kontinente und mehr als zwei Jahrzehnte Forschung. Während bestimmte Ergebnisse kontextabhängig sind (z. B. ob eine verstärkte Belüftung die Luftqualität in von außen verschmutzten Umgebungen verbessert) und einige Ergebnisse einer weiteren Bestätigung bedürfen (z. B. die Stärke des Zusammenhangs zwischen Belüftungsraten und krankheitsbedingten Fehlzeiten), gibt es überwältigende Beweise dafür, dass die meisten Klassenzimmer unterbelüftet sind. Darüber hinaus zeigen zahlreiche Studien, dass es einen Zusammenhang zwischen unterbelüfteten Klassenzimmern (mit erhöhten CO<sub>2</sub>-Werten) und einer Beeinträchtigung der schulischen Leistung sowie in einigen Fällen einer erhöhten Abwesenheit gibt. Ob dies indirekt auf eine Zunahme schädlicher Schadstoffe (wie VOC oder Partikel) oder die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration oder eine Kombination mehrerer Faktoren zurückzuführen ist, muss noch vollständig geklärt werden.

Darüber hinaus sind erhöhte Raumtemperaturen mit einer schlechteren Luftqualität verbunden (und korrelieren oft mit erhöhten CO<sub>2</sub>- und VOC-Emissionsraten), wobei Temperaturen über 20–22 °C aus lerntechnischer Sicht als suboptimal eingestuft werden. Die spezifische Gestaltung von hybriden und mechanischen Lüftungssystemen kann ebenfalls eine entscheidende Rolle für die Effektivität der Lüftungssysteme spielen. Die Art und Weise, wie die Luft in einen Raum gelangt und aus diesem abgeführt wird, hat einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Innenraumluftqualität und kann sich somit potenziell auf das Infektionsrisiko sowie die schulische Leistung der Nutzenden auswirken. Daher ist nicht nur die volumetrische Luftstromrate von Bedeutung, sondern auch die Gestaltung des Lüftungssystems (wobei vertikale Verdrängungssysteme typischerweise eine bessere Lüftungseffektivität erzielen).

Es ist auch wichtig zu wissen, dass viele der in der Literatur dokumentierten Ergebnisse in Ordnung waren, wenn man sie mit den Normen und Standards vergleicht, die zum Zeitpunkt der Durchführung dieser Studien galten. In Bezug auf moderne (d. h. nach 2020) „gesundheitsbasierte“ Lüftungsrichtlinien wären die Unterschiede in den meisten Fällen noch auffälliger. Mit dem neuen Wissen (einschließlich der explosionsartigen Zunahme von Forschung und Leitlinien, die seit Beginn der COVID-19-Pandemie entstanden sind) ist das Bewusstsein für die direkte und indirekte Rolle, die CO<sub>2</sub> als Indikator für die Luftqualität spielt, sowie für seine Einschränkungen noch größer geworden. Während CO<sub>2</sub> unter normalen Betriebsbedingungen (z. B. in einem Klassenzimmer, in dem nur eine Person spricht) ein sehr nützlicher Indikator für die Belüftungsrate ist, ist es als Indikator für die Luftqualität in Innenräumen (in Bezug auf die Übertragung von Krankheitserregern über die Luft) in Räumen, in denen erhebliche aerosolerzeugende Aktivitäten stattfinden (z. B. Singen und Sport), deutlich weniger präzise. Trotz dieser Einschränkungen wird die überwiegende Mehrheit der österreichischen Klassenzimmer natürlich belüftet, und in diesem Zusammenhang ist die Messung von CO<sub>2</sub> nach wie vor eine der einfachsten und kostengünstigsten Methoden zur Beurteilung der Belüftungsrate und der Frische der Innenraumluft.

Die COVID-19-Pandemie hat das Bewusstsein für die Rolle sauberer Luft bei der Verringerung der Übertragung von Krankheitserregern in der Luft geschärft. Drei Erkenntnisse sind in diesem Zusammenhang besonders wichtig:

- i) Niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern sind mit weniger krankheitsbedingten Fehlzeiten verbunden.
- ii) Die Dauer der Exposition, die im Raum stattfindende Aktivität und die Belegungsdichte in einem Raum spielen alle eine entscheidende Rolle für die Wahrscheinlichkeit einer Infektion durch die Luft. Daher müssen geeignete CO<sub>2</sub>-Zielwerte all diese Faktoren in Kombination berücksichtigen.
- iii) Es hat sich gezeigt, dass ein moderater Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft die aerogene Stabilität von SARS-CoV-2 und anderen Viren erhöht, was bedeutet, dass CO<sub>2</sub> sowohl eine indirekte als auch eine direkte Rolle bei der Beeinflussung des Risikos einer Übertragung von Krankheiten durch die Luft spielt.

## 2.5 Raumlufthqualität und Belüftung – normative Standards, Leitfäden und Gesetze

### 2.5.1 Österreichische Normen, Richtlinien und offizielle Rechtsakte

In Österreich gibt es eine spezifische Gesetzgebung, die die Kontrolle der externen Luftverschmutzung vorschreibt. Diese ist im Immissionsschutzgesetz (IG-L) (Republik Österreich, 1997) festgelegt und in späteren Änderungen dieses Gesetzes dokumentiert (BMK, 2024a). In Bezug auf die Luftqualität in Arbeitsräumen bieten die Bestimmungen zum Arbeitsschutz der österreichischen Arbeitsstättenverordnung und der österreichischen Richtlinien (RIS, 2024a) nur begrenzte Orientierungshilfen für die Bereitstellung akzeptabler Lüftungsraten am Arbeitsplatz. Darüber hinaus hat der „Arbeitskreis Innenraumlufth“ des österreichischen Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) eine Reihe von Positionspapieren (zu Themen im Zusammenhang mit Belüftung, Innenraumlufthqualität und Infektionsrisiken) in Auftrag gegeben (BMK, 2024c). Eine Reihe dieser Dokumente befasst sich mit der Bereitstellung einer akzeptablen Belüftung und Luftqualität in Innenräumen in Schulen und/oder am Arbeitsplatz. In Bezug auf diese Studie werden die relevantesten Dokumente wie folgt zusammengefasst:

#### Immissionsschutzgesetz-Luft IG-L – (Republik Österreich, 1997)

Ziel dieser Gesetzgebung ist die Erhaltung einer guten Luftqualität bzw. die Verbesserung der Luftqualität durch die vorbeugende Reduzierung externer Luftschadstoffe. Um dieses Ziel zu erreichen, wird über das Umweltbundesamt (UBA) ein österreichweites Messnetz zur kontinuierlichen Überwachung von Luftschadstoffen betrieben und Überschreitungen von Grenzwerten bzw. Zielwerten ermittelt und gemeldet. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit sind im IG-L Emissionsgrenzwerte für die Luftschadstoffe CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, Blei, Benzol, Feinstaub (PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub>) und Benzo(a)pyren festgelegt; für SO<sub>2</sub> und NO<sub>2</sub> sind auch Alarmwerte und für Partikel und NO<sub>x</sub> Zielwerte festgelegt. Außerdem wurden Zielwerte für Arsen, Kadmium und Nickel eingeführt. Für Feinstaub PM<sub>2,5</sub> wurden zusätzlich zum Grenzwert eine Verpflichtung und ein Ziel eingeführt, um die durchschnittliche Feinstaubbelastung der Bevölkerung zu reduzieren.

#### Österreichische Arbeitsstättenverordnung (ASTV) – (RIS, 2024a)

Die Rechtsvorschrift für Arbeitsstättenverordnung (ASTV) ist ein Bundesgesetz, das Informationen zur Luftqualität an österreichischen Arbeitsplätzen sowie Grenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit enthält, die im gesamten Bundesgebiet gelten. Das vollständige konsolidierte Bundesgesetz (RIS, 2024b) enthält auch Bestimmungen zur Angemessenheit der natürlichen und



mechanischen Belüftung. Für natürlich belüftete Räume besagt § 26, dass die folgenden Bedingungen erfüllt sein müssen:

- (i) „Als Arbeitsräume dürfen nur Räume verwendet werden, denen ausreichend frische, von Verunreinigungen möglichst freie Luft zugeführt und aus denen verbrauchte Luft abgeführt wird.“ Die Belüftung muss sicherstellen, dass die Räume so gleichmäßig wie möglich belüftet werden. Feste Arbeitsplätze müssen so angeordnet sein, dass die Beschäftigten keiner schädlichen Zugluft ausgesetzt sind.
- (ii) Arbeitsbereiche, die ausschließlich natürlich belüftet werden, müssen über Lüftungsöffnungen verfügen, die direkt nach außen führen. Diese Lüftungsöffnungen müssen: einen effektiven „Lüftungsquerschnitt von mindestens 2 %“ der gesamten Bodenfläche des Raumes aufweisen und bei einer Raumtiefe von mehr als 10 m so angeordnet sein, „dass eine Querlüftung möglich ist“.

Während für Räume mit mechanischer Be- und Entlüftung § 27 besagt, dass die Bestimmungen von § 26 Absatz auch für mechanische Be- und Entlüftung gelten und Arbeitsräume zusätzlich mechanisch be- und entlüftet werden müssen, „wenn die natürliche Belüftung nicht ausreicht, insbesondere wenn“:

- (i) die nach § 26 Ziffer (ii) „erforderlichen Lüftungsquerschnitte nicht erreicht werden“ oder trotz Einhaltung der erforderlichen Lüftungsquerschnitte
  - a) „eine ausreichende gute Luftqualität nicht gewährleistet werden kann (z. B. unter erschwerenden Bedingungen wie erhöhter Wärme-, Rauch- oder Dampfbelastung, Belastung der Raumluft durch gefährliche Stoffe“ oder
  - b) die „natürliche Belüftung zu einer unzulässigen Lärmbelästigung“ der Arbeitnehmer\*innen führen würde.

Wird ein Arbeitsraum ausschließlich mechanisch belüftet, gibt der AStV (RIS, 2024a) die Mindestluftwechselraten an, die je nach Art der am Arbeitsplatz ausgeübten Tätigkeit gelten (Tab. 2-2). Unter der Annahme, dass es sich bei der Präsenzlehre überwiegend um eine leichte körperliche Tätigkeit handelt, wäre ein Mindestluftwechsel von 35 m<sup>3</sup>/(h·Person) erforderlich.

Tabelle 2-2 Mindestluftvolumenströme in mechanisch belüfteten Räumen je nach Art der Tätigkeit (RIS, 2024b)

Mindestluftvolumenstrom [m <sup>3</sup> /(h·person)]	Art der Arbeitstätigkeit
35	wenn in dem Raum nur Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung durchgeführt werden
50	wenn in dem Raum Arbeiten mit normaler körperlicher Belastung durchgeführt werden;
70	wenn in dem Raum Arbeiten mit hoher körperlicher Belastung durchgeführt werden.

Obwohl die Anforderungen an die natürliche Belüftung etwas locker definiert sind, ist es klar, dass mit diesem Gesetz sichergestellt werden soll, dass die Mitarbeiter\*innen über ausreichend Frischluft verfügen, die so frei wie möglich von Schadstoffen ist, und dass die Belüftung sicherstellen muss, dass

die Räume so gleichmäßig (und damit so kontinuierlich) wie möglich belüftet werden. Das Gesetz besagt auch, dass „Arbeitsräume (..) mechanisch zu be- und entlüften sind, wenn die natürliche Lüftung nicht ausreicht, (..)“ (RIS, 2024b, §27(2)).

In Bezug auf die mechanische Belüftung wird nicht genau beschrieben, welche Aktivitätsstufe „geringer“, „normaler“ und „hoher“ körperlicher Belastung entspricht (Tab. 2-2). Unter der Annahme, dass der Unterricht als „geringe“ körperliche Aktivität gilt, besagt das Gesetz ganz klar, dass in Klassenzimmern und allen ähnlichen Räumen, die von Schulpersonal genutzt werden, eine Mindestluftmenge von  $35 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$  ( $9,7 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{Person})$ ) erforderlich ist. Darüber hinaus ist die mechanische Umwälzung von Luft nur unter sehr begrenzten Umständen zulässig, wobei der Anteil des pro Stunde zugeführten Außenluftvolumens bei Außentemperaturen zwischen  $26 \text{ °C}$  und  $32 \text{ °C}$  sowie zwischen  $0 \text{ °C}$  und  $-12 \text{ °C}$  linear auf einen Wert von 50 % reduziert werden kann (RIS, 2024b).

### ÖNORM EN 16798-1:2024 – Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1 – (CEN, 2024)

Es sollte beachtet werden, dass es sich bei der ÖNORM EN 16798-1 sowohl um eine CEN-Norm als auch um eine österreichische Norm (EN 16798-1) handelt. Sie wird in Abschnitt 2.5.2 beschrieben, um sie von Normen mit rein nationalem Anwendungsbereich zu unterscheiden.

### ÖNORM H 6039:2023 – Lüftungstechnische Anlagen (ASI, 2023)

Diese ÖNORM regelt die Planung des Außenluftbedarfs einschließlich der Auslegung, des Betriebs und der Instandhaltung einer kontrollierten mechanischen Lüftung von Unterrichts- und Gruppenräumen sowie Räumen mit ähnlicher Zweckbestimmung (z. B. Seminar- oder Schulungsräume). Allerdings werden hier keine Luftreinigungsgeräte, die im Umluftbetrieb in Verbindung mit chemischen oder strahlungsbasierten Verfahren (z. B. UV-C-Strahlung, Ozon, Wasserstoffperoxid, chemische Behandlung usw.) betrieben werden, behandelt. Sie befasst sich auch nicht mit den Anforderungen an spezielle Unterrichtsräume (z. B. Lehrwerkstätten oder Lehrküchen, Turnhallen oder Labore). Diese ÖNORM empfiehlt einen maximalen  $\text{CO}_2$ -Grenzwert von 1000 ppm für Unterrichtsräume und 1400 ppm für untergeordnete Bereiche mit mechanischer Belüftung (basierend auf dem arithmetischen Mittelwert über eine Unterrichtsstunde) (ASI, 2023, S. 6).

In Bezug auf VRs empfiehlt sie je nach Altersgruppe der SuS die folgenden Planungswerte für personenbezogene Außenluftvolumenströme unter der Einhaltung einer  $\text{CO}_2$ -Ausgleichskonzentration von 1000ppm:

**Tabelle 2-3 Empfohlene Luftwechselraten nach Alter gemäß ÖNORM H 6039:2023** (ASI, 2023)

Altersgruppe der SuS	Luftwechselrate [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$ ]	Luftwechselrate [ $\text{l}/(\text{s}\cdot\text{Person})$ ]
< 10 Jahre	28	7,8
11–18 Jahre	33	9,2
> 19 Jahre	36	10

**Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter** – (BMK, 2024d)

Diese BMK-Richtlinie besagt, dass CO<sub>2</sub> als Schlüsselparameter für die vom Menschen verursachte Luftverschmutzung angesehen werden sollte, da der Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen gut mit dem Anstieg der durch den menschlichen Stoffwechsel verursachten Geruchsintensität korreliert. Der Zusammenhang zwischen dem Prozentsatz der unzufriedenen Personen in einem Raum und der CO<sub>2</sub>-Konzentration (über dem Umgebungsniveau) wird durch Gl. 2-1 (Beinfait et al., 1992) definiert.

$$PPD = 395 \cdot \exp(-15.15 \cdot \Delta CO_2^{-0.25}) \quad [2-1]$$

Dabei gilt:

*PPD* = Prozentsatz der Personen, die mit der Luftqualität in Innenräumen unzufrieden sind [%]

$\Delta CO_2$  = Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm] über die Außenluftkonzentration

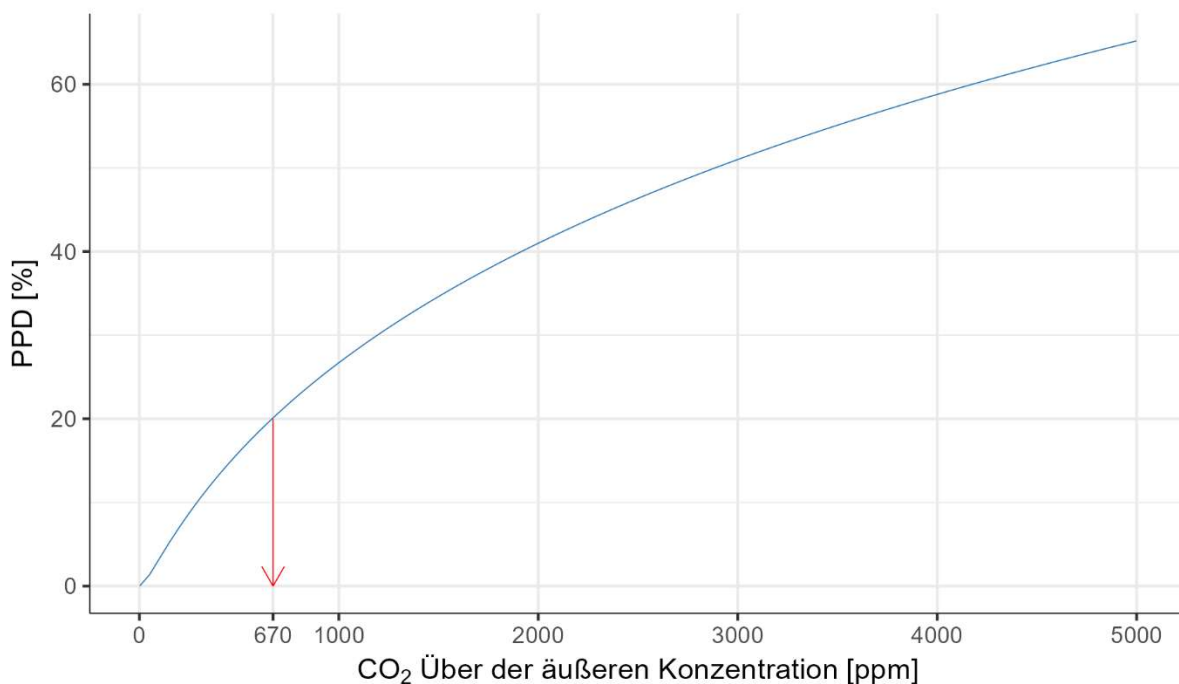


Abbildung 2-1 CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen über der Außenluftkonzentration und der korrespondierende Prozentsatz der unzufriedenen Personen [PPD]

Aus Abbildung 2-1 geht hervor, dass bei etwa 1.100 ppm (d. h. Umgebungsniveau plus 670 ppm) etwa 20 % der Personen die Raumluft als unbefriedigend empfinden (BUWAL, 1997). Die Klassifizierung von Räumen nach der CO<sub>2</sub>-Konzentration hat sich für Räume etabliert, in denen die Kontamination hauptsächlich durch den menschlichen Stoffwechsel verursacht wird (siehe z. B. ÖNORM H 60391 für

Schulen). In Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionsraten von Menschen weist die BMK-Richtlinie darauf hin, dass es in der Literatur zum Teil sehr unterschiedliche Zahlen gibt.

In Bezug auf neue Schulen wird in der Richtlinie berichtet, dass viele Schulen aus Energiespargründen über extrem luftdichte Fenster verfügen, bei denen die Luftwechselrate (d. h. die Infiltrationsrate) unter 0,05 h<sup>-1</sup> liegt. Darüber hinaus können (oder dürfen) diese Fenster aus Sicherheitsgründen während der Pausen oft nicht geöffnet werden. Dies führt zu extrem hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und betrifft Schulen sowohl in der Stadt als auch auf dem Land. Unter ungünstigen Umständen kann dies zu sehr hohen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (im Bereich von 5.000 ppm und darüber hinaus) führen. Diese Zahlen deuten darauf hin, dass die betroffenen Schulen über längere Zeiträume ohne jegliche Form von gezielter Belüftung betrieben werden.

In der BMK-Richtlinie heißt es: „CO<sub>2</sub> ist jedenfalls eine gute Maßzahl für die Atemaktivität der Nutzer der Räume. Im Fall von Situationen, die der in Müller et al. (2020) beschriebenen Standardsituation in Hinblick auf die Sprachaktivität nahekommen (4 % Sprecher, d. h. eine von 25 Personen), können daher CO<sub>2</sub>-Messgeräte einen relativ guten Hinweis auf das Risiko einer Infektion durch aerosolgebundene Viren geben.“ (BMK, 2024d, S. 28). Die Richtwerte und Zielwerte für verschiedene Schulräume sind in der Richtlinie festgelegt, wie in Tabelle 2-4 dargestellt.

Die Leitlinien (Tab. 2-4) basieren auf den Informationen in ISO 16000-41, wobei die Bewertung nach dem arithmetischen Mittelwert der CO<sub>2</sub>-Konzentration im jeweiligen Beurteilungszeitraum erfolgt. Diese Bewertungszeiträume werden durch die Länge der Schulklassen während der Unterrichtszeit definiert, die von einer „Schulstunde“ (d. h. 1–2 Stunden) bis zu einem „Schultag“ (d. h. 6–8 Stunden) reichen kann (ISO, 2023).

Tabelle 2-4 Vorgaben der BMK-Richtlinie zur Beurteilung der Innenraumluft in Bezug auf CO<sub>2</sub> (BMK, 2024d, S. 47)

Raumklasse	Beschreibung	Arithmetisches Mittel der Momentanwerte für CO <sub>2</sub> [ppm]*
A+	Zielwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	≤ 800
A	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen (z. B. Klassenzimmer)	≤ 1000
B	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen mit Ausnahme von Räumen der Klasse A (z. B. Essbereiche, Versammlungsräume, Sporthallen)	≤ 1400
C	Richtwert für Innenräume mit geringer Nutzungsdauer durch Personen (z. B. Flure, Badezimmer)	≤ 5000
Außerhalb der Raumklassen	Für die Nutzung durch Personen nicht akzeptabel	> 5000

\* **Hinweis:** Ermittlung als arithmetischer Mittelwert über den jeweiligen Beurteilungszeitraum (in der Regel eine Stunde oder länger).

In Tabelle 2-4 werden vier verschiedene Klassen von Funktionsräumen definiert, und gemäß dieser Klassifizierung würden Klassenzimmer für die Zwecke der Konformitätsbewertung als Klasse A (≤ 1000

ppm CO<sub>2</sub>) oder in Bezug auf die Festlegung von Zielwerten als Klasse A+ ( $\leq 800$  ppm CO<sub>2</sub>) betrachtet werden. Flure und Badezimmer (d. h. Innenräume mit geringer Nutzungsdauer) würden als Klasse C<sup>1</sup> ( $\leq 5000$  ppm CO<sub>2</sub>) betrachtet werden. In diesem Zusammenhang scheint es ein unnötiges Risiko zu sein, in gemeinschaftlich genutzten Fluren und Toiletten bis zu 5000 ppm zuzulassen (aufgrund der sehr geringen Luftwechselraten, die dies implizieren würde), und die Tatsache, dass abgestandene Flurluft leicht in angrenzende Klassenzimmer gelangen kann. Während die SuS die meiste Zeit in Klassenzimmern verbringen, können sie schätzungsweise bis zu einer Stunde pro Tag in den Fluren zwischen den Unterrichtsstunden sowie für schulische und außerschulische Aktivitäten verbringen. Dies liegt zum Teil daran, dass Schulkorridore häufig auch als Räume für häufig genutzte Schulpinde und Schließfächer genutzt werden, was in Bürogebäuden weniger üblich ist (Ng und Mills, 2024). Aufgrund dieser besonderen Anforderungen definiert die neueste Version des ASHRAE-Standards 62.1-2022 Schulkorridore als einen separaten Raumtyp mit spezifischen Anforderungen an die Außenlüftung, die sich von denen für allgemeine Korridore unterscheiden. Eine verstärkte Belüftung in Schulkorridoren dient dazu, die Belastung durch luftgetragene Schadstoffe in den Korridoren zu verringern, kann aber auch die allgemeine Luftqualität in Schulgebäuden verbessern, da die Türen zu den Klassenzimmern häufig geöffnet werden und manchmal über längere Zeiträume offenbleiben, um die Querlüftung der Räume zu fördern (obwohl dies nur empfohlen wird, wenn die Lüftungs- oder Raumtemperaturziele sonst nicht erreicht werden können).

In diesem Zusammenhang ist es auch wichtig zu beachten, dass Studien zeigen, dass SARS-CoV-2 in einem aerosolisierten Zustand bis zu 16 Stunden lang (Fears et al., 2020) und in schlecht belüfteten Waschräumen bis zu 4 Tage lang (Li et al., 2022) infektiös bleiben kann. Darüber hinaus gibt es Belege dafür, dass die Aerostabilität von SARS-CoV-2 in direktem Zusammenhang mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Raumluft steht (Haddrell, 2024), was die Logik von Normen in Frage stellt, die selbst in zeitweise genutzten Räumen deutlich erhöhte CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte zulassen.

### Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Bildungseinrichtungen – (BMK, 2024).

Diese Publikation basiert auf dem „*Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Gebäuden*“ (BMK, 2021) sowie dem nunmehr zurückgezogenen „*Positionspapier zur Lüftung von Schul- und Unterrichtsräumen – SARS-CoV-2*“ von 2020. In der aktualisierten Veröffentlichung wird die Aussage getroffen, dass „*Intensiv genutzte Schul- und Unterrichtsräume oder ähnliche Einrichtungen wie Kindergärten lassen sich aber in der Regel nicht ganzjährig alleine durch Fensterlüftung (...) so belüften, dass sowohl die gewünschten Konditionen der thermischen Behaglichkeit als auch der Hygiene und Luftqualität eingehalten werden können*“, insbesondere bei kälterem Wetter, aber auch an belebten Straßen, wo Hintergrundgeräusche mit der Anforderung, für frische Luft zu sorgen, in Konflikt stehen (BMK 2024, S. 5-6). Weiter heißt es: „*Bei hinsichtlich des Parameters CO<sub>2</sub> ausreichender Lüftung ist in der Regel davon auszugehen, dass anthropogen (von Menschen) erzeugte Luftinhaltsstoffe und Gerüche, Krankheitskeime, Schadstoffe aus Baumaterialien, Einrichtungs- und Gebrauchsgegenständen sowie aus dem Erdreich (Radon) effizient abgeführt werden.*“ Es ist jedoch zu

---

<sup>1</sup> BMK (2024d, S. 48) stellt fest: „*In Innenräumen mit geringer Nutzungsdauer durch Personen (bspw. Gänge, Nassräume, Nebenräume, selten benutzte Räume) sollte der arithmetische Mittelwert der Momentanwerte im jeweiligen Beurteilungszeitraum nicht über dem Wert von 5.000 ppm CO<sub>2</sub> absolut (Raumklasse C, MAK-Wert laut Grenzwertverordnung) liegen. Eine geringe Nutzungsdauer liegt vor, wenn der jeweilige Raum insgesamt nicht mehr als eine halbe Stunde pro Tag von der gleichen Person benutzt wird.*“

beachten, dass diese nicht belegte Annahme durch wissenschaftliche Erkenntnisse aus In-situ-Studien in Schulen widerlegt wird, die zeigen, dass akzeptable CO<sub>2</sub>-Werte nicht garantieren, dass andere Schadstoffe innerhalb sicherer Grenzen bleiben (Csobod, 2014; McLeod et al., 2022).

In Bezug auf die Festlegung akzeptabler Grenzwerte für CO<sub>2</sub> verweist das Dokument auf die in der Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft des BMK (2024d) festgelegten CO<sub>2</sub>-Richtlinien (Tab. 2-4).

### **Positionspapier zu Lüftungsunterstützenden Maßnahmen zur Infektionsprophylaxe** – (BMK, 2022)

Dieses „Positionspapier des Arbeitskreises Innenraumluft“ befasst sich mit dem Einsatz von Luftreinigern und dem Eintrag von Wirkstoffen in die Innenraumluft. In Bezug auf die Lüftungsraten wird in dem Papier darauf hingewiesen, dass *„bestimmend ist das zugeführte Außenluftvolumen, oft auch als „Frischluft“ bezeichnet. Als Richtschnur ist dem jeweiligen Raum pro im Raum anwesender erwachsener Person und Stunde ein Außenluftvolumen von etwa 35 m<sup>3</sup> zuzuführen.“* Diese Zahl entspricht den Anforderungen für Arbeitsplätze mit geringer körperlicher Belastung, wie sie in der österreichischen Arbeitsstättenverordnung und den österreichischen Richtlinien für kulturelle Aktivitäten (siehe oben) definiert sind, die sich weitgehend auf EU-Richtlinien stützen (Arbeitsinspektion, 2020). Das Positionspapier enthält auch die nicht belegte Aussage, dass *„bei Kindern sind altersabhängig geringere Werte anzusetzen“*, wobei jedoch keine spezifischen Werte angegeben werden und die wissenschaftliche Grundlage für diese Aussage nicht angegeben wird (BMK, 2022, S. 8). In Bezug auf diese Behauptung ist anzumerken, dass Kleinkinder bekanntermaßen anfälliger für Luftverschmutzung sind als Erwachsene (Selgrade et al., 2008; Zhang et al., 2013; Cai et al., 2021). Darüber hinaus zeigten Bakó-Biró et al. (2012), dass die Ergebnisse von Aufgaben wie Bildgedächtnis und Worterkennung bei Schulkindern um 8 % bzw. 15 % gesteigert werden konnten, wenn höhere Luftwechselraten (von 8 l/(s·Person)) bereitgestellt wurden. Ähnlich berichteten Wargocki und Wyon (2017), dass die schulische Leistung um bis zu 30 % sinken kann, wenn die Luftqualität in Innenräumen beeinträchtigt ist.

In Bezug auf die Einschränkungen von Luftreinigern wird in dem Positionspapier darauf hingewiesen, dass sie eine ausreichende hygienische Versorgung mit Frischluft nicht ersetzen können. Darüber hinaus wird in Bezug auf luftgetragene Pandemien darauf hingewiesen, dass Luftreiniger zwar zur Ergänzung, aber keinesfalls als Ersatz für die Risikominimierung durch eine Reihe anderer Maßnahmen (einschließlich des Tragens von FFP2-Masken, der Erhöhung der natürlichen oder mechanischen Belüftung und der Verringerung der Raumdichte) eingesetzt werden können (BMK, 2022, S. 26).

### **Positionspapier zur Bewertung von Innenräumen in Hinblick auf das Infektionsrisiko durch SARS-CoV-2** – (BMK, 2021)

Das Papier weist darauf hin, dass das Risiko einer Infektion mit SARS-CoV-2 mit den Aktivitäten der Personen im Gebäude (Sprechen, Schreien, Singen und körperliche Aktivität) zusammenhängt und dass die Anwesenheit vieler Personen auf engem Raum das Risiko erhöht. Daher ergeben sich vergleichsweise hohe Risiken in Schul- und Klassenräumen, die nur auf Fensterlüftung angewiesen sind, und das Papier empfiehlt, dass geeignete Luftreinigungsgeräte die Risiken in diesem Zusammenhang erheblich reduzieren können.

Das Papier weist darauf hin, dass die Bestimmung des absoluten Risikos einer Infektionsübertragung eine komplexe Aufgabe ist, die auch mit einem hohen Maß an Unsicherheit verbunden ist (z. B.

aufgrund sich ständig ändernder Infektionszahlen, begrenzter Kenntnisse über die von einer Person freigesetzten infektiösen Virusquanten sowie individueller immunologischer Risikofaktoren). Daher wird in dem Papier befürwortet, dass die Berechnung des relativen Risikos (d. h. des Risikos in einem bestimmten Raum im Vergleich zu einer Referenzsituation) informativer und leichter verständlich sein kann, insbesondere für Laien (BMK, 2021, S. 8–9). Relative Risikobewertungen können auch bei Entscheidungen auf politischer und baulicher Ebene hilfreich sein, da sie Informationen darüber liefern können, welche Räume zusätzliche Vorsichtsmaßnahmen zum Schutz vor Infektionen erfordern. Gleichzeitig werden in dem Papier die Grenzen eines vereinfachten Modells für das Infektionsrisiko durch Tröpfcheninfektion anerkannt, beispielsweise in Situationen, in denen die Auswirkungen von Tröpfcheninfektionen im Nahbereich (wie Niesen, Husten oder Sprechen in unmittelbarer Nähe) die Auswirkungen von Aerosolinfektionen überwiegen.

In Bezug auf CO<sub>2</sub> und die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten wird in dem Papier darauf hingewiesen, dass CO<sub>2</sub>-Messgeräte (oder visuelle RAG-Warnanzeigen) einen relativ guten Hinweis auf das Infektionsrisiko durch SARS-CoV-2 und andere Viren geben können (insbesondere in Situationen, die der in Bezug auf die Sprechaktivität beschriebenen Standardsituation nahekommen (4 % Sprechende, d. h. eine Person von 25), unter Berufung auf ein White Paper von Müller et al. (2020). In dem Papier wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub> und dem Infektionsrisiko durch die Luft in Umgebungen, in denen mehrere Personen sprechen oder singen, oder umgekehrt, wenn zusätzliche Filtrationsmaßnahmen (Masken, Raumluftreiniger usw.) eingesetzt werden, nicht mehr besteht.

## 2.5.2 Europäische (CEN) Normen

### **EN 16798-1:2019. Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1** **(Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1) – (CEN, 2019)**

Es sollte beachtet werden, dass EN 16798-1 sowohl eine CEN-Norm als auch eine österreichische Norm (ÖNORM EN 16798-1) ist, hier jedoch beschrieben wird, um sie von Normen mit rein nationalem Anwendungsbereich zu unterscheiden. EN 16798-1 enthält Kriterien zur Bewertung der Lüftung und der Energieeffizienz von Gebäuden in Bezug auf das Raumklima. In der Norm sind eine Reihe von Leistungsrichtlinien festgelegt, darunter CO<sub>2</sub>-Schwellenkonzentrationen und Lüftungsvolumenströme. Diese Richtlinie ist in erster Linie für Büros und Räume mit ähnlichen Aktivitäten, einschließlich Klassenzimmern, gedacht und geht daher davon aus, dass die Aktivitäten in solchen Räumen sitzend ( $\approx 1,2$  met) stattfinden.

Um die in EN 16798-1 enthaltenen Leitlinien interpretieren zu können, muss zunächst die Kategorie der Raumluftqualität (IEQ) definiert werden, die dem für die Gebäudenutzenden angemessenen Erwartungsniveau entspricht (Tab. 2-5). Gemäß der Norm wäre ein normales Niveau „mittel“ (entspricht IEQ<sub>II</sub>), während ein höheres Niveau (entspricht IEQ<sub>I</sub>) für *“occupants with special needs (children, elderly, persons with disabilities, etc.)”* [Bewohner\*innen mit besonderen Bedürfnissen (Kinder, ältere Menschen, Menschen mit Behinderungen usw.)] gewählt werden kann (CEN, 2019, S. 18). Da Schulen überwiegend von Kindern besucht werden und einige Schulbesucher\*innen auch Behinderungen und zusätzliche besondere Bedürfnisse haben (oder zu Risikogruppen für Asthma oder durch die Luft übertragene Krankheiten gehören), bietet die Kategorie IEQ<sub>I</sub> („Hoch“) die am besten geeignete Kategorie für den sicheren und integrativen Betrieb von Klassenzimmern. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit einer dynamischen Raumnutzung, bei der das genaue Alter und

der Gesundheitszustand aller Raumnutzenden in der Regel unbekannt ist. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass die Leitlinien in EN 16798-1:2024 nicht als gesundheitsbasierte Leitlinien per se gedacht sind. Insbesondere sind die angegebenen Lüftungsraten seit der Veröffentlichung der vorherigen Version der Norm (EN 16798-1 :2019) vor der COVID-19-Pandemie unverändert geblieben. Die angegebenen Werte sollten daher nicht als prophylaktisch oder gesundheitsbezogen interpretiert werden, um die Ausbreitung von durch die Luft übertragenen Krankheiten einzudämmen.

Tabelle 2-5 EN 16798-1 Kategorien der Raumklimaqualität (CEN, 2019)

Kategorie	Maß an Erwartung
IEQ <sub>I</sub>	High (hoch)
IEQ <sub>II</sub>	Medium (mittel)
IEQ <sub>III</sub>	Moderate (moderat)
IEQ <sub>IV</sub>	Low (niedrig)

In Bezug auf akzeptable CO<sub>2</sub>-Konzentrationen legt EN16798-1 fest, dass die folgenden Werte (Tab. 2-6) angemessen sind, wenn man von einer Standard-CO<sub>2</sub>-Emissionsrate<sup>2</sup> von 20 l/(h·Person) für nicht angepasste Personen<sup>3</sup> ausgeht. Ausgehend davon, dass Klassenzimmer für eine Belegung ausgelegt sein sollten, die der Kategorie 1 entspricht, kann man erkennen (Tab. 2-6), dass 975 ppm (oder etwa 1000 ppm in städtischen Gebieten) als oberer Grenzwert für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen gemäß dieser Norm verwendet werden sollten.

In Bezug auf die Bestimmung der Mindestluftmenge während der Nutzungszeiten empfiehlt EN 16798-1, dass die Gesamtmindestluftmenge während der Nutzung, ausgedrückt in l/s pro Person, aus gesundheitlichen Gründen nie unter 4 l/(s·Person) liegen sollte. Dies liegt daran, dass eine Mindestluftmenge von 4 l/(s·Person) erforderlich ist, um menschliche durch Stoffwechselprozesse entstandene Schadstoffe (bio-effluent) zu verdünnen, wobei eine zusätzliche Komponente für gebäude- und aktivitätsbedingte Emissionen erforderlich ist (CEN, 2019, S. 51). Die Luftstromrate für die Entwurfsbelüftung besteht daher immer aus zwei Teilen: (a) Belüftung zur Verdünnung/Beseitigung von Verschmutzungen durch die Bewohner\*innen (d. h. Bioabwässer oder bio-effluent) und (b) Belüftung zur Beseitigung/Verdünnung von Verschmutzungen durch die Bausubstanz und die Systeme.

<sup>2</sup> Die CO<sub>2</sub>-Emissionsrate von Kindern hängt von ihrem Alter, Geschlecht und Aktivitätsniveau ab. Für sitzende Tätigkeiten im Alter von 5 bis 18 Jahren berichten Wu et al. (2023) von einem Mittelwert von 0,00367 l/(s·Person) oder 13,2 l/(h·Person).

<sup>3</sup> Eine „nicht angepasste Person“ ist definiert als eine Person, die sich nicht länger als 15 Minuten in einem Raum aufhält und sich an den Geruch einer Vielzahl von Schadstoffen, die bei Stoffwechselprozessen der Bewohnenden (bio-effluent) entstehen, gewöhnt hat (Olesen, 2015). Nicht angepasste Kriterien werden im Allgemeinen zur Bewertung der Leistung von Nichtwohngebäuden wie Schulen und Büros herangezogen.



Tabelle 2-6 EN 16798-1 Standardmäßige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Innenraum über der Außenkonzentration (CEN, 2024)

Kategorie	Entsprechende CO <sub>2</sub> [ppm] Konzentration über Außenbereich	Innenraum CO <sub>2</sub> [ppm] Schwellenkonzentration (2024) <sup>4</sup>
IEQ <sub>I</sub>	550	975
IEQ <sub>II</sub>	800	1225
IEQ <sub>III</sub>	1350	1775
IEQ <sub>IV</sub>	1350	1775

In EN 16798-1 werden drei Methoden zur Festlegung geeigneter Luftvolumenströme bereitgestellt. Diese Methoden gehen von einer vollständigen Vermischung der frischen Zuluft im Raum aus (d.h. die Schadstoffkonzentration ist am Abzugsort gleich der im Aufenthaltsbereich). Bei Nichtwohngebäuden sollten die Lüftungsraten gemäß EN 16798-3 an die Lüftungseffektivität ( $\epsilon$ ) angepasst werden, wenn die Luftverteilung von einer vollständigen Vermischung abweicht.

### EN 16798-1 Methode 1: basierend auf der wahrgenommenen Luftqualität

Diese Methode kombiniert zwei Komponenten: Die erste ist die Auslegungslüftungsrate für sitzende Erwachsene (Tab. 2-7), (die nicht angepasste Personen voraussetzt) zur Verdünnung von Emissionen (d. h. Bioabwässern) von Personen, die als Luftstromraten pro Person gemäß der entsprechenden IEQ-Kategorie angegeben werden (Tab. 2-5). Diese Werte werden wiederum durch Schätzungen des erwarteten Prozentsatzes der (mit dem Raumgeruch) unzufriedenen Personen bei der gegebenen Luftstromrate definiert, wobei die Kategorie 1 einer Unzufriedenheitsquote von 15 % entsprechen würde (CEN, 2019).

Tabelle 2-7. Auslegungslüftungsraten zur Verdünnung von Emissionen (Bioabwässern) von Personen (CEN, 2024)

Kategorie	Erwarteter Prozentsatz Unzufriedener Personen	Luftstrom pro nicht angepasster Person [l/(s·Person)]
IEQ <sub>I</sub>	15	10
IEQ <sub>II</sub>	20	7
IEQ <sub>III</sub>	30	4
IEQ <sub>IV</sub>	40	2,5

Je nach IEQ Kategorie des Raums und je nachdem, ob das Gebäude als „sehr gering“, „gering“ oder „nicht gering“ umweltbelastend<sup>5</sup> eingestuft wird, wird eine zusätzliche Erhöhung des Grundluftstroms zu den Pro-Kopf-Lüftungsraten hinzugefügt.

<sup>4</sup> Es wird eine mittlere Hintergrundkonzentration von CO<sub>2</sub> von 425 ppm angenommen (Ludewig, 2024). Es ist zu beachten, dass für Gebäude in dicht besiedelten städtischen Gebieten, in denen die europäischen Hintergrundwerte durch lokale CO<sub>2</sub>-Emissionsquellen erhöht werden, möglicherweise höhere Hintergrundkonzentrationen (z. B. ca. 450 ppm) gelten.

<sup>5</sup> Das Gebäude gilt als gering oder sehr gering umweltbelastend, wenn die Mehrheit der Innenraummaterialien geringe oder sehr geringe Emissionen aufweist. Detaillierte Kriterien für die verschiedenen Gebäudetypen sind in EN 16798-1 Abschnitt B.4 und Tabelle B.17 festgelegt.

Tabelle 2-8. Auslegungslüftungsraten für die Verdünnung von Emissionen aus verschiedenen Gebäudetypen (CEN, 2024)

Kategorie	Sehr gering umweltbelastendes Gebäude LPB-1 [l/(s·m <sup>2</sup> )]	Gebäude mit geringer Schadstoffbelastung LPB-2 [l/(s·m <sup>2</sup> )]	Gebäude mit nicht geringer Schadstoffbelastung LPB-3 [l/(s·m <sup>2</sup> )]
IEQ <sub>I</sub>	0,5	1,0	2,0
IEQ <sub>II</sub>	0,35	0,7	1,4
IEQ <sub>III</sub>	0,2	0,4	0,8
IEQ <sub>IV</sub>	0,15	0,3	0,6

Durch die Kombination der Verdünnungsrate des Bioabwassers (Tab. 2-7) mit der Verdünnungsrate der Gebäudeemissionen (Tab. 2-8) kann die Auslegungslüftungsraten für einen bestimmten Raum bestimmt werden. Im folgenden Beispiel wird davon ausgegangen, dass 24 SuS und ein Lehrkörper einen 50 m<sup>2</sup> großen, schadstoffarmen Klassenraum als nicht angepasste Personen mit einem „hohen“ Erwartungsniveau (d. h. Kategorie 1) belegen.

Tabelle 2-9. Beispiel: EN 16798-1 Methode 1 Berechnung des Luftvolumenstroms für ein Schadstoffarmes Gebäude (LPB-2)

Kategorie	Schadstoffarmes Gebäude LPB-2 [l/(s·m <sup>2</sup> )]	Luftstrom pro nicht angepasster Person [l/(s·Person)]	Gesamtvolumenstrom der Lüftungsanlage [l/(s·Person)]
IEQ <sub>I</sub>	1,0	10	12
IEQ <sub>II</sub>	0,7	7	8,4
IEQ <sub>III</sub>	0,4	4	4,8
IEQ <sub>IV</sub> *	0,3	2,5	3,1

\* Hinweis: Der Auslegungsluftstrom für IEQ<sub>IV</sub> liegt unter dem Schwellenwert von 4 l/s pro Person und kann daher in diesem Fall nicht verwendet werden

Das obige Beispiel (Tab. 2-9) veranschaulicht die Berechnung der Gesamtauslegungslüftungsraten unter Verwendung von EN 16798-1 (2019) entsprechend des Gebäudetyps, der Raumgröße, der Belegungszahl und der IEQ-Kategorie. In diesem konkreten Beispiel ist eine Gesamt-Luftstromrate von 12 l/(s·Person) erforderlich, um die Norm zu erfüllen. Da es in der Praxis jedoch nicht immer möglich ist, zu wissen, ob das Gebäude immer als „schadstoffarmes“ Gebäude betrieben wird oder ob die Raumbelegung irgendwann zunehmen wird, sollte das System mit einer gewissen zusätzlichen Kapazität ausgelegt werden, um diesen Eventualitäten gerecht zu werden.

### EN 16798-1 Methode 2: basierend auf Grenzwerten einer Substanzkonzentration

Diese Methode verwendet eine Massenbilanzformel, die auf der stationären Substanzkonzentration im Raum (z. B. CO<sub>2</sub>) basiert und die Konzentration im Freien berücksichtigt, unter Verwendung von Gl. 2-2.

$$Q_h = \frac{G_h}{C_{h,i} - C_{h,o}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_v} \quad [2-2]$$

Dabei ist

- $Q_h$  die für die Verdünnung erforderliche Belüftungsrate in  $m^3$  pro Sekunde;
- $G_h$  die Emissionsrate der Substanz in Mikrogramm pro Sekunde (oder l/s);
- $C_{h,i}$  der Richtwert der Substanz in Mikrogramm pro  $m^3$  (oder  $ppm \cdot 10^{-3}$ );
- $C_{h,o}$  die Konzentration der Substanz in der Zuluft in Mikrogramm pro  $m^3$  (oder  $ppm \cdot 10^{-3}$ );
- $\epsilon_v$  ist die Lüftungseffektivität (1 für vollständige Vermischung, Standardwerte in EN 16798-3 (CEN, 2022)).

Wenn  $CO_2$  als Indikator für die Anwesenheit von Personen verwendet wird, sind die Standard-Auslegungswerte in Tabelle 2-6 angegeben. Diese Methode wird in der Regel für die bedarfsgesteuerte mechanische Lüftung (DC) verwendet, kann aber auch in natürlich belüfteten Räumen in Verbindung mit einem (oder mehreren) entsprechend platzierten  $CO_2$ -Sensoren eingesetzt werden. Auch hier muss die angemessene Auswahl gesundheitsbasierter  $CO_2$ -Schwellenwerte (Abschnitt 2.5.6) in Schulen berücksichtigt werden, da die in EN 16798-1 (Tab. 2-6) angegebenen Schwellenwerte (d. h.  $IEQ_I = 975$  ppm) nicht als Grenzwerte zur Eindämmung luftgetragener Krankheitserreger vorgesehen waren und auch keine optimalen Lernergebnisse garantieren.

### EN 16798-1 Methode 3: basierend auf vordefinierten Lüftungsvolumenströmen

Die Gesamtvolumenströme der Entwurflüftung können entweder als erforderlicher Luftvolumenstrom pro Person ( $l/(s \cdot \text{Person})$ ) oder als erforderlicher Volumenstrom pro  $m^2$  Bodenfläche ( $l/(s \cdot m^2)$ ) ausgedrückt werden. Nachstehend ist eine Abbildung (Tabelle 2-10), die auf dem vorherigen Beispiel (für ein  $50 m^2$  großes Klassenzimmer mit 25 Personen) basiert, das in Methode 1 (oben) verwendet wurde.

Tabelle 2-10. Beispiel: EN 16798-1 Methode 3 – angewendet auf ein Beispielklassenzimmer

Kategorie	Gesamt-Lüftungsvolumenstrom für den Raum	
	$[l/(s \cdot \text{Person})]$	$[l/(s \cdot m^2)]$
IEQ <sub>I</sub>	12	6
IEQ <sub>II</sub>	8,4	4,2
IEQ <sub>III</sub>	4,8	2,4
IEQ <sub>IV</sub> *	3,1	1,55

\* Hinweis: Der Auslegungsluftstrom für IEQ<sub>IV</sub> liegt unter dem Schwellenwert von  $4 l/(s \cdot \text{Person})$  und kann daher in diesem Fall nicht verwendet werden

### EN 16798-2 :2019. Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 2 – (CEN, 2019a)

Die europäische Norm EN 16798-2 erläutert, wie die Informationen in EN 16798-1 zu interpretieren und anzuwenden sind. Das Dokument legt Methoden zur langfristigen Bewertung des Innenraumklimas fest, die als Ergebnis von Berechnungen oder raumbezogenen Messungen ermittelt werden. Die Norm enthält auch Kriterien, die bei Bedarf zur Messung der Einhaltung bei Inspektionen verwendet werden können. Außerdem werden die wichtigsten Parameter genannt, die bei der Überwachung und Darstellung des Innenraumklimas in bestehenden Gebäuden verwendet werden

müssen. Die Norm erklärt auch, wie die verschiedenen IEQ-Kriterienkategorien für das Innenraumklima (Tab. 2-5) in der Praxis angewendet werden können.

EN 16798-2 betont die Bedeutung der Quellenkontrolle (d. h. die Begrenzung der Freisetzung schädlicher Verunreinigungen) in jeder Lüftungsstrategie, da Luftschadstoffe häufig in Innenräumen entstehen. Es wird festgestellt, dass *“source control should as often as possible be the primary strategy for controlling the level of air substances”* [die Quellenkontrolle so oft wie möglich die primäre Strategie zur Kontrolle des Gehalts an Luftschadstoffen sein sollte] (CEN, 2019a, S. 17), während die nach der Quellenkontrolle verbleibende Verschmutzung durch Verdünnung oder Verdrängung bei angemessenen Luftströmungsgeschwindigkeiten behandelt werden sollte.

Die Kontrolle der Quellen im Zusammenhang mit Schulen bedeutet eine sorgfältige Spezifikation der Materialien, die sowohl beim Bau als auch bei der Fertigstellung eines Gebäudes verwendet werden, sowie die Begrenzung der Einführung potenzieller Schadstoffe durch Möbel, Büroausstattung, Einwegmaterialien und Reinigungsprodukte. In Bezug auf luftübertragene Krankheitserreger bedeutet dies, dass eine geringere Belegung (d.h. zu Hause bleiben, wenn man krank ist und/oder die Klassengröße während Pandemien reduzieren) und das Tragen von Masken eine wichtige Rolle bei der Reduzierung der Konzentration infektiöser Partikel in einem Raum spielen.

### 2.5.3 Beispiele bewährter Verfahren in anderen europäischen Ländern

In einer Reihe von europäischen Ländern entwickeln sich Initiativen, Standards und Richtlinien zur Luftqualität in Bezug auf den Betrieb öffentlicher Gebäude, einschließlich Schulen, rasant weiter. Angeregt durch die COVID-19-Pandemie haben einige Länder kürzlich ihre Richtlinien verschärft und/oder neue Gesetze entwickelt, um die Luftqualität in Innenräumen von Schulen strenger zu kontrollieren. Darüber hinaus haben viele Regierungen und Regionalregierungen Mittel für CO<sub>2</sub>-Sensoren, Belüftungssysteme und Luftreinigungsgeräte bereitgestellt, um die Umsetzung solcher Ziele zu unterstützen. Alle Beispiele für neu entstehende bewährte Verfahren wären zu zahlreich, um sie vollständig aufzuzählen, daher werden hier zwei Schlüsselbeispiele angeführt, um die jüngsten Entwicklungen in Belgien und Frankreich zu veranschaulichen.

#### Belgien

Belgien war das erste europäische Land, das die Messung von CO<sub>2</sub> in allen geschlossenen Räumen, die der Öffentlichkeit zugänglich sind, vorschrieb (Morawska, 2024a). ‚The Belgium Clean Air Law: A Law to Improve Indoor Air Quality in Enclosed Spaces Open to the Public‘ [Das belgische Gesetz über saubere Luft: Ein Gesetz zur Verbesserung der Luftqualität in geschlossenen Räumen, die der Öffentlichkeit zugänglich sind] wurde am 6. November 2022 erlassen (Belgische Gesetzessammlung, 2022). Dieses Gesetz trat zehn Tage nach seiner Veröffentlichung in Kraft, allerdings werden die in diesem Gesetz festgelegten Verpflichtungen jedoch nur schrittweise umgesetzt werden. Die Verpflichtung, mindestens ein CO<sub>2</sub>-Messgerät zu verwenden, eine Risikoanalyse zu erstellen und einen Aktionsplan zu erstellen (falls die Risikoanalyse dies als notwendig erweist), wird ab dem 1. Januar 2027 verpflichtend. Zunächst gelten diese Verpflichtungen nur für bestimmte geschlossene Räume, die für die Öffentlichkeit zugänglich sind. Bis Ende 2037 wird der Geltungsbereich dann auf alle Räume ausgedehnt.

In einer zweiten Phase können Räume, die die ersten Bestimmungen erfüllt haben, die folgenden Punkte umsetzen: Zertifizierung des Raums beantragen; das verliehene Zertifizierungslabel ausstellen; und den Betrieb des Raums unter technischen Bedingungen fortsetzen, die mindestens den zum Zeitpunkt der Zertifizierung bestehenden Bedingungen entsprechen. Dies wird zunächst auf freiwilliger Basis erfolgen, sobald der Zertifizierungsprozess eingerichtet ist. Diese Bestimmungen werden dann frühestens am 1. Januar 2038 verbindlich (d. h. sobald alle geschlossenen Räume, die der Öffentlichkeit zugänglich sind, von den ersten Verpflichtungen erfasst sind).

Diese Gesetzgebung bedeutet, dass ab dem 1. Januar 2027 alle festgelegten öffentlichen Räume (einschließlich Schulen) in Belgien verpflichtet sind, mit der Messung der Luftqualität zu beginnen und die im Gesetz festgelegten Verpflichtungen einzuhalten. Das Gesetz (Artikel 3, Absatz 1) beschreibt zwei Referenzwerte für die Überwachung von CO<sub>2</sub>:

- (i) Referenzwert A entspricht einer CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Räumlichkeiten, die im Allgemeinen unter 900 ppm liegt, oder einer Mindestlüftungs- und Luftreinigungsrate von 40 m<sup>3</sup> pro Stunde und Person (davon mindestens 25 m<sup>3</sup> pro Stunde und Person bei Belüftung mit Außenluft).
- (ii) Referenzwert B ist eine CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Räumlichkeiten, die im Allgemeinen weniger als 1200 ppm beträgt, oder eine Mindestlüftungsrate mit Außenluft von 25 m<sup>3</sup> pro Stunde und Person.

Es ist zu beachten, dass das Gesetz die Verantwortlichen für die Räumlichkeiten nicht verpflichtet, diese spezifischen Ziele zu erreichen. Vielmehr stellen diese Referenzwerte Richtwerte dar, anhand derer die Qualität der vorhandenen Luft beurteilt werden kann.

Eine der wichtigsten Verpflichtungen (für alle öffentlich zugänglichen Räume) ist *„the provision and communication of the label by display or any other means as soon as the certification (referred to in point 4 of the Article) has been obtained“* [die Bereitstellung und Kommunikation des Labels durch Aushang oder auf andere Weise, sobald die Zertifizierung (gemäß Artikel 4) vorliegt] (belgische Gesetzgebung, 2022). Jeder Raum erhält ein Etikett, das vor Ort angebracht werden muss. Dadurch wird die Öffentlichkeit darüber informiert, dass die Luftqualität gemessen und kontrolliert wird, um die negativen Auswirkungen der Luft auf die Gesundheit der Menschen zu minimieren. Das Gesetz schafft auch eine Plattform und eine Datenbank für die Luftqualität, die dazu dienen, die bestehende wissenschaftliche Wissensbasis zu erweitern, politische Entscheidungsträger\*innen zu beraten und die Öffentlichkeit zu sensibilisieren (HFCSE, 2024).

## Frankreich

Seit 2012 gibt es gesetzliche Anforderungen (Dekret Nr. 2012-14), um die Belüftungsmöglichkeiten in allen Unterrichtsräumen in Mittel- und Oberschulen in Frankreich (sowie in Sporträumen, Kantinen und Schlafsälen) zu bewerten. Darüber hinaus sind Empfangsräume, in denen Kinder unter sechs Jahren untergebracht sind, sowie Freizeitzentren verpflichtet, dieses Gesetz einzuhalten. Dieses Dekret wurde im Dezember 2022 überarbeitet (Dekret 2022-1690). Unter den darin festgelegten Änderungen definiert das neue Statut die direkte Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration als einen erforderlichen Schritt bei der jährlichen Bewertung der Belüftungsmethoden sowie Schwellenwerte für die Auslösung von Schadstoffmesskampagnen und deren Umsetzungsfristen (République Française, 2022a) (Nous aérons, 2023).

Eine weitere Verordnung (JORF Nr. 0301), die am 1. Januar 2023 in Kraft trat (République Française, 2022b), legt die Bedingungen für die Durchführung von Direktmessungen der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Raumluft im Rahmen der jährlichen Bewertung von Lüftungssystemen fest. Neben der erforderlichen Messgenauigkeit, der Positionierung des Sensors im Raum, der Dauer der Messung und den erforderlichen Belegungsbedingungen legt die Verordnung auch die korrekte Interpretation der Messungen fest. Gemäß der Verordnung weist eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von weniger als 800 ppm auf eine zufriedenstellende Lüfterneuerung in belegten Räumlichkeiten hin. Wird dieser Wert überschritten, müssen Maßnahmen ergriffen werden, um eine zufriedenstellende Luftqualität wiederherzustellen. Umgekehrt weist eine CO<sub>2</sub>-Konzentration von mehr als 1500 ppm auf eine unzureichende Lüfterneuerung hin. Wird dieser Wert überschritten, müssen unverzüglich Maßnahmen ergriffen werden, um die Ursachen der Überschreitung zu beheben und eine zufriedenstellende Lüfterneuerungsqualität wiederherzustellen (République Française, 2022b).

#### 2.5.4 Internationale Standards

##### **ASTM D6245-18 – Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation (Standardleitfaden für die Verwendung von Kohlendioxidkonzentrationen in Innenräumen zur Bewertung der Luftqualität und Belüftung) – (ASTM, 2024)**

Die American Society for Testing and Materials (ASTM) ist eine Entwicklung internationaler freiwilliger Standards, die Umwelt- und Ingenieurdienstleistungen regeln. ASTM D6245 enthält Richtlinien zur Verwendung von CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen zur Bestimmung der Außenlüftungsraten, wobei ein Ansatz verwendet wird, der auf der Arbeit von Persily und de Jonge (2017) basiert. Dieser Ansatz wird als Gleichgewichtsanalyse bezeichnet und basiert auf einer stationären, einzonigen Massenbilanz von CO<sub>2</sub> im Gebäude (siehe Gl. 2-2).

ASTM D6245-24 (ASTM, 2024) warnt davor, dass Massenbilanzberechnungen manchmal mit wenig oder gar keiner Diskussion über ihre Grenzen oder die Annahmen, auf denen sie basieren, präsentiert werden, was dazu geführt hat, dass die Technik missbraucht wurde und die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen möglicherweise falsch interpretiert wurden. Paradoxe Weise bietet die Norm selbst in dieser Hinsicht Potenzial für Fehlinterpretationen, da sie besagt, dass *“One approach to estimating the air change rate of a zone involves tracking the amount of time it takes for the CO<sub>2</sub> concentration to decrease from one concentration value to a lower one after the occupants have left a space”* [ein Ansatz zur Schätzung der Luftwechselrate einer Zone darin besteht, die Zeit zu verfolgen, die die CO<sub>2</sub>-Konzentration benötigt, um von einem Konzentrationswert auf einen niedrigeren zu sinken, nachdem die Personen einen Raum verlassen haben] (ASTM, 2024, S. 16). Ohne weitere Präzisierung ist diese Aussage potenziell irreführend, da bei einem solchen Abklingtest wahrscheinlich die Hintergrundinfiltrationsrate oder genauer gesagt die Restluftwechselrate in einem Gebäude mit mehreren Räumen gemessen wird. Dies liegt daran, dass das CO<sub>2</sub>-Abklingprofil in einem bestimmten Raum nicht nur durch die Infiltration und Exfiltration von Außenluft, sondern auch durch das Ein- und Ausströmen von Luft in und aus angrenzenden Räumen beeinflusst wird. Dieser Punkt ist besonders in Klassenzimmern relevant, in denen die Fenster wahrscheinlich geschlossen sind und die Lüftungsanlagen heruntergefahren oder ausgeschaltet werden, wenn die Personen das Gebäude verlassen.

Der Leitfaden beschreibt auch die Bestimmung genauerer CO<sub>2</sub>-Emissionsraten von Personen als Funktion der Körpergröße und des Niveaus der körperlichen Aktivität (Li et al., 2024). Darüber hinaus

beschreibt ASTM D6245, wie gemessene Werte der Kohlendioxidkonzentration (CO<sub>2</sub>) in Innenräumen zur Bewertung der Luftqualität in Innenräumen und der Gebäudebelüftung herangezogen werden können.

**ISO 16000-26:2012. Indoor air – Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)**  
**(Innenraumluftverunreinigungen – Teil 26: Probenahmestrategie für Kohlendioxid) (CO<sub>2</sub>) – (ISO, 2012)**

ISO 16000-26:2012 betont die Bedeutung einer sorgfältigen Planung in Bezug auf Messungen der Innenraumverschmutzung auf der Grundlage der Messung von CO<sub>2</sub>. Bei Messungen der Innenraumluft sind die Probenahme und die Messstrategie von besonderer Bedeutung, da die Ergebnisse solcher Messkampagnen weitreichende Folgen haben können, beispielsweise im Hinblick auf die Feststellung des Bedarfs an Abhilfemaßnahmen oder die Durchführbarkeit bestehender Lüftungsmethoden.

In Bezug auf den Messort empfiehlt die ISO 16000-26, dass es bei Räumen mit einer Fläche von bis zu 50 m<sup>2</sup> im Allgemeinen ausreicht, eine Probenahmestelle pro Raum zu haben, die sich in einer Höhe von 1,5 m und in einem Abstand von mindestens 1 m bis 2 m von den Wänden befinden sollte. Bei größeren Räumen sollten mehr Probenahmestellen vorgesehen werden, um sicherzustellen, dass Konzentrationsgradienten ermittelt werden. Bei Schulklassenräumen ist es wahrscheinlich unpraktisch, die Sensoren in einem Abstand von 1–2 m von einer Wand anzubringen (da dies mit der Sitzordnung kollidieren würde), und es ist wahrscheinlich, dass der Sensor nicht an einer dauerhaft befestigten Oberfläche angebracht werden kann. Da die SuS in der Regel in den Klassenräumen sitzen, ist die Messung der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Atemhöhe (d. h. 1,1–1,2 m über dem Boden) außerdem aussagekräftiger für die tatsächliche Konzentration, die von den SuS eingeatmet wird.

Die Norm empfiehlt, die Messunsicherheit im Rahmen der Messplanung zu berücksichtigen und angemessen zu beschreiben. Es wird empfohlen, in den Messergebnissen in der Regel numerische Daten anzugeben, sodass die letzte Dezimalstelle (signifikante Zahl) die Größenordnung der Messunsicherheit widerspiegelt. In Bezug auf die Qualitätssicherung empfiehlt die Norm, die verwendeten Kalibrierungsverfahren (einschließlich der Häufigkeit und des Umfangs der Kalibrierung von Messgeräten) vor jeder Überwachungskampagne zu klären. Tabelle B.1 in Anhang B der ISO 16000-26 enthält eine Zusammenfassung der allgemeinen Klassifizierung der IAQ- und CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen auf der Grundlage der EN 13779. Da diese Norm jedoch inzwischen zurückgezogen wurde, wurden die Werte hier nicht aufgenommen.

**ISO 16000-41:2023 – Indoor air – Part 41: Assessment and classification**  
**(Innenraumluftverunreinigungen - Teil 41: Bewertung und Klassifizierung) – (ISO, 2023)**

ISO 16000-41:2023 definiert ein Verfahren zur Bewertung der Innenraumluftqualität, das für alle Innenräume in Wohn- und Nichtwohngebäuden gilt, die entweder mit natürlicher oder mechanischer Belüftung ausgestattet sind. Die Norm weist darauf hin, dass die Konzentrationen von Stoffen in der Raumluft innerhalb eines Raums, im Laufe der Zeit und in Abhängigkeit von nutzungsspezifischen Aktivitäten erheblich schwanken können. Dies unterstreicht die Bedeutung von Längsschnittstudien, die den gesamten Betriebszyklus des untersuchten Gebäudes umfassen.

Für die Bewertung der Innenraumluftqualität klassifiziert die Norm ISO 16000-41:2023 die Raumluft in drei Qualitätsklassen A (hoch), B (mittel) und C (niedrig), basierend auf der Bewertung der wichtigsten Parameter der Innenraumluftqualität (Tab. 2-11). Wenn eines der Hauptkriterien die Qualitätsklasse C

nicht dauerhaft erfüllt, gilt die Raumluft als *“outside all quality classes”* [außerhalb aller Qualitätsklassen] (ISO, 2023).

Tabelle 2-11. Gesamtklassen der Raumluftqualität (ISO 16000-41)

Qualitätsklasse	Bezeichnung	Beschreibung
A	Hohe Raumluftqualität	Niedrige Stoffkonzentrationen
B	Mittlere Raumluftqualität	Durchschnittliche Stoffkonzentrationen
C	Niedrige Raumluftqualität	Überdurchschnittliche Stoffkonzentrationen
Niedrigste Luftqualitätsklasse nicht erfüllt		Konzentrationen über den Grenzwerten der Klasse C

Die wichtigsten vorgeschriebenen Parameter, die für eine vollständige Bewertung der Innenraumluftqualität einbezogen werden müssen, sind im Folgenden aufgeführt: Formaldehyd, flüchtige organische Verbindungen (VOC), Radon, Kohlendioxid, Schimmel (mikrobieller Befall), Geruch, Feinstaub (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) und ultrafeine Partikel (UFP) gemäß den jeweiligen Grenzwerten.

In Bezug auf die Bewertung von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Schulklassen empfiehlt die Norm, den Bewertungszeitraum auf die Zeit der intensivsten, aber noch üblichen Nutzung zu beschränken, wobei die Dauer der Pausen vor oder nach dem Unterricht ebenfalls berücksichtigt wird. In dieser Hinsicht könnte der tägliche Überwachungszeitraum für eine typische Schule vom Beginn des Unterrichts bis zum Ende des Unterrichts (d. h. 6–8 Stunden) oder für die Dauer einer einzelnen Unterrichtsstunde (d. h. 1–2 Stunden) dauern (ISO, 2023).

Tabelle 2-12. Klassen für die Luftqualität in Innenräumen für CO<sub>2</sub> (ISO 16000-41) (ISO, 2023)

Qualitätsklasse	Beschreibung	Arithmetisches Mittel des momentanen CO <sub>2</sub> [ppm]*
A	Anforderungen an Innenräume für den ständigen Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten ausgeübt werden oder die zur Regeneration genutzt werden	≤ 1000
B	Allgemeine Anforderungen an Innenräume für den ständigen Aufenthalt von Personen	> 1000 ≤ 1400
C	Anforderungen an Innenräume mit kurzzeitiger Nutzung durch Personen	> 1400 ≤ 5000
Außerhalb der Klasse	Nicht akzeptabel für die Nutzung durch Personen	> 5000

Die Norm ISO 16000-41:2023 untermauert die im „Positionspapier zu Lüftungserfordernissen in Bildungseinrichtungen“ (BMK 2024) vorgeschriebenen CO<sub>2</sub>-Ziel- und Einhaltungswerte entsprechend der spezifischen Raumnutzungsarten. Es ist zu beachten, dass es einige Diskrepanzen zwischen der Anpassung von Tabelle 2-12 in der ISO-Norm und ihrer Umsetzung im BMK-Positionspapier (Tab. 2-4) gibt, wobei die Zielklasse A+ in der BMK-Richtlinie (Tab. 2-4) nicht Teil der ISO-Klassifizierung ist.



Darüber hinaus wird in der BMK-Richtlinie angegeben, dass Klasse C für Badezimmer und Flure geeignet ist, während die genaue Auslegung der ISO-Norm in dieser Hinsicht unklar ist, da die Bedeutung des Begriffs „kurze Nutzung“ nicht definiert ist. In diesem Zusammenhang sollte auch beachtet werden, dass die ISO-Norm nur die direkten Auswirkungen einzelner Schadstoffe (z. B. biologische Ausdünstungen oder CO<sub>2</sub>) auf die Gesundheit und das Wohlbefinden berücksichtigt und nicht beispielsweise das Folgerisiko der Übertragung von Krankheiten durch die Luft, das nachweislich indirekt mit der CO<sub>2</sub>-Konzentration korreliert.

**ISO 17772-1 – Energy performance of buildings – Indoor environmental quality Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings (Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Raumklimatische Eingangsparameter für die Planung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden) – (ISO, 2017)**

ISO 17772-1 befasst sich mit dem Energieverbrauch von Gebäuden und dem Raumklima, einschließlich Heizung, Kühlung, Lüftung und Beleuchtung, sowie mit der Planung und dem Betrieb von Gebäuden und ihren Systemen. Die Norm übernimmt das Konzept der Verwendung von vier verschiedenen Kategorien der Raumklimaqualität, die von „hoch“ bis „niedrig“ reichen, wie in EN 16798-1 (Tab. 2-5). Ähnlich wie in EN 16798-1 heißt es in ISO 17772-1, dass *“a higher level might be selected for occupants with special needs (children, elderly, handicapped, etc.)”* [für Bewohner\*innen mit besonderen Bedürfnissen (Kinder, ältere Menschen, Menschen mit Behinderung usw.) ein höheres Niveau gewählt werden kann]. Gleichzeitig wird die nicht referenzierte Aussage getroffen, dass *“a lower level will not provide any health risk but might decrease comfort”* [ein niedrigeres Niveau kein Gesundheitsrisiko darstellt, aber den Komfort beeinträchtigen könnte] (ISO, 2017, S. 7). Wenn ein solches Konzept jedoch auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration oder die Belüftungsrate im Raum angewendet wird, kann die Wahl der IEQ-Kategorie erhebliche indirekte Auswirkungen auf die Gesundheit haben, wie eine Reihe aktueller Studien belegen (Schwarzbauer, 2021; Buonanno, 2022; Pollozhani, 2024).

Die Methoden zur Bemessung der Luftstromraten in ISO 17772-1 (ISO, 2017) basieren auf der Verdünnung menschlicher Bioabwässer und Hintergrundemissionen (aus der Bausubstanz und der Nutzungsart), die mit den in EN 16798-1 (Tab. 2-7, 2-8) beschriebenen Methoden identisch sind. Ebenso ist die Methode zur Verwendung von Grenzwerten einer Stoffkonzentration, wie z. B. CO<sub>2</sub>, zur Definition von Lüftungsgrenzwerten identisch mit Methode 2 von EN 16798-1. Aus der Perspektive der Lüftungsdimensionierung und der CO<sub>2</sub>-Schwellenkonzentration können die beiden Normen daher als identisch betrachtet werden.

**ASHRAE 62-1 – Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality (Belüftung und akzeptable Luftqualität in Innenräumen) – (ASHRAE, 2022)**

ASHRAE 62-1 ist Teil einer Reihe von Gebäudeleistungsstandards, die von der American Society of Heating Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE) entwickelt wurden. Der Standard 62.1 (der gewerbliche, institutionelle und Hochhaus-Wohngebäude abdeckt) legt Mindestlüftungsraten und andere Maßnahmen fest, die eine für die menschlichen Bewohner\*innen akzeptable Raumluftqualität gewährleisten und darauf abzielen, gesundheitsschädliche Auswirkungen zu minimieren. Die Norm wurde 2022 aktualisiert und wird in Nordamerika und vielen anderen Ländern weltweit häufig als Standard-Entwurfsnorm für die Dimensionierung von Lüftungssystemen verwendet. Gemäß ASHRAE 62.1 muss die Außenluftqualität vor der Fertigstellung eines Lüftungssystementwurfs untersucht werden. Diese Untersuchung erfordert die Dokumentation der

Außenluftqualität sowohl auf regionaler als auch auf lokaler Ebene. Auf lokaler Ebene umfasst dies die Identifizierung potenzieller Schadstoffquellen auf dem Gelände und von angrenzenden Grundstücken, einschließlich solcher, die nur saisonal betrieben werden (ASHRAE, 2022). Es ist bemerkenswert, dass eine derart umfassende Bewertung der Außenluftqualität während der Planungsphase in entsprechenden europäischen Lüftungsnormen nicht vorgeschrieben ist.

In Bezug auf die Mindestlüftungsrate besagt die überarbeitete Norm, dass Schulklassenräume mit einer Mindestlüftungsrate von 5 l/(s·Person) oder mehr betrieben werden müssen, mit einer zusätzlichen flächenbezogenen Komponente von 0,6 l/(s·m<sup>2</sup>) (um gebäudebedingte Emissionen zu berücksichtigen). Bei einer angenommenen Mindestbelegung der Klassenräume von 3 m<sup>2</sup>/Person würde die kombinierte Mindestlüftungsrate daher 6,8 l/(s·Person) betragen. Dieser Wert liegt deutlich unter dem entsprechenden Wert, der in der EN 16798-1 bei IEQ<sub>i</sub> angegeben ist, und ist auch niedriger als der IEQ<sub>ii</sub>-Wert (Tab. 2-7) und die in der ÖNORM H 6039:2023 (Tab. 2-3) angegebenen Werte.

Bei der Anwendung solcher Normen in der „realen Welt“ muss auch die „Leistungslücke“ berücksichtigt werden, die zwischen den in den Entwurfsnormen angegebenen Werten und der gemessenen Leistung von Lüftungssystemen vor Ort besteht. Haverinen-Shaughnessy et al. (2011) weisen darauf hin, dass ein erheblicher Prozentsatz der US-Schulen im Vergleich zur Version von ASHRAE 62.1, die zum Zeitpunkt ihrer Planung galt, unterbelüftet war. Eine Untersuchung von Persily (2021) bestätigt, dass es zahlreiche Gründe dafür gibt, dass die tatsächliche Lüftungsleistung oft nicht der Planungsabsicht entspricht.

### 2.5.5 Zusammenfassung europäischer und internationaler normativer Standards und Richtlinien

Es ist wichtig zu betonen, dass die in EN 16798-1:2019, ISO 17772-1:2017 und ASHRAE 62.1 vorgeschriebenen Frischluft-Lüftungsrate größtenteils aus Studien stammen, die die Auswirkungen von Luftschadstoffen in Innenräumen aus der Perspektive der menschlichen Wahrnehmung der Luftqualität untersucht haben. Mit anderen Worten: Sie stammen aus Labor- und Feldversuchen, die an Proben von Personen durchgeführt wurden, deren Geruchssystem entweder an verschiedene Bioabwässer und gebäudebezogene Schadstoffe, die vom Geruchssystem wahrgenommen werden können (sowohl einzeln als auch in Kombination) „angepasst“ oder „nicht angepasst“ war (Fanger und Berg-Munch, 1983; Berg-Munch et al., 1986; Gunnarsen und Ole Fanger, 1992; Wargocki, 2004; Wargocki und Kostyrko, 2022). Die in diesen Normen vorgeschriebenen Luftwechselraten basieren daher in erster Linie auf der „wahrgenommenen Luftqualität“ und nicht auf der tatsächlichen „Luftqualität“ (aus toxikologischer oder gesundheitsbezogener Sicht).

Es wurde stillschweigend davon ausgegangen, dass die in den EN- und ISO-Normen vorgeschriebenen Lüftungsrate Schutz vor anderen Risiken bieten würden, einschließlich der Risiken, die von üblichen Luftschadstoffen in Innenräumen ausgehen. Dies wird jedoch nicht ausdrücklich erwähnt, und es gibt auch keine eindeutigen Belege für diese Annahme (Carrer, 2018). Tatsächlich zeigt die Tatsache, dass einige der früheren Untersuchungen zur Geruchsanpassung, (die diesen Normen zugrunde liegen,) Tests zur Anpassung der Bewohner\*innen an Zigarettergerüche (z. B. Gunnarsen, 1992) (ohne Berücksichtigung der damit verbundenen Gesundheitsrisiken) beinhalteten, die Grenzen dieses Ansatzes aus gesundheitlicher Sicht auf.

Darüber hinaus werden die Auswirkungen der Bewältigung der Gesundheitsrisiken im Zusammenhang mit saisonalen und/oder pandemischen durch die Luft übertragenen Krankheiten auf die Belüftung in den aktuellen europäischen Normen und ISO-Standards nicht berücksichtigt. Daher gelten solche Normen nur für Innenräume, in denen die Kriterien für Innenräume ausschließlich durch die Anwesenheit von Menschen definiert werden (d. h. in denen die im Raum ablaufenden Prozesse und die Umweltschadstoffe in der Umgebungsluft keinen wesentlichen Einfluss auf die Luftqualität in Innenräumen haben). In der täglichen Praxis sind solche Umgebungen äußerst selten. In diesem Zusammenhang kamen Wargocki und Kostyrko (2022) zu dem Schluss, dass olfaktorische Methoden als Ergänzung zu chemischen Messungen in Betracht gezogen werden sollten, da keine der beiden Methoden für sich genommen eine vollständige Charakterisierung der Luftqualität in Innenräumen liefern kann.

Tabelle 2-13. Übersichtstabelle der normativen Standards und Richtlinien für die CO<sub>2</sub>-Konzentration und Belüftung

Land	Name	Jahr	Werte für CO <sub>2</sub> Konzentrationen	Werte für personenbezog. Außenluftvolumenstrom	Wertetyp *	Anmerkungen
AUT	Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV)	2024		35 m <sup>3</sup> /(h·P.), geringe k.B. 50 m <sup>3</sup> /(h·P.), normale k.B. 70 m <sup>3</sup> /(h·P.), hohe k.B.	Grenzwert	Für Mechanische Be- und Entlüftung und versch. körperlicher Belastungen (k.B.)
AUT	ÖNORM H 6039:2023	2023	≤ 1000 ppm in Klassenräumen (arithmetischer Mittelwert über eine Unterrichts-Std.)	Für 1000 ppm: 28 m <sup>3</sup> /(h·Person), < 10 Jr. 33 m <sup>3</sup> /(h·Person), 11-18 Jr. 36 m <sup>3</sup> /(h·Person), > 19 Jr.	Richtwert	≤ 1400 ppm für Nebenräume (arithm. Mittelwert über eine Unterrichts-Std.)
AUT	BMK - Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter	2024	Raumkl. A+: ≤ 800 ppm Raumkl. A: ≤ 1000 ppm Raumkl. B: ≤ 1400 ppm Raumkl. C: ≤ 5000 ppm		Richtwert	A: Klassenräume; B: Nebenräume (ohne geistige Tätigkeiten); C: R. mit weniger als 0,5 Std./Tag Belegung
EU	EN 16798-1:2024	2024	IEQ <sub>I</sub> : ≤ 550 ppm ab. o.d. IEQ <sub>II</sub> : ≤ 800 ppm ab. o.d.	IEQ <sub>I</sub> : 10 l/(s·Person) IEQ <sub>II</sub> : 7 l/(s·Person)	Richtwert	IEQ <sub>I</sub> : Hohe Erwartungen (z.B. für Kinder); IEQ <sub>II</sub> : Mittlere Erwartungen
INTL	ISO 17772-1:2017	2017	IEQ <sub>III</sub> : ≤ 1350 ppm ab. o.d. IEQ <sub>IV</sub> : ≤ 1350 ppm ab. o.d.	IEQ <sub>III</sub> : 4 l/(s·Person) IEQ <sub>IV</sub> : 2,5 l/(s·Person)		
INTL	ISO 16000-41:2023	2023	Qlt.Cl. A: ≤ 1000 ppm Qlt.Cl. B: 1001–1400 ppm Qlt.Cl. C: 1401–5000 ppm Nicht akzept. > 5000 ppm		Richtwert	A: Daueraufenthalt (geistige Tätigkeiten); B: Allg. Anf. für Daueraufenthalt; C: Kurzaufenthalt
USA	ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2022	2022		5 l/(s·Person) Für Klassenräume	Richtwert	3.8 l/(s·person) für Hörsäle. Zusätzlicher Luftstrom von 0.3–0.6 l/(s·m <sup>2</sup> ) erforderlich
USA	ASHRAE Standard 241-2023	2023		20 l/(s·Person) Für Klassenräume	Richtwert	25 l/(s·person) Für Hörsäle. Nur unter pandemischen Gegebenheiten anwendbar.
DEU	ASR A3.6	2018	< 1000 ppm		Grenzwert	Für Arbeitsstätten: 1000-2000 ppm: Verbesserung erf.; >2000 ppm: weitere Maßnahmen erf.
INTL	WHO - Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context COVID-19	2021		10 l/(s·Person)	Richtwert	Luftvolumenstrom nach EN 16798-1

\* Grenzwert: Gesetzlich festgelegter Beurteilungswert, der eingehalten bzw. hinreichend sicher unterschritten werden muss.

Richtwert: Toxikologisch begründeter Wert, abgeleitet aus Erkenntnissen zu Dosis-Wirkungs-Beziehungen eines Stoffes.

Aus ganzheitlicher Sicht könnte man jedoch argumentieren, dass eine solche Formulierung die entscheidende Dimension biologischer Schadstoffe, welche sowohl mit saisonalen und epidemischen luftgetragenen Krankheiten als auch mit der Baubiologie in Verbindung stehen, immer noch ignoriert.

## 2.5.6 Gesundheitsbasierte Belüftungsstandards

Das erste dokumentierte Auftreten des Sick-Building-Syndroms (SBS) Mitte der 1970er Jahre wurde weitgehend auf die reduzierten Belüftungsraten in gewerblichen Gebäuden zurückgeführt, die als Reaktion auf Strategien zur Steigerung der Energieeffizienz nach dem arabischen Ölembargo von 1973 eingeführt wurden (Boslaugh, 2023). Einem späteren Bericht der WHO aus dem Jahr 1984 zufolge könnten bis zu 30 % der neuen und renovierten Gebäude weltweit Gegenstand übermäßiger Beschwerden im Zusammenhang mit der Luftqualität in Innenräumen (IAQ) sein (USEPA, 1991). Das sogenannte „Sick-Building-Syndrom“ erregte die Aufmerksamkeit der Forscher\*innen und führte zur Entstehung eines neuen Forschungsgebiets, das sich auf die Luftqualität in Innenräumen (IAQ) konzentriert. In den 1980er und 1990er Jahren lieferte dieses aufstrebende Forschungsgebiet Belege dafür, dass Belüftungsraten, die über den bestehenden Mindeststandards lagen, mit zahlreichen gesundheitlichen und kognitiven Vorteilen verbunden waren. Seitdem wurden die Forschungsbemühungen fortgesetzt, um die Wissensbasis und das Wertversprechen einer besseren Raumluftqualität zu erweitern (Allen, 2024). Unter zahlreichen verwandten Erkenntnissen haben Studien dokumentiert, dass höhere Lüftungsraten mit besseren Mathematik- und Leseleistungen bei SuS (Petersen, 2016), weniger Schulkrankheitstagen (Mendell, 2013), weniger Abwesenheiten am Arbeitsplatz (Myatt et al., 2002), ein geringeres Risiko für Infektionen mit Atemwegserkrankungen (Riley, 1980; Rudnick und Milton, 2003), höhere kognitive Funktionswerte (Allen et al., 2016) und eine verbesserte Leistung am Arbeitsplatz (Seppänen, 2006) verbunden sind. Zusätzlich zu diesen Vorteilen schätzen Forscher\*innen des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), dass die US-Wirtschaft durch Verbesserungen der Belüftung ein kombiniertes Potenzial von mehr als 20 Milliarden US-Dollar an wirtschaftlichem Nutzen erzielen könnte (Fisk et al., 2011) (Allen, 2024).

Das Konzept der „gesundheitsbasierten“ Lüftungsstandards ist eine logische Weiterentwicklung dieser Forschung und der Unzulänglichkeiten bestehender olfaktorischer Methoden (Abschnitt 2.5.5). Nach der COVID-19-Pandemie wurde dieses Konzept weiterentwickelt, um eine zusätzliche Prophylaxe zu bieten und die Wahrscheinlichkeit einer weiträumigen Übertragung von Krankheiten durch die Luft in Zeiten erhöhter Risiken zu verringern. Dieser Ansatz wird im Allgemeinen als Ergänzung zu bestehenden Standards und Leitlinien betrachtet, sodass „gesundheitsbasierte“ Standards verwendet werden, um zeitweise auf saisonale oder epidemische Infektionswellen zu reagieren. In den letzten Jahren haben professionelle Lüftungsorganisationen in Europa (z. B. CIBSE, REHVA) und Nordamerika (ASHRAE/ANSI) sowie medizinische Konsortien (z. B. die Lancet COVID-19 Kommission) bei der Entwicklung neuer „gesundheitsbasierter“ Lüftungsstandards eine Vorreiterrolle eingenommen.

### **REHVA – COVID-19 Guidance (Anleitung)** (REHVA, 2021)

Als Reaktion auf die Pandemie hat die Föderation der europäischen Verbände für Heizung, Lüftung und Klimatechnik (REHVA) eine detaillierte „COVID-19-Leitlinien“ für öffentliche Gebäude erstellt. REHVA befürwortete die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren zur Regulierung der Belüftung in öffentlichen Gebäuden, einschließlich Klassenzimmern, und erklärte: *“During an epidemic it is recommended to temporarily change the default settings of the traffic light indicator so that the yellow/orange light (or warning) is set to 800 ppm and the red light (or alarm) up to 1000 ppm in order to trigger prompt action to achieve sufficient ventilation even in situations with reduced occupancy”* [Während einer Epidemie wird empfohlen, die Standardeinstellungen der Ampelanzeige vorübergehend so zu ändern, dass das gelbe/orangefarbene Licht (oder die Warnung) auf 800 ppm und das rote Licht (oder der Alarm) auf 1000 ppm eingestellt wird, um auch in Situationen mit reduzierter Belegung sofortige

Maßnahmen zur Erzielung einer ausreichenden Belüftung auszulösen] (REHVA, 2021, S. 16). In Bezug auf den Betrieb mechanischer Lüftungssysteme gab die REHVA die Empfehlung ab, *“to change the CO<sub>2</sub> setpoint to 550 ppm in demand-controlled ventilation systems, in order to maintain the operation at nominal speed”* [den CO<sub>2</sub>-Sollwert in bedarfsgesteuerten Lüftungssystemen auf 550 ppm zu ändern, um den Betrieb mit Nenndrehzahl aufrechtzuerhalten] (REHVA, 2021, S. 4). Diese Empfehlung bezieht sich sowohl auf den belegten Zeitraum als auch auf die unbelegten (oder teilweise belegten) Zeiträume vor und nach der Konditionierung.

In den Leitlinien wird auch die Bedeutung von Übertragungswegen mit „geringer Reichweite“ betont, wobei die allgemein akzeptierte Entfernung von 1,5 m für die Flugbahn großer Atemtröpfchen nur dann gilt, wenn im Raum keine Luftbewegung herrscht. Die typische Luftverteilung in Räumen mit menschlicher Belegung, die durch Lüftung und Konvektion von Wärmegewinnen entsteht, kann Luftgeschwindigkeiten zwischen 0,05 und 0,2 m/s verursachen. Unter Verwendung dieser Geschwindigkeiten als plausible untere und obere Grenzwerte können zusammen mit den Sinkgeschwindigkeiten von Partikeln Schätzungen darüber vorgenommen werden, wie weit Tröpfchen fliegen können, bevor sie (unter dem Einfluss der Schwerkraft) eine Höhe von 1,5 m zu Boden fallen. Dementsprechend veranschaulichen diese Schätzungen, dass Tröpfchen, selbst wenn sie so groß wie 30 µm sind, mehr als 10 m zurücklegen können, bevor sie sich absetzen (REHVA, 2021), wodurch die Grenze zwischen herkömmlichen Annahmen bezüglich der Übertragung über kurze und lange Strecken verwischt wird.

#### **WHO – Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19** **(Fahrplan zur Verbesserung und Sicherstellung einer guten Belüftung in Innenräumen im Zusammenhang mit COVID-19)** (WHO, 2021a)

Als Reaktion auf die COVID-19-Pandemie legte die WHO Leitlinien vor, um sicherzustellen, dass alle öffentlichen Gebäude gut belüftet sind, um die Ausbreitung der Krankheit zu minimieren. In den WHO-Leitlinien wird eine Mindestlüftungsrate von 10 l/(s·Person) für Nichtwohngebäude empfohlen (WHO, 2021). Die Empfehlung der WHO für diese Mindestlüftungsrate verleiht ihrer Verwendung zwar mehr Gewicht, es sollte jedoch beachtet werden, dass dieser Wert nicht mithilfe einer „gesundheitsbasierten“ Risikoanalysemethode abgeleitet wurde, sondern einfach auf der Annahme der höchsten Kategorie (IEQ) basiert, die in EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) festgelegt ist.

#### **The Lancet – Designing infectious disease resilience into school buildings through improvements to ventilation and air cleaning** **(Resilienz von Schulgebäuden gegenüber Infektionskrankheiten durch Verbesserungen der Belüftung und Luftreinigung)** (The Lancet COVID-19 Commission, 2021)

Die Task Force für sicheres Arbeiten, sichere Schulen und sicheres Reisen der The Lancet COVID-19 Kommission hat es sich zur Aufgabe gemacht, Schulen strategische, evidenzbasierte Leitlinien für gesundheitsfördernde Maßnahmen auf Gebäudeebene zur Verfügung zu stellen, um das Risiko der Übertragung von Infektionskrankheiten durch die Luft in Schulen zu verringern. Dem Bericht zufolge *“Buildings play a critical role in minimizing, or conversely exacerbating, the spread of airborne infectious diseases. COVID-19 outbreaks occur indoors, and within-room long-range transmission beyond two meters (six feet) has been well-documented in conditions with no masking and low ventilation rates”* [spielen Gebäude eine entscheidende Rolle bei der Minimierung oder umgekehrt bei der Verschärfung der Ausbreitung von Infektionskrankheiten, die über die Luft übertragen werden. COVID-19-Ausbrüche treten in Innenräumen auf, und eine Übertragung über große Entfernungen innerhalb eines Raums von mehr als zwei Metern (sechs Fuß) ist unter Bedingungen ohne Maskierung

*und bei geringer Belüftung gut dokumentiert*]. In dem Bericht wird außerdem darauf hingewiesen, dass *“Building-related interventions have been shown to reduce the spread of many other airborne infectious diseases, including severe acute respiratory syndrome (SARS), Middle East respiratory syndrome (MERS), tuberculosis, measles, and influenza”* [gebäudebezogene Maßnahmen nachweislich die Ausbreitung vieler anderer durch die Luft übertragener Infektionskrankheiten verringert, darunter das schwere akute Atemwegssyndrom (SARS), das Nahost-Atemwegssyndrom (MERS), Tuberkulose, Masern und Influenza] (The Lancet COVID-19 Commission, 2021, S. 3).

Um dieses Problem anzugehen, empfiehlt der Bericht der The Lancet COVID-19 Commission (2021) die Priorisierung der folgenden fünf Kontrollstrategien (Tab. 2-14).

**Tabelle 2-14 Fünf vorrangige Kontrollstrategien** (The Lancet COVID-19 Commission, 2021)

Empfohlene Kontrollstrategien	
1	Gebäude in Betrieb nehmen und bestehende Systeme untersuchen
2	Mit sauberer Außenluft lüften
3	Die Luftreinigungseffizienz des Gebäudes durch evidenzbasierte Luftreinigungsverfahren wie Filterung verbessern
4	Wenn die Möglichkeit, die Belüftung und Luftreinigung zu verbessern, begrenzt ist, sollten tragbare Luftreiniger mit hocheffizienter Partikelfilterung (HEPA) verwendet werden
5	Andere evidenzbasierte Luftreinigungsansätze im Rahmen bestehender Strategien in Erwägung ziehen

In den Leitlinien von The Lancet wird darauf hingewiesen, dass gebäudebezogene Strategien zur Verringerung des Risikos der Übertragung von Infektionskrankheiten durch die Luft in Schulen (Tab. 2-14) im Rahmen eines mehrschichtigen Ansatzes zur Infektionsprophylaxe betrachtet werden müssen. In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass Masken eine entscheidende Kontrollstrategie während einer Pandemie von durch die Luft übertragenen Krankheiten darstellen, da sie zwei wichtige Funktionen erfüllen: (i) die Reduzierung der Konzentration infektiöser Atemwegspartikel, die vom Tragenden, der infiziert ist, ausgestoßen werden (d. h. „Quellenkontrolle“), und (ii) die Reduzierung der Konzentration von Partikeln, die vom Tragenden, der anfällig ist, eingeatmet werden (d. h. der „Rezeptor“) (The Lancet COVID-19 Commission, 2021).

**The Lancet - Proposed Non-infectious Air Delivery Rates (NADR) for Reducing Exposure to Airborne Respiratory Infectious Diseases (Vorgeschlagene nicht-infektiöse Luftzufuhrdaten (NADR) zur Reduzierung der Exposition gegenüber durch die Luft übertragenen Atemwegserkrankungen)** (The Lancet COVID-19 Commission, 2022)

Die Task Force für sicheres Arbeiten, sichere Schulen und sicheres Reisen der Lancet COVID-19-Kommission hat ihre Leitlinien im November 2022 aktualisiert und erklärt, dass *“There is urgency in setting new minimum standards that can help reduce respiratory disease risk indoors and promote better health overall”* [es dringend notwendig ist, neue Mindeststandards festzulegen, die dazu beitragen können, das Risiko von Atemwegserkrankungen in Innenräumen zu verringern und die Gesundheit insgesamt zu fördern] (The Lancet COVID-19 Commission, 2022). Die Task Force für sichere Arbeit, sichere Schulen und sicheres Reisen der Lancet COVID-19-Kommission überprüfte die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu Belüftung und Krankheitsübertragung für SARS-CoV-2 und andere durch die Luft übertragene Krankheitserreger und stellte fest, dass trotz der Unterschiede (zwischen

Studien, Expert\*innen und Messgrößen) Einigkeit über Belüftungsziele über den aktuellen Mindestwerten bestand. Auf der Grundlage dieser Bewertung schlug die Lancet-Taskforce die folgenden nicht-infektiösen Luftzufuhrraten (NADR) zur Reduzierung der Exposition gegenüber durch die Luft übertragenen Atemwegserkrankungen vor (Tab. 2-15).

**Tabelle 2-15 Vorgeschlagene nicht-infektiöse Luftzufuhrraten (NADR) zur Reduzierung der Exposition gegenüber durch die Luft übertragenen Atemwegserkrankungen (The Lancet COVID-19 Commission, 2022)**

Kategorie	Volumendurchflussrate pro Volumen [h <sup>-1</sup> ]	Volumenstrom pro Person [l/(s·Person)]	Volumenstrom pro Bodenfläche [l/(s·m <sup>2</sup> )]
Am besten (Best)	> 6	> 14	> 5,1 + ASHRAE Min*
Besser (Better)	6	14	5,1 + ASHRAE Min*
Gut (Good)	4	10	3,8 + ASHRAE Min*

\* Der ASHRAE-Mindestwert (ASHRAE Min) für die Außenluftzufuhr bezieht sich auf die in ASHRAE 62.1 angegebenen Werte

Gemäß der Lancet COVID-19-Kommission (2022, S. 3) wird eine Volumenstromrate von mehr als 14 l/(s·Person) empfohlen, um einen maximalen Schutz vor durch die Luft übertragenen Atemwegserkrankungen zu erreichen. Laut der Lancet-Taskforce sind solche Ziele *“feasible and achievable right now with existing and widely available approaches and technologies”* [mit bestehenden und weit verbreiteten Ansätzen und Technologien bereits jetzt machbar und erreichbar] (The Lancet COVID-19 Commission, 2022).

#### **REHVA – Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases (Gesundheitsbasierte Ziel-Lüftungsraten und Entwurfsmethode zur Reduzierung der Exposition gegenüber luftübertragenen Atemwegserkrankungen) (REHVA, 2022)**

Der Zweck dieses Dokuments bestand darin, umfassende Leitlinien für gesundheitsbasierte Ziel-Lüftungsraten zu erstellen, einschließlich einer Entwurfsmethode zur Reduzierung der Exposition gegenüber Atemwegserkrankungen in der Luft in Nichtwohngebäuden (REHVA, 2022). Diese Leitlinien bauen auf früheren REHVA-Leitlinien (siehe oben) auf und befassen sich sowohl mit Epidemieperioden (z. B. durch saisonale Grippe oder COVID-19-Wellen) als auch mit normalen Betriebsbedingungen.

Die REHVA empfiehlt, dass der Wechsel vom Normalbetrieb zur Verwendung erhöhter Belüftungsluftstromraten manuell erfolgen muss, da derzeit keine Sensoren für Atemwegserreger zur automatischen Steuerung verfügbar sind. In Bezug auf mechanische Systeme bekräftigt die jüngste Empfehlung der REHVA die in der vorherigen COVID-19-Empfehlung ausgesprochenen Ratschläge. Darin heißt es (während Epidemien): *“In ventilation systems controlled according to room CO<sub>2</sub> and temperature sensors, this can be done using the CO<sub>2</sub> setpoint change to 550 ppm. With a 550-ppm setpoint, ventilation will be operated during regular operating hours continuously at full speed in rooms with normal occupant density and at reduced speed in rooms with lower occupancy”* [Bei Lüftungssystemen, die über CO<sub>2</sub>- und Temperatursensoren im Raum gesteuert werden, kann dies durch Änderung des CO<sub>2</sub>-Sollwerts auf 550 ppm erfolgen. Bei einem Sollwert von 550 ppm wird die Lüftung während der regulären Betriebszeiten in Räumen mit normaler Belegungsdichte kontinuierlich mit voller Geschwindigkeit und in Räumen mit geringerer Belegung mit reduzierter Geschwindigkeit betrieben] (REHVA, 2022, S. 6).



Die REHVA empfiehlt, dass infektionsrisikobasierte Außenluftziel-Lüftungsraten für belegte Räume entweder spezifisch zu Raumtyp und Belegung berechnet werden sollten oder alternativ ein maximaler CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 800 ppm in Klassenzimmern und Besprechungsräumen (und 650 ppm in Büros, Restaurants und Fitnessstudios) eingehalten werden sollte. Diese Luftstromraten und CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte setzen voraus, dass keine tragbaren Luftreiniger verwendet werden und dass eine vollständige Mischluftverteilung gegeben ist (REHVA, 2022). Außerhalb von Epidemie- oder Pandemiezeiten empfiehlt die REHVA die Verwendung normativer Lüftungsraten (wie in EN 16798-1:2019 und ISO 17772-1:2017 beschrieben), die dem Raumtyp und der Belegung entsprechen.

Die REHVA empfiehlt, Nichtwohngebäude mit Mess- und Regelgeräten zur Regulierung der Raumluftqualität (IAQ) auszustatten. Da die direkte Messung der meisten Luftschadstoffe in Innenräumen nicht praktikabel ist und in der Regel eine Probenahme erfordert, befürwortet die REHVA die kontinuierliche Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration als Indikator für die Belüftung und die Raumluftqualität. Es sind auch kostengünstige Sensoren für die Überwachung von Feinstaub PM<sub>2,5</sub> erhältlich. Laut REHVA werden letztere insbesondere im Zusammenhang mit natürlicher Belüftung und hybriden Belüftungssystemen empfohlen, bei denen je nach Betriebsmodus eine zusätzliche Außenluftfilterung erforderlich sein kann (REHVA, 2022).

#### **ASHRAE – Standard 241-2023 – Control of Infectious Aerosols (Norm 241-2023 – Kontrolle infektiöser Aerosole)** (ASHRAE, 2023)

Ende 2022 wurde ASHRAE nach Gesprächen mit dem Weißen Haus dazu ermutigt, eine neue Norm zur Kontrolle von Krankheitserregern in der Luft zu entwickeln. Die Norm 241 soll die Anforderungen der bestehenden ANSI/ASHRAE-Normen 62.1 und 62.2 sowie der ANSI/ASHE/ASHRAE-Norm 170 ergänzen, um einen Infektionsrisikomanagementmodus (IRMM) bereitzustellen, wenn die Behörden als Reaktion auf Daten zur öffentlichen Gesundheit ein höheres Maß an Infektionsrisikominderung wünschen (oder verlangen) (ASHRAE, 2023).

Die in der Norm 241 genannten Anforderungen werden in Form einer „*equivalent clean airflow rate in units of flow per occupant in a space*“ [äquivalente saubere Luftstromrate in Einheiten des Luftstroms pro Person in einem Raum] (ECAi) angegeben. Die äquivalente saubere Luftstromrate kann durch eine Kombination aus frischer Außenluft und gefilterter Umluft sowie durch Luft, die durch verschiedene andere Technologien desinfiziert wurde, erreicht werden. Dieser Ansatz ermöglicht es Gebäuden mit vorhandenen Lüftungssystemen, die nicht ohne weiteres die zusätzliche Belüftung bereitstellen können, die zur Erfüllung der Norm erforderlich ist, die Anforderungen mithilfe von Luftreinigern für Räume und ähnlichen Geräten zu erfüllen.

**Tabelle 2-16. ASHRAE-241-Mindestwert für den äquivalenten sauberen Luftstrom pro Person im Infektionsrisikomanagement -Modus** (ASHRAE, 2023)

Belegungskategorie	ECAi* [l/(s·Person)]
Klassenzimmer	20
Hörsaal	25

\* ECAi-Werte beziehen sich auf die äquivalente saubere Luftstromrate im Atembereich

Es ist ersichtlich (Tab. 2-16), dass die von der ASHRAE-Norm 241 für Klassenzimmer und Hörsäle vorgeschlagenen ECAI-Werte deutlich höher sind als die von REHVA (REH VA, 2022) und den Schwellenwert der Kategorie „Best“ übersteigen, der in den von der Lancet COVID-19 Commission vorgeschlagenen Non-Infectious Air Delivery Rates (NADR) (The Lancet COVID-19 Commission, 2022) festgelegt wurde.

In einer unabhängigen Überprüfung des ASHRAE-241-Standards, die von Dr. Joseph Allen (Harvard TH Chan School of Public Health) durchgeführt wurde (Allen, 2024), wurde angemerkt, dass der Standard ein Gesamtziel für „saubere Luft“ (Außenluft + gefilterte/gereinigte Luft) empfahl, das eher mit den historischen, gesundheitsorientierten Lüftungsraten übereinstimmt. Allen kritisierte jedoch die Aufnahme eines „Ein-/Aus-Schalters“ in die Norm (d. h. ihre Anwendbarkeit nur im „Risikomanagement-Modus“). Allen erklärt, dass dieser Mechanismus darauf hindeute, dass die Einführung einer verstärkten Belüftung auf freiwilliger Basis erfolgen könnte und dass die Grundbelastung durch Influenza, COVID-19 und andere Atemwegserkrankungen es irgendwie nicht wert sei, zu einem Vollzeitrisiko erklärt zu werden. Zur Untermauerung dieses Arguments führt Allen an, dass die US-amerikanischen Zentren für die Kontrolle und Prävention von Krankheiten (US CDC) allein für Influenza schätzen, dass seit 2010 jährlich bis zu 41 Millionen Erkrankungen, 710.000 Krankenhausaufenthalte und 51.000 Todesfälle aufgetreten sind (CDC, 2024) (Allen, 2024).

### 2.5.7 Zusammenfassung der gesundheitsbasierten Lüftungsstandards

Trotz der zahlreichen Forschungsarbeiten zu den gesundheitlichen und wirtschaftlichen Vorteilen der Einführung höherer „gesundheitsbasierter“ Belüftungsraten hat sich wenig geändert, und die Verwendung geruchsbasierter „akzeptabler“ Belüftungsraten bleibt die Grundlage für viele normative Standards und Branchenrichtlinien. Darüber hinaus gibt es wenig Harmonisierung und Konsens zwischen den verschiedenen globalen Standards und Richtlinien, und selbst die Auslegung häufig verwendeter Standards wird in der Praxis oft nur unzureichend verstanden. Diese Situation wird durch schwache Gesetzgebung und mangelnde Durchsetzung verschärft, was sich in dem gut dokumentierten „Performance Gap“ (Performancelücke) zwischen der Konstruktionsplanung bzw. -absicht und der tatsächlichen Leistung von Lüftungssystemen zeigt (Haverinen-Shaughnessy et al., 2011; Persily, 2021). Länder wie Belgien und Frankreich haben kürzlich neue Gesetze erlassen, die darauf abzielen, viele dieser Probleme zu beheben, indem sie höhere Standards in öffentlichen Gebäuden vorschreiben, die durch evidenzbasierte Inspektionen und eine kontinuierliche Überwachung der Innenraum CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unterstützt werden.

Das Jahr 2020 markierte einen wichtigen Wendepunkt in der Entwicklung der Lüftungsstandards weltweit. SARS-CoV-2 verbreitete sich vorwiegend in Innenräumen, wobei die schwersten Ausbrüche in Gebäuden verzeichnet wurden, die nach den minimalen „akzeptablen“ Lüftungsstandards konzipiert waren (Allen, 2024). Im Februar 2020 äußerten Forscher\*innen Bedenken hinsichtlich der Übertragung durch die Luft und betonten, dass eine verbesserte Belüftung und Filterung die wichtigsten Kontrollstrategien seien. Im Jahr 2020 gaben globale Gebäudetechnikorganisationen wie ASHRAE, CIBSE und REHVA als Reaktion auf die Pandemie Empfehlungen für erhöhte Lüftungsraten ab. Es sollte jedoch beachtet werden, dass „gesundheitsbasierte“ Lüftungsstandards (wie ASHRAE 241) nur das Risiko einer weiträumigen Übertragung von infektiösen Aerosolen von einem Infizierten, der sich nicht in unmittelbarer Nähe einer anfälligen Person befindet, berücksichtigen. Es ist unwahrscheinlich, dass solche Standards das Übertragungsrisiko in allen Situationen signifikant

verringern, da es eine Vielzahl von Infektionsmodalitäten gibt und Faktoren wie die Dauer der Exposition und die persönliche Anfälligkeit für Infektionen eine Rolle spielen (Abschnitt 4.5).

Für die Zukunft ist klar, dass es dringend notwendig ist, „gesundheitsbasierte“ Anforderungen in bestehende europäische und österreichische Lüftungsstandards aufzunehmen, um die Dichotomie zwischen bestehenden olfaktorischen Standards und solchen, die auf die Unterstützung der optimalen menschlichen Gesundheit und Leistungsfähigkeit abzielen, zu beenden. Gleichzeitig ist eine gewisse Überwachung der Einhaltung erforderlich, um sicherzustellen, dass „gesundheitsbasierte“ Standards in öffentlichen Einrichtungen korrekt umgesetzt und eingehalten werden. Letzteres ist unerlässlich, um zu vermeiden, dass den Bewohner\*innen schlecht verwalteter Gebäude ungerechterweise gesundheitliche Ungleichheiten auferlegt werden. Diese Probleme sind besonders wichtig in dicht besiedelten Schulgebäuden, in denen SuS und LuL den Großteil ihres wachen Lebens außerhalb ihrer eigenen Wohnungen verbringen.



### 3 Studiendesign und Forschungsmethoden

#### 3.1 Überblick über die Forschungsmethodik

Die ImpAQS-Studie verwendete eine Forschungsmethodik mit *Mixed Methods*, bei der quantitative und qualitative Methoden kombiniert wurden, um die in Abschnitt 1.4 dargelegten Forschungsfragen zu beantworten. Studien mit Mixed Methods werden zunehmend in der Bauforschung, die sich mit bewohnten Gebäuden befasst, eingesetzt, um die komplexen Wechselwirkungen zwischen Bauphysik, Gebäudetechnik und dem stochastischen und kontextabhängigen Verhalten der Bewohnenden zu berücksichtigen. Ein solcher Ansatz ist für die ImpAQS-Studie dringend erforderlich, bei der das Ziel darin besteht, die Lüftungseigenschaften und die Raumluftqualität (IAQ) in österreichischen Klassenzimmern zu bewerten, wie sie von einer Vielzahl von Altersgruppen in mehreren geografischen Regionen in unterschiedlichen Gebäudetypologien und zu verschiedenen Jahreszeiten erlebt werden.

Die allgemeine Forschungsmethodik ist so konzipiert, dass sie die dominierenden Faktoren berücksichtigt, die die Lüftungspraktiken und die Luftqualität in Innenräumen in Schulen beeinflussen (Abb. 1-2). Neben der physischen Überwachung der CO<sub>2</sub>- und anderen Umweltvariablen in Klassenzimmern (und den Details zu Sensoren, Kalibrierung und Höhenanpassungen) umfasst dies Faktoren, die die Außenumgebung beeinflussen (z. B. den Standort der Schulen, die CO<sub>2</sub>- und Luftverschmutzungskonzentration im Freien usw.), physikalische Details zu den Klassenräumen (wie z. B. deren Lage, die Fläche der offenen Fenster, die Anzahl der SuS pro Klasse usw.). Objektive Parameter, die SuS und LuL betreffen (wie z. B. die Anzahl der im Laufe des Jahres erfassten Fehltag oder das Infektionsrisiko), und die subjektive Einstellung der LuL zur Verwendung von CO<sub>2</sub> Sensoren und Belüftung werden ebenfalls ausgewertet.

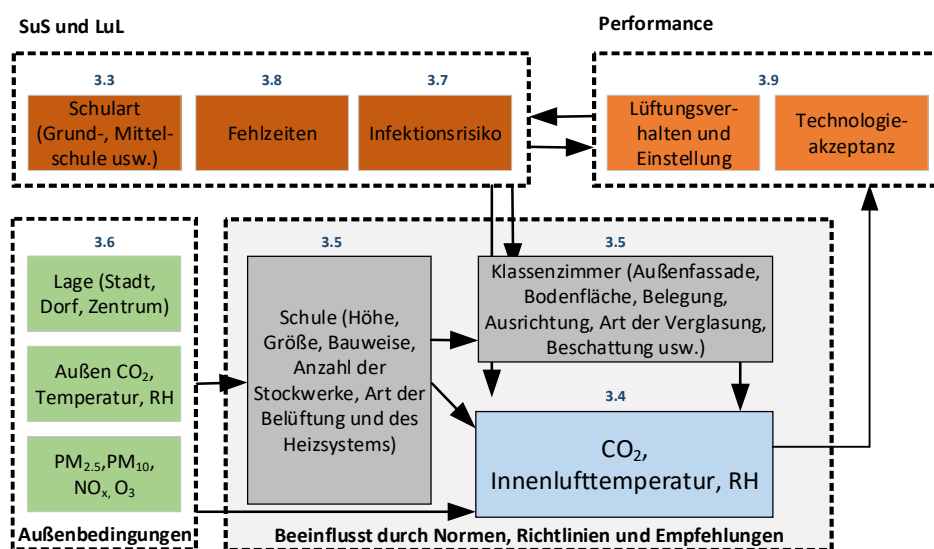


Abbildung 3-1. Konzeptueller Überblick über die Forschungsmethodik, die jede Komponente des Studiendesigns mit dem entsprechenden Methodenteil verknüpft

Die quantitativen Methoden, die zur Erhebung und Analyse der Primärdaten in dieser Studie verwendet wurden (einschließlich des Matched-Pair-Longitudinal-Forschungsdesigns<sup>6</sup>, der verwendeten Ausrüstung, der Kalibrierungsmethoden und des Installationsprozesses), werden in den Abschnitten 3.2–3.5 ausführlich beschrieben. Die Daten der Klassenraumerhebung werden in Abschnitt 3.6 zusammengefasst und die Daten zur Außenluftverschmutzung sind in Abschnitt 3.7. Das analytische Infektionsrisikomodell, das zur Bestimmung des relativen Risikos der Übertragung von Krankheiten durch die Luft verwendet wird, wird in Abschnitt 3.8 dargestellt. Daten zu Schulabwesenheiten werden in Abschnitt 3.9 beschrieben. Die österreichischen SARS-CoV-2-Abwasserdaten und ihre Verwendung im Rahmen dieser Studie werden in Abschnitt 3.10 zusammengefasst. Die qualitativen Methoden (einschließlich des Erhebungsdesigns, der Verteilung und der Durchführung) werden in Abschnitt 3.11 beschrieben.

### 3.2 Projektdauer und Überwachungszeitraum

Der Arbeitsablauf und der Zeitplan des ImpAQS-Projekts sind in Abb. 3-2 und Anhang A.1 dargestellt. Die Installation der Überwachungsgeräte (Abschnitt 3.5) begann Ende Juni 2023 und wurde mit wenigen Ausnahmen während der Sommerferien abgeschlossen, bevor das Schuljahr Anfang September begann. Daher startete die Überwachungsphase pünktlich zu Beginn des neuen Schuljahres (4. September 2023) und wurde ein Jahr später (3. September 2024) abgeschlossen. Die Daten wurden anschließend bereinigt (Abschnitt 3.4.2), um das Schuljahr 2023–24 widerzuspiegeln, indem alle regionalen Ferienzeiten, einschließlich zusätzlicher autonomer Feiertage, soweit bekannt, entfernt wurden. Darüber hinaus wurden bei unbesetzten oder teilbesetzten Räumen zusätzliche Datenbereinigungsverfahren (Abschnitt 3.4.2) angewendet, um diese Zeiträume sowohl für die Kontroll- als auch für die Testdaten selektiv zu entfernen (paarweise). Dies wurde durchgeführt, um zu verhindern, dass voreingenommene Vergleiche zwischen voll besetzten und unbesetzten (oder teilbesetzten) Klassenzimmern gezogen werden (Abschnitt 3.4.2).

---

<sup>6</sup> Beim Matched-Pairs-Design werden Paare zufällig einer Kontroll- oder Versuchsgruppe zugewiesen. Hierbei handelt es sich um ein experimentelles Design, bei dem die Teilnehmenden auf der Grundlage bestimmter Merkmale (Klassenzimmer mit gleicher oder ähnlicher Belegung, Belüftungsart usw.) gepaart und dann in zwei verschiedene Gruppen eingeteilt werden (hier: CO<sub>2</sub>-Sensoren mit und ohne sichtbare Anzeige). Im Matched-Pairs-Design werden die Klassenzimmer dann nach dem Zufallsprinzip entweder der Kontroll- (K) oder der experimentellen Testgruppe (T) zugeordnet.



Abbildung 3-2. Arbeitsablauf ImpAQS-Projekt, einschließlich Zeitplan für Installation, Überwachung und Umfragen

Die Umfragen unter den Schulleiter\*innen fanden zu Beginn und am Ende des Projekts statt, im September 2023 und 2024. Der Hauptzweck dieser Umfragen (Abschnitt 3.11) bestand darin, die Wahrnehmung der Schulleiter\*innen in Bezug auf Belüftung und Raumluftqualität sowie die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren zu verstehen. Die Umfragen der LuL (Abschnitt 3.11) wurden im Winter (Februar) und Sommer (September) durchgeführt, um Informationen über die Auswirkungen saisonaler Faktoren auf das Lüftungsverhalten in Klassenzimmern zu erfassen. Diese Umfragen sollten Informationen über die Einstellung der LuL zur Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren einholen und ein tieferes Verständnis für die Hindernisse und Motivationen vermitteln, mit denen LuL konfrontiert sind, wenn sie versuchen, ihre Klassenzimmer zu lüften.

In den folgenden Abschnitten dieses Kapitels werden die Methoden beschrieben, die zur Erfassung und Validierung der für das ImpAQS-Projekt erforderlichen Daten verwendet wurden.

### 3.3 Teilnehmende Schulen

Die Studie zielte darauf ab, einen breiten Querschnitt von Schulformen einzubeziehen, der aus einer ausreichend großen Stichprobe stammt, um für die Schulen in den 9 Bundesländern Österreichs repräsentativ zu sein. Gleichzeitig musste die Stichprobe ausreichend homogen sein, um aussagekräftige „like-for-like“-Vergleiche zwischen verschiedenen Klassen, Schulformen und Regionen zu ermöglichen. Aufgrund dieser Zielsetzungen wurden bestimmte Schulkategorien von der Studie ausgeschlossen (z. B. weil es sich um Schularten handelte, die nur zeitweise besucht werden oder außerhalb der Kernzeiten der meisten Schulen stattfinden). Kleine Schulen (d. h. Schulen mit weniger als 10 Klassenräumen) wurden ebenfalls nicht inkludiert, da die Einbeziehung solcher Schulen ressourcenintensiver gewesen wäre (d. h. jede Schule hätte ein eigenes LoRaWAN Gateway benötigt) und dies die Gesamtzahl der Klassen, die aus Budgetgründen in die Studie einbezogen werden konnten, limitiert. Außerdem war es aufgrund des „Matched-Pairs“-Studiendesigns wichtig, dass jede der in die Studie einbezogenen Schulen über ausreichend Räume verfügte, um zwei nahezu identische Klassenräume zu bilden, die ein passendes Test- (T) und Kontrollstudienpaar (K) bilden (Abschnitt 3.5.4.1).

### 3.3.1 Berechnung der Stichprobengröße

Die Größe der Studienstichprobe und ihre Repräsentativität (in Bezug auf die untersuchte Population) beeinflussen das Konfidenzniveau der Ergebnisse. Daher war es wichtig, dass die ausgewählte Stichprobe eine angemessene Größe und ausreichende Variabilität aufwies, um Verzerrungen und Stichprobenfehler zu vermeiden.

Die Gesamtzahl der für die Studie ausgewählten Klassenräume wurde auf der Grundlage einer ausreichenden Zuverlässigkeit ausgewählt, um Rückschlüsse auf die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und Lüftungseigenschaften zu ziehen, die auf die größere Population aller österreichischen Klassenräume verallgemeinert werden können. Es gibt viele mathematische Formeln, die zur Berechnung von Stichprobenumfängen verwendet werden, und die Methode von Yamane (Gl. 3-1) wird häufig für diesen Zweck verwendet.

$$n = N / (1 + N(e)^2) \quad [3-1]$$

Dabei ist:

$n$  ist die Stichprobengröße,

$N$  ist die Populationsgröße,

$e$  ist die von der Studie akzeptierte Fehlermarge (in der Regel 0,05 oder 0,01).

Basierend auf Yamane's Methode und einer Schätzung  $N = 57,000$  der Klassenzimmer an öffentlichen Schulen in Österreich (Statistik Austria, 2022) würde die erforderliche Stichprobengröße bei einem angestrebten Konfidenzniveau von 99 % für die statistische Inferenz  $n = 8507$  betragen; während bei einem Konfidenzniveau von 95 % eine Stichprobengröße von 397 ausreichen würde. In der ImpAQS-Studie wird jedoch eine Matched-Pair-Stichprobe erstellt, was bedeutet, dass zwei Stichproben erforderlich sind, um eine Beobachtung abzuleiten. Daher werden zwei gleich große Gruppen benötigt und eine Stichprobengröße, die doppelt so hoch ist wie der von Yamane's Methode vorhergesagte Wert, ist erforderlich, um die gewünschte statistische Konfidenz zu erhalten. Dies würde bedeuten, dass eine Mindeststichprobengröße von 794 erforderlich wäre, um Schlussfolgerungen erster Ordnung mit einem Konfidenzniveau von 95 % zu ziehen. Da auf der Grundlage einer unbekanntem Teilmenge der Stichprobe (z. B. in Bezug auf die Teilmenge der natürlich oder mechanisch belüfteten Schulen) letztendlich weitere Schlussfolgerungen höherer Ordnung gezogen werden würden, müsste die Stichprobengröße weiter erhöht werden, um das gewünschte Konfidenzniveau aufrechtzuerhalten. Aus diesem Grund und aufgrund der Möglichkeit von Ausfallverlusten (d. h. Studienabbruch) wurde die Größe der ImpAQS-Stichprobe auf  $n_{ImpAQS} = 1,200$  Klassenzimmer erhöht. Folglich ist die Größe der Matched-Pair-Stichprobe  $n_{pairs} = 600$ .

### 3.3.2 Stichprobenauswahl und geografische Verteilung

Auf der Grundlage der oben genannten Auswahlkriterien wurde bei der Stichprobenstrategie eine möglichst große Bandbreite verschiedener Schularten und Altersgruppen berücksichtigt, die aus allen neun Bundesländern Österreichs stammten. Die Stichprobe für die Studie wurde dann in Zusammenarbeit mit dem Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen (IQS) unter Verwendung von Monte-Carlo-Stichprobenverfahren erstellt. Während des Strata-Prozesses wurde die Stichprobe mit dem Ziel gezogen, die spezifische Population so genau wie



möglich darzustellen. Wenn der Unterschied zwischen der Stichprobe und der tatsächlichen Population gering ist und die Stichprobengröße ausreichend groß ist (Abschnitt 3.3.1), ist es möglich, sehr genaue Aussagen über die gesammelten Ergebnisse zu treffen.

Die Verwendung von Strata im Stichprobenverfahren ist ein wichtiges Verfahren, um Teilpopulationen so genau wie möglich abzubilden und so die Repräsentativität einer Stichprobe zu erhöhen. „Repräsentativität“ beschreibt, wie gut die Anzahl der Einheiten in einem bestimmten Stichprobenstratum (z. B. einem bestimmten Schultyp) deren tatsächliches Vorkommen in der Realität widerspiegelt. Bei dem verwendeten Stichprobenverfahren werden Strata verwendet, um die Grundgesamtheit möglichst repräsentativ zu gruppieren. In diesem Fall umfassten die Strata Bundesländer, Schulformen und städtische/ländliche Umgebung. Innerhalb dieser Strata wurden weitere Variablen zur Sortierung verwendet (z. B. Schulgröße). Konkrete Gruppen werden als explizite Strata bezeichnet, Sortiervariablen als implizite Strata. Innerhalb dieser Strata werden dann zufällig Schulen ausgewählt. Anschließend wurden weitere Überprüfungen durchgeführt, um festzustellen, ob die generierte Stichprobe die Realität möglichst genau widerspiegelt (d. h. in diesem Fall, ob das Verhältnis der Schularten und geografischen Standorte mit den vorhandenen Raumerhebungsdaten übereinstimmt (Abschnitt 4.1.1).

Anschließend wurde eine Überschneidungskontrolle durchgeführt. Das bedeutet, dass Schulen, die bereits für die Teilnahme an anderen Studien ausgewählt wurden, ausgeschlossen werden. Bei Studien, die vom IQS durchgeführt werden (z. B. iKM-PLUS-Pilotprojekte), wird darauf geachtet, Schulen auszuschließen, die bereits ein oder zwei Jahre vor der aktuellen Studie an Studien teilgenommen haben. Das gilt ebenso bei Studien, die von externen Auftragnehmer\*innen durchgeführt werden.

Im Hinblick auf die Erfüllung der Vorgaben für das ImpAQS-Projekt wurden 120 Schulen mit mindestens 10 Klassenräumen gezogen. Für jede Schule wurden zwei Ersatzschulen gezogen. Die Strata Merkmale waren Bundesland (explizit), Stadt/Land (in zwei Kategorien), Grundschultyp, Schulgröße (implizit, in dieser Reihenfolge). Nach der Überschneidungskontrolle wurden einige Schulen ausgeschlossen, die bereits für andere Studien im selben Schuljahr ausgewählt worden waren. Die geografische Verteilung der ImpAQS-Schulen ist in Abb. 3-3 dargestellt und eine detaillierte Analyse des Stichprobenauswahlverfahrens ist in Abschnitt 4.1 enthalten.

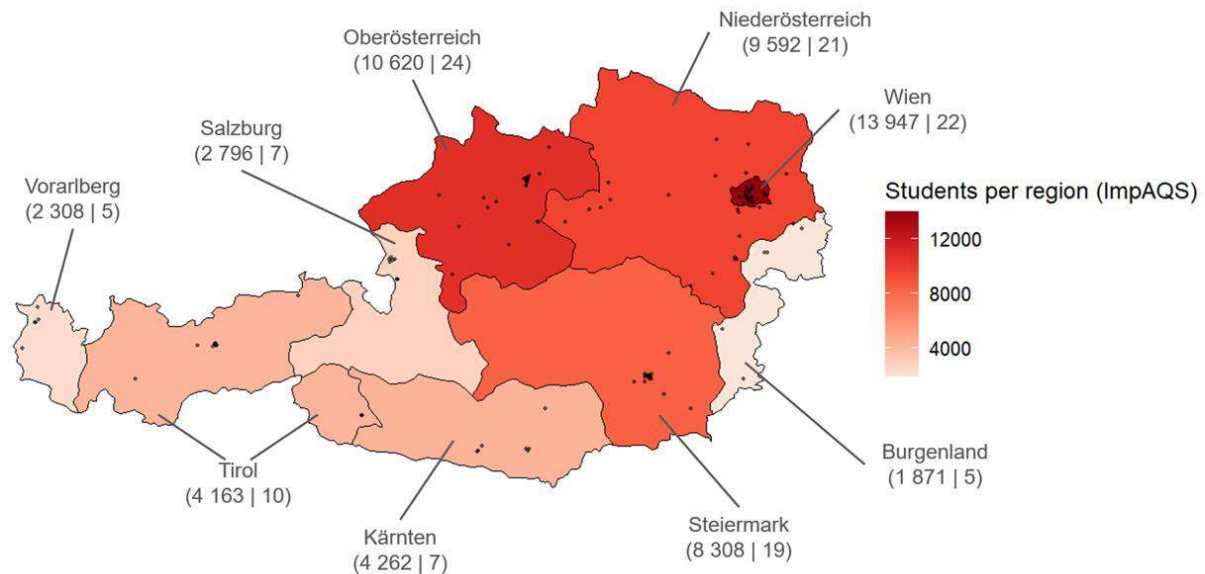


Abbildung 3-3. Geografische Lage der ImpAQS-Schulstichprobe, Gesamtzahl der SuS an den ImpAQS-Schulen und Anzahl der ImpAQS-Schulen in jeder Region

### 3.3.3 Teilnehmerrekrutierung

Nach der Erstellung der Studienstichprobe (Abschnitt 3.3.2) wurde im Mai 2023 per E-Mail der erste Kontakt zu den ausgewählten Schulen hergestellt<sup>7</sup>. Während Schulen in Graz relativ schnell auf diese Einladung reagierten (wahrscheinlich aufgrund früherer Kontakte mit einigen der Schulen), waren die Reaktionen von Schulen außerhalb der Steiermark oft nicht immer positiv. Aufgrund der anfänglich schlechten Resonanz wurde die Kontaktstrategie auf Telefonanrufe umgestellt. Der Juni 2023 war für die meisten Schulen aufgrund der Abschlussprüfungen (Matura) und der damit verbundenen Fristen zum Schuljahresende ein herausfordernder Monat, und die Kontaktaufnahme war zu diesem Zeitpunkt schwierig. In den Monaten Juli und August wurden die verbleibenden Schulen erfolgreich kontaktiert und (trotz der Ferienzeit) konnten genügend Schulen gewonnen werden, um die meisten Installationen bis Ende August abschließen zu können.

## 3.4 Theoretische Grundlagen – Berechnungsverfahren und Datenverarbeitung

### 3.4.1 Berechnung der Belüftungsrate

Die empirische Messung von Lüftungsraten in natürlich belüfteten Gebäuden ist ein komplizierter und zeitaufwendiger Prozess (Persily, 2015). Die Durchführung solcher Verfahren im Rahmen des ImpAQS-Projekts wäre sehr ressourcenintensiv. Die Umrechnung der gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Lüftungsraten ist jedoch möglich, wobei entweder transiente oder stationäre Methoden verwendet werden können. In Situationen, in denen die CO<sub>2</sub>-Flüsse in und aus der Raumluft nicht stabil sind, können instationäre Methoden präzisere Lösungen bieten. Die Anwendung solcher Verfahren

<sup>7</sup> Ein Beispiel für das ursprüngliche Anschreiben ist in Anhang B.1

erfordert jedoch genaue Kenntnisse über Zustandsänderungen im System (z. B. Änderungen der Belegung, der Stoffwechselrate usw.). Liegen solche Informationen nicht vor, können stationäre Methoden zuverlässige Ergebnisse liefern, vorausgesetzt, der Raum erreicht innerhalb des Bewertungszeitraums eine stationäre CO<sub>2</sub>-Konzentration. Diese Bedingung wird in der Regel durch die Luftwechselrate (oder Zeitkonstante) des jeweiligen Raums beeinflusst, und in den meisten Fällen ist es unwahrscheinlich, dass sie in einem Zeitraum von einer Stunde (oder einer kürzeren Unterrichtsstunde) eintritt (Persily, 2022). Über einen längeren Zeitraum von mehreren Stunden oder einem Schultag ist es in der Regel möglich, stabile Bedingungen zu erreichen, um eine Massenbilanz-Umrechnungsberechnung mit ausreichender Zuverlässigkeit durchzuführen.

Um die Belüftungsraten in jedem Klassenzimmer zu bewerten, basiert das diesem Bericht zugrundeliegende Modell für die Berechnung der Belüftungsraten auf einer vollständig gemischten Massenbilanzgleichung. Diese Gleichung wird wie folgt ausgedrückt (Persily, 2022)

$$V \cdot \frac{dC}{dt} = G(t) + Q(t) \cdot C_{out}(t) - Q(t) \cdot C(t) \quad [3-2]$$

Dabei ist

$V$  ist das Raumvolumen [m<sup>3</sup>],

$t$  ist die Zeit [h],

$C$  ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum [ppm],

$C_{out}$  ist die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration im Freien von ungefähr 420 bis 430 ppm (Sonnblick Observatorium, 2023),

$Q$  ist die Luftstromrate zwischen Raum und Außenluft [l/(s·Person)],

$G$  ist die menschliche CO<sub>2</sub>-Emissionsrate im Raum [l/(s·Person)]

Unter der Annahme, dass  $G$ ,  $Q$  und  $C_{out}$  konstant sind, wird ein System schließlich eine stationäre Konzentration ( $C_{ss}$ ) erreichen. Zu diesem Zeitpunkt wird das von den Personen im Raum erzeugte CO<sub>2</sub> durch die Verdünnung durch Belüftung ausgeglichen. In diesem stationären Zustand wird die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen konstant und die Änderungsrate ( $dC / dt$ ) ist gleich Null, was darauf hinweist, dass sich die Konzentration im Laufe der Zeit nicht weiter ändert. Wenn man sowohl die Entfernung von CO<sub>2</sub> in Innenräumen als auch den Transport zwischen verschiedenen Zonen innerhalb desselben Gebäudes vernachlässigt, kann die Lösung für Gl. 3-2 wie folgt vereinfacht werden (Persily, 2022):

$$0 = G + Q \cdot C_{out} - Q \cdot C_{ss} \quad [3-3]$$

$$C_{ss} = C_{out} + G/Q \quad [3-4]$$

Dabei ist

$C_{ss}$  die stationäre CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen.

Hinweis: Wenn  $G$  und  $Q$  die Einheiten (z. B. l/(s·Person)) nutzen, muss  $G/Q$  mit 10<sup>6</sup> multipliziert werden, um die Einheit ppm zu erhalten.

Die Umformung von Gleichung 3-4 zur Lösung von  $Q$  entspricht dies der Massenbilanzformel aus EN 16798-1 Methode 2 zur Bestimmung von Auslegungsparametern für die Innenraumluftqualität (CEN, 2019), wobei die Lüftungseffektivität und die Anpassung der Einheiten vernachlässigt werden (Abschnitt 2.5.2 für weitere Informationen zu EN 16798-1).

$$Q = \frac{G}{C_{ss} - C_{out}} \quad [3-5]$$

Gleichung 3-5 wird häufig verwendet, um die Belüftungsraten basierend auf den Spitzen- oder stationären CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu bestimmen (Andamon et al., 2023 , wobei davon ausgegangen wird, dass der Raum bei einer konstanten Lüftungsrate schließlich einen stationären Zustand erreicht (Persily, 2016; Batterman, 2017). In natürlich belüfteten Klassenzimmern treten jedoch häufig variable Belüftungs- und Belegungsmuster auf, sodass eine stationäre Konzentration nur selten erreicht wird. Außerdem hängt die Zeit, die benötigt wird, um ein Gleichgewicht zwischen der CO<sub>2</sub>-Erzeugung und seiner Verdünnung durch Belüftung zu erreichen, von der Umkehrung der Luftwechselrate ab. In der Regel wird ein stationärer Zustand erst nach etwa dem Dreifachen der Umkehrung der Luftwechselrate ( $Q/V$ ) erreicht. Zum Beispiel, bei einer Luftwechselrate von 1 h<sup>-1</sup> wird der stationäre Zustand beispielsweise nach etwa 3 Stunden erreicht. Je niedriger die Luftwechselrate ist, desto länger dauert es also, bis eine stationäre CO<sub>2</sub> Konzentration im Innenraum erreicht wird.

Angesichts dieser Einschränkungen wurde in dieser Studie die tägliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration (d. h. Integral der überschüssigen CO<sub>2</sub>-Konzentration geteilt durch die Belegungszeit) verwendet, um eine genauere Darstellung der unterschiedlichen Lüftungsbedingungen im Laufe des Tages zu erhalten. Dieser Ansatz zur Berechnung der täglichen durchschnittlichen Pro-Kopf-Lüftungsrate ähnelt dem in einer Studie an britischen Schulen in Gl. 3-6 (Wood et al., 2024) verwendeten Ansatz, siehe Gl.3-6.

$$\overline{Q_{pp}}_{est} = M \cdot \frac{T_{occ} \cdot \langle \overline{G_N} \rangle_{est}}{\int_{t_0}^{t_{end}} C dt} \quad [3-6]$$

Dabei ist

$\overline{Q_{pp}}_{est}$  die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der täglichen durchschnittlichen Pro-Kopf-Lüftungsrate [l/(s·Person)],

$T_{occ}$  die typische Belegungszeit eines Klassenzimmers [h],

$\langle \overline{G_N} \rangle_{est}$  die durchschnittliche Pro-Kopf-CO<sub>2</sub>-Emissionsrate [l/(s·Person)],

$C$  die überschüssige CO<sub>2</sub>-Konzentration (d. h. die Differenz zwischen der Konzentration in Innenräumen und im Freien),

$M$  der Mittelwert-Bias-Faktor für die Studie (Wood et al., 2024)

Die ausgeatmeten CO<sub>2</sub>-Raten hängen von einer Reihe von Faktoren ab, darunter: Stoffwechselrate, Alter und Geschlecht der Insassen. Die Wahl einer angemessenen durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsrate pro Person, die Alter, Stoffwechselrate und Geschlecht berücksichtigt, ist von entscheidender Bedeutung, da die Emissionsrate ( $G$ ) in einem linearen Verhältnis zur Lüftungsrate ( $Q$ ) steht, wie in der Gleichung dargestellt. Wobei eine Überschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionsrate um den Faktor 2 würde zu einer berechneten Lüftungsrate ( $Q$ ) führen, die ebenfalls doppelt so hoch ist.

EN 16798-1:2024 definiert eine Standard-CO<sub>2</sub>-Emissionsrate von 20 l/(h·Person) für die Berechnung der Außenluftdurchflussrate unter Verwendung der Massenbilanzgleichung. Persily und Jonge (2017) schätzten die CO<sub>2</sub>-Emissionsraten für verschiedene Körpermassen und körperliche Aktivitäten und hoben die Variabilität der Emissionen hervor. Tab 3-1 zeigt eine Reihe von Emissionsraten für verschiedene Raumtypen, basierend auf ihrer Studie (Persily & Jonge, 2017).

Bei der Analyse dieser Studie wurden die Referenzwerte von Wood et al. (2024) nach Persily (2016) herangezogen und die SuS entsprechend ihrem Alter in zwei verschiedene Altersgruppen aufgeteilt (für Volksschulen und weiterführende Schulen). Für Volksschulen wurde eine CO<sub>2</sub>-Emissionsrate von 3,1 ml/(s·Person) angewendet, was 11,16 l/(h·Person) entspricht, während für weiterführende Schulen eine Rate von 4,32 ml/(s·Person) verwendet wurde, was 15,55 l/(h·Person) entspricht, wie von Wood et al. (2024) beschrieben.

Tabelle 3-1 Durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionsrate für verschiedene Räume (Persily und Jonge, 2017)

Raumtyp	Durchschnittliche CO <sub>2</sub> -Emissionsrate		Anmerkung
	l/(s·Person)	l/(h·Person)	
Büro	0,0048	17,3	Erwachsene (50 % Männer und 50 % Frauen) bei 1,4 met
Konferenzraum	0,0048	17,3	Erwachsene (50 % Männer und 50 % Frauen) bei 1,4 met
Bildungsbereich (5 bis 8 Jahre)	0,0030	10,8	24 Kinder bei 1,4 met. (50 % Männer und 50 % Frauen, 5 bis 8 Jahre), eine erwachsene Frau bei 1,6 met
Vorlesungsraum	0,0043	15,5	64 SuS bei 1,2 met erfüllt (50 % männlich und 50 % weiblich, 16 bis 20 Jahre), ein Erwachsener bei 1,4 met
Hörsaal	0,0041	14,8	148 SuS bei 1,2 met (50 % männlich und 50 % weiblich, 16 bis 20 Jahre), ein Erwachsener bei 1,4 met
Wohnheim	0,0040	14,4	Kinder/Erwachsene (50 % männlich und 50 % weiblich) bei 1,4 met

### 3.4.2 Messdaten – Reinigungs-, Aggregations- und Analysezeiträume

Da die Studie darauf abzielte, die CO<sub>2</sub>- und Lüftungsraten in belegten Klassenzimmern zu bewerten, wurden zusätzliche Datenbereinigungsverfahren angewendet, um Zeiträume zu entfernen, in denen die Räume wahrscheinlich nicht belegt waren. Im ersten Schritt wurde die Dauer des Schultages auf die Kernzeit von sechs Stunden von Montag bis Freitag von 8:00 bis 14:00 Uhr standardisiert, mit

Ausnahme von zwei berufsbildenden Schulen (ABHS) (Schulnummern 21 und 59), die als von 10:00 bis 16:00 Uhr geöffnet definiert wurden.

Um sicherzustellen, dass sich die Analyse nur auf effektive Schultage konzentriert, wurden Zeiträume wie Wochenenden (d. h. Samstag und Sonntag), nationale und regionale Feiertage sowie einzelne Schulferien oder Schließungen aus dem Datensatz entfernt. Dieser Schritt zielte darauf ab, Daten so genau wie möglich zu erfassen und alle Zeiträume auszuschließen, in denen die Klassenzimmer voraussichtlich nicht belegt waren. Da es möglich ist, dass auch innerhalb dieser „Kernzeiten“ unbesetzte Zeiträume auftraten, wurden weitere Methoden angewendet, um unbesetzte und teilweise besetzte Zeiträume zu entfernen, die sonst die Ergebnisse verfälschen könnten.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde ein unterer Grenzwert für die stündliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration festgelegt und Stunden innerhalb der Kernzeit mit stündlichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unter 460 ppm wurden ausgeschlossen, da davon ausgegangen wurde, dass diese Räume wahrscheinlich nicht oder nur teilweise oder zeitweise belegt sind. Diese Annahme wurde durch eine Sichtprüfung einer Zufallsstichprobe der ausgeschlossenen Stunden verifiziert, um sicherzustellen, dass die Mehrheit dieser Zeiträume korrekt als unbesetzte Räume kategorisiert wurde.

Außerdem wurden gelegentliche Messwerte über 7500 ppm aus dem Datensatz entfernt. Diese ungewöhnlich hohen Werte wurden manchmal über relativ kurze Zeiträume aufgezeichnet und sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass SuS die CO<sub>2</sub>-Sensoren absichtlich manipuliert haben (z. B. durch direktes Pusten in den Sensor), was zu starken Spitzen im CO<sub>2</sub>-Gehalt führte, die nicht den typischen Belegungsbedingungen in Klassenzimmern entsprechen. Solche Ausreißer wurden ausgeschlossen, um die Integrität und Genauigkeit der Analyse zu gewährleisten.

Die Daten wurden zunächst mit einer Auflösung von 2 Minuten aufgezeichnet, aber aufgrund der großen Datenmenge und zur Straffung der Analyse wurden die Daten aggregiert. Zunächst wurden sie mit der zentralen Methode auf eine Auflösung von 15 Minuten aggregiert, d. h. die Daten wurden innerhalb eines Fensters von  $\pm 7$  Minuten um die beobachteten Zeiten aggregiert. Da die CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte in den Normen für die Luftqualität in Innenräumen (z. B. 1000 ppm gemäß ISO 16000-41, EN 16798-1 und Raumklasse A der österreichischen BMK-Richtlinien) jedoch in der Regel auf stündlichen Durchschnittswerten basieren, müssen die Daten auf Stundenbasis aggregiert werden. Außerdem ist die Entfernung von unbesetzten Zeiträumen, in denen die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 460 ppm liegt, am aussagekräftigsten, wenn sie auf stündlicher Basis angewendet wird. Daher wurden die Daten zu Stunden- und Tagesmittelwerten aggregiert, und diese Zeiträume bilden die Grundlage für die meisten in diesem Bericht vorgestellten Analysen.

Die stündlichen Daten wurden mithilfe der Floor-Methode<sup>8</sup> aggregiert (d. h. die Daten wurden in stündlichen Intervallen gruppiert, indem auf die nächste volle Stunde abgerundet wurde). Diese Methode wurde auf die gefilterten Perioden (8:00–14:00 Uhr und 10:00–16:00 Uhr) angewendet, die die „Kern“-Tagesdaten bilden. Zum Beispiel stellt die 8:00-Uhr-Stunde den Durchschnitt der

---

<sup>8</sup> Die Floor-Methode rundet eine Zahl auf die nächste ganze Zahl ab.

Beobachtungen dar, die um 8:00, 8:15, 8:30 und 8:45 Uhr gemacht wurden, da die Daten ursprünglich in 15-Minuten-Intervallen verarbeitet wurden. Dies bedeutet effektiv, dass die stündliche Messung um 8:00 Uhr ein Mittelungsfenster von 7:53 bis 8:52 Uhr abdeckt, was gut mit der Belegungszeit im Klassenzimmer für eine typische Unterrichtsstunde von 50 Minuten Dauer übereinstimmt (RIS, 2024). Für die letzte Periode des „Kern“-Schultages um 14:00 Uhr enthalten die Daten zusätzliche Beobachtungen von 13:53 bis 14:07 Uhr. Diese kurze Verlängerung ist enthalten, um den letzten Teil der Unterrichtsstunde zu erfassen, bevor der Raum geleert wird. Diese Anpassung ist notwendig, da die letzte Stunde nicht vollständig durch ein typisches 60-Minuten-Fenster (d. h. bis 13:52 Uhr) dargestellt werden kann, da dies die letzte Stunde abschneiden würde, bevor die SuS ihre Sachen gepackt haben und nach Hause gehen.

Nach der Definition der stündlichen Daten auf dieser Grundlage wurden die täglichen Daten aus den stündlichen Daten aggregiert, um die täglichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen während der „Kernzeit“ (von 8:00–14:00 Uhr und 10:00–16:00 Uhr je nach Schultyp) darzustellen. Wenn zusätzliche Analysen außerhalb dieser „Kernzeiten“ durchgeführt werden, wird dies im Text deutlich vermerkt.

Für die Matched-Pair-Analyse von Kontroll- und Testsensoren (Abschnitt 4.4) wurden mechanisch belüftete Schulen ausgeschlossen, um Verzerrungen zu vermeiden. Tatsächlich wiesen die Kontroll- und Testklassenräume in mechanisch belüfteten Schulen erwartungsgemäß sehr ähnliche CO<sub>2</sub>-Werte auf. Darüber hinaus wurden in mehreren Kontrollklassenräumen tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unter 600 ppm gemessen, was einer Belüftungsrate von etwa 30 l/s pro Person entspricht (bei einer Standard CO<sub>2</sub>-Emissionsrate von 20 l/(h·Person)). Derartig hohe Belüftungsraten sind als täglicher Mittelwert in voll besetzten, natürlich belüfteten Klassenräumen nicht plausibel. Bei weiteren Untersuchungen wurde festgestellt, dass die niedrigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen auf unbesetzte oder teilweise unbesetzte Klassenzimmer hindeuteten, was die Notwendigkeit einer weiteren Filterung der Daten zur Gewährleistung eines genauen Vergleichs zwischen Kontroll- und Testgruppe unterstreicht. Da die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen in den kälteren Monaten höher und in den wärmeren Monaten niedriger waren, wurde ein fester Grenzwert von 600 ppm als ungeeignet erachtet, um teilweise belegte Räume während des gesamten Schuljahres auszuschließen. Die Anwendung eines festen Schwellenwerts auf diese Weise hätte das Risiko mit sich gebracht, dass in den wärmeren Monaten einige gut belüftete, belegte Klassenzimmer ausgeschlossen worden wären. Daher wurde ein dynamischer Schwellenwert (d. h. „fuzzy boundary“) aus dem 25. Perzentil der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von Kontrollsensoren abgeleitet (Appendix B.2). Stündliche Mittelwerte von Kontrollsensoren, die unter diesen unscharfen Schwellenwert fielen, wurden (zusammen mit ihrem entsprechenden Testpaar) von der Analyse ausgeschlossen. Dieser Prozess führte zu einem verfeinerten Satz von Kontroll- und Testsensoren mit weniger leeren sowie teilweise leeren Räumen, die sonst die Kontroll-Test-Vergleiche verzerrt hätten.

## 3.5 Messgeräte und Datenverwaltung

### 3.5.1 Ausrüstung – Sensormessungen, Messunsicherheit und Aufzeichnungsintervall

Zur Überwachung der Innenraumklimabedingungen in den 1200 Klassenzimmern wurden batteriebetriebene nicht-dispersive Infrarotsensoren (NDIR) (AM 103, Milesight) eingesetzt. Diese Geräte maßen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit in Intervallen von 2 Minuten. Die Messauflösung des Sensors beträgt 1 ppm, und die Messgenauigkeit wird vom Hersteller mit  $\pm (30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ des Messwerts})$  für CO<sub>2</sub>-Messungen angegeben, was bei

CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Freien von etwa 420 bis 430 ppm zu einer Ungenauigkeit von  $\pm 43$  ppm und bei einer CO<sub>2</sub>-Standardschwelle von 1000 ppm zu einer Ungenauigkeit von  $\pm 60$  ppm führt. Die Genauigkeit der Lufttemperaturmessungen ist definiert als  $\pm 0,3$  °C für Temperaturen zwischen 0 °C und +70 °C. Für die relative Luftfeuchtigkeit ist die Genauigkeit mit  $\pm 3$  % innerhalb eines Bereichs von 10–90 % r. F. und mit  $\pm 5$  % für Messwerte unter 10 % oder über 90 % r. F. angegeben.

Zusätzlich zu den Innenraumsensoren wurde an jeder Schule ein Außensensor (EM 500, Milesight) direkt vor dem Hauptschulgebäude angebracht. Der Zweck dieses Geräts bestand darin, die lokalisierte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Umgebung und die Umweltbedingungen am Schulstandort aufzuzeichnen. Der EM 500 enthält vier Sensoren (CO<sub>2</sub>, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck) und ist für den Einsatz im Freien ausgelegt (Schutzart IP65). Er verwendet einen NDIR-Sensor für CO<sub>2</sub> mit einem Messbereich von 400 ppm bis 5.000 ppm und einer vom Hersteller angegebenen Sensorgenauigkeit von  $\pm (30 \text{ ppm} + 3 \% \text{ des Messwerts})$ . Die Temperatur wird mit einem MEMS-Sensor (Mikro-Elektromechanische Systeme) mit einer angegebenen Genauigkeit von  $\pm 0,3$  °C für Temperaturen zwischen 0 °C und +70 °C und  $\pm 0,6$  °C für Temperaturen zwischen -30 °C und 0 °C gemessen. Die relative Luftfeuchtigkeit wird mit einem MEMS-Sensor mit einer angegebenen Genauigkeit im Bereich von 10 % bis 90 % r. F. von  $\pm 3$  % gemessen, während sie unter 10 % und über 90 % r. F. bei  $\pm 5$  % liegt. Der Luftdruck wird mit einem MEMS-Sensor mit einem Bereich von 300–1100 hPa (-40 °C–85 °C) mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  hPa gemessen.

Die Innen- und Außensensoren messen und übertragen Daten in Intervallen von 2 Minuten. Obwohl anfänglich ein kürzeres (1-minütiges) Datenprotokollierungsintervall gewünscht wurde, das aufgrund der höheren Datenauflösung möglich gewesen wäre, erwies sich dies aufgrund der Konfiguration der Milesight-Geräte und der Auswirkungen, die dies auf die Lebensdauer der Sensorbatterie gehabt hätte, als technisch nicht durchführbar.

### 3.5.2 Ausrüstung – Sensordatenübertragung und -speicherung

Während der Installationsphase des Projekts wurden in jeder der 120 Schulen 11 CO<sub>2</sub>-Sensoren (10 für den Innen- und 1 für den Außenbereich) und ein Gateway (Abb. 3-4) installiert, was insgesamt 1320 Sensor- und 120 Gateway-Installationen ergab.

Um die Daten von den Sensoren an den Projektserver zu übertragen, wurde in jeder Schule ein LoRaWAN-System (Long Range Wide Area Network) eingerichtet. LoRaWAN ist eine drahtlose Telekommunikations-Technologie, die aufgrund ihrer Energieeffizienz und ihrer großen Reichweite häufig zur Verbindung von IoT-Geräten (Internet of Things) eingesetzt wird. Dieses System besteht aus vier integralen Komponenten: den CO<sub>2</sub>-Sensoren, einem Gateway (Funkbasisstationen), einem Netzwerkserver und einer Cloud-Plattform (Abb. 3-4). Die Sensorausrüstung, Gateways, Netzwerkserver und Cloud-Dienste (einschließlich Datenhosting und technischen Supports) wurden von der Firma LineMetrics GmbH (mit Sitz in Haag, Niederösterreich) bereitgestellt.

Die Gateways empfangen die Messdaten von allen Sensoren in ihrem Abdeckungsbereich und übertragen sie dann über ein Long Term Evolution (LTE)- oder Fourth Generation (4G)-Mobilfunknetz an den Server. Um die Datensicherheit zu gewährleisten und die Nutzung von Wi-Fi-Netzen in Schulen zu vermeiden, wurde ein Mobilfunknetz verwendet. Anschließend können die Daten über eine sichere, mit der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) konforme Cloud-Plattform abgerufen, visualisiert und exportiert werden. Die Integration der Cloud-Plattform und des Datenservers



ermöglicht einen Echtzeitzugriff mit Fernsteuerungsfunktionen (z. B. Passwortschutz der NFC-Funktionalität (Near Field Communication) der Geräte, um Manipulationen durch Dritte zu verhindern) und die Möglichkeit, Warnmeldungen und Benachrichtigungen bei Verbindungsverlusten oder anderen Anomalien einzurichten. Ohne ein solches automatisiertes Überwachungssystem wäre mit einer weitaus höheren Datenverlustrate zu rechnen.

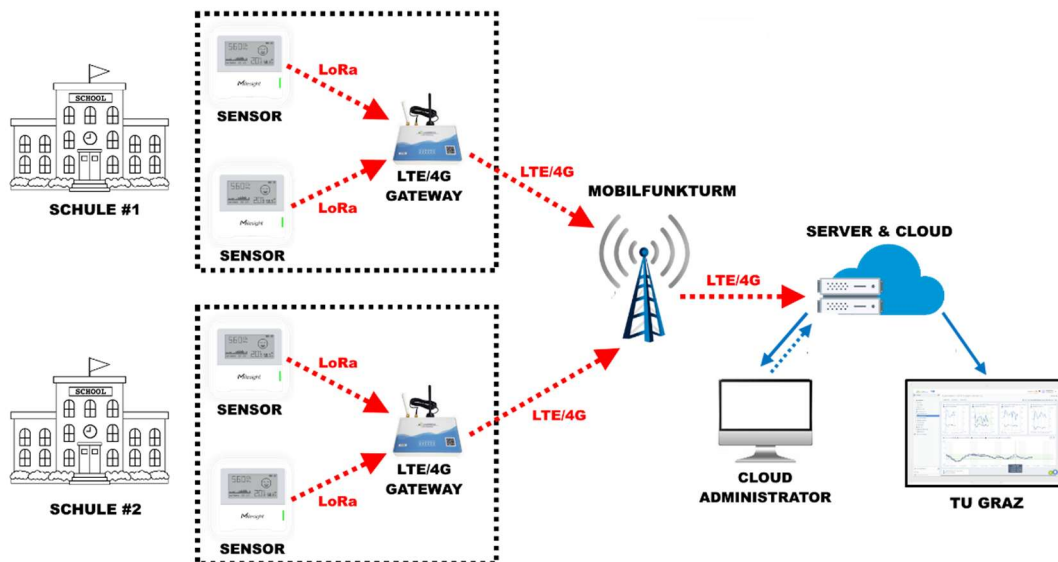


Abbildung 3-4. Überblick über die Datenkommunikation von Sensoren und Gateways zur Cloud und zum Server

### 3.5.3 Kohlendioxidsensoren – Kalibrierung und Höhenkompensation

#### 3.5.3.1 Erstkalibrierung

Obwohl die vom Hersteller (Milesight) gelieferten Sensoren werkseitig vorkalibriert wurden, ergaben weitere an der TU Graz durchgeführte Tests, dass der Kalibrierungsprozess des Herstellers für die Zwecke dieser Studie nicht immer ausreichend zuverlässig war. Als Qualitätssicherungsverfahren wurde daher jeder Sensor überprüft und neu kalibriert, um eine genaue und zuverlässige Messung von CO<sub>2</sub> zu gewährleisten. Bei der Kalibrierung werden die Messwerte der Sensoren an einen bekannten und genauen Referenzpunkt angepasst und validiert. Sensoren müssen aus verschiedenen wichtigen Gründen kalibriert werden, darunter Qualitätskontrolle, Messgenauigkeit und zur Entgegenwirkung möglicher Abweichungen, die durch Unterschiede im Herstellungsprozess sowie durch schwankende Umgebungsbedingungen entstehen. Darüber hinaus ist die Kalibrierung ein wesentlicher Bestandteil des regelmäßigen Wartungsprogramms für diese Geräte, um eine gleichbleibende Leistung zu gewährleisten und mögliche Abweichungen in der Messgenauigkeit, die im Laufe der Zeit auftreten können, zu korrigieren. In der Regel kann ein einfacher und schneller Kalibrierungsprozess durchgeführt werden, indem der Sensor der Umgebungsatmosphäre ausgesetzt wird, die derzeit eine relativ konstante CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen 415 und 425 ppm aufrechterhält (die je nach Tageszeit, Jahreszeit und örtlichen Einflüssen leicht variieren kann) (Ludewig und Senoner, 2024). Bei diesem Verfahren wird der Sensor für einen Zeitraum von 10 Minuten in die Außenluft gebracht und seine Messwerte werden dann an die der Außenatmosphäre angepasst.

Durch die Durchführung dieses Prozesses in großen Chargen (mehrere hundert Sensoren gleichzeitig) ist es möglich, den Mittelwert und die Standardabweichung der gesamten Charge zu ermitteln und so zu beurteilen, ob der Mittelwert ausreichend nahe am Referenzwert liegt und die Messabweichung (zwischen einzelnen Sensoren) innerhalb eines akzeptablen Bereichs liegt. Die gemeinsame Kalibrierung der Sensorenpaare in Chargen bietet die Gewissheit, dass jedes Sensorpaar unter identischen Bedingungen kalibriert wurde, wodurch die Möglichkeit einer Messverzerrung zwischen „Test“- und „Kontroll“-Paaren verringert wird.



Abbildung 3-5. Zweistufiger Sensorkalibrierungsprozess, der die anfängliche Kalibrierung in der Außenumgebung (links) zeigt, gefolgt von einer Laborkalibrierung unter Verwendung von Referenzgasgemischen (Mitte) in einer versiegelten Kammer (rechts), um individuelle Kalibrierungskurven abzuleiten.

### 3.5.3.2 Kalibrierungsprozess der zweiten Stufe

Ein zusätzlicher Laborkalibrierungsprozess wurde an einer Teilmenge ( $n=150$ ) der Sensoren nach dem Kalibrierungsprozess der Stufe 1 (Abschnitt 3.5.3.1) durchgeführt. Der Zweck dieses Schritts bestand darin, die Kalibrierung einer kleineren Anzahl von Sensoren weiter zu verbessern, sodass sie als Referenzsensoren für weitere Kalibrierungstests verwendet werden konnten, bei denen große Chargen von Sensoren gleichzeitig kalibriert wurden. Dieser Schritt war wichtig, da die Installation aller Sensoren vor Beginn des neuen Schuljahres schnell erfolgen musste.

Das Ergebnis des Kalibrierungsprozesses der Stufe 2 war die Erstellung einer einzigartigen Kalibrierungskurve für jeden  $\text{CO}_2$ -Sensor (Abb. 3-6) auf der Grundlage einer Vier-Punkt-Laborkalibrierung unter Verwendung von Referenzgasen. Dieses Verfahren bestand aus den folgenden drei Schritten. (i) Im ersten Schritt wurden jeweils 10  $\text{CO}_2$ -Sensoren einer Reihe von Referenzgaskonzentrationen (in einer versiegelten Kammer) im Bereich von 0,04 % bis 0,20 %  $\text{CO}_2$  ausgesetzt (Abb. 3-5). (ii) Während dieser Kalibrierung wurden die Sensoren an ein LoRaWAN-Netzwerk angeschlossen und die Messwerte bei den jeweiligen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen über ein kontinuierliches Zeitintervall von etwa 10 Minuten protokolliert (um an jedem Referenzpunkt eine normalverteilte Stichprobe zu erzeugen). (iii) Anschließend wurde eine gewöhnliche Regression der kleinsten Quadrate (OLS) unter Verwendung der gemessenen Werte (Abb. 3-6) durchgeführt, um die beste Passgerade zu erhalten. Da der wahre Wert von  $y$  gleich der Referenzgaskonzentration ist, kann die Regressionsgleichung umgeformt werden, um  $x$  zu lösen. Dieser Prozess führt zur Erstellung einer spezifischen Kalibrierungskurve für jeden Sensor. Die resultierende Kalibrierungskurve bietet eine einzigartige Anpassungsfunktion, die zur Korrektur des Einflusses der beiden Arten systematischer Fehler (Offset und Spanne) erforderlich ist, die sich auf jede einzelne Sensormessung auswirken.

Da es in der verfügbaren Zeit nicht möglich war, den Kalibrierungsprozess der zweiten Stufe für alle 1320 Sensoren zu wiederholen, wurde ein zusätzliches Kalibrierungsverfahren entwickelt, um den

Prozess zu beschleunigen. In diesem Schritt wurden die verbleibenden 1170 Sensoren in einem Seminarraum einer Universität einem systematischen Zweipunkt-Kalibrierungsprozess unterzogen. Bei diesem Verfahren wurden die Sensoren zunächst in einem Raum mit dezentraler Belüftung ( $n > 6 \text{ h}^{-1}$ ) und belüfteten Fenstern platziert. Das Verhalten dieser neuen Sensoren wurde mit dem Mittelwert von 20 Referenzsensoren verglichen, die bereits über Kalibrierungskurven verfügten (wie vorher beschrieben). Dieser Massenkabrierungsprozess dauerte etwa 30 Minuten, wobei die Türen des Raums versiegelt waren und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration auf dem Niveau der Außenumgebung gehalten wurde (um den unteren Kalibrierungsreferenzpunkt zu erhalten). Anschließend wurde die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Raum künstlich auf etwa 2800 ppm erhöht (um den oberen Kalibrierungspunkt zu erhalten), wobei handelsübliche  $\text{CO}_2$ -Kanister mit etwa 100 %  $\text{CO}_2$  verwendet wurden. Die obere Referenz- $\text{CO}_2$ -Konzentration wurde durch eine Massenbilanzberechnung definiert und durch Messung (basierend auf dem Mittelwert der Referenzsensoren) verifiziert. Bei geschlossenen Fenstern und abgedichteten Türen wurden die Sensoren dann für einen weiteren Zeitraum von 30 Minuten fernüberwacht. Auf diese Weise wurden an den unteren und oberen Referenzpunkten ausreichend Daten gesammelt, die für die nachfolgenden Regressionsanalysen verwendet wurden, wodurch die Erstellung weiterer einzigartiger Kalibrierungskurven für jedes Gerät erleichtert wurde. Während dieses Prozesses wurden die 20 Referenzsensoren gleichmäßig über den Raum verteilt und in unterschiedlichen Höhen angebracht, um die durchschnittliche  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Raum zu messen. Darüber hinaus wurden drei Ventilatoren im Raum positioniert, um eine gründliche Durchmischung der Luft zu ermöglichen und lokale Spitzenwerte der  $\text{CO}_2$ -Konzentration zu vermeiden.

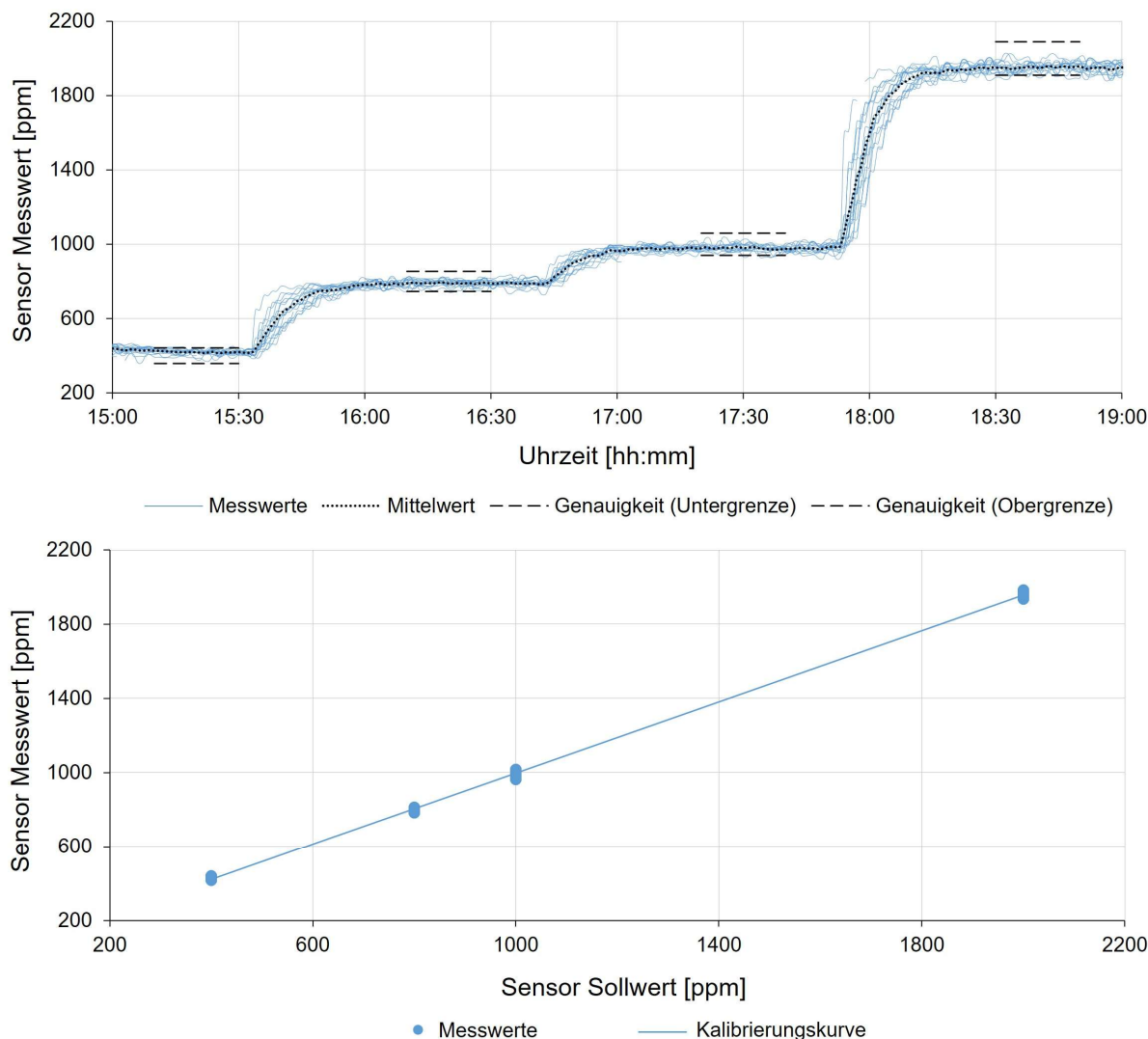


Abbildung 3-6. Kalibrierverfahren der zweiten Stufe unter Laborbedingungen. Die obere Abbildung zeigt die Sensormessungen aller getesteten Sensoren im zeitlichen Verlauf. Die untere Abbildung zeigt die gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen eines Beispielsensors (y-Achse), die gegen vier Referenzgaskonzentrationen (400, 800, 1000 and 2000 ppm) regressiert wurden.

In der dritten Phase dieses Prozesses wurde die Qualität der von den Sensoren generierten Messdaten durch weitere statistische Analysen überprüft. Sensoren, die die vom Hersteller angegebene Messgenauigkeit ( $\pm 30$  ppm und  $\pm 3\%$  des Messwerts) beiderseits des kalibrierten Mittelwerts überschritten, wurden beiseitegelegt. Diese Sensoren wurden dann einer Neukalibrierung und weiteren Tests unterzogen, um ihre Zuverlässigkeit sicherzustellen. Alle Sensoren, die nach den anschließenden Tests die vom Hersteller angegebene Genauigkeit nicht erreichten, wurden an den Lieferanten zurückgesendet.

### 3.5.3.3 Höhenausgleich

In jeden Sensor wurde ein Höhenausgleichsalgorithmus (Anhang B.3) implementiert, um die druckabhängigen Sensormessungen zu korrigieren und die finale Höhe zu berücksichtigen, in der der Sensor installiert wurde. Dieser Prozess findet unabhängig vom anfänglichen Kalibrierungsprozess statt, was bedeutet, dass der Sensor in einer bekannten Höhe kalibriert werden kann und dann seine

Höhe zurückgesetzt werden kann, um sie an die Höhe anzupassen, in der er installiert ist, ohne den ursprünglichen Kalibrierungsprozess zu beeinflussen. Der atmosphärische Standarddruck auf Meereshöhe beträgt etwa 101,3 kPa und nimmt mit zunehmender Höhe exponentiell ab. Diese Kalibrierungsanpassung ist notwendig, da relativ kleine Höhenänderungen einen erheblichen Einfluss auf die Luftdichte (d. h. die Anzahl der Gasmoleküle in einem bestimmten Luftvolumen) haben können. Die Höhenkompensation korrigiert diese druckabhängigen Dichteschwankungen und gewährleistet so präzisere CO<sub>2</sub>-Konzentrationsmessungen. Durch die Umsetzung dieser Kompensation in allen 120 Schulen, die sich in einer Höhe von 150 bis 1020 Metern über dem Meeresspiegel befanden, wurden konsistentere und genauere Messungen erzielt, wodurch ein direkter Vergleich von einer Schule zur anderen möglich wurde. Da sowohl Temperatur als auch Druck die Dichte von Gasen beeinflussen, kann das kombinierte Gasgesetz zur Ableitung einer Höhenkompensationsgleichung (Gl. 3-7) verwendet werden. Da die Temperaturen in Innenräumen oft in einem engen Bereich liegen (d. h. zwischen 20 und 23 °C), ist der letzte Term in Gl. 3-7 oft nahe bei Eins und kann daher ignoriert werden (vorausgesetzt, die Erstkalibrierung erfolgte bei einer ähnlichen Temperatur).

$$CO_{2,korr} = CO_{2,unkorr} \cdot \frac{p_{ref}}{p_{gem}} \cdot \frac{T_{gem}}{T_{ref}} \quad [3-7]$$

Dabei ist

$CO_{2,korr}$  die korrigierte CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm]

$CO_{2,unkorr}$  die unkorrigierte CO<sub>2</sub>-Konzentration [ppm]

$p_{ref}$  der Referenzluftdruck in der Höhe, in der das Gerät kalibriert wurde [hPa]

$p_{gem}$  der Referenzluftdruck in der Höhe, in der das Gerät installiert ist hPa]

$T_{ref}$  die Referenzlufttemperatur am Ort, an dem das Gerät kalibriert wurde [°C]

$T_{gem}$  die Referenzlufttemperatur am Ort, an dem das Gerät installiert ist [°C]

Durch Anwendung von Gl. 3-7 auf die höhenabhängige atmosphärische Druckdifferenz kann ein Höhenausgleichsfaktor [-] abgeleitet werden (Tab. 3-2), der es ermöglicht, den unkompensierten CO<sub>2</sub>-Sensormesswert anzupassen, um einen korrigierten Messwert zu erhalten, der unabhängig von der Höhe ist. Aus Tabelle 3-2 geht hervor, dass in dem Höhenbereich, in dem sich die ImpAQS-Schulen befinden (150–1020 Meter über dem Meeresspiegel), ein Kompensationsfaktor von 1,13 erforderlich ist, um die unkorrigierten CO<sub>2</sub>-Messwerte an der höchstgelegenen Schule (relativ zur Höhe von Graz) zu berichtigen. Ohne diese Korrektur würde eine durch den Luftdruck bedingte CO<sub>2</sub>-Differenz von ca. 52 ppm bestehen.

Tabelle 3-2. Höhenkompensation von CO<sub>2</sub> unter Standard-Luftdruck

Meereshöhe [m]	Luftdruck [hPa]	Faktor für Höhenkompensation [-]	Kompensierte CO <sub>2</sub> Konzentration [ppm]
0	1013	1.00	400
50	1006	1.01	403
100	1000	1.01	405
150	993	1.02	408
200	986	1.03	411
250	980	1.03	414
300	973	1.04	417
350	966	1.05	419
400	960	1.06	422
450	953	1.06	425
500	947	1.07	428
550	941	1.08	431
600	934	1.08	434
650	928	1.09	437
700	921	1.10	440
750	915	1.11	443
800	909	1.11	446
850	903	1.12	449
900	897	1.13	452
950	890	1.14	455
1000	884	1.15	458
1050	878	1.15	462
1100	872	1.16	465
1150	866	1.17	468
1200	860	1.18	471

### 3.5.4 Installationsprozess der Ausrüstung

Nach der Überprüfung und Kalibrierung der Sensoren (Abschnitt 3.5.3) begann der Installationsprozess. Insgesamt waren 18 Techniker\*innen an der Installation beteiligt. Die Techniker\*innen absolvierten eine praktische Schulung an der TU Graz und wurden dann bei ihren ersten Projekten von einem erfahrenen Mitarbeitenden begleitet, bevor sie selbstständig arbeiteten (siehe Anhang B.4 für das Installationshandbuch, das den Installationsprozess beschreibt). Aufgrund der großen Anzahl an Schulen und der damit verbundenen Logistik erstreckte sich die Phase der Sensormontage über einen Zeitraum von mehreren Monaten (Juni bis September 2023). Der Prozess begann lokal in Graz, Steiermark, und wurde dann auf alle anderen Schulen in der Steiermark ausgeweitet. Dieser Ansatz bot die Möglichkeit, die Installationen zu testen und zu prüfen, die Projekttechniker\*innen vor Ort zu schulen und potenzielle Probleme mit der Ausrüstung vor der landesweiten Ausführung vor Ort zu beheben.

#### 3.5.4.1 Matched-Pair Forschungsdesign und Raumauswahlverfahren in Schulen

Im Rahmen des Matched-Pair Forschungsdesigns bestand das Ziel darin, pro Schule 10 Klassenräume auszuwählen, aus denen fünf nahezu identische, passende Raumpaare gebildet werden sollten. Jedes dieser fünf Paare bestand aus einem Test- (T) und einem Kontrollklassenzimmer (K). In den T-Klassenzimmern wurden CO<sub>2</sub>-Sensoren mit einem aktiven (d. h. sichtbaren) Display, einer LED-Ampel und begleitenden Lüftungsanweisungen installiert (Anhang B.6). In den K-Klassenzimmern wurden dagegen identische Sensoren, aber mit deaktivierten Displays und deaktivierten LED-Ampeln, ohne Lüftungsanweisungen installiert. Das randomisierte Matched-Pair-Design wurde so konzipiert, dass Vergleiche zwischen den Auswirkungen sichtbarer Maßnahmen wie der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und Lüftungsempfehlungen und einer gepaarten Kontrollstichprobe (mit ähnlichen Raum- und Belegungsmerkmalen, aber ohne sichtbare Einflussfaktoren) aus einem fast identischen Klassenzimmer derselben Schule gezogen werden können.

Der Prozess der Klassenzimmerpaarung erforderte einen methodischen Ansatz, der einer vordefinierten Hierarchie im Auswahlverfahren folgte (Anhang B.5). Die oberste Priorität bestand darin, Räume ähnlicher Größe und Funktion mit ähnlichen Lüftungsoptionen und -merkmalen zu vergleichen, um beispielsweise sicherzustellen, dass ein Raum mit mechanischer Lüftung nicht mit einem Raum gepaart wurde, der ausschließlich über Fenster belüftet wird. Darüber hinaus war es wichtig, dass die Vergleichsklassenräume mehrere zusätzliche Kriterien erfüllten, um „ähnliche“ Vergleiche zu ermöglichen und eine Verzerrung der Studie zu vermeiden. Dazu gehörte, dass sie sich auf derselben Etage befanden, die gleiche Fensterausrichtung hatten, eine ähnliche verglaste Fläche, Bodenfläche und Deckenhöhe aufwiesen, obwohl es nicht möglich war, alle diese Kriterien in allen Fällen zu erfüllen. Darüber hinaus wurde versucht, die Klassenzimmer auf der Grundlage der Klassenstufe oder des Alters der SuS und der Klassengröße aufeinander abzustimmen. Wo möglich, wurden Räume ohne feste Klassengruppen und mit wechselnder Population der SuS, wie fachspezifische Räume für Physik, Chemie oder Holzbearbeitung, ausgeschlossen. Durch diesen Ausschluss sollte der potenzielle Einfluss wechselnder Populationen auf die Ergebnisse des Matched-Pair-Forschungsdesigns mit paarweiser Zuordnung minimiert werden, um sicherzustellen, dass die Messungen genauer sind und die beabsichtigten Interventionen widerspiegeln. Die Zuordnung von T- und K-Räumen innerhalb eines Paares erfolgte dann vor dem Besuch der Schulen nach dem Zufallsprinzip, um eine unbeabsichtigte Verzerrung bei der endgültigen Raumauswahl zu vermeiden (Anhang B.5). Des Weiteren wurde ein Excel-Tool erstellt, das einen Zufallszahlengenerator enthält, um den randomisierten (T oder K) Raumzuordnungsprozess zu erleichtern.

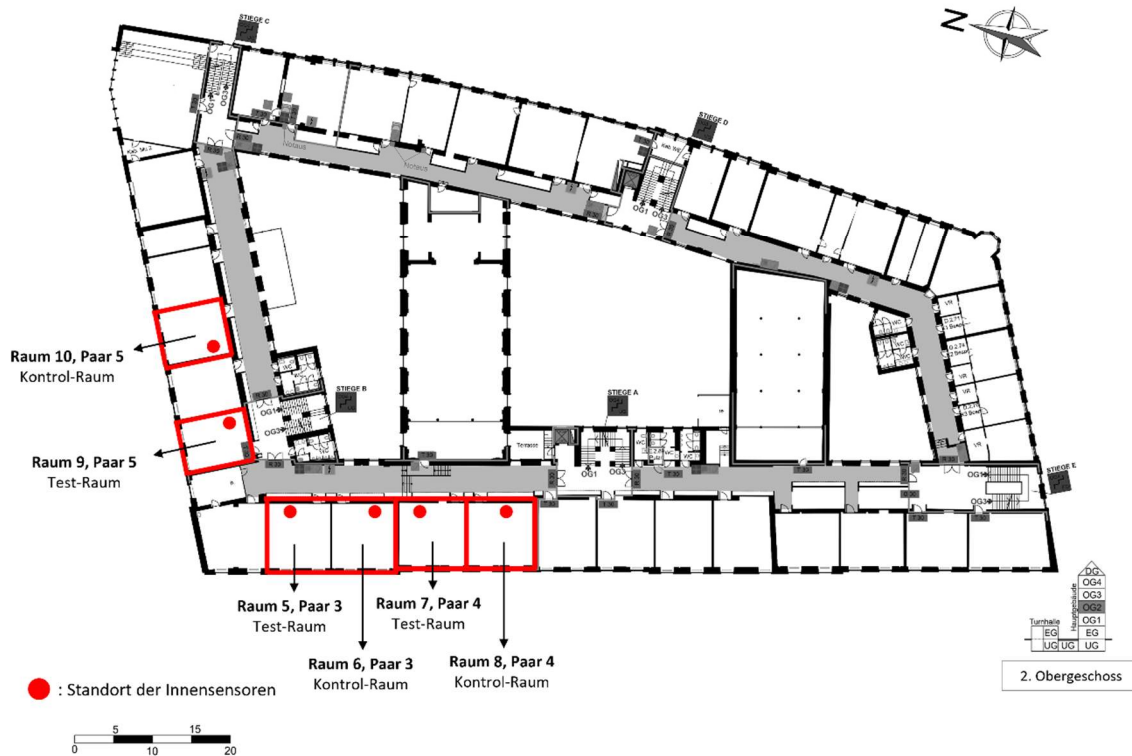
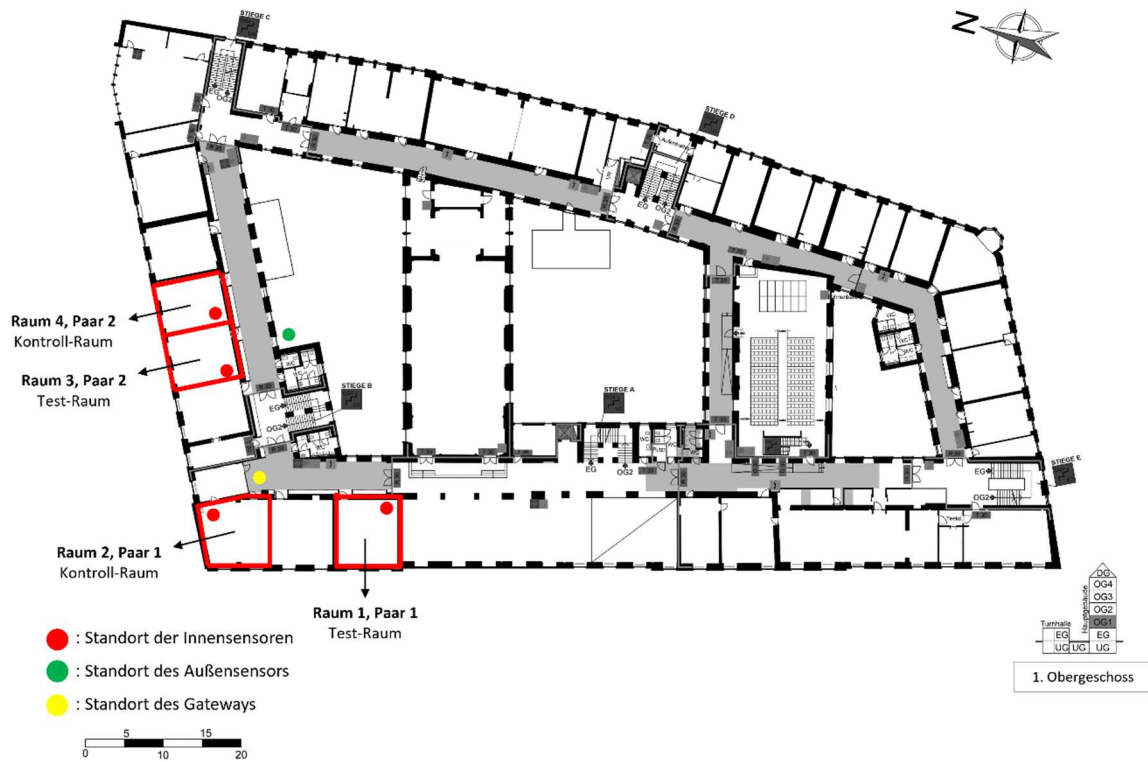


Abbildung 3-7. Beispielschule, erstes Stockwerk (oben) und zweites Stockwerk (unten), zur Veranschaulichung des Konzepts der Auswahl von Raumpaaren. Räume mit Sensoren sind mit einem roten Punkt gekennzeichnet und Test- und Kontrollräume sind gleich ausgerichtet, haben die gleiche Belüftung (Fensteröffnungen), befinden sich auf derselben Etage und haben eine ähnliche Raumgröße



### 3.5.4.2 Positionen der CO<sub>2</sub>-Sensoren in Innenräumen

In jeder Schule wurden zehn Sensoren (AM 103, Milesight) in einer Höhe von 1,2 Metern (über dem Boden) an den Innenwänden der Klassenzimmer angebracht. Es wurde besonders darauf geachtet, die Innenraumsensoren in einem beträchtlichen Abstand (mehr als 1 Meter) von Frischluftquellen wie Türen und Fenstern und von potenziellen CO<sub>2</sub>-Quellen wie SuS und LuL zu platzieren (Hopfe et al., 2022). Gemäß dem Matched-Pair-Studiendesign (Abschnitt 3.1) wurden in den fünf Testklassenräumen CO<sub>2</sub>-Sensoren mit aktiven Displays (Abb. 3-8) installiert, während in den übrigen fünf Kontrollklassenräumen Sensoren mit deaktivierten Displays (Abb. 3-9) angebracht wurden (Abschnitt 3.5.5). Zusätzlich wurden die Testklassenräume mit zwei an der Wand montierten Anzeigepostern ausgestattet. Das erste Poster enthielt Hinweise zu angemessenen CO<sub>2</sub>-Grenzwerten, während das zweite Poster praktische Anweisungen zum richtigen Lüften des Raums gab, wie in Abb. 3-8 und Anhang B.6 dargestellt. Diese Poster enthielten QR-Codes, die mit zusätzlichen Informationen auf der ImpAQS-Projektwebsite verlinkt waren. Die Poster wurden nebeneinander an einer Innenwand in unmittelbarer Nähe des Sensors angebracht (Abb. 3-8).

In Abstimmung mit dem Gebäudepersonal der Schule wurden die Innenraumsensoren entweder mit Schrauben und Dübeln sicher befestigt oder mit doppelseitigem Klebeband, das vom Sensorhersteller bereitgestellt wurde, angebracht.

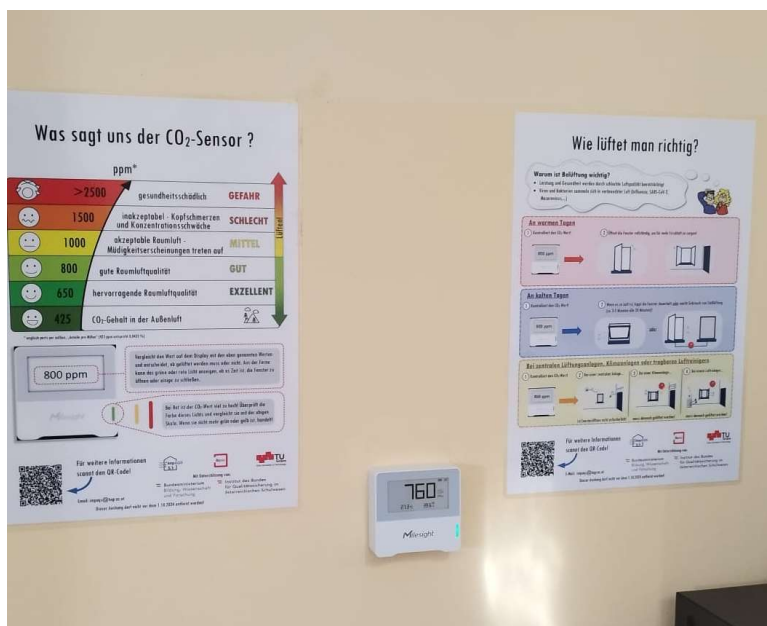


Abbildung 3-8. Beispiel für einen installierten Testsensor (T) und Poster



Abbildung 3-9. Beispiel für einen Kontrollsensor (K) (mit deaktivierter Anzeige)

#### 3.5.4.3 Positionen der CO<sub>2</sub>-Sensoren im Freien

Ein batteriebetriebener Außensensor (EM 500, Milesight) wurde auf dem Gelände außerhalb jeder Schule platziert. Diese Sensoren wurden nicht-invasiv mit standardmäßigen verzinkten Schlauchschellen an sicheren Gebäudeteilen (z. B. Geländer, Laternenpfähle usw.) befestigt. Es wurde darauf geachtet, dass der Sensor nicht in der Nähe von Fenstern und Lüftungssystemen platziert wurde, die sonst die CO<sub>2</sub>-, Temperatur- und Feuchtemessungen beeinflussen könnten. Die Standorte wurden so gewählt, dass der Sensor zwar im Freien, aber auch teilweise vor Umwelteinflüssen (wie direkter Sonneneinstrahlung, Regen, Schnee) und Diebstahl geschützt war. Diese Sensoren wurden in der Regel in einer Höhe zwischen 1,5 und 2 m über dem Boden angebracht (Abb. 3-10).



Abbildung 3-10. Beispiel für die Installation eines Außensensors (EM 500)

### 3.5.5 Test- und Kontroll-Klassenzimmer –CO<sub>2</sub>-Displays, Schwellenwerte und Belüftungshinweise

In den Test-Klassenzimmern wurden die CO<sub>2</sub>-Sensoren mit sichtbaren Displays konfiguriert, während in den Kontroll-Klassenzimmern die Displays (für die Dauer der Forschungsstudie) deaktiviert waren. Für die Testsensoren wurden vom Hersteller (Milesight) maßgeschneiderte Firmware-Updates bereitgestellt, um die rekonfigurierte Anzeige gemäß den Spezifikationen des ImpAQS-Teams zu vergrößern und zu vereinfachen. Dadurch sollten die angezeigten Werte im Klassenzimmer besser sichtbar sein. Zusätzlich wurde eine farbige LED-Warnleuchte (RAG Alarm) an den Testsensoren angebracht, die je nach CO<sub>2</sub>-Konzentration im Raum drei verschiedene Farbsignale (grün, gelb und rot) anzeigt. Zu diesem Zweck leuchtet die grüne Leuchte auf, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 800 ppm liegt, die Ampel leuchtet gelb bei Konzentrationen von 800 bis 1000 ppm und rot bei Konzentrationen über 1000 ppm. Diese Werte wurden in Übereinstimmung mit den Empfehlungen der Föderation der europäischen Verbände für Heizung, Lüftung und Klimatechnik (REHVA) und den CO<sub>2</sub> Grenzwertempfehlungen in ISO 16000-41:2023 (ISO, 2023) und ÖNORM EN 16798-1 (CEN, 2024) gewählt.

Um die Auswirkungen des Projekts auf das Schulpersonal zu minimieren, wurde mit dem BMBWF vereinbart, dass für die LuL im Klassenzimmer keine formelle Schulung zur Verwendung des CO<sub>2</sub>-Sensors oder zu geeigneten Lüftungsmethoden angeboten wird. Stattdessen wurden zwei an der Wand montierte Anzeigeposter erstellt und in jedem Testklassenzimmer installiert. Diese Poster sollten den Lehrkräften eine einfache Anleitung bieten, anhand derer sie die auf dem CO<sub>2</sub>-Sensor angezeigten Informationen interpretieren und die Lüftungsrate mithilfe von zu öffnenden Fenstern regulieren können. Die Lüftungsanleitung befasste sich mit der Lüftung in warmen und kalten Jahreszeiten sowie mit der angemessenen Nutzung der Lüftung in Verbindung mit Luftfilter- und Klimaanlage (Anhang B.6).

### 3.5.6 Messdaten – Qualitätssicherungsverfahren

Nach der Installation der Geräte wurde während der gesamten Überwachungsphase ein fortlaufender Qualitätssicherungsprozess (QS) durchgeführt. Der QS-Prozess umfasste zwei Hauptaspekte:

- (i) *Fernüberwachung des Gerätestatus über die Cloud* (Abb. 3-4). Dazu gehörte die Einrichtung automatischer Alarme, die beispielsweise anzeigten, wenn Batterien an Leistung verloren und ausgetauscht werden mussten oder wenn ungewöhnliche (extrem hohe oder niedrige) CO<sub>2</sub>-Werte aufgezeichnet wurden.
- (ii) *Audit-Inspektionen und Neukalibrierungsprüfungen an Sensoren vor Ort*. Es wurden sowohl geplante (d. h. als Reaktion auf nicht plausibel niedrige oder hohe Werte) als auch zufällige QS-Audits durchgeführt. Die Genauigkeit der installierten Sensoren wurde mit einem hochwertigen vorkalibrierten CO<sub>2</sub>-Sensor (LiCOR 850, LI-COR Environmental USA) als Mittel zur Kreuzvalidierung überprüft. Geräte, bei denen erhebliche Messabweichungen festgestellt wurden, wurden dann vor Ort neu kalibriert, während Geräte mit geringfügigen Abweichungen in der letzten Phase der Datenverarbeitung einem Prozess zur Korrektur des mittleren systematischen Fehlers unterzogen wurden. Dieser Prozess basierte auf statistischen Schlussfolgerungen unter Verwendung des kollektiven mittleren systematischen Fehlers aller Sensoren in einer bestimmten Kalibrierungscharge (Anhang B.7).

Zusätzlich zu diesen geplanten Qualitätssicherungsprozessen meldete das Schulpersonal gelegentlich Probleme mit der Ausrüstung (z. B. fehlende oder beschädigte Sensoren), die von der ImpAQS-Projektmanagerin protokolliert und durch Telefonate und Besuche vor Ort weiterverfolgt wurden.

## 3.6 Datenprotokolle der Klassenraumerhebung

Während der Installationsphase führten die ImpAQS-Techniker\*innen in jedem Klassenzimmer detaillierte Raumuntersuchungen durch (Installationshandbuch im Anhang B.4). Mit dem Tool Zoho Forms (Zoho Corporation Pvt. Ltd., 2024) wurde ein System zur Erfassung der wichtigsten physischen Merkmale jeder untersuchten Schule und jedes untersuchten Raums erstellt, das direkt mit der Cloud-Datenbank des Projekts verknüpft war.

**Tabelle 3-3. Im Rahmen der Umfrage während des Installationsprozesses erfasste Schuldaten**

Schuldaten
Name der Region
Schul-ID-Nummer (eine intern zugewiesene Nummer)
Schultyp (z. B. Grundschule, Mittelschule usw.)
Schulgröße (Gesamtzahl der SuS)
Höhe
Anzahl der Stockwerke insgesamt
Gesamtgröße der Schule
Lüftungssystem
Bauweise

Tabelle 3-4. Im Rahmen der Umfrage während des Installationsprozesses erhobene Klassenzimmerdaten

Klassenzimmerdaten	
Allgemein	Zeitpunkt der Umfrage, Datum der Umfrage
	Kontroll- oder Testraum
	Netzwerkstärke (erforderlich für die Übertragung des Sensorsignals an das Gateway)
Klassenzimmer	Klassenzimmer-Etage
	Raumtyp (Klassenzimmer, Fachraum, andere)
	Raumgeometrie (Breite, Länge, Höhe)
	Ausrichtung des Raums
	CO <sub>2</sub> -Sensor bereits vorhanden (nein, ja mit Anzeige und RAG Alarm, nur RAG Alarm)
	Hintergrundgeräusche (hörbare menschliche, Außen-, Lüftungsgeräusche)
	Tischanordnung (Reihen, schräg, U-Form, kreisförmig, gruppiert, andere)
	tatsächliche Belegung (falls bekannt)
	maximale Belegung (basierend auf Sitzplätzen und Tischen)
	Pflanzen im Klassenzimmer
Gebäudetechnik	Art der Belüftung (keine, natürlich, mechanisch, Hybrid, andere)
	mechanische/Hybrid-Belüftung (keine, zentral, im Raum, Abluft, Hybrid-Zuluft, Hybrid-Abluft, Hybrid-Abluft verteilt)
	tragbare Filter (Einzelraum, mehrere Räume, HEPA, UV-C, andere)
	Heizsystem (kein System, Heizkörper, Warmwasserheizung, elektrische Heizkörper, Fußbodenheizung, Raumkonvektor, tragbare Heizung, unbekannt)
	Kühlsystem (Split-System, Kühlbalken, Kühlschlange, unbekannt)
Fenster und Beschattung	Fensterausrichtung (einseitig, zweiseitig, dreiseitig, vierseitig, keine, andere)
	Ausrichtung Verglasung (Nord, Nordost, Ost, Südost, Süd, Südwest, West, Nordwest, horizontal, Oberlicht)
	Oberlichtfenster (ja, nein, andere)
	Außenfassade Gesamtfläche
	Maximal zu öffnende Fensterfläche
	Zu öffnende Fenster (Kipp- und Drehfenster, nur Drehfenster, Kippfenster, Klappfenster, Schiebefenster horizontal, Schiebefenster vertikal, Schwingfenster horizontal und vertikal, keine, zu öffnende Fenster, andere)
	Art der Fensterbegrenzer (wenn ja, Öffnungsgrad 5, 10, 15, 20, 25-45 %)
	Fensteröffner (manuell, mechanisch, per Knopfdruck, mechanisch automatisiert, andere)
	Fensterposition (zentral, in voller Höhe zu öffnen, niedrige und hohe Ebene, nur hohe Ebene, nur niedrige Ebene, nicht zu öffnen, andere)
	Anzahl der Glasscheiben (einfach, doppelt, dreifach, vierfach)
	Rahmentyp (Vinyl, Aluminium, Massivholz, Holzverkleidung)
	Außenbeschattung (horizontal beweglich oder feststehend, Rollläden, Überhang, Nischenfenster, Bepflanzung, andere)
	Innenbeschattung (Vorhänge, Jalousien, Rollos)

Der Zweck der Erhebung von Daten aus Schul- und Klassenraumbefragungen bestand darin, weitere Analysen durchzuführen, um die Art der Beziehungen zwischen der Lüftungsrate und der

Innenraumluftqualität sowie die spezifischen Merkmale eines einzelnen Schulraums oder eines Klassenraumpaares besser zu verstehen. Die in den Erhebungen erfassten Schuldaten sind in Tab. 3-3 (Schuldaten) und Tab. 3-4 (Klassenzimmerdaten) zusammengefasst. Ein Beispiel für das verwendete Formular ist in Anhang B.8 enthalten.

### 3.7 CO<sub>2</sub>-Referenzwerte für den Außenbereich und UBA-Luftverschmutzungsdaten

Die Kenntnis der Außenluftqualität in der Nähe der Schulen ist ein wichtiger Faktor bei der Beurteilung der Gesamtqualität der Innenraumluft und gilt als Voraussetzung für die angemessene Auslegung von Lüftungssystemen (Eurovent, 2018). Gemäß dem nordamerikanischen Standard ASHRAE 62.1 sollte die Einhaltung der nationalen Luftqualitätsstandards als Teil des Bewertungsprozesses der Außenluftqualität bestimmt werden, bevor ein neues Lüftungssystem installiert wird.

Diese Bewertung auf regionaler Ebene sollte durch eine Beobachtungserhebung des Gebäudeorts und seiner unmittelbaren Umgebung unterstützt werden, um potenzielle Quellen gefährlicher lokaler Schadstoffe zu identifizieren (ASHRAE, 2022). Etwa 90 % der österreichischen Schulen werden auf natürliche Weise über zu öffnende Fenster belüftet (Abschnitt 4.2.1.5), was bedeutet, dass die einströmende Luft nicht gefiltert werden kann. Im Gegensatz dazu sind die meisten mechanischen Lüftungssysteme in der Lage, Feinstaub aus der Zuluft zu filtern, wenn sie die entsprechende Filterklasse verwenden (Eurovent, 2018).

Umgekehrt verhält es sich, dass die meisten der vorhandenen mechanischen Lüftungssysteme in Schulen nicht mit Aktivkohlefiltern oder anderen Methoden zur Entfernung gasförmiger Schadstoffe (wie NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>) ausgestattet sind. Dies ist ein wichtiger Aspekt, da die Luft in einem Klassenzimmer wahrscheinlich nicht besser ist als die Luft außerhalb des Klassenzimmers, es sei denn, die Zuluft wird gefiltert oder die Frischluftzufuhr wird zu Zeiten hoher externer Schadstoffbelastung unterbrochen (z. B. durch geschlossene Fenster) zu Zeiten, in denen die Außenluftverschmutzung hoch ist (Greenpeace, 2018).

Im Idealfall würde eine detaillierte Überwachung vor Ort (auf dem Schulgelände und im Schulgebäude) einer breiten Palette externer Luftschadstoffe<sup>9</sup> den genauesten Einblick in die Außenluftverschmutzung (und die entsprechende Innenluftverschmutzung) am Standort der einzelnen Schulen geben. Da keine Messdaten vor Ort vorlagen, wurden die Daten der nächstgelegenen Messstation des österreichischen Umweltbundesamtes (UBA) als Ersatz für die Hintergrundluftqualität am Standort der Schulen in diesem Projekt herangezogen. Die UBA-Messstationen befanden sich im Durchschnitt etwa 10 km (Anhang B.9, Tab. A-3) von den Schulen entfernt und können daher nur einen groben Hinweis auf die Luftqualität außerhalb der Schulen geben (Anhang B.8, Tab. B-3). Dennoch hilft die räumlich-zeitliche Analyse dieser Informationen, einen Hinweis auf die Hintergrundluftqualität in der Nähe der Schulen zu geben und potenzielle Risikobereiche aufzuzeigen, die durch weitere Forschung genauer untersucht werden könnten.

---

<sup>9</sup> Eine ausführliche Liste solcher Luftschadstoffe und ihrer Auslegungsgrenzwerte findet sich in der ASHRAE-Norm 62.1-2019 (ASHRAE, 2019) und ihrem Addendum aa (ASHRAE, 2021)

Schädliche Luftschadstoffe sind in der Hintergrundluftmasse in ganz Europa weit verbreitet, wobei 96 % der städtischen Bevölkerung in der EU unsicheren Konzentrationen von Feinstaub (PM<sub>2,5</sub>) ausgesetzt sind (EEA, 2024). Obwohl in den letzten Jahrzehnten erhebliche Verbesserungen der Luftqualität erzielt wurden, schätzt die Europäische Umweltagentur (EUA), dass jährlich mehr als 300.000 vorzeitige Todesfälle auf die Verschmutzung durch Feinstaub, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub> zurückzuführen sind (EEA, 2024a). Während bei den meisten herkömmlichen Luftverschmutzungsbewertungen die Überschreitungen für jeden Schadstoff einzeln betrachtet werden, können sie, wenn mehrere Schadstoffe gleichzeitig die sicheren Grenzwerte überschreiten, einen synergistischen Einfluss auf die allgemeinen Gesundheitsrisiken haben (Inness et al., 2019; De Marco et al., 2022). In Europa sind schätzungsweise über 86 % der Bevölkerung jährlich einem oder mehreren komplexen Verschmutzungsereignissen<sup>10</sup> ausgesetzt (Chen et al., 2024).

Je nach Art des Schadstoffs können lokale Kontaminationsquellen die Schadstoffbelastung an einem bestimmten Standort stark beeinflussen. Der Straßenverkehr ist einer der Hauptfaktoren, die die örtliche Konzentration der Luftverschmutzung im Freien beeinflussen (Greenpeace, 2018). Aus dem jüngsten Jahresbericht der Europäischen Umweltagentur (EUA) geht hervor, dass der Straßenverkehr im Zeitraum 2022–2023 die Hauptquelle für Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>)- und Rußemissionen (schwarzer Kohlenstoff) war. Was die Feinstaubpartikel PM<sub>10</sub> und PM<sub>2,5</sub> betrifft, so leben 16 % bzw. 2 % der Bevölkerung in einer Region, in der die Konzentration über dem aktuellen EU-Grenzwert liegt. Es ist jedoch zu beachten, dass die EU-Grenzwerte für alle wichtigen Luftschadstoffe deutlich höher angesetzt sind als die „gesundheitsbezogenen“ Richtwerte der WHO. So liegt beispielsweise der jährliche durchschnittliche Richtwert der WHO für PM<sub>2,5</sub> bei 5 µg/m<sup>3</sup>, und schätzungsweise 95 % der europäischen Bevölkerung sind Konzentrationen an oder über diesem Grenzwert ausgesetzt (EEA, 2024b).

Obwohl lokale Verschmutzungsquellen die Hintergrundschadstoffkonzentrationen erheblich verstärken können, werden die lokalen Luftkonzentrationen in einer Entfernung von etwa 100 bis 150 m von einer Straße nicht mehr direkt durch den Verkehr beeinflusst. In vielen Fällen kann der Abstand zwischen Schulen und einer Hauptverkehrsstraße jedoch deutlich weniger als 100 m betragen (Greenpeace, 2018).

### 3.7.1 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) in der Umgebungsluft – Auswirkungen auf die Gesundheit und Referenzwerte

Die in Bodennähe gemessenen Kohlendioxidkonzentrationen werden hauptsächlich durch den globalen Kohlenstoffkreislauf bestimmt. Emissionen aus lokalen CO<sub>2</sub>-Quellen (hauptsächlich aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe) und Senken (wie Bäume und Pflanzen, die während der Photosynthese CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre binden) können jedoch die lokale CO<sub>2</sub>-Konzentration beeinflussen, insbesondere in dicht besiedelten städtischen Gebieten (Bergeron und Strachan, 2011). Der in der Luft gemessene CO<sub>2</sub>-Gehalt wird in der Regel in der Einheit Teile pro Million (wobei 1 ppm als Volumenanteil ist 1 µmol/mol) angegeben (ISO, 2012), wobei die aktuelle globale CO<sub>2</sub>-Durchschnittskonzentration von etwa 420 ppm einem Luftvolumenanteil von 0,042 % entspräche. Vor allem aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffe steigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Außenluft

---

<sup>10</sup> Eine Episode der kombinierten Luftverschmutzung ist definiert als eine Episode, bei der die täglichen WHO-Richtlinien für zwei oder mehr Luftschadstoffe gleichzeitig überschritten werden (Chen, 2024).

um etwa 2,5 ppm pro Jahr. CO<sub>2</sub> ist farb-, geruch- und geschmacklos, gut wasserlöslich und unter Standardbedingungen chemisch stabil. Bei Umgebungskonzentrationen gilt es nicht als gesundheitsgefährdend.

Eine der bekanntesten globalen CO<sub>2</sub>-Überwachungsstellen ist das Mauna Loa Observatorium auf der Big Island von Hawaii. Obwohl das Mauna Loa Observatorium, das sich auf einer Höhe von 3400 m befindet, als gut geeignet für die Messung von Luftmassen gilt, die für sehr große Gebiete repräsentativ sind (Tans und Thoning, 2020), gibt es Schwankungen in den CO<sub>2</sub>-Umgebungswerten auf verschiedenen Kontinenten. So liegt beispielsweise die CO<sub>2</sub>-Hintergrundkonzentration in Köln im Durchschnitt etwa 10 % höher als am Moana-Loa-Observatorium auf Hawaii (ISO, 2012, S. 2). CO<sub>2</sub>-Hintergrundmessungen in Österreich werden am Sonnblick-Observatorium der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) auf dem Hohen Sonnblick in 3100 m Höhe durchgeführt (Ludewig, 2024). Außer in dicht bewaldeten Gebieten ist es unwahrscheinlich, dass die lokalen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Österreich unter die am Sonnblick-Observatorium gemessenen Werte fallen. Aus diesem Grund sind die CO<sub>2</sub>-Zeitreihenwerte von Sonnblick (dunkelblaue Linie, Abb. 3-11) eine nützliche Quelle für Hintergrund-Vergleichswerte für die ImpAQS-Studie.

Wien ist das größte Stadtgebiet Österreichs, und die CO<sub>2</sub>-Referenzwerte in dicht besiedelten Teilen der Stadt dürften einige der höchsten Konzentrationen in Österreich widerspiegeln. Es gibt jedoch nur wenige bodennahe CO<sub>2</sub>-Überwachungswerte, anhand derer typische städtische Referenzwerte ermittelt werden können. Aus diesem Grund wurden Messungen der Forschungsstation des Vienna Urban Carbon Laboratory auf dem Arsenal-Turm in Wien als Schätzung für die plausible Obergrenze der CO<sub>2</sub>-Werte in Österreich herangezogen (Matthews et al., 2024). Aufgrund des CO<sub>2</sub>-Aufwärtsflusses über städtischen Gebieten sind die am Arsenal-Funkturm (144 m über dem Boden) gemessenen CO<sub>2</sub>-Werte wahrscheinlich höher als die Messungen am Boden am selben Standort. Daher können diese Werte (dunkelrote Linie, Abb. 3-11) als ungefähre Obergrenze der saisonalen täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen angesehen werden, die in einem städtischen Gebiet in Österreich wahrscheinlich auftreten. Aus dieser Desktop-Analyse geht hervor, dass tägliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Werte, die 10–80 ppm über dem Hintergrundniveau der Außenluft liegen, in städtischen Gebieten plausibel sind, wobei größere Abweichungen während der winterlichen Heizperiode wahrscheinlicher sind.



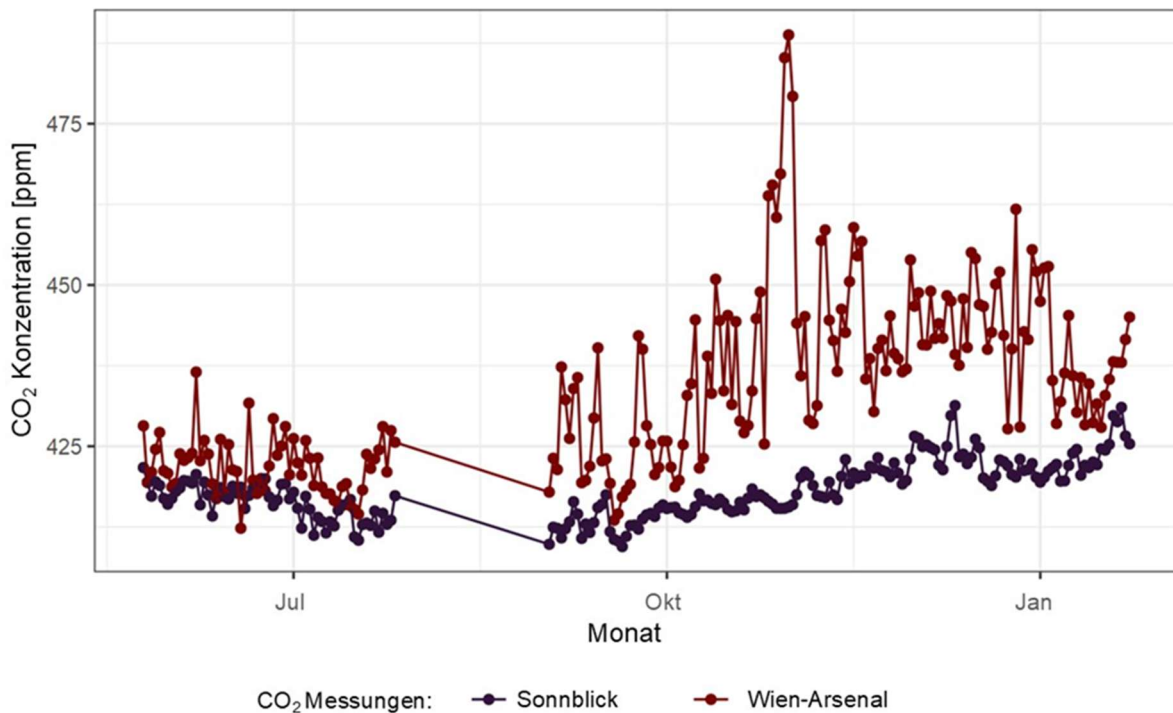


Abbildung 3-11 CO<sub>2</sub>-Messungen im Freien – Sonnblick-Observatorium (ländliche Hintergrundkonzentration) vs. Arsenal Tower Vienna (städtische Umgebung) (2023-24) (Matthews, 2024)<sup>11</sup>

### 3.7.2 Feinstaub (PM<sub>2,5</sub>) – gesundheitliche Auswirkungen und normative Referenzwerte

Feinstaub mit einem Durchmesser von 2,5 µm oder weniger (PM<sub>2,5</sub>) gelangt eher in die tieferen Bereiche der Lunge und lagert sich dort ab, im Gegensatz zu PM<sub>10</sub>, das sich im oberen Bereich der Lunge ablagert. Daher gelten die Feinstaubpartikel (d.h. PM<sub>2,5</sub> und kleiner) in der Regel als gefährlicher für die menschliche Gesundheit. Ähnlich wie bei PM<sub>10</sub> stammen die Hauptquellen von PM<sub>2,5</sub> aus der Verbrennung fester Brennstoffe für die häusliche Heizung, industrielle Aktivitäten und den Straßenverkehr. Wie bei PM<sub>10</sub> können sie auch aus natürlichen Quellen stammen und sich in der Atmosphäre bilden (EEA, 2024). Eine langfristige Exposition gegenüber PM<sub>2,5</sub> wurde mit vorzeitigen Todesfällen, kardiopulmonalen Erkrankungen wie Herzkrankheiten, Atemwegsinfektionen, chronischen Lungenerkrankungen, Krebs, Frühgeburten und anderen Krankheiten sowie einer verminderten Lungenfunktionsentwicklung bei Kindern in Verbindung gebracht (Thangavel et al., 2022). Der jährliche durchschnittliche PM<sub>2,5</sub>-Grenzwert der EU liegt bei 25 µg/m<sup>3</sup>, während der jährliche durchschnittliche Richtwert der WHO bei 5 µg/m<sup>3</sup> und der tägliche Richtwert (beim 99. Perzentil<sup>12</sup>) bei 15 µg/m<sup>3</sup> liegt.

<sup>11</sup> Bei diesem Bild handelt es sich um Material von Dritten, das von den Bedingungen der CC BY-NC-ND 4.0-Lizenzvereinbarung ausgenommen ist.

<sup>12</sup> Hinweis: Ein täglicher Richtwert, der am 99. Perzentil bewertet wird, bedeutet, dass der Grenzwert an nicht mehr als 1 % der Tage im Jahr überschritten werden darf (d. h. 3,65 Tage), sodass maximal 3–4 tägliche Überschreitungen zulässig sind.

### 3.7.3 Feinstaub (PM<sub>10</sub>) – Auswirkungen auf die Gesundheit und normative Referenzwerte

Feinstaub mit einem Durchmesser von 10 µm oder weniger (PM<sub>10</sub>) wird hauptsächlich durch die Verbrennung fester Brennstoffe für die häusliche Heizung freigesetzt, obwohl auch die Landwirtschaft, der Straßenverkehr und industrielle Tätigkeiten als wichtige Quellen gelten (EEA, 2024). Die Exposition gegenüber hohen Konzentrationen von PM<sub>10</sub> kann zu einer Reihe von gesundheitlichen Auswirkungen führen, die von Husten und Keuchen über Asthmaanfälle und Bronchitis bis hin zu Bluthochdruck, Herzinfarkt, Schlaganfall und vorzeitigem Tod reichen. Studien zeigen, dass sowohl symptomatische als auch asymptomatische Kinder unter den akuten gesundheitlichen Auswirkungen der Feinstaubbelastung leiden können, wobei symptomatische Kinder am stärksten betroffen sind (Pope und Dockery, 2012). Der EU-Tagesgrenzwert für PM<sub>10</sub> liegt bei 50 µg/m<sup>3</sup>, während der entsprechende tägliche Richtwert der WHO bei 45 µg/m<sup>3</sup> (beim 99. Perzentil) liegt. Der EU-Jahresgrenzwert liegt bei 40 µg/m<sup>3</sup>, während der jährliche durchschnittliche Richtwert der WHO bei 15 µg/m<sup>3</sup> liegt.

### 3.7.4 Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) – Auswirkungen auf die Gesundheit und normative Referenzwerte

Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) gilt als wichtiger Indikator für die straßenverkehrsbedingte Luftverschmutzung. Im Jahr 2015 lebten schätzungsweise 9 % der europäischen Bevölkerung in einer Region, in der die jährliche Konzentration von Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) den EU-Grenzwert (40 µg/m<sup>3</sup>) überschritt (Greenpeace, 2018). Aufgrund strengerer Emissionskontrollen ist diese Zahl jedoch inzwischen auf 1 % gesunken (EEA, 2024). Es ist jedoch zu beachten, dass der europäische Jahresgrenzwert für NO<sub>2</sub> viermal höher ist als der von der WHO empfohlene gesundheitsbezogene Wert (10 µg/m<sup>3</sup>) (WHO, 2021b). Im Gegensatz dazu liegt der tägliche Schwellenwert der WHO bei 25 µg/m<sup>3</sup> (beim 99. Perzentil). Die WHO verweist auf Studien, die belegen, dass die negativen Auswirkungen der NO<sub>2</sub>-Exposition (und anderer damit verbundener Schadstoffe) auf die Gesundheit von Kindern selbst bei relativ niedrigen Konzentrationen nachgewiesen wurden. Die stärksten Belege beziehen sich auf das Asthmarisiko (WHO, 2021b), das mit jedem Anstieg der durchschnittlichen jährlichen NO<sub>2</sub>-Konzentration um 10 µg/m<sup>3</sup> um 15 % zunimmt. Diese Ergebnisse unterstreichen, dass bereits bei Konzentrationen weit unter dem aktuellen europäischen Grenzwert erhebliche Gesundheitsrisiken bestehen (Greenpeace, 2018).

### 3.7.5 Ozon (O<sub>3</sub>) – gesundheitliche Auswirkungen und normative Referenzwerte

Ozon (O<sub>3</sub>) wird wie andere photochemische Oxidantien nicht direkt von einer Primärquelle emittiert. Es entsteht vielmehr durch eine Reihe komplexer Reaktionen in der Atmosphäre, die durch die Energieübertragung auf Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) und flüchtige organische Verbindungen (VOCs) (einschließlich Methan) angetrieben werden, wenn diese Wärme und Licht aus der Sonnenstrahlung absorbieren. Laut der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde (EPA) (2024) kann O<sub>3</sub> eine Reihe von Atemwegserkrankungen auslösen, darunter: Entzündungen der Atemwege sowie die Verschlimmerung von Lungenerkrankungen wie Asthma, Emphysem und chronischer Bronchitis. Der langfristige Luftqualitätsrichtwert (AQG) der WHO für O<sub>3</sub> ist an die sogenannte Spitzensaison-Exposition gekoppelt. Die Spitzensaison ist definiert als die sechs aufeinanderfolgenden Monate des Jahres mit der höchsten O<sub>3</sub>-Konzentration im Sechsmonatsdurchschnitt. Auf der Nordhalbkugel fällt dieser Zeitraum in der Regel in die warme Sommerperiode. Der EU-Zielwert für O<sub>3</sub> liegt bei 120 µg/m<sup>3</sup>, während der Richtwert der WHO für die Hauptsaison bei 60 µg/m<sup>3</sup> und der kurzfristige

Richtwert bei  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  liegt. In Österreich steht das Ozongesetz (RIS, 2024d) im Einklang mit den EU Richtlinien und legt ebenfalls einen Zielwert von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fest. Diese Werte sind nicht einfach nur Tagesmittelwerte, sondern basieren auf dem täglichen maximalen gleitenden 8-Stunden-Mittelwert. Das bedeutet, dass den ganzen Tag über jede Stunde ein gleitender 8-Stunden-Mittelwert berechnet wird, wobei die aktuelle Stunde und die vorangegangenen 7 Stunden berücksichtigt werden, was zu 17 verschiedenen 8-Stunden-Mittelwerten führt. Der höchste dieser stündlichen gleitenden Mittelwerte wird dann als täglicher maximaler gleitender Mittelwert ausgewählt.

### 3.7.6 Zusammenfassung der Grenzwerte für Schadstoffe im Freien der EU und der WHO

Um den Zustand der Außenluftqualität in der Nähe der Schulen zu beurteilen, wurden die UBA-Daten für jeden Außenluftschadstoff ( $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  und  $\text{PM}_{10}$ ) sowohl im Vergleich zu den EU-Grenzwerten als auch zu den Luftgüteleitlinien (AQG) der WHO (täglich, jährlich und während der Spitzensaison) bewertet. Die Richtwerte für die Konzentration von Außenluftschadstoffen werden von der WHO (2021b) veröffentlicht und auf der Grundlage neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse über deren Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit regelmäßig aktualisiert. Die relevanten EU-Normen wurden ursprünglich in der Richtlinie über die Luftqualität von 2008 (EU-Richtlinie 2008/50/EG12) festgelegt. Im Oktober 2022 schlug die Kommission im Rahmen des Europäischen Green Deal vor, die Richtlinien über die Luftqualität zu überarbeiten (Europäische Kommission, 2024). Durch diese Überarbeitung werden die EU-Luftqualitätsnormen stärker an die Empfehlungen der Weltgesundheitsorganisation angeglichen. Die für diese Bewertungen verwendeten Schwellenwerte sind als zeitgewichtete Mittelwerte definiert (Tab. 3-6).

Laut dem Europäischen Parlament hat eine Eignungsprüfung der Richtlinien zur Luftqualität (Richtlinien 2004/107/EG) (Europäische Union, 2004) und 2008/50/EG (Europäische Union, 2008)) ergeben, dass *“limit values are more effective in bringing down pollutant concentrations than other types of air quality standards, such as target values”* [Grenzwerte sind wirksamer bei der Senkung der Schadstoffkonzentration als andere Arten von Luftqualitätsstandards, wie Zielwerte] (European Parliament, 2023). Es besteht jedoch die Sorge, dass die derzeitigen EU-Grenzwerte die Schwere der Gesundheitsrisiken nicht in der Weise widerspiegeln, wie es die Richtwerte der WHO tun, insbesondere in Bezug auf Feinstaub ( $\text{PM}_{2,5}$ ) (Europäische Kommission, 2019; Europäisches Parlament, 2023). Aus diesem Grund werden hier beide Werte angegeben.

Die Klassifizierung der Außenluftqualität (ODA) ist ein Konzept, das dem IEQ-Klassifizierungssystem für die Innenraumluft in EN 16798-1 (CEN, 2019) und anderen normativen Dokumenten entspricht. Die ODA-Klassifizierung war in erster Linie als Hilfsmittel für Lüftungsplaner gedacht, um die Auswirkungen von Schadstoffen im Freien auf die Innenraumumgebungsbedingungen für die Bewohner\*innen eines bestimmten Raums zu bewerten (Eurovent, 2018). Die ODA ist in drei Schadstoffkonzentrationskategorien (akzeptabel, mäßig, hoch) unterteilt, die auf der Schadstoffkonzentration in der Umgebungsluft basieren. Das Verfahren zur Anwendung dieses Prozesses im Zusammenhang mit den standortabhängigen Überschreitungen der stündlichen Schwellenwerte ist in EN 16798-3 beschrieben, wobei das Verhältnis der stündlichen Überschreitung zum maximal zulässigen Wert die ODA-Klasse bestimmt (Tab. 3-5). Es wird empfohlen, die ODA-Klassen getrennt für Feinstaub-ODA (P) und für gasförmige Komponenten-ODA (G) zu bewerten, wobei der schlechteste Parameter in jeder Klasse die ODA Kategorie bestimmt (CEN, 2022).

Tabelle 3-5 Klassifizierung der Außenluftqualität (ODA) auf der Grundlage der WHO-Grenzwerte

ODA Kategorie	Schadstoffkonzentration	Beschreibung
ODA 1	< 1,0 x WHO -Grenzwert	Akzeptabel
ODA 2	1,0 x WHO-Grenzwert ≤ Schadstoffkonzentration < 1,5 x WHO-Grenzwert	Mäßig
ODA 3	≥ 1,5 x WHO -Grenzwert	Hoch

Tabelle 3-6 Zusammenfassung der Schadstoffe im Freien und der entsprechenden österreichischen, EU- und WHO-Grenzwerte

Luftschadstoff	Beurteilungszeitraum	WHO Richtlinie	EU Richtlinie	Österreich Gesetze	Überschreitungsmöglichkeiten
PM <sub>2.5</sub>	Jahresmittelwert	5 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>	25 µg/m <sup>3</sup>	
	Tagesmittelwert	15 µg/m <sup>3</sup>	N/A	N/A	WHO: 3-4 Übersch. pro Jahr (99. %ile)
PM <sub>10</sub>	Jahresmittelwert	15 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>	
	Tagesmittelwert	45 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	50 µg/m <sup>3</sup>	WHO: 3-4 Übersch. pro Jahr (99. %ile) EU: 35 Übersch. pro Jahr AUT: 25 Übersch. pro Jahr
NO <sub>2</sub>	Jahresmittelwert	10 µg/m <sup>3</sup>	40 µg/m <sup>3</sup>	30 µg/m <sup>3</sup>	
	Tagesmittelwert	25 µg/m <sup>3</sup>	N/A	80 µg/m <sup>3</sup> (Zielwert)	WHO: 3-4 Übersch. pro Jahr (99. %ile)
	Stundenmittelwert	200 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>	200 µg/m <sup>3</sup>	EU: 18 Übersch. pro Jahr
O <sub>3</sub>	Hochsaison Mittelwert *	60 µg/m <sup>3</sup>	N/A	N/A	
	höchster täglicher Achtstundenmittelwert	100 µg/m <sup>3</sup>	120 µg/m <sup>3</sup> (Zielwert)	120 µg/m <sup>3</sup> (Zielwert)	WHO: 3-4 Übersch. pro Jahr (99. %ile) EU: 25 Übersch. im Mittel über 3 Jahre AUT: 25 Übersch. im Mittel über 3 Jahre
	Jahresmittelwert	N/A	N/A	N/A	

\* Durchschn. tägl. max. 8-Std-Mittelwert der O<sub>3</sub>-Konz. in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit dem höchsten gleitenden 6 Monatsdurchschnitt

### 3.7.7 Zuordnung der UBA-Luftqualitätsmessstationen zu den Schulstandorten

Da am Standort der einzelnen Schulen keine Messgeräte für Luftschadstoffe vorhanden waren, wurden die Daten zur Außenluftqualität der nächstgelegenen Messstation des Umweltbundesamtes (UBA) (Abb. 3-12) verwendet, um die Hintergrundluftqualität in der Nähe der Schulen abzuschätzen. Für diese Bewertung wurden zwei Partikel- ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ) und zwei gasförmige ( $NO_2$  und  $O_3$ ) Luftqualitätsparameter ausgewählt, basierend auf der räumlichen Abdeckung und der Qualität der verfügbaren Daten. Experten des Umweltbundesamtes Österreich (Spangl, 2023) halfen dabei, die am besten geeignete Messstation für jede Variable in Bezug auf jede der ImpAQS-Schulen zu ermitteln.

In den meisten Fällen wurden geeignete Messstationen für jeden der vier Parameter ( $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$  und  $O_3$ ) für jede Schule ermittelt, wobei sich etwa 73 % der Stationen innerhalb von 10 km von den Schulen befanden. In 16 % der Fälle befanden sich die Stationen zwischen 10 und 30 km von den Schulen entfernt. Weitere 11 % der Stationen befanden sich mehr als 30 Kilometer von den Schulen entfernt (Anhang B.9, Tabelle A-3). Es wird anerkannt, dass weiter entfernte Messungen das Luftqualitätsprofil an einer einzelnen Schule wahrscheinlich nicht genau widerspiegeln, die Messungen werden jedoch als repräsentativ für die Hintergrundluftverschmutzungskonzentrationen in der Nähe der Schulen angesehen.

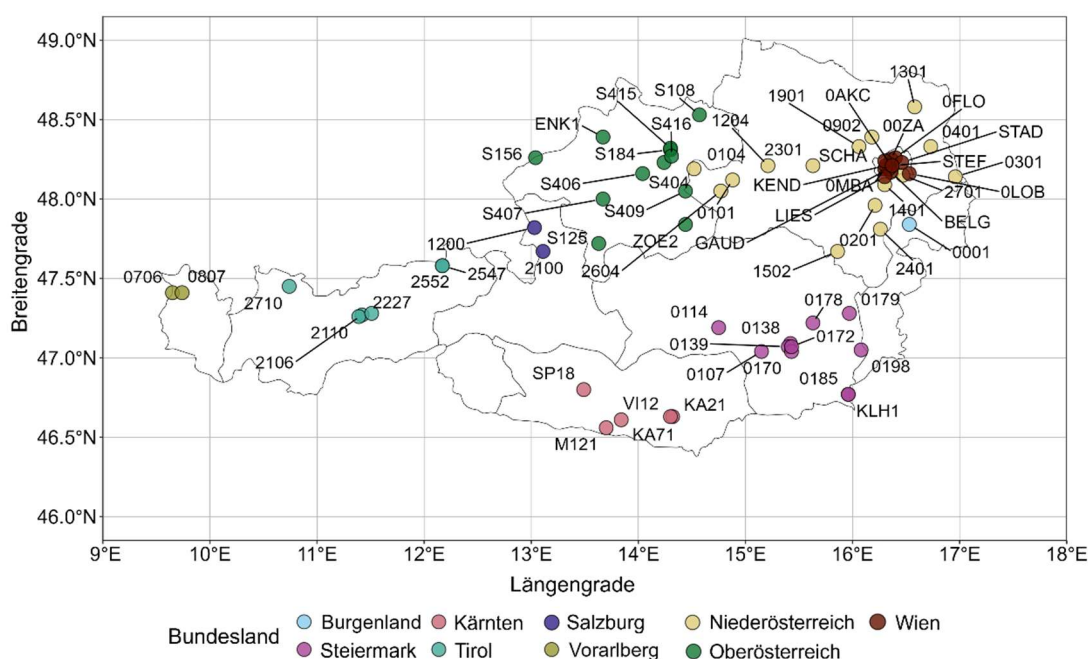


Abbildung 3-12 Karte mit den Standorten der UBA - Außenstationen und der Nähe zu Schulen

### 3.8 Analytische Infektionsrisikomodelle

Das Risiko einer Infektion durch die Übertragung des SARS-CoV-2-Virus durch Aerosole wurde mit einer analytischen Methode geschätzt, die von Forschenden des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC), Deutschland, und des Cyprus Institute, Zypern, entwickelt wurde (Lelieveld et al., 2020). Diese Methode berechnet die zeitabhängige Konzentration von Viruspartikeln in der Luft und die akkumulierte Anzahl eingeatmeter Viruspartikel auf der Grundlage menschlicher Aerosolemissionen

und Virusentfernungsraten, die sich aus der Luftaustauschrate und der Lebensdauer des Virus in Aerosolen ergeben. Die Wahrscheinlichkeit einer Infektion wird anhand der eingeatmeten Dosis an Viruspartikeln und der Infektionsdosis ( $D_{50}$ ) von 154 für die Omicron-Variante des SARS-CoV-2-Virus bestimmt. Dabei stellt der  $D_{50}$ -Wert die mittlere Dosis dar, die bei 50 % der anfälligen Personen eine Infektion verursacht. Das Gruppenrisiko bezieht sich auf die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens eine Person innerhalb einer Gruppe infiziert wird, wobei davon ausgegangen wird, dass sich eine infektiöse Person im Raum befindet. Die Methode sowie die zugehörigen Formeln und Parameter befinden sich im Anhang B.9 und B10.

Der Zweck dieser Infektionsrisikoberechnung besteht nicht darin, die Wahrscheinlichkeit einer einzelnen Infektion zu einem bestimmten Zeitpunkt genau vorherzusagen, sondern vielmehr darin, eine indikative Schätzung zu liefern und die Vorteile der relativen Prophylaxe bei verschiedenen Lüftungszuständen zu vergleichen.

In Abschnitt 4-5 werden anschauliche Beispiele für das Infektionsrisiko basierend auf Belegung, Belüftungsrate und Expositionszeit dargestellt. Darüber hinaus wurde das theoretische durchschnittliche tägliche Infektionsrisiko für alle 1200 Klassenzimmer über den Messzeitraum von Oktober 2023 bis Juli 2024 unter Verwendung der aus den CO<sub>2</sub>-Messungen abgeleiteten mittleren täglichen Belüftungsdaten berechnet.

### 3.9 Fehlzeiten

Von den teilnehmenden Schulen wurden anonyme Abwesenheitsdaten erhoben, um zu beurteilen, ob ein Zusammenhang zwischen Schulbesuch und IAQ, Belüftung und anderen Umweltparametern besteht. Diese Daten erwiesen sich als schwer zu beschaffen, was zum Teil auf das Fehlen eines standardisierten Meldesystems in Österreich zurückzuführen ist. Während die Mehrheit der Schulen das Meldesystem WebUntis (Untis GmbH, 2024) verwendete, musste für die Schulen, die ihre Abwesenheitsdaten mit einer anderen Methode erfassten, ein zusätzliches System entwickelt werden. Zu diesem Zweck wurde eine maßgeschneiderte Datenerhebungsmethode entwickelt, bei der für jedes Klassenzimmer ein eindeutiger QR-Code verwendet wurde, der mit einem webbasierten Formular (Zoho Corporation Pvt. Ltd., 2024) verknüpft war, um die Abwesenheiten der SuS zu erfassen. Von den 120 Schulen, die am ImpAQS-Projekt teilnahmen, meldeten etwas mehr als die Hälfte anonymisierte Anwesenheitsdaten für das Wintersemester ( $n=61$ ) und das Sommersemester ( $n=62$ ).

Für die Schulen, die Abwesenheitsdaten gemeldet haben, wurden zwei anonymisierte Tabellen für jede Klasse bereitgestellt: eine für das erste und eine für das zweite Halbjahr. Jede Tabelle enthielt eine Wochentabelle, in der jede Zeile einen anonymisierten Schüler oder eine anonymisierte Schülerin darstellte, und für jeden Wochentag wurde die Anzahl der Fehlstunden erfasst.

Angesichts der großen Datenmenge wurde eine manuelle Zählung der Fehlzeiten als unpraktisch erachtet. Um dieses Problem zu lösen, wurde ein benutzerdefiniertes Skript entwickelt, um den Prozess zu automatisieren. Das Skript lud iterativ jede Tabelle und identifizierte automatisch die Anzahl der SuS aus den Tabellenstrukturen und ihre Abwesenheiten für jeden Schultag auf der Grundlage der aufgezeichneten täglichen Abwesenheitsstunden pro SuS. Da keine Informationen über die Ursache der Abwesenheit vorlagen, wurde jeder SuS, der oder die an einem bestimmten Tag 4 Stunden oder länger abwesend war, als den ganzen Tag abwesend eingestuft, während diejenigen mit

weniger als 4 Stunden als anwesend galten. Das Skript verarbeitete die Abwesenheitsdaten für jede Klasse und jedes Semester und berechnete die Gesamtzahl der Schüler\*innen, abwesenden Schüler\*innen und anwesenden Schüler\*innen, sowohl in absoluten als auch in relativen Zahlen, über das gesamte Schuljahr hinweg.

Obwohl der Prozess weitgehend erfolgreich war, führten einige Unregelmäßigkeiten und Abweichungen in der Struktur der Tabellenkalkulationen dazu, dass während des automatisierten Extraktionsprozesses eine geringe Menge an Daten verloren ging. Obwohl nur eine begrenzte Anzahl von Schulen (~50 %) Abwesenheitsdaten zur Verfügung stellte, konnte der automatisierte Prozess erfolgreich Abwesenheitszahlen für etwa 42 % des täglichen Datensatzes von insgesamt 120 teilnehmenden Schulen abrufen. Dies ermöglichte eine einigermaßen umfassende Bewertung der Abwesenheitstrends, selbst angesichts der Herausforderungen, die sich aus den unterschiedlichen Datenberichtsformaten der verschiedenen Schulen ergaben.

### 3.10 Österreichische SARS-CoV-2-RNA-Abwasserdaten

Das österreichische Abwassermonitoring-Programm (Abwasserüberwachung) verfolgt die Konzentration der SARS-CoV-2-Virus-RNA im Abwasser in ganz Österreich. Derzeit umfasst das System 48 strategisch ausgewählte Kläranlagen in Österreich, die mehr als 58 % der österreichischen Bevölkerung in ihrem Einzugsgebiet erfassen (BSGPK, 2024). Diese Überwachung liefert wertvolle Erkenntnisse über die Ausbreitung des Virus und bietet ein Frühwarnsystem sowie eine Möglichkeit zur Überwachung von Infektionstrends. Die Abwasserüberwachung erfasst Daten sowohl von symptomatischen als auch von asymptomatischen Personen und ist somit eine wertvolle Ergänzung zu klinischen Tests. Sie hilft auch bei der Überwachung neu auftretender Varianten und liefert eine Echtzeit-Momentaufnahme der Viruslast in der Bevölkerung, die die Entscheidungsfindung im Bereich der öffentlichen Gesundheit unterstützen kann.

In diesem Bericht wurde der Datensatz aus dem nationalen Abwassermonitoring-Dashboard (BSGPK, 2024), der dem Schuljahr 2023–24 entspricht, verwendet, um die Beziehung zwischen der Prävalenz von SARS-CoV-2 (gemessen in Einheiten von RNA-Genomkopien pro Einwohner/Tag) und den Abwesenheitsraten in Schulen zu analysieren. Ziel war es, festzustellen, ob es einen Zusammenhang zwischen dem Gehalt an SARS-CoV-2 viraler RNA im Abwasser und den Schulabwesenheitsraten gibt, was möglicherweise einen Zusammenhang zwischen der Viruslast in der Bevölkerung und dem Schulbesuch aufzeigt.

Die Korrelationsanalyse wurde unter Verwendung der täglichen durchschnittlichen Abwesenheitsquoten, die über alle Schulen hinweg aggregiert wurden, und der täglichen durchschnittlichen nationalen Genomkopien-Daten für Österreich sowie anderer Umweltvariablen wie der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen, der PM<sub>2,5</sub>-Werte im Freien, der Außentemperaturen und der Belüftungsraten in Innenräumen durchgeführt. Ziel war es, zu untersuchen, ob zwischen diesen Faktoren und den Schulabwesenheitsraten signifikante Zusammenhänge festgestellt werden können. Obwohl die Einbeziehung von Abwasserdaten in diese Analyse explorativ war, lieferte sie wertvolle Erkenntnisse über den potenziellen Einfluss von Umwelt- und Gemeinschaftsfaktoren bei Schulabwesenheiten.

### 3.11 Qualitative Umfragen (von Direktor\*innen<sup>13</sup> und LuL) und deren statistische Analyse

Die Durchführung qualitativer Forschung durch Umfragen oder Interviews mit den Insassen von Gebäuden ist ein bewährter Ansatz, das wertvolle Einblicke in die Meinungen, Verhaltensweisen und Einstellungen der Endnutzer\*innen sowie in ihre Akzeptanz neuer Technologien liefern kann. Soziotechnische Methoden werden in der Forschung im Bereich der bebauten Umwelt zunehmend eingesetzt, basierend auf der Prämisse, dass der Betrieb von Gebäuden und den damit verbundenen technischen Systemen ein Prozess sein sollte, der sowohl soziale als auch technische Faktoren berücksichtigt (Bordass et al., 2001; Lowe et al., 2018). In dieser Hinsicht erleichtern Befragungen der Nutzer\*innen die systematische Erfassung qualitativer Daten und ermöglichen es Forscher\*innen, spezifische Variablen innerhalb einer ausgewählten Stichprobe zu messen. Dieser strukturierte Ansatz ermöglicht auch die Extrapolation von Ergebnissen auf größere Bevölkerungsgruppen, wodurch die Verallgemeinerbarkeit der Ergebnisse verbessert wird. Die Weiterentwicklung von Erhebungsmethoden, einschließlich der Nutzung von Online-Plattformen und Mixed-Mode-Ansätzen, hat die Reichweite und Effizienz der Datenerhebung erhöht. Insbesondere Online-Umfragen erfreuen sich aufgrund ihrer Kosteneffizienz und der Möglichkeit, größere und vielfältigere Bevölkerungsgruppen zu erreichen, zunehmender Beliebtheit (Evans und Mathur, 2005).

Die ImpAQS-Umfragen zielen darauf ab, die Perspektiven der Endnutzer\*innen in Bezug auf die Innenraumluftqualität und Belüftung in österreichischen Klassenzimmern zu erfassen und zu bewerten, wie sie von Schulleiter\*innen und LuL erlebt werden, die in unterschiedlichen Gebäudetypologien in einer Vielzahl von Schularten, über mehrere Altersgruppen von SuS und geografische Regionen hinweg arbeiten.

Es wird davon ausgegangen, dass die Durchführung einer Umfrage unter LuL und Schulleiter\*innen wertvolle Erkenntnisse liefern kann, die für die folgenden Forschungsziele von Bedeutung sind: (i) Verständnis für die Herausforderungen, mit denen Schulen konfrontiert sind (einschließlich der persönlichen Perspektiven und Reaktionen der Schulleiter\*innen auf diese Probleme). Es wird gehofft, dass die Ergebnisse der Umfrage sowohl allgemeine Probleme aufzeigen als auch dazu beitragen werden, die spezifischen Herausforderungen zu ermitteln, mit denen einzelne Schulen konfrontiert sind. (ii) Die Dokumentation und Bewertung der Einstellungen von LuL zu Lüftung und Sensoren wird wertvolle Einblicke in die Probleme bei der Belüftung von Klassenzimmern in einem „realen“ Kontext geben. Diese Umfragen können auch Hindernisse bei der Einführung von Technologien und möglicherweise auch eine Abneigung gegen Technologien aufzeigen. Durch die zweimalige Durchführung der Umfrage unter LuL, im Winter und im Sommer, können weitere Informationen über saisonale Unterschiede bei den Lüftungspraktiken gesammelt werden.

Die Fragen an die Schulleiter\*innen sind in Tab. 3-7 aufgeführt; die Umfrage an die LuL ist in Tab. 3-8 für den Winter und in Tab. 3-9 für den Sommer zusammengefasst. Alle vier Umfragen wurden mit dem Open-Source-Tool LimeSurvey (Version 5.6.17) (Limesurvey GmbH., Deutschland) erstellt. Bei den Umfragen für Schulleiter\*innen handelte es sich um geschlossene Umfragen, d. h., auf die Umfrage konnte nur über einen eindeutigen, von LimeSurvey generierten Link zugegriffen werden. Zu Analyse Zwecken wurden die Links der Projekt-ID-Nummer der Schule zugewiesen, enthielten jedoch keine persönlichen Angaben des Befragten, um die Anonymität zu wahren. Die Links wurden in Form

---

<sup>13</sup> Die Begriffe Schuldirektor\*in und Schulleiter\*in werden synonym verwendet



einer E-Mail-Einladung an die E-Mail-Adresse der Schulleiter\*innen gesendet. Als weitere Qualitätssicherungsmaßnahme, wurde zu Beginn der Umfrage die Position der Befragten abgefragt: „*Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten?*“ (Tab. 3-7, Q01) Dies diente als zweiter Filter, um sicherzustellen, dass es sich bei den Befragten tatsächlich um die Schulleiter handelte. Wenn die Person eine andere Antwort als „*Schulleiter/in*“ gab, wurde sie zum Ende der Umfrage weitergeleitet und ihre Antworten wurden verworfen.

Was die saisonalen Umfragen für die LuL betrifft: Diese Umfragen wurden als Open-Access-Umfrage erstellt und der Link zu den Umfragen wurde an die Schulleiter\*innen über die E-Mail-Adressen der Schulen gesendet und dann intern an die am Projekt beteiligten LuL weitergeleitet. Um sicherzustellen, dass die Umfrage an die richtigen LuL gesendet wurde, wurde der Einladungs-E-Mail eine Umverteilungstabelle mit den 10 teilnehmenden Klassenräumen (einschließlich der Etage und der jeweiligen Raumnummern) beigefügt, um die Schule darüber zu informieren, dass der Link einzig an diese ausgewählten LuL weitergeleitet werden sollte. Zu Beginn der Umfrage wurde eine ähnliche Frage eingefügt, um sicherzustellen, dass nur die ausgewählten LuL an der Umfrage teilnehmen. Die Frage „*Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten?*“ führte zu Antworten wie „*Klassen-/Fachlehrer\*in (Sensordisplay EIN)*“ oder „*Klassen-/Fachlehrer\*in (Sensordisplay AUS)*“. Darunter befand sich der Hinweis: „*Die Umfrage war nur von den Klassenlehrer\*innen in den 10 ausgewählten Klassenräumen auszufüllen, in denen Milesight-CO<sub>2</sub>-Sensoren von der TU Graz installiert wurden.*“ (Tab. 3-8 und 3-9, Q01). Wählten die Befragten eine andere Option als eine dieser beiden, wurden sie zum Ende der Umfrage weitergeleitet und ihre Antworten wurden verworfen. Durch diese Art der Handhabung der Umfragen, die Verwendung anonymisierter und pseudonymisierter personenbezogener Daten und die verschlüsselte Speicherung der Umfrageergebnisse blieb der Prozess vollständig konform mit den Allgemeinen Datenschutzbestimmungen (GDPR) (Europäische Kommission, 2016).

Die Fragen in Tabelle 3-7 richteten sich an die Schulleiter\*innen in zwei Umfragen, von denen die erste im September 2023 (Projektbeginn) und die zweite im September 2024 (Projektende) stattfand:

Tabelle 3-7 Fragen der Umfrage für Schulleiter\*innen

Frage	
Q01	Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten? (obligatorische Frage mit 3 Optionen, wenn „andere“ ausgewählt wird, endet die Umfrage, da sie nur von Schulleiter*innen beantwortet werden soll)
Q02	Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen zu Belüftung, Raumluftqualität, Gesundheit und Übertragung von durch die Luft übertragenen Krankheiten:
Q02A	Für wie wichtig halten Sie die Belüftung im Klassenzimmer? (Likert-Skala: überhaupt nicht, etwas, ziemlich, sehr, extrem, ich weiß nicht)
Q02B	Inwieweit glauben Sie, dass die Luftqualität in Innenräumen die schulische Leistung der SuS beeinflusst? (Likert-Skala: überhaupt nicht, etwas, ziemlich, sehr, extrem, ich weiß nicht)
Q02C	Für wie wichtig halten Sie die Luftqualität in Innenräumen im Hinblick auf die Gesundheit und die Übertragung von Krankheiten durch die Luft (z. B. Grippe, Masern, SARS-CoV-2 usw.)? (Likert-Skala: überhaupt nicht, etwas, ziemlich, sehr, extrem, ich weiß nicht)
Q03	Warum ist Ihrer Meinung nach Belüftung wichtig? (11 Optionen mit 'ja' oder 'nicht ausgewählt')
Q04	Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt am besten Ihre Herangehensweise an die Belüftung?(4 Optionen aus 'gelegentlich', 'jede Stunde', 'kontinuierlich', 'andere Methode (z. B. tragbarer Filter oder Hybridmethode)')
Q05	Mit welchem der folgenden Sätze können Sie sich identifizieren? (15 Optionen mit 'ja' oder 'nein')
Q06	CO <sub>2</sub> wird oft als Indikator für gute Luftqualität verwendet. Was denken Sie, sollte der maximale CO <sub>2</sub> -Wert sein, wenn Sie eine gesunde Arbeitsumgebung in einem Klassenzimmer sicherstellen wollen? (Schieberegler von 0-10.000)
Q07	Wissen Sie, welche Faktoren die Luftqualität in einem Klassenzimmer beeinflussen? (14 Optionen mit 'ja' oder 'nicht ausgewählt')
Q08	Denken Sie, dass SuS über die Auswirkungen von Lüftungsverfahren und die Luftqualität im Klassenzimmer informiert werden sollten? (4 Optionen: alle sollten informiert werden, es hängt von ihrem Alter ab, es ist nicht ihre Verantwortung, wenn es nicht vom Unterricht ablenkt). Wenn die Option „es hängt von ihrem Alter ab“ gewählt wird, stehen 6 Optionen zur Auswahl (5 Jahre oder älter, 8 Jahre oder älter, 10 Jahre oder älter, 12 Jahre oder älter, 15 Jahre oder älter, andere)
Q09	Sind Sie der Meinung, dass SuS eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Belüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten? (3 Optionen 'ja', 'vielleicht', 'nein'). Wenn „ja“ ausgewählt wird, 2 Optionen („Schüler sind für die Überwachung von CO <sub>2</sub> und die Belüftung verantwortlich“ oder „andere“). Wenn „nein“ ausgewählt wird, 2 Optionen („die Schule ist dafür verantwortlich“ oder „die Lehrer sind dafür verantwortlich“). Wenn „vielleicht“ ausgewählt wurde, 2 Optionen („es hängt vom Alter ab“ oder „wenn es nicht vom Unterricht ablenkt“). Wenn „es hängt vom Alter ab“ ausgewählt wird, 6 Optionen (5 Jahre oder älter, 8 Jahre oder älter, 10 Jahre oder älter, 12 Jahre oder älter, 15 Jahre oder älter, andere)
Q10	Glauben Sie, dass ein CO <sub>2</sub> -Sensor (mit einer farbigen Ampelanzeige) und eine Anleitung zu dessen Verwendung dazu beitragen würden, die Luftqualität in Ihren Klassenzimmern zu verbessern? (Bitte wählen Sie eine oder mehrere zutreffende Antworten aus) (8 Optionen mit 'ja' oder 'nicht ausgewählt')
Q11	Inwieweit haben Sie Ihrer Meinung nach ausreichende Anleitung und Unterstützung erhalten, wie Sie Ihre Schule während der COVID-19-Pandemie richtig lüften können? („ja“ oder „nein“)

Die folgenden Fragen der Umfrage richteten sich an die LuL in der ersten Lehrkörperumfrage, die im Februar 2024 stattfand (Winterumfrage):

**Tabelle 3-8 Fragen, die in der Lehrkörperumfrage während der Winterperiode verwendet wurden**

<b>Frage</b>	
Q01	Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten? (obligatorische Frage mit 3 Optionen, wenn „andere“ ausgewählt wird, endet die Umfrage, da sie nur von LuL mit Sensoren im Klassenzimmer beantwortet werden soll)
Q02	Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen zu Lüftungspraktiken und Raumtemperatur: A, Wie oft haben Sie die durchschnittliche Raumtemperatur beim Lüften als zu warm oder zu kalt empfunden? (Likert-Skala: nie, selten, manchmal, oft, immer). B, Wie oft hätten Sie sich gewünscht, dass die Temperatur kühler oder wärmer wäre (Likert-Skala: nie, selten, manchmal, oft, immer)
Q03	Wie empfinden Sie die Luftbewegung (Zugluft) bei der Lüftung? (Likert-Skala: sehr angenehm, angenehm, nicht bemerkt, unangenehm, sehr unangenehm)
Q04	Wie sollte die Luftbewegung Ihrer Meinung nach sein? (Likert-Skala: weniger, etwas weniger, keine Veränderung, etwas mehr, mehr)
Q05	Wie empfinden Sie den (Außen-)Lärm bei der Lüftung? (Likert-Skala: nicht störend, neutral, störend, sehr störend)
Q06	Haben Sie das Gefühl, dass sich die SuS während der Lüftung besser oder schlechter konzentrieren können? (Likert-Skala: schlechter, etwas schlechter, neutral, etwas besser, besser)
Q07	Sind Ihnen im Winter eines oder mehrere der folgenden Probleme im Zusammenhang mit der Lüftung aufgefallen? (13 Fragen, die mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten sind)
Q08	Wenn Sie auf eines oder mehrere der oben genannten Probleme gestoßen sind und eine Möglichkeit gefunden haben, das Problem zu umgehen, beschreiben Sie das Problem bitte genauer und wie Sie es gelöst haben. (Offene Frage, die sich auf die Themen in Q07 bezieht, nicht zwingend zu beantworten)
Q09	Was hat Ihnen geholfen, besser zu lüften? (9 Optionen mit „ja“ oder „nicht zutreffend“ und Kommentarfeld)
Q10	Was würde Ihnen helfen, für eine bessere Belüftung zu sorgen? (6 Optionen mit „ja“ oder „nicht zutreffend“ und Kommentarfeld)
<b>Allgemeine Einstellung zur Technologie</b>	
Q11	Wie oft gelingt es Ihnen, den empfohlenen CO <sub>2</sub> -Bereich einzuhalten? (Likert-Skala: immer, manchmal, selten, nie, und andere)
Q12	Wie schwierig ist es, mit einem CO <sub>2</sub> -Sensor richtig zu lüften? (Likert-Skala: sehr leicht, leicht, schwer, sehr schwer, und andere)
Q13	Welche Schwierigkeiten haben Sie bei der Verwendung des CO <sub>2</sub> -Sensors? (7 Optionen mit 'ja' oder 'nicht ausgewählt')
Q14- Q18	Bitte kreuzen Sie ein Kästchen an, wenn Sie der folgenden Aussage zur Verwendung eines CO <sub>2</sub> -Sensors zustimmen (9 Optionen mit „ja“ und „nicht ausgewählt“)

Die folgenden Fragen der Umfrage richteten sich an die LuL in der zweiten Lehrkörperumfrage, die im September 2024 stattfand:

**Tabelle 3-9. Fragen, die in der Umfrage unter LuL während der Sommerperiode verwendet wurden**

<b>Frage</b>	
Q01	Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten? (obligatorische Frage mit 3 Optionen, wenn „andere“ ausgewählt wird, endet die Umfrage, da sie nur von LuL mit Sensoren im Klassenzimmer beantwortet werden soll)
Q02	Bitte beantworten Sie die folgenden Fragen zu Lüftungspraktiken und Raumtemperatur:

	A, Wie oft haben Sie die durchschnittliche Raumtemperatur beim Lüften als zu warm oder zu kalt empfunden? (Likert-Skala: nie, selten, manchmal, oft, immer). B, Wie oft hätten Sie sich gewünscht, dass die Temperatur kühler oder wärmer wäre (Likert-Skala: nie, selten, manchmal, oft, immer)
Q03	Wie empfinden Sie die Luftbewegung (Zugluft) bei der Lüftung? (Likert-Skala: sehr angenehm, angenehm, nicht bemerkt, unangenehm, sehr unangenehm)
Q04	Wie sollte die Luftbewegung Ihrer Meinung nach sein? (Likert-Skala: weniger, etwas weniger, keine Veränderung, etwas mehr, mehr)
Q05	Wie empfinden Sie den (Außen-)Lärm bei der Lüftung? (Likert-Skala: nicht störend, neutral, störend, sehr störend)
Q06	Haben Sie das Gefühl, dass sich die SuS während der Lüftung besser oder schlechter konzentrieren können? (Likert-Skala: schlechter, etwas schlechter, neutral, etwas besser, besser)
Q07	Sind Ihnen im Winter eines oder mehrere der folgenden Probleme im Zusammenhang mit der Lüftung aufgefallen? (13 Fragen, die mit „ja“ oder „nein“ zu beantworten sind)
Q08	Wenn Sie auf eines oder mehrere der oben genannten Probleme gestoßen sind und eine Möglichkeit gefunden haben, das Problem zu umgehen, beschreiben Sie das Problem bitte genauer und wie Sie es gelöst haben. (Offene Frage, die sich auf die Themen in Q07 bezieht, nicht zwingend zu beantworten)
Q09	Was hat Ihnen geholfen, besser zu lüften? (9 Optionen mit „ja“ oder „nicht zutreffend“ und Kommentarfeld)
Q10	Was würde Ihnen helfen, für eine bessere Belüftung zu sorgen? (6 Optionen mit „ja“ oder „nicht zutreffend“ und Kommentarfeld)
Q11	CO <sub>2</sub> wird oft als Indikator für gute Luftqualität verwendet. Was denken Sie, sollte der maximale CO <sub>2</sub> -Wert sein, wenn Sie eine gesunde Arbeitsumgebung in einem Klassenzimmer sicherstellen wollen? (Schieberegler von 0-10.000)
Q12	Denken Sie, dass SuS über die Auswirkungen von Lüftungspraktiken und Luftqualität im Klassenzimmer informiert werden sollten? (4 Optionen: alle sollten informiert werden, es hängt von ihrem Alter ab, es ist nicht ihre Verantwortung, wenn es nicht vom Unterricht ablenkt). Wenn die Option „es hängt von ihrem Alter ab“ gewählt wird, stehen 6 Optionen zur Auswahl (5 Jahre oder älter, 8 Jahre oder älter, 10 Jahre oder älter, 12 Jahre oder älter, 15 Jahre oder älter, andere)
Q13	Denken Sie, dass SuS eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Lüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten? (3 Optionen 'ja', 'vielleicht', 'nein'). Wenn „ja“ ausgewählt wird, 2 Optionen („Schüler sind für die Überwachung von CO <sub>2</sub> und die Belüftung verantwortlich“ oder „andere“). Wenn „nein“ ausgewählt wird, 2 Optionen („die Schule ist dafür verantwortlich“ oder „die Lehrer sind dafür verantwortlich“). Wenn „vielleicht“ ausgewählt wurde, 2 Optionen („es hängt vom Alter ab“ oder „wenn es nicht vom Unterricht ablenkt“). Wenn „es hängt vom Alter ab“ ausgewählt wird, 6 Optionen (5 Jahre oder älter, 8 Jahre oder älter, 10 Jahre oder älter, 12 Jahre oder älter, 15 Jahre oder älter, andere)
Q14	Haben Sie derzeit einen CO <sub>2</sub> -Beauftragten (der den CO <sub>2</sub> -Gehalt im Auge behält und für das Lüften verantwortlich ist)? (2 Optionen mit 'ja' oder 'nein')
<b>Allgemeine Einstellung zur Technologie</b>	
Q15	Wie oft gelingt es Ihnen, den empfohlenen CO <sub>2</sub> -Bereich einzuhalten? (Likert-Skala: immer, manchmal, selten, nie, und andere)
Q16	Wie schwierig ist es, mit einem CO <sub>2</sub> -Sensor richtig zu lüften? (Likert-Skala: sehr leicht, leicht, schwer, sehr schwer, und andere)
Q17	Welche Schwierigkeiten haben Sie bei der Verwendung des CO <sub>2</sub> -Sensors? (7 Optionen mit 'ja' oder 'nicht ausgewählt')
Q18-Q22	Bitte kreuzen Sie ein Kästchen an, wenn Sie der folgenden Aussage zur Verwendung eines CO <sub>2</sub> -Sensors zustimmen (9 Optionen mit „ja“ und „nicht ausgewählt“)

## 4 Quantitative Ergebnisse und analytische Untersuchungen

Dieser Abschnitt des Berichts enthält die Ergebnisse der quantitativen Untersuchungen, die zur Beantwortung der Forschungsfragen 1–4 (Abschnitt 1.4) erforderlich sind. Die Analyse umfasst die Auswertung von fünf Datensätzen, sowohl einzeln als auch in Kombination:

1. **ImpAQS Schul- und Klassenzimmer-Erhebungsdaten** – dieser Datensatz wurde von den ImpAQS-Projekttechniker\*innen während der Installationsphase der Geräte zusammengestellt und liefert detaillierte Informationen über die physischen Eigenschaften jeder an der Studie beteiligten Schule und jedes Klassenraums (Abschnitt 3.6).

2. **ImpAQS CO<sub>2</sub>- und Umweltqualitäts-Messdaten**– dieser Datensatz enthält überwachte Daten, die in einem Intervall von 2 Minuten von 1200 Innenraumsensoren (CO<sub>2</sub>, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) und 120 Außensensoren (CO<sub>2</sub>, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) für das Schuljahr 2023–24 aufgezeichnet wurden (Abschnitt 3.5).

3. **Daten zur Luftverschmutzungsüberwachung** – dieser Datensatz enthält Überwachungsdaten, die vom österreichischen Umweltbundesamt (UBA) im Stundentakt für die in der Nähe der Schulen gemessenen Luftschadstoffe (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>) aufgezeichnet wurden (Abschnitt 3.7)

4. **Daten zu Fehlzeiten** – dieser Datensatz enthält anonymisierte Informationen über die stündlichen Fehlzeiten in den teilnehmenden Klassen und wurde von den Schulen unter Verwendung anonymisierter Daten aus dem Anwesenheitsüberwachungssystem WebUntis bereitgestellt (Abschnitt 3.9)

5. **Abwasserdaten** – dieser Datensatz enthält Informationen zur epidemiologischen Überwachung von SARS-CoV-2-RNA im kommunalen Abwasser während des Schuljahres 2023–24. Die Daten wurden vom nationalen Abwasserüberwachungsprogramm des Bundesministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz (BMSGPK) bereitgestellt (Abschnitt 3.10)

Die ersten beiden Datensätze, die oben aufgeführt sind, sind Primärdaten, die im Rahmen der ImpAQS-Forschungsstudie erhoben wurden. Die letzten drei Datensätze bestehen aus Sekundärdaten, wobei die Datensätze 3 und 5 von den jeweiligen Bundesbehörden der österreichischen Regierung bereitgestellt wurden, während Datensatz 4 aus einzelnen Datensätzen zusammengestellt wurde, die von den teilnehmenden Schulen bereitgestellt wurden. Die Datensätze 1, 2 und 3 werden zunächst getrennt in Bezug auf die geltenden normativen Standards analysiert und anschließend in Kombination analysiert, um Zusammenhänge zwischen Faktoren wie thermischer Behaglichkeit und Belüftung zu bewerten. Die Datensätze 1 und 2 werden weiter untersucht, um statistisch signifikante Unterschiede zwischen Kontroll- und Testklassenräumen zu ermitteln. Schließlich werden die Datensätze 1–5 in weitere statistische Analysen einbezogen, in denen Zusammenhänge zwischen Belüftungsraten, CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, Fehlzeiten, externen Schadstoffen und anderen Umweltparametern untersucht werden.

Eine Zusammenfassung der in diesem Abschnitt durchgeführten Analysen wird in Abschnitt 4.6 vorgestellt, in dem eine konsolidierte Antwort auf jede der vier in Abschnitt 1.4 formulierten quantitativen Forschungsfragen gegeben wird.

## 4.1 Teilnehmende Schulen

### 4.1.1 Stichprobenauswahl und geografische Verteilung

Auf der Grundlage der Schulauswahlkriterien (Abschnitt 3.3) wurde bei der Stichprobenstrategie ein möglichst breites Spektrum verschiedener Schularten und Altersgruppen berücksichtigt, die aus den neun Bundesländern Österreichs stammten. Die Stichprobe für die Studie wurde dann in Zusammenarbeit mit dem Bundesinstitut für Qualitätssicherung im österreichischen Bildungswesen (IQS) unter Verwendung von Monte-Carlo-Stichprobenverfahren erstellt. Dabei wurde die Anzahl der ausgewählten Schulen pro Region entsprechend der Zahlen der SuS in den jeweiligen Regionen gewichtet (Abb. 3-3).

Abbildung 4-1 zeigt die prozentuale Aufschlüsselung der Schulen pro Region innerhalb der ImpAQS-Stichprobe zusammen mit den tatsächlichen Prozentsätzen der SuS pro Region. Die Grafik veranschaulicht, dass die Verteilung der ImpAQS-Schulen auf die neun Regionen die Verteilung der SuS im Land genau widerspiegelt, was darauf hindeutet, dass die ImpAQS-Stichprobe für die geografische Verteilung der Population der SuS repräsentativ ist.

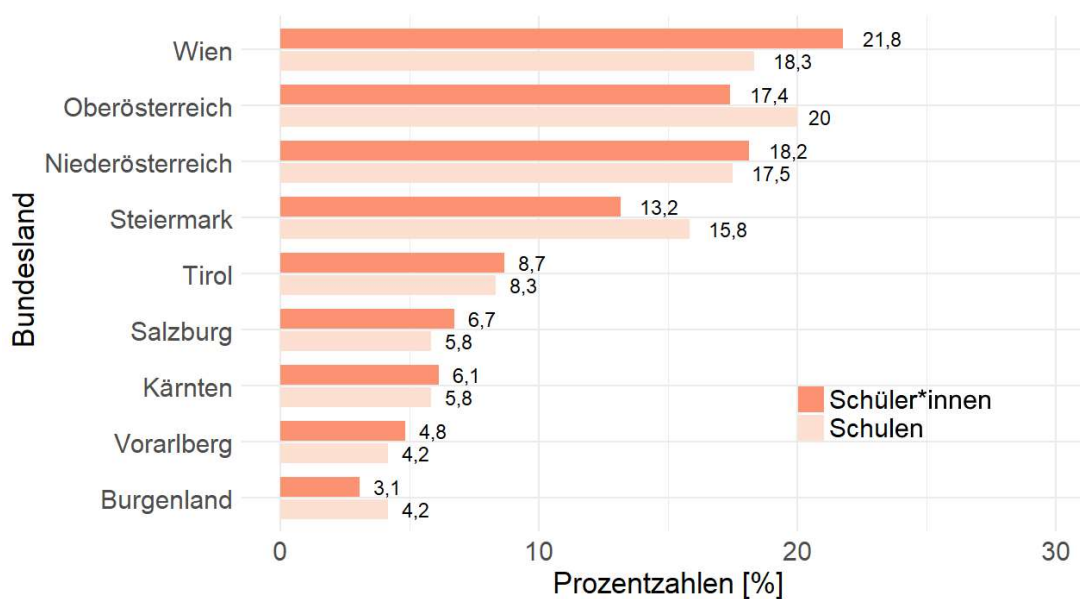


Abbildung 4-1 Prozentualer Anteil ausgewählter Schulen pro Region in der ImpAQS-Studie (hellorange) im Verhältnis zum prozentualen Anteil der SuS pro Region (dunkelorange)

Ausgehend von dem Ziel, 5 gepaarte Klassenräume (d. h. 10 Klassenräume) pro Schule auszustatten, wurden insgesamt 120 Schulen für die Studie ausgewählt. Abbildung 4-1 zeigt die regionale Verteilung der ausgewählten Schulen als prozentualen Anteil an der Gesamtzahl, absteigend sortiert. Mit insgesamt 24 Schulen wurde die größte Anzahl an Schulen in der Region Oberösterreich ausgewählt. Obwohl Oberösterreich nach Wien und Niederösterreich die Region mit den drittmeisten SuS ist (Abb. 4-2). Diese endgültige Auswahl ist eine Folge der niedrigeren Rücklaufquoten, die in Wien und Niederösterreich während der Rekrutierungsphase der Teilnehmenden des Projekts beobachtet wurden.

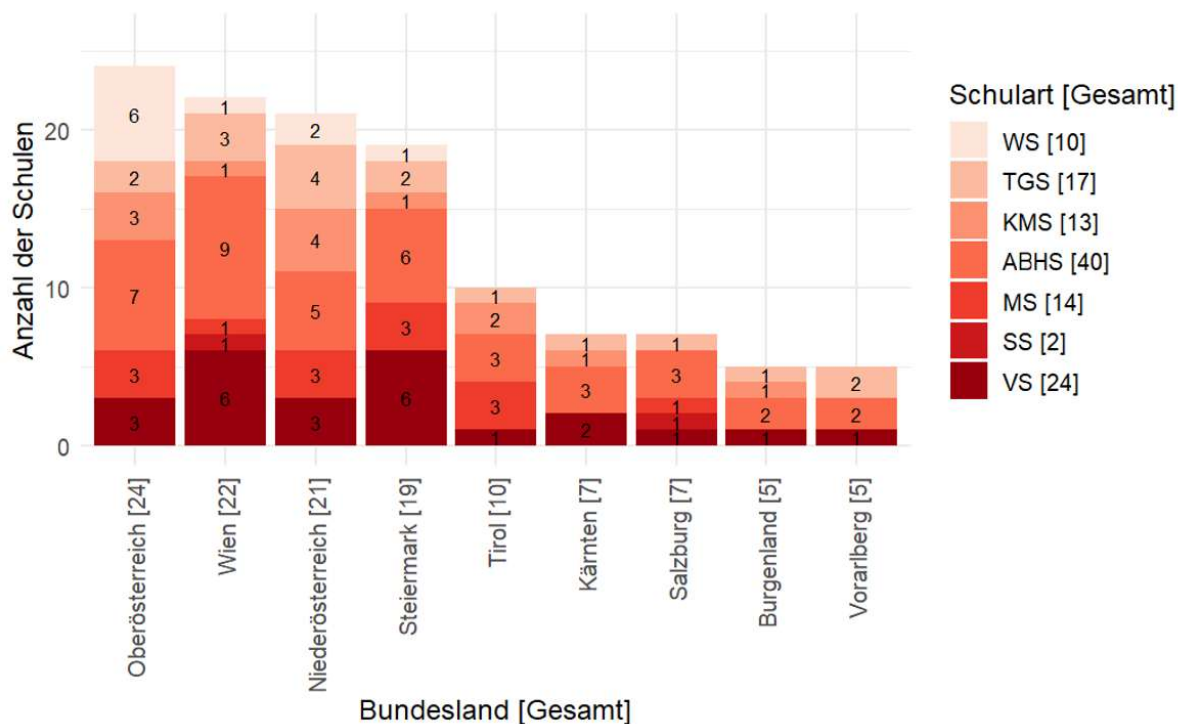


Abbildung 4-2 Verteilung der ausgewählten Schulen nach Region und Schultyp

Die ausgewählten Schultypen, die in die Studie einbezogen wurden, und ihre jeweiligen Prozentsätze sind: Volksschule (**VS**) (20,0 %), Sonderschule (**SS**) (1,7 %), Mittelschule (**MS**) (11,7 %), Allgemein bildende höhere Schule (**ABHS**) (33,3 %), Kaufmännische mittlere oder höhere Schule (**KMS**) (3,3 %), Technische und gewerbliche mittlere oder höhere Schule (**TGS**) (14,2 %) und Wirtschaftsberufliche mittlere oder höhere Schule (**WS**) (8,3 %).

In der Legende von Abb. 4-2 folgt auf die Abkürzungen der Schulen die Gesamtzahl der Schulen in jeder Kategorie (z. B. VS [24] bedeutet, dass die ImpAQS-Stichprobe insgesamt 24 Volksschulen enthält). Ebenso folgt auf der horizontalen Achse auf den Namen jeder Region die Gesamtzahl der Schulen pro Region (z. B. Oberösterreich [24] bedeutet, dass insgesamt 24 Schulen in der Region Oberösterreich eingeschlossen waren).

Hinweis: Berufsschulen und Polytechnische Schulen, die 4,4 % bzw. 2,5 % der österreichischen Bildungseinrichtungen ausmachen, wurden bewusst aus der Stichprobe ausgeschlossen. Diese Entscheidung wurde durch ihren starken Fokus auf praktische Fächer und die dynamische Natur der Anwesenheit der SuS vor Ort während des gesamten Schuljahres beeinflusst, die das „like-for-like“-Matched-Pair-Forschungsdesign der Studie möglicherweise stören könnte (Abschnitt 3.1 and 3.5.4.1).

## 4.2 Überblick über die Angemessenheit der Lüftungspraktiken in österreichischen Schulen

In diesem Abschnitt soll die **Forschungsfrage 1** beantwortet werden: „Wieviel Prozent der österreichischen Klassenzimmer werden gemäß den bestehenden Normen und den neuen ‚gesundheitsbasierten‘ Lüftungsrichtlinien angemessen bzw. unzureichend belüftet?“

Um diese Frage zu beantworten und die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen einzelnen Schulen und Klassenräumen in einen Kontext zu setzen, ist es wichtig, die vorherrschenden physischen und sozialen Faktoren (Abschnitt 5) zu verstehen, die die Ergebnisse beeinflussen können. Dieser Abschnitt beginnt mit einer Zusammenfassung der wichtigsten physischen Merkmale der Klassenräume, die aus den Daten der Raumbefragung stammen, die während der Installationsphase des Projekts (Abschnitt 3.5.4 and 4.2.1) erhoben wurden. Darauf folgt eine Analyse der Ergebnisse der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen im Vergleich zu bestehenden Standards und neuen „gesundheitsbasierten“ Grenzwerten (Abschnitt 4.2.2). Die gemessenen täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen werden dann mithilfe von Massenbilanzmodellen in Lüftungsraten umgewandelt und die resultierenden Werte mit bestehenden Lüftungsstandards und neuen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsgrenzwerten verglichen (Abschnitt 4.2.3).

#### 4.2.1 Physische Merkmale österreichischer Schulen und Klassenzimmer

Der folgende Abschnitt fasst die wichtigsten physikalischen Merkmale der ImpAQS-Schulstichprobe in Bezug auf Faktoren zusammen, die einen Einfluss auf die resultierende Innenraumluftqualität und die Lüftungsraten haben können. Zu diesen Parametern gehören physikalische Faktoren wie Raumgrößen und Lüftungssysteme sowie die in die Studie einbezogenen Schularten und ihre geografische Verteilung. Ein detaillierter Überblick über die Ergebnisse dieses Abschnitts findet sich in Anhang C.1.1.

##### 4.2.1.1 Schultyp

Das österreichische Bildungssystem zeichnet sich durch eine Vielzahl von Schultypen aus, die unterschiedliche Bildungsbedürfnisse und -wege abdecken. Im Jahr 2022 gab es in Österreich insgesamt 5921 Schulen (Statistik Austria, 2024). Zu den wichtigsten Schultypen gehören Volksschulen, weiterführende Schulen und Berufsschulen, die jeweils unterschiedliche Zwecke innerhalb des Bildungsrahmens erfüllen. Die verschiedenen in der ImpAQS-Studie ausgewählten Schularten sind in Abb. 4-3 dargestellt und lauten wie folgt: Allgemein bildende höhere Schulen (ABHS) (33,3 %), Kaufmännische mittlere oder höhere Schulen (KMS) (10,8 %), Mittelschulen (MS) (1,7 %), Sonderschulen (SS) (1,7 %), Technische und gewerbliche mittlere oder höhere Schulen (TGS) (14,2 %), Volksschulen (VS) (20 %) und Wirtschaftsberufliche mittlere oder höhere Schulen (WS) (8,3 %).

Österreich ist ein Land der beruflichen Bildung und Ausbildung und hat einen hohen Anteil an Berufsschulen und einen gleich hohen Anteil an akademischen Sekundarschulen (Statistik Austria, 2024). Sieben von zehn SuS der Sekundarstufe II nehmen an einer beruflichen Aus- und Weiterbildung teil. Dies ist die zweithöchste Quote in der OECD (engl: Organisation for Economic Co-operation and Development), gleichauf mit Finnland, nach der Tschechischen Republik (73 %) (Der Standard, 2016). Dies erklärt die gleichmäßige Vertretung von Berufsschulen (33,3 %) im Vergleich zu allgemeinbildenden Sekundarschulen (33,3 %) in der ImpAQS-Studie (siehe Abb. 4-3).

Die Schulstichprobe für das ImpAQS-Projekt zeigt eine typische Teilmenge der oben genannten Schularten. Polytechnische Schulen wurden jedoch in der Stichprobe nicht berücksichtigt, da sie 14- bis 15-jährige SuS unterstützen, die unmittelbar nach ihrer Pflichtschulzeit in der neunten Schulstufe einen Beruf erlernen möchten und daher nicht das gesamte Schuljahr über im Klassenzimmer anwesend sind.



### Schulart

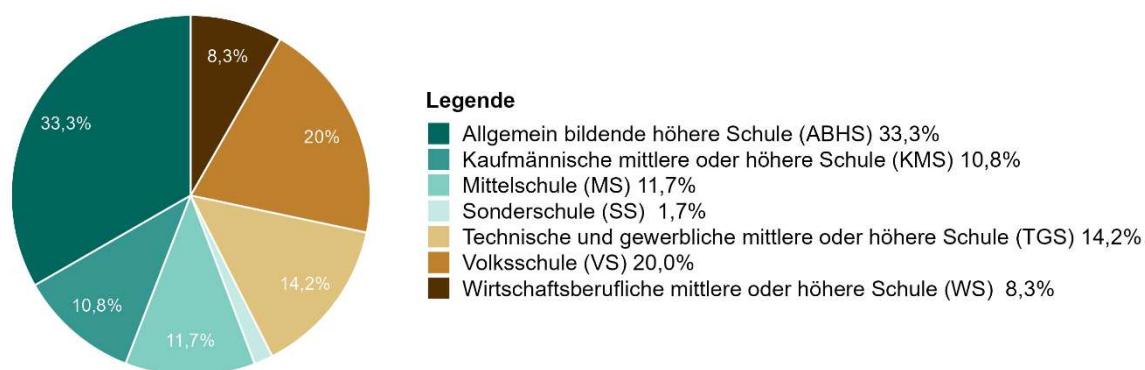


Abbildung 4-3. ImpAQS- Schultypen [%]

Tabelle 4-1 ImpAQS-Schultypen in absoluten Zahlen

Schulart	Anzahl
Allgemein bildende höhere Schule	40
Kaufmännische mittlere oder höhere Schule	13
Mittelschule	14
Sonderschule	2
Technische und gewerbliche mittlere oder höhere Schule	17
Volksschule	24
Wirtschaftsberufliche mittlere oder höhere Schule	10

### 4.2.1.2 Schulregionen

Österreich ist in neun Bundesländer unterteilt. Diese sind: 1. Burgenland 2. Kärnten 3. Niederösterreich 4. Oberösterreich 5. Salzburg 6. Steiermark 7. Tirol 8. Vorarlberg 9. Wien. Jedes dieser Bundesländer hat seine eigene Regierung und Verwaltungsstruktur, die zum föderalen Regierungssystem in Österreich beitragen. Die Bundesländer verfügen über eine weitreichende Autonomie, insbesondere in Bereichen wie Bildung, Gesundheit und Infrastruktur. Die meisten Schulen im ImpAQS-Projekt befinden sich in Oberösterreich (20%), Wien (18,3%), Niederösterreich (17,5%) und der Steiermark (15,8%), was die Anzahl der Schulen in diesen Bundesländern widerspiegelt (Abb. 4-4).

### Bundesland

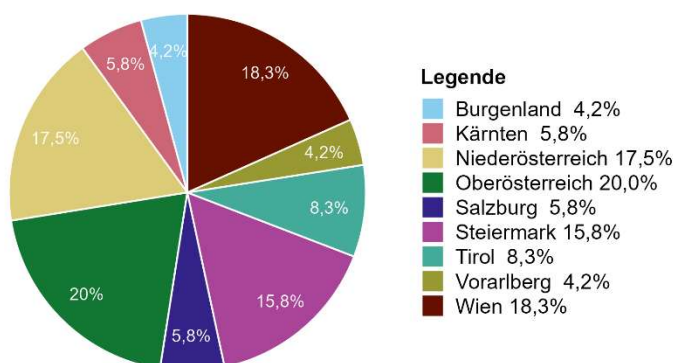


Abbildung 4-4 ImpAQS-Schulen nach Region [%]

Tabelle 4-2 Zusammenfassung der ImpAQS-Schulen nach Regionen in absoluten Zahlen

Region	Anzahl
Burgenland	5
Kärnten	7
Niederösterreich	21
Oberösterreich	24
Salzburg	7
Steiermark	19
Tirol	10
Vorarlberg	5
Wien	22

#### 4.2.1.3 Schulische Stadt-Land-Zonierung

Die Verteilung von Schulen in **ländlichen und städtischen bzw. halbstädtischen Gebieten** ist ein wichtiges Thema in der Bildungsforschung, da sie oft umfassendere soziale und wirtschaftliche Unterschiede widerspiegelt. In Österreich wird üblicherweise zwischen Dörfern (weniger als 10.000 Einwohner\*innen), Kleinstädten (10.000–39.999 Einwohner\*innen), Mittelstädten (40.000–100.000 Einwohner\*innen) und Großstädten (>100.000 Einwohner\*innen) unterschieden (Baukulturpolitik, 2024). Im Allgemeinen sind Schulen in städtischen Gebieten im Vergleich zu ländlichen Regionen stärker konzentriert. Dieser Trend wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, darunter Bevölkerungsdichte, Ressourcenzuweisung und Bildungspolitik. Städtische Gebiete in Österreich (wie Wien mit ca. 1,89 Millionen Einwohner\*innen, Graz mit ca. 443.000 Einwohner\*innen, Innsbruck mit ca. 311.400 Einwohner\*innen oder Linz mit ca. 203.000 Einwohner\*innen) weisen in der Regel eine höhere Bevölkerungsdichte auf, was zu einer größeren Nachfrage nach Bildungseinrichtungen führt. Infolgedessen verfügen Städte oft über eine größere Anzahl von Schulen, um den Bedürfnissen ihrer Bevölkerung gerecht zu werden. Im Gegensatz dazu stehen ländliche Gebiete mit geringerer Bevölkerungsdichte oft vor Herausforderungen, die mit einer geringeren Anzahl von Schulen verbunden sind, einschließlich eines eingeschränkten Zugangs zu einem vollständigen Spektrum an Bildungsressourcen. Diese Verteilung der Schulen spiegelt sich in der endgültigen Schulstichprobe wider, die einen großen Prozentsatz an Schulen in den großen Städten Österreichs enthält (Abb. 4-5). Über die Hälfte (51,6 %) aller Schulen in der ImpAQS-Stichprobe befinden sich in Großstädten (entweder zentral oder in den Außenbezirken). Danach folgen Mittelstädte (10,8 %), Kleinstädte (18,3 %) und Ortschaften (19,2 %).

#### Stadt-Land-Zonierung

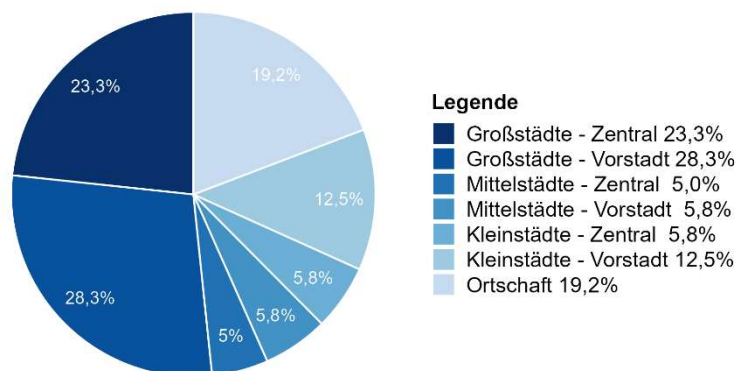


Abbildung 4-5 Klassifizierung der Schulen nach Stadt-Land-Zonierung

Tabelle 4-3 Zusammenfassung der ImpAQS-Stadt-Land-Zonierung in Zahlen

Lage		Anzahl
Großstädte	Zentral	28
	Vorstadt	34
Mittelstädte	Zentral	6
	Vorstadt	7
Kleinstädte	Zentral	7
	Vorstadt	15
Ortschaft		23

4.2.1.4 Bauart

Was die Bauweise betrifft, so enthält die Gesamtstichprobe der Schulen 122 individuelle Gebäudetypen statt 120, da zwei Schulen mit einer schweren Bauweise im Hauptgebäude, aber mit einem neueren Anbau oder einem zusätzlichen neuen Komplex aus leichten Materialien gebaut wurden. Da Räume in beiden Gebäudetypen Teil der Stichprobe waren, ändert sich die Gesamtzahl der Schulbautypen auf 122.

Dennoch sind die meisten der ImpAQS-Stichprobengebäude in thermisch schwerer Bauweise (97 %) (z. B. Mauerwerk oder Beton), während nur 3 % entweder in leichter Bauweise (z. B. Holz oder Glas und Stahl) oder in hybrider Bauweise (z. B. Kombination aus Mauerwerk und Holz) errichtet sind (Abb. 4-6).

Konstruktionsbauweisen

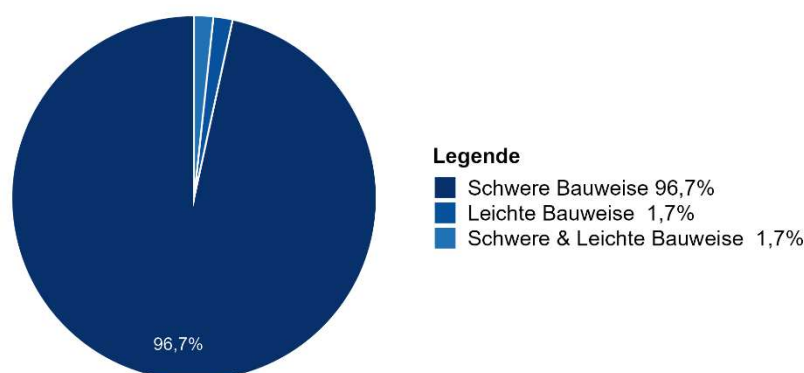


Abbildung 4-6 Konstruktionsbauweisen

Tabelle 4-4 Zusammenfassung der ImpAQS-Bauweisen in Zahlen

Konstruktionsbauweise	Anzahl
Schwere Bauweise	116
Leichte Bauweise	2
Schwere und leichte Bauweise	2

## 4.2.1.5 Art des Lüftungssystems

Die Verbreitung von natürlich belüfteten Schulen variiert je nach Region und Bildungssystem. Eine beträchtliche Anzahl von Forschungsarbeiten deutet darauf hin, dass ein erheblicher Anteil der Schulen weltweit, insbesondere in Europa, auf natürliche Belüftungssysteme angewiesen ist. So schätzte das SINPHONIE-Projekt beispielsweise, dass etwa 86 % der europäischen Schulgebäude natürliche Belüftungsmethoden nutzen (Csobod, 2014). Diese Abhängigkeit von natürlicher Belüftung ist oft auf die Einfachheit und Kosteneffizienz solcher Systeme zurückzuführen, insbesondere in Regionen, in denen eine mechanische Belüftung traditionell als unnötig angesehen wurde. Nach Kenntnis der Autoren liegen in der Literatur keine aktuellen Informationen über den prozentualen Anteil natürlich belüfteter Schulen in Österreich im Vergleich zur Anzahl mechanisch belüfteter Schulen vor. Nach der Analyse der Daten aus der Schulumfrage (Abb. 4-7) zeigte sich, dass in der ImpAQS-Stichprobe 104 Gebäude natürlich belüftet werden (86,7 %) und 11 über eine mechanische Belüftung verfügen (9,2 %), während 5 Schulen (4,2 %) eine Kombination aus natürlich und mechanisch belüfteten Klassenräumen aufweisen.<sup>14</sup> In Anhang C.1.1.11 werden Beispiele für verschiedene Lüftungsarten vorgestellt.

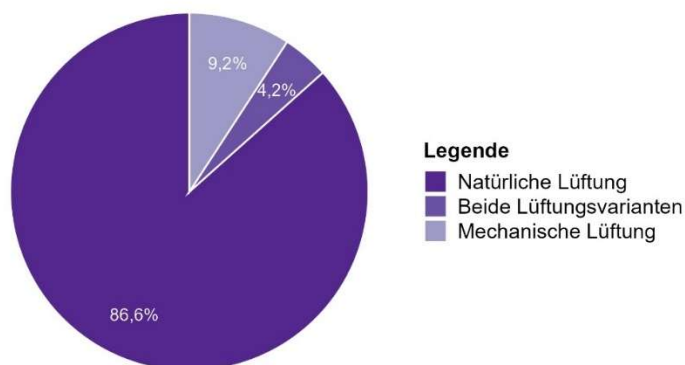
**Lüftungsart**

Abbildung 4-7 Lüftungsarten der Schulen [%]

---

<sup>14</sup> Es sollte beachtet werden, dass trotz der gebotenen Sorgfalt bei der Erfassung der Daten zu den Lüftungssystemen (Abb. 4-7 und Tab. 4-5) eine gewisse Unsicherheit bei der genauen Aufschlüsselung der verschiedenen Lüftungssystemtypen bestehen kann. Dies liegt daran, dass Techniker\*innen in einigen Fällen möglicherweise missverstanden haben, ob ein mechanisches System noch funktionsfähig war oder nicht. In einigen Fällen konnte das Schulpersonal trotz telefonischer Nachfragen nicht bestätigen, welche Art von System in einem bestimmten Klassenzimmer verwendet wurde oder ob das System während der gesamten Dauer der Studie funktionsfähig war. In anderen Fällen wurden Lüftungsanlagen möglicherweise während der Studie ohne Benachrichtigung des ImpAQS-Projektteams ausgetauscht, repariert oder abgeschaltet.

Tabelle 4-5 Zusammenfassung der ImpAQS-Lüftungsarten der Schulen in Zahlen

Lüftungsart	Anzahl
Natürliche Lüftung	104
Beide Lüftungsvarianten	5
Mechanische Lüftung	11

#### 4.2.1.6 Schulhöhenlage

Die Höhenlage der Schulen in Europa und insbesondere in Österreich variiert je nach geografischer Lage erheblich, insbesondere in Bezug auf die Bergregionen des Landes. Im Allgemeinen befinden sich Schulen in städtischen Gebieten in niedrigeren Höhenlagen von etwa 100 bis 300 Metern über dem Meeresspiegel. Im Gegensatz dazu liegen Dörfer in alpinen Regionen in viel höheren Lagen, oft zwischen 600 und 2.600 Metern über dem Meeresspiegel. Diese Variation ist besonders relevant im Zusammenhang mit umweltbezogenen Gesundheitsstudien, bei denen die Höhe indirekt Faktoren wie die Luftqualität (Xing et al., 2023) und Allergenkonzentrationen (Gao et al., 2024) beeinflussen kann, die sich auf die Gesundheit und das Wohlbefinden von SuS auswirken können. Die höchstgelegene Schule, die am ImpAQS-Projekt teilnimmt, liegt auf einer Höhe von 1020 Meter, während die meisten Schulen unterhalb von 500 m Höhe liegen (Abb. 4-8).

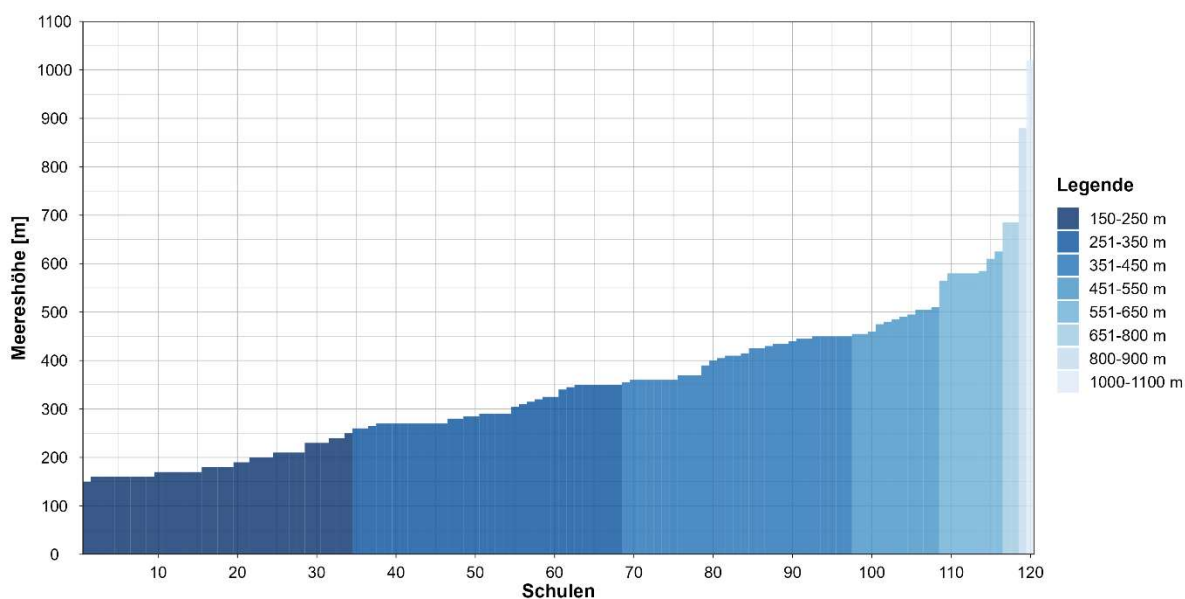


Abbildung 4-8 Höhenlage der Schule [m]

#### 4.2.1.7 Physische Merkmale von Klassenzimmern

Die Größe von Klassenzimmern in Quadratmetern [m<sup>2</sup>] (Abb. 4-9) kann aufgrund verschiedener Faktoren erheblich variieren, darunter die Art der Schule (Anhang C.1.1.3), die Anzahl der eingeschriebenen SuS und die spezifischen Gestaltungs- und Architekturrichtlinien, die in der Planungsphase befolgt wurden. Ebenso kann die Flächendichte, oder die Bodenfläche pro Person [m<sup>2</sup>/Person] (Abb. 4-9), in Schulen je nach mehreren Faktoren erheblich variieren, wie z. B. der Gestaltung der Schule, dem Alter der SuS, den spezifischen Aktivitäten, der Klassengröße und dem allgemeinen Platzbedarf in dieser bestimmten Schule, erheblich abweichen. In Bezug auf den Klassenraum richtet sich die Gestaltung von Bildungseinrichtungen oft nach spezifischen Richtlinien,

die den Mindestplatzbedarf pro SuS vorschreiben. So können beispielsweise Bildungsbehörden eine bestimmte Quadratmeterzahl pro SuS empfehlen, um eine angenehme und effektive Lernumgebung zu gewährleisten. Die Richtlinie des Österreichischen Instituts für Schul- und Sportstättenbau (ÖISS) vermeidet bewusst die Angabe eines spezifischen Flächenbedarfs (d.h. Quadratmeterverhältnisses pro SuS). Der Grund dafür ist, dass nur staatliche Schulen (Bundesschulen, d. h. alle Schularten außer Volksschulen, Mittelschulen und Sonderschulen) verpflichtet sind, die ÖISS-Richtlinie einzuhalten. Pflichtschulen (VS, MS, SS) werden von den Bundesländern verwaltet, die ihre eigenen spezifischen Regelungen haben können (Raab, 2024).

Daten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) zeigen, dass die durchschnittliche Klassengröße in der EU in den letzten zwei Jahrzehnten bei etwa 19 SuS lag, diese Zahl jedoch im Laufe der Zeit allmählich sinkt (OECD, 2024). In Österreich wurde die durchschnittliche Anzahl pro Klasse der Primarstufe im Jahr 2019 auf 18,28 geschätzt (Statista, 2019). Konkrete Zahlen zum Flächenbedarf österreichischer Klassenzimmer sind rar und können je nach Region variieren. EU-Daten deuten jedoch darauf hin, dass die typische durchschnittliche Fläche pro Person in Grundschulklassen zwischen  $2$  und  $3,1 \pm 0,3$  m<sup>2</sup>/Person liegt (Daniels, 2016).

Eine Reihe von Studien hat gezeigt, dass die Klassengröße (in Bezug auf die absolute Anzahl der SuS) einen erheblichen Einfluss sowohl auf die Bildungserfahrung der SuS als auch auf die von ihnen erzielten akademischen Ergebnisse hat (Konstantopoulos und Shen, 2023; Antoniou et al., 2024). Es gibt jedoch nur wenige Untersuchungen über die Auswirkungen der Belegungsdichte von Klassenzimmern auf die Gesundheit, das Wohlbefinden und die Leistungen der SuS.

Abbildung 4-9 bietet eine Zusammenfassung der wichtigsten Umfragedaten zu Klassenzimmern, darunter (in der oberen Reihe): die verglaste Fläche der Außenfassade [m<sup>2</sup>], die maximal zu öffnende Fläche [m<sup>2</sup>], die Grundfläche [m<sup>2</sup>], die Grundfläche pro Person basierend auf der tatsächlichen Raumbelugung<sup>15</sup> [m<sup>2</sup>/Person], die Fläche pro Person basierend auf der maximalen Raumbelugung [m<sup>2</sup>/Person], sowie die offenbare Fensterfläche pro Quadratmeter Grundfläche [%]. In der unteren Reihe: die tatsächliche Raumbelugung [Personen], die maximale Raumbelugung [Personen], das gesamte Raumvolumen [m<sup>3</sup>], das Volumen pro Person basierend auf der tatsächlichen Raumbelugung [m<sup>3</sup>/Person] und das Volumen pro Person basierend auf der maximalen Raumbelugung [m<sup>3</sup>/Person]. erheblich in Abhängigkeit vom Bundesland, der Schulart und weiteren Faktoren (Anhang C.1.1).

In der ImpAQS-Stichprobe variiert die Grundfläche der einzelnen Klassenzimmer zwischen 27 m<sup>2</sup> und 110 m<sup>2</sup> (arithmetisches Mittel 64 m<sup>2</sup>). Die Deckenhöhen der Räume variieren zwischen 2,10 m und 4,5 m (arithmetisches Mittel 3,24 m). Das interne Raumvolumen variiert zwischen 86 m<sup>3</sup> und 369 m<sup>3</sup> (arithmetisches Mittel 207 m<sup>3</sup>). Die vorgesehene Belegung (basierend auf Raumuntersuchungen und Plänen) variiert zwischen 8 und 49 Personen mit einem arithmetisches Mittel von 23. Die Belegung pro Fläche variiert zwischen 1,12 m<sup>2</sup>/Person und 8,33 m<sup>2</sup>/Person (arithmetisches Mittel 2,93 m<sup>2</sup>/Person) und einschließlich der Lehrkraft 1,08 m<sup>2</sup>/Person und 7,4 m<sup>2</sup>/Person (arithmetisches Mittel 2,79 m<sup>2</sup>/Person).

---

<sup>15</sup> Anmerkung: Die Zahlen für die tatsächliche Raumbelugung und die maximale Raumbelugung umfassen sowohl die SuS als auch die LuL.

Dementsprechend variiert das Raumvolumen zwischen 3,58 m<sup>3</sup>/Person und 27,54 m<sup>3</sup>/Person (arithmetisches Mittel 9,48 m<sup>3</sup>/Person) und einschließlich der Lehrkraft 3,44 m<sup>3</sup>/Person und 24,48 m<sup>3</sup>/Person (arithmetisches Mittel 9,04 m<sup>3</sup>/Person).

Es gibt nur wenige vergleichbare Daten, um diese Zahlen in einen Kontext zu setzen, abgesehen vom SINPHONIE-Projekt (Csobod, 2014). Am SINPHONIE-Projekt nahmen zwei Schulen in Österreich zusammen mit Schulen in Finnland, Großbritannien, Frankreich, Serbien und Griechenland teil. Insgesamt wurden 337 Klassenräume untersucht. Die arithmetische mittlere Bodenfläche betrug hier 55 m<sup>2</sup> (variierend zwischen 24–135 m<sup>2</sup>), mit einer arithmetischen mittleren Deckenhöhe von 3,3 m (variierend zwischen 2,5–5,3 m).

Im Vergleich zu den Klassenräumen des SINPHONIE-Projekts ist der arithmetische Mittelwert der Grundfläche im ImpAQS-Projekt 9 m<sup>2</sup> größer, obwohl die maximale Grundfläche 25 m<sup>2</sup> kleiner ist als der größte Raum im SINPHONIE-Projekt (135 m<sup>2</sup>). Der arithmetische Mittelwert der Deckenhöhe ist in beiden Projekten (SINPHONIE und ImpAQS) mit etwa 3,2–3,3 m sehr ähnlich.

Die durchschnittliche Fläche pro Person Belegungsdichte [m<sup>2</sup>/Person] im SINPHONIE-Projekt für die gesamte Bandbreite der Klassenräume betrug 2,44 (mit einem Maximum von 6,15 für eine italienische Schule und einem Minimum von 0,83 für eine albanische Schule) (Csobod et al., 2014). In der ImpAQS-Stichprobe liegt der arithmetische Mittelwert bei 2,93 m<sup>2</sup>/Person, was deutlich über dem europäischen Durchschnitt liegt, und der Höchstwert von 8,33 m<sup>2</sup>/Person liegt über dem höchsten Wert, der im SINPHONIE-Projekt gemeldet wurde.

In drei Klassenräumen (0,25 % der ImpAQS Stichprobe) lag die Fläche pro Person unter 1,5 m<sup>2</sup>/Person (Abbildung 4.9), was mit 8 % der Stichprobe des SINPHONIE-Projekts verglichen werden kann. Im Vergleich zu den von der American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) (2022) verwendeten Kriterien von 2,0 m<sup>2</sup>/Person steigt der Anteil der ImpAQS-Klassenzimmer, die unter dem empfohlenen ASHRAE-Wert liegen, auf 5,75 %, verglichen mit 23 %, die im SINPHONIE-Projekt angegeben wurden (Csobod, 2014).

Eine Zusammenfassung der Schulmerkmale (einschließlich Höhe, Schultyp, Lüftungssystem usw.) befindet sich in Anhang C.1.1.1.

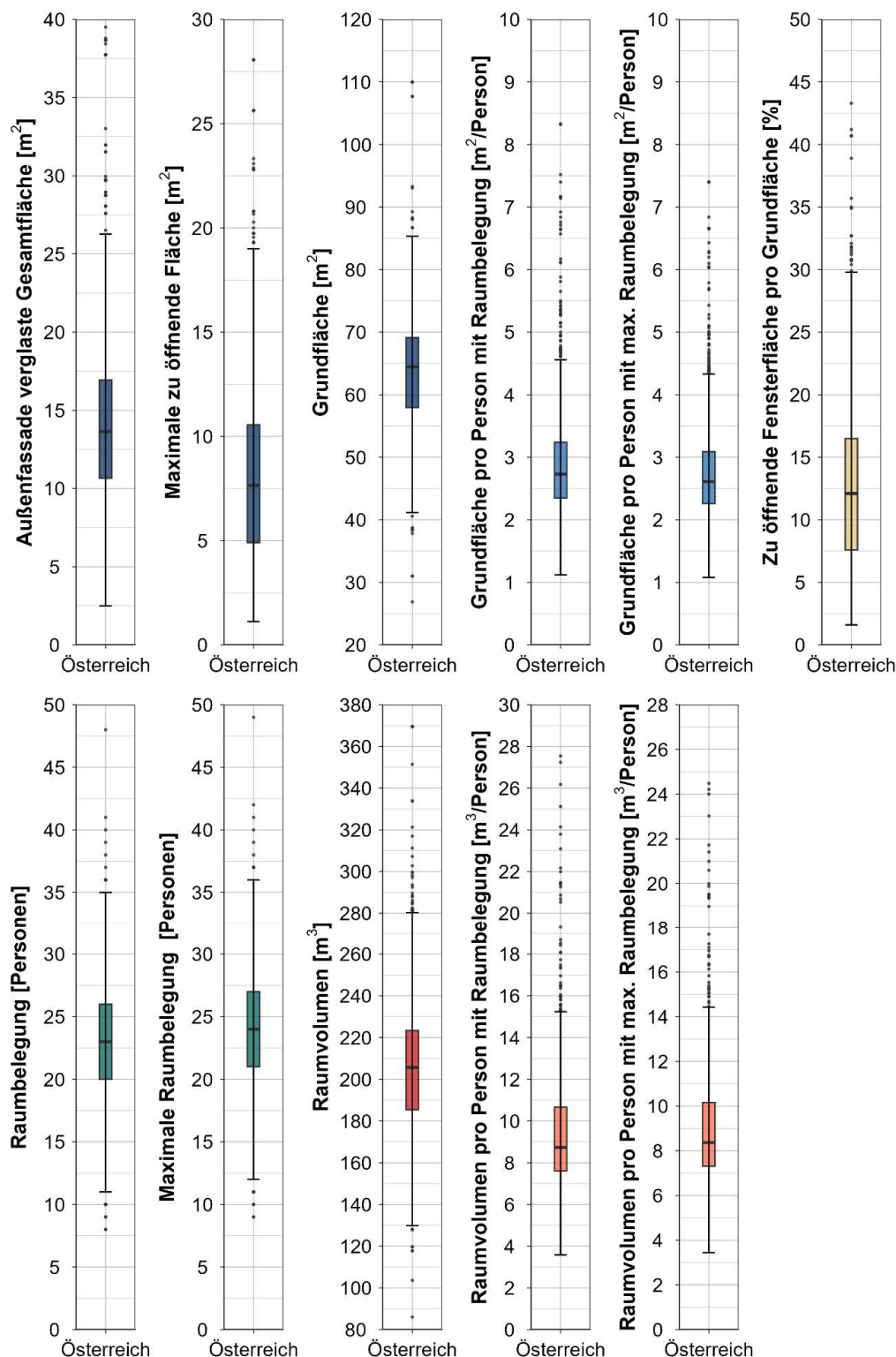


Abbildung 4-9 Allgemeine Merkmale aller ImpAQS-Klassenzimmer zusammengefasst für ganz Österreich. Einige dieser Informationen werden im Anhang C1.1 nach Region und Schultyp aufgeschlüsselt.

Abbildung 4-9 fasst die wichtigsten Merkmale österreichischer Klassenzimmer in Bezug auf Faktoren zusammen, welche die Innenraumluftqualität und die Außenluftvolumenströme beeinflussen könnten. Wobei Blau für Flächen steht (d. h. verglaste Fläche, Fensterfläche, Bodenfläche und Bodenfläche pro Person), Rot für Volumen (d. h. Raumvolumen und Raumvolumen pro Person), Grün



für Belegungsdaten (d. h. tatsächliche und maximale Personenzahl) und Gelb für Oberflächenverhältnisse (d. h. zu öffnende Fensterfläche pro Bodenfläche).

Die verglaste Außenfläche liegt in der Regel zwischen 10,5 und 17,0 m<sup>2</sup>, mit einer zu öffnenden Fläche von 5,0 bis 10,5 m<sup>2</sup>. Klassenzimmer haben in der Regel eine Grundfläche von 58 bis 69 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen von 185 bis 225 m<sup>3</sup>. Bei einer typischen Belegung von 22–27 Personen ergibt sich eine Grundfläche pro Person von 2,25–3,25 m<sup>2</sup> und ein Raumvolumen pro Person von 7,75–10,75 m<sup>3</sup>. Die maximal zu öffnenden Fensterflächen machen in der Regel 7,5–16,5 % der Grundfläche aus. Diese Bereiche erfassen zwar typische Fälle (ca. 50 % der Daten, zwischen dem 25. und 75. Perzentil), es gibt jedoch erhebliche Unterschiede zwischen den Klassenzimmern und Schulen in ganz Österreich, wie die langen Balken und Ausreißer in den Boxplots zeigen (Abb. 4-9).

#### 4.2.1.8 Fenstermerkmale in Klassenzimmern

Fenster spielen eine zentrale Rolle bei der natürlichen Belüftung, und in diesem Abschnitt werden die wichtigsten Parameter für die Fensterlüftung in Bezug auf die Umfragedaten der Klassenzimmer bewertet. Beispiele verschiedener Fensteröffnungsmöglichkeiten sind im Anhang C.1.1.10 inkludiert. Die maximal zu öffnende Fensterfläche [m<sup>2</sup>] als Funktion der behandelten Klassenzimmerbodenfläche [m<sup>2</sup>] ist ein wichtiger Parameter bei der Beurteilung der Angemessenheit der Fensteröffnungsflächen und wird in Abb. 4-10 als Prozentsatz [%] nach Region (und in Anhang C.1.1.7 nach Schultyp) dargestellt. Die Umfragedaten zeigen, dass die Mehrheit (83,6 %) der Klassenzimmer einseitig zu öffnende Fenster haben, während nur 11,8 % über zweiseitige Fenster verfügen. Die Hauptausrichtung der verglasten Fassade ist fast gleichmäßig in alle Richtungen verteilt (Abb. 4-12). Nach Verglasungstyp sind die meisten Fenster doppelt verglast (80,3 %), während offenbare Fenster hauptsächlich über einen Kipp- und Drehöffnungsmechanismus gesteuert werden (82,8 %).

Mehr als die Hälfte aller Klassenzimmer verfügt über zwei oder mehr verschiedene Fenstertypen, wobei 643 Klassenzimmer über Nebenfenster verfügen (54 % aller Klassenzimmer). Nur 94 (8 %) aller Hauptfenster haben Öffnungsbegrenzer, während 216 sekundäre Fenster mit Begrenzern ausgestattet sind (das entspricht fast 40 % aller sekundären Fenster und 18 % aller Fenster).

Das bedeutet, dass mehr als ein Viertel aller Klassenzimmer mindestens ein Fenster hat, das in seiner Öffnung eingeschränkt ist (Abb. 4-12). Diese Fensterbegrenzer schränken den maximalen Öffnungswinkel in der Regel auf etwa 10–15 Grad (41 %) ein, in einigen Fällen aber auch auf bis zu 45 Grad. Fast alle Fenster (97,8 %) müssen manuell geöffnet werden. Mehr als 50 % aller Klassenzimmer verfügen über ein zweites Fenster, das sich in einigen Fällen nicht öffnen lässt (15,2 %). Sekundärfenster sind außerdem oft durch Fensterhalter eingeschränkt, die eine Öffnung von 10-45 Grad ermöglichen. Die Mehrheit der Fenster hat Aluminiumrahmen (40,3 %), gefolgt von Holzrahmen (30,8 %). Fast die Hälfte (46,3 %) hat keine Innenbeschattung, während 38,7 % Vorhänge haben.

Mehr als ein Viertel (26 %) aller Schulgebäude hat auch keine Außenbeschattung, während 39,5 % Außenrollläden und 16,9 % horizontale oder andere Arten von beweglichen Beschattungen haben, während ein kleiner Prozentsatz (1,8 %) über eine unbewegliche Beschattung verfügt (Abb. 4-11). Weitere Informationen zu häufig vorkommenden Fenstern befinden sich im Anhang C.1.1.9.

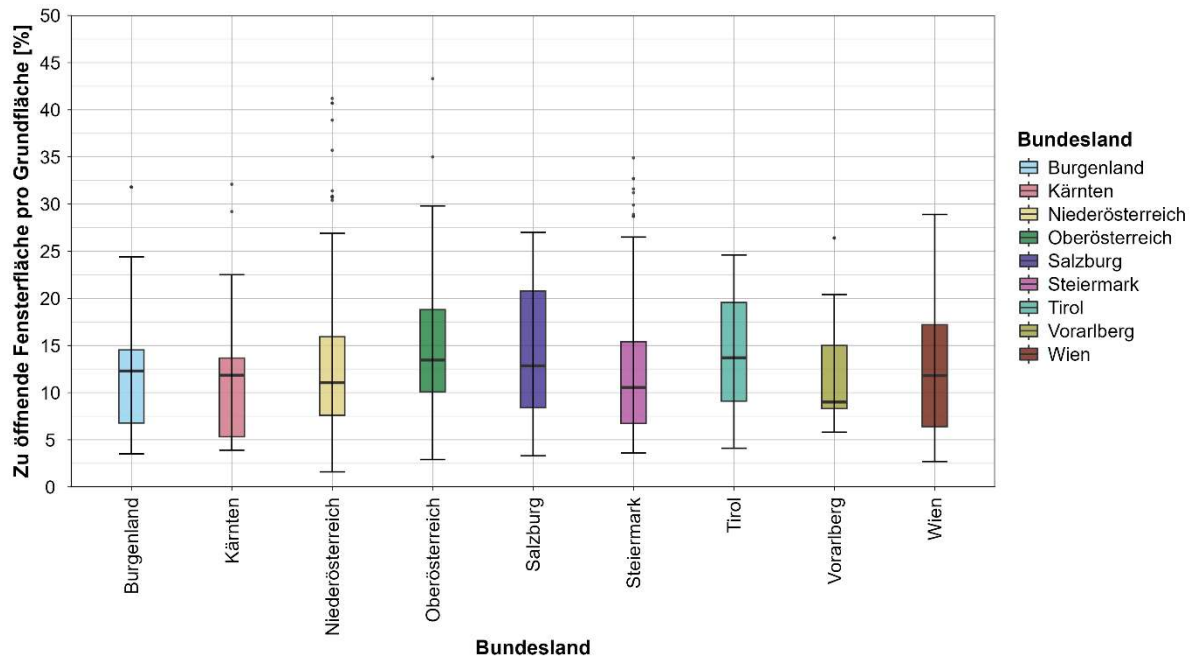
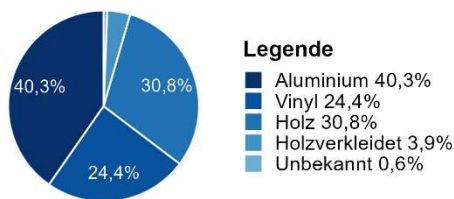
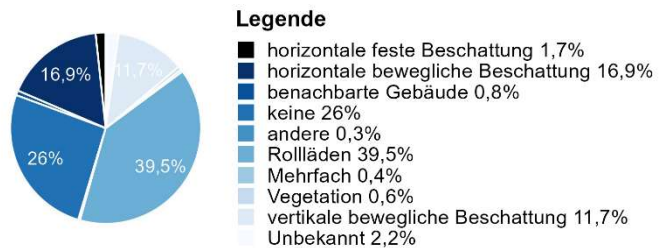


Abbildung 4-10 Überblick über den Prozentsatz der maximal zu öffnenden Fensterfläche als Funktion der Bodenfläche des Klassenzimmers [%] nach Region

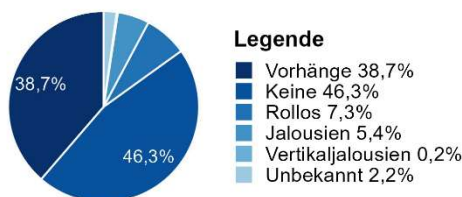
**Fensterrahmen**



**Externe Verschattung**



**Interne Verschattung**

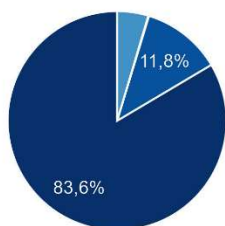


**Fensterpositionen in der Wand**

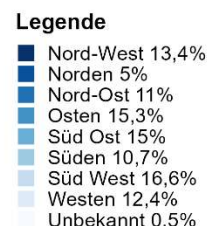
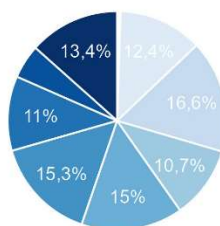


Abbildung 4-11 Tortendiagramme, die den Typ des Fensterrahmens, Außen- und Innenbeschattung und Fensterposition für alle Klassenräume zusammenfassen

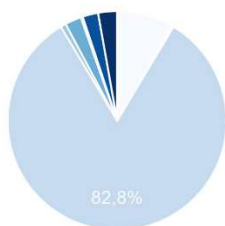
### Fensterflächen



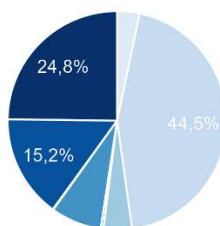
### Orientierung



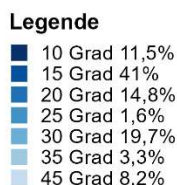
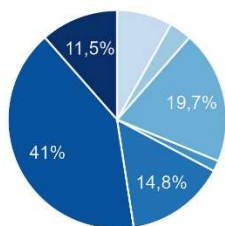
### Typ des Hauptfensters



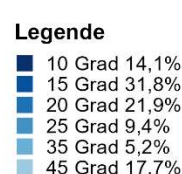
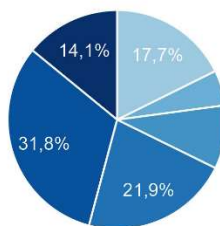
### Typ des Sekundärfensters



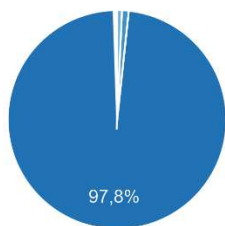
### Begrenzung des Hauptfensters



### Begrenzung des Sekundärfensters



### Fensteröffnung



### Verglasung

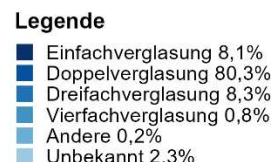
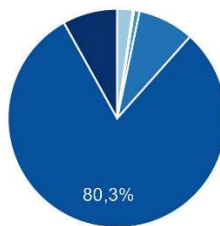


Abbildung 4-12 Tortendiagramme, die die wichtigsten Fenster-Merkmale aller Klassenräume zusammenfassen, einschließlich Fensterausrichtung, Art der Öffnungsbegrenzung, Haupt- und Nebenfensterarten sowie Verglasungsart.

## 4.2.2 Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)-Konzentrationen in österreichischen Schulen

Der Hauptzweck dieser Analyse besteht darin, zu beurteilen, ob österreichische Klassenzimmer den bestehenden internationalen, europäischen und österreichischen Normen und Richtlinien entsprechen. Die in EN16798-1 (CEN, 2019) (Tab. 2-6), ISO 16000-41 (ISO, 2023) (Tab. 2-12) und durch das österreichische BMK-Positionspapier (BMK, 2024d), wie in Tab. 2-13 zusammengefasst, gelten als die relevantesten im Zusammenhang mit der Bewertung der Leistung österreichischer Klassenzimmer.

Die Kohlendioxidkonzentration (CO<sub>2</sub>) wurde in 1200 österreichischen Klassenzimmern während des Untersuchungszeitraums, d. h. im Schuljahr 2023–24, in 2-Minuten-Intervallen aufgezeichnet (Abschnitt 3.2, Anhang C.1.2.1). Die Datenanalyse konzentrierte sich auf die belegten Schulstunden von 8:00 bis 14:00 Uhr, da dies als Kernzeit gilt, in der österreichische SuS in der Regel im Klassenzimmer anwesend sind (RIS, 2024a) (Abschnitt 3.4.2). Um unbesetzte/teilbesetzte Klassenzimmer (aufgrund nicht gemeldeter Faktoren wie Exkursionen, Schulautonome Tagen und aus anderen unbekanntem Gründen) zu berücksichtigen, wurden Klassenzimmer mit einer stündlichen durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 460 ppm oder weniger von der Analyse ausgeschlossen (nach dem Ansatz von Wood et al. (2024)). Da der „Schultag“ (d. h. 6–8 Stunden) als Bewertungszeitraum verwendet wird, wurden die 2-Minuten-Intervalldaten gemäß dem in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Verfahren zu Stundenwerten und dann zu Tageswerten für den Kernzeitraum (d. h. 8:00–14:00 Uhr) aggregiert. Die arithmetischen Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Werte, die diesem Zeitraum entsprechen, werden als „tägliche mittlere“ CO<sub>2</sub>-Konzentrationen bezeichnet (Englisch: 'daily mean' CO<sub>2</sub>).

Die folgenden Diagramme zeigen saisonale Trends der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern zusammen mit zwei Grenzwerten. Der obere Grenzwert bezeichnet die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen bei oder unter 1000 ppm (gemäß ISO 16000-41, EN16798-1 und Raumklasse A der österreichischen BMK-Richtlinien) und ist als **gestrichelte rote Linie** dargestellt. Während der untere Schwellenwert die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen bei oder unter 800 ppm (gemäß dem österreichischen BMK-Zielwert der Raumklasse A+ und dem von REHVA empfohlenen „gesundheitsbasierten“ Schwellenwert) angibt und als **gestrichelte rosa Linie** dargestellt ist. Die Diagramme werden von Tabellen begleitet, die zusammenfassende Statistiken, Prozentsätze der Schwellenwertüberschreitungen und den Interquartilsabstand (IQR) enthalten. Der IQR, ein gängiges Maß für die Datenstreuung, wird als Differenz zwischen dem 75. (Q3) und dem 25. (Q2) Perzentil berechnet. Anhang C.1.2 enthält zusätzliche saisonale und monatliche Analysen der in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse.

#### 4.2.2.1 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern

Abb. 4-13 veranschaulicht die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern während des gesamten Schuljahres 2023-24. Die Grafik hebt mehrere wichtige Trends hervor, wie z. B. den Mittelwert, den Median und die Werte bei verschiedenen Perzentilen (d. h. 5., 25., 75. und 95. Perzentil) der Verteilung, zusammen mit den minimalen und maximalen Trendlinien. Der grau schattierte Bereich zwischen der 25. und der 75. Perzentillinie stellt den Bereich dar, in den 50 % der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werte fallen, während der hellgraue Bereich zwischen der 5. und der 95. Perzentillinie 90 % der Daten abdeckt. Die Trendlinien und grauen Bänder sind während der langen Ferienzeiten unterbrochen, einschließlich der Herbst-, Sommer- und Osterferien. Die Grafik aggregiert Daten sowohl von Kontroll- als auch von Testsensoren. Ein vorläufiger Vergleich von Klassenzimmern mit Kontroll- und Testsensoren findet sich in Abschnitt 4.2.2.3, während eine detailliertere Analyse unter Einbeziehung der aufeinander abgestimmten Kontroll-Test-Paare (nach Anwendung strengerer Datenbereinigungs- und Analyseverfahren, Anhang B.2) in Abschnitt 4.4 zu finden ist. Boxplots der jährlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in jeder der 120 Schulen sind in Anhang C.1.2.1 zu finden.

Während des gesamten Schuljahres 2023–2024 lagen die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern im Allgemeinen über dem Zielwert der BMK Klasse A+ von 800 ppm, außer kurzzeitig während der warmen Sommermonate (Abb. 4-13). Zu Beginn des Schuljahres (bis

Mitte Oktober 2023) und erneut in den letzten Monaten des Schuljahres (von Mai bis Juli 2024) blieben die österreichischen Klassenzimmer innerhalb des Grenzwerts der Klasse A von 1000 ppm, wie der mittlere Trend (durchgezogene rote Linie) zeigt. In diesen wärmeren Monaten lagen die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Regel unter dem Grenzwert, wobei zu erkennen ist, dass die Mehrheit (75 %) der Daten in der Regel unter dem Grenzwert liegt. In den kälteren Monaten (November 2023 bis April 2024) lagen jedoch nur 25 % oder weniger der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen innerhalb des 1000-ppm- Konformitätsgrenzwerts (Abb. 4-13).

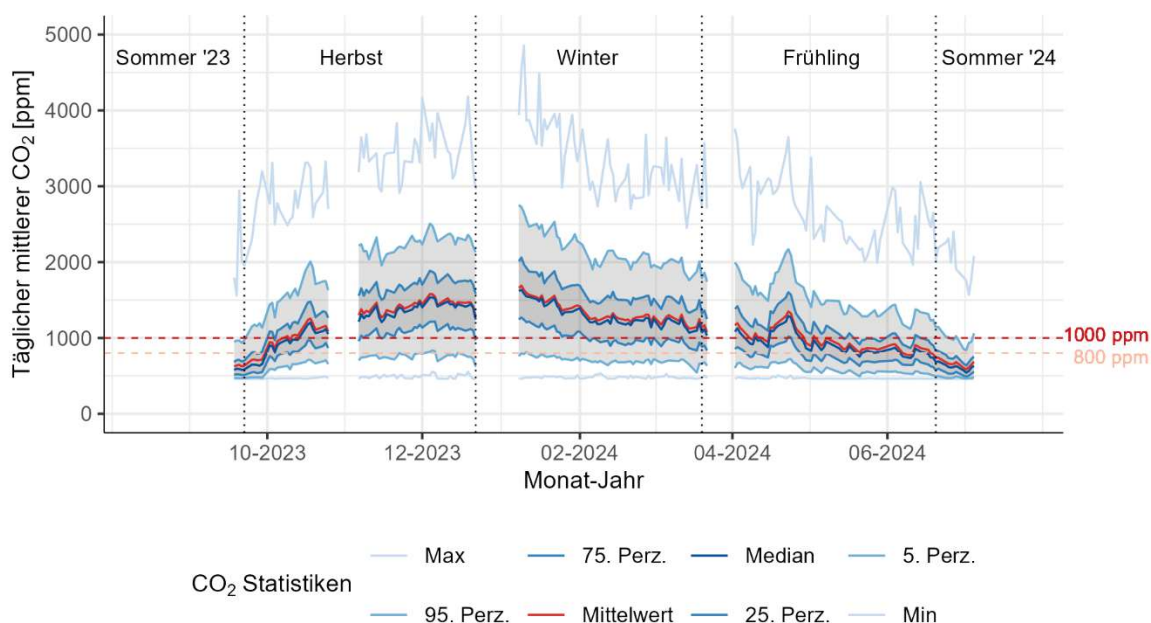


Abbildung 4-13 Überblick über die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern mit Hervorhebung der wichtigsten Trends sowie des CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielschwellenwerts (800 ppm, gestrichelte rosa Linie).

#### 4.2.2.2 CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern bei Monat

Die tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern variierte je nach Monat erheblich<sup>16,17</sup> (Abb. 4-14, Tab. 4-6). Dies ist in natürlich belüfteten Räumen zu erwarten, in denen die Nutzung von Fenstern zur Belüftung in erster Linie von Überlegungen zum thermischen Komfort beeinflusst wird (Hawila et al., 2023). In geringerem Maße zeigen auch mechanisch belüftete Klassenzimmer einen saisonalen und monatlichen Trend (Abb. 4-17). Dies spiegelt die Tatsache wider, dass die natürliche Belüftung häufig zur Ergänzung der mechanischen Belüftung eingesetzt wird, insbesondere in den wärmeren Sommermonaten.

Die monatlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen in Klassenzimmern erreichen in der Regel während den kältesten Monaten Dezember und Januar ihren Höhepunkt, wobei 83 % der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werte den Schwellenwert von 1000 ppm überschreiten (93 % über 800 ppm). Die

<sup>16</sup> Hinweis: Bei der Interpretation der Daten für die Monate September und Juli ist Vorsicht geboten, da sie nur zwei Wochen bzw. eine Woche abdecken.

<sup>17</sup> Die saisonale Variation der CO<sub>2</sub> Konzentration befindet sich im Anhang C.1.2.2

maximal gemessene tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Januar betrug 4856 ppm, was fast dem Fünffachen des empfohlenen Konformitätsgrenzwerts und über dem Sechsfachen des Zielgrenzwerts entspricht.

Umgekehrt sind die CO<sub>2</sub>-Werte in den wärmeren Sommermonaten September, Juni und Juli (d. h. zu Beginn des Schuljahres und vor den Sommerferien) viel niedriger. In der zweiten Septemberhälfte überschreiten nur 7 % der täglichen Durchschnittswerte den Grenzwert von 1000 ppm (19 % über 800 ppm). Im Juni überschreiten nur 17 % der täglichen Durchschnittswerte 1000 ppm (40 % über 800 ppm), während in der ersten Juliwoche nur 4 % der täglichen Werte 1000 ppm (12 % über 800 ppm) überschreiten.

Der Mittelwert der täglichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über das Jahr hinweg entspricht weitgehend den monatlichen Werten für Oktober und April (Abb. 4-14), wobei die Mehrheit (55 %) der jährlichen Tageswerte den Schwellenwert von 1000 ppm (74 % über 800 ppm) überschreitet. Eine zusätzliche Analyse der saisonalen Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen findet sich in Anhang C.1.2.2.

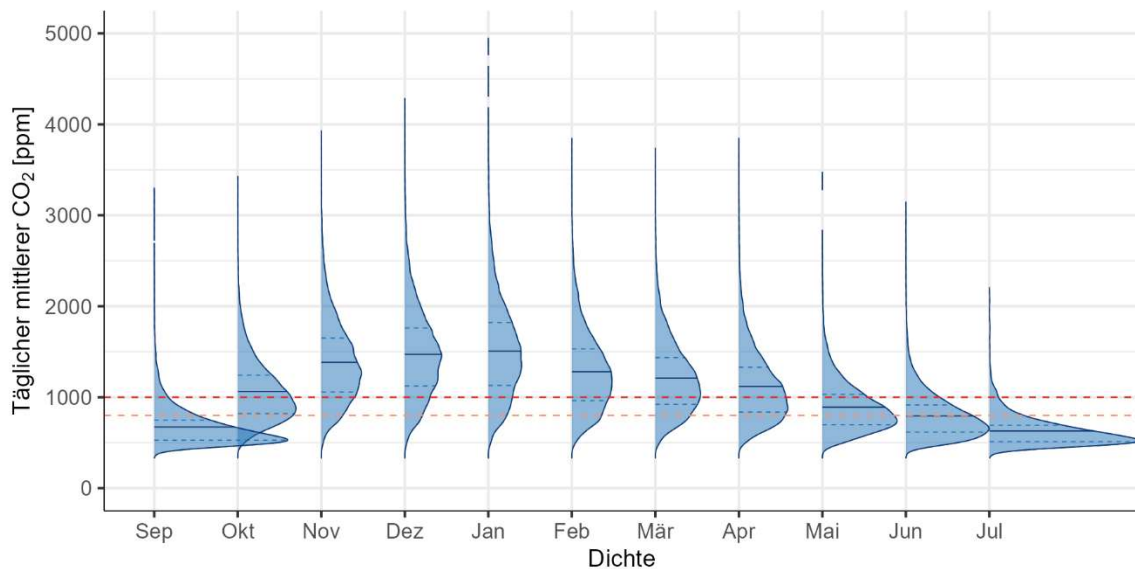


Abbildung 4-14 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern (NV und MV), einschließlich des CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielschwellenwerts (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75-Perzentil markieren.

Tabelle 4-6 Monatliche statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern (NV und MV), einschließlich der Häufigkeit von Überschreitungen des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts in Innenräumen in Bezug auf die Grenzwerte von 1000 ppm und 800 ppm. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf tägliche Überschreitungen des Mittelwerts. Beispielsweise beträgt die höchste beobachtete tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Januar 4856 ppm und 83 % der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werte liegen über 1000 ppm.

Monat	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
			25.	50.	75.			>1000 ppm [%]	>800 ppm [%]
Sep	460	3197	527	613	749	221	673	7	19
Okt	462	3326	820	1005	1242	422	1063	51	78
Nov	462	3833	1057	1329	1650	593	1384	80	93
Dez	460	4184	1124	1436	1761	638	1472	83	93
Jan	463	4856	1129	1461	1821	692	1508	83	93
Feb	461	3748	962	1231	1532	569	1280	72	88
Mär	461	3641	921	1157	1436	514	1209	67	86
Apr	461	3759	837	1056	1330	493	1119	56	79
Mai	460	3379	698	840	1031	332	891	28	57
Jun	460	3055	616	743	915	299	794	17	40
Jul	460	2084	512	587	692	180	629	4	12
Jahr	460	4856	785	1058	1417	633	1145	55	74

Die aus stündlichen Daten abgeleiteten Prozentsätze der Schwellenwertüberschreitungen (Tab. 4-7) sind im Allgemeinen niedriger als die aus täglichen Daten berechneten (Tab. 4-6), insbesondere in den Monaten November bis April. Dies lässt sich dadurch erklären, dass stündliche Daten stärker rechtsverzerrt sind als tägliche Daten. Dies führt zu stündlichen Mittelwert-Maxima, die deutlich höher sind als die täglichen Mittelwert-Maxima, während umgekehrt die arithmetischen Monatsmittel (berechnet auf Basis stündlicher Daten) niedriger ausfallen als jene, die auf täglichen Werten basieren (Tab. 4-6). Beispielsweise beträgt die höchste beobachtete stündliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Januar 6905 ppm (vgl. den höchsten täglichen Mittelwert von 4856 ppm), was nahezu dem Siebenfachen des empfohlenen Konformitätsgrenzwerts und über dem Achtfachen des Zielgrenzwerts entspricht.

Dies führt zu stündlichen Mittelwerten, die deutlich höher sind als die täglichen Mittelwerte, was bedeutet, dass es vergleichsweise weniger Beobachtungen im rechten Bereich der monatlichen Verteilungen gibt.

Tabelle 4-7 Monatliche statistische Zusammenfassung der stündlichen Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, einschließlich der Häufigkeit von Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte in Innenräumen in Bezug auf die Schwellenwerte von 1000 ppm und 800 ppm. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf Überschreitungen der stündlichen Mittelwerte. Beispielsweise beträgt die maximal beobachtete stündliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Januar 6905 ppm und 75 % der stündlichen Mittelwerte der CO<sub>2</sub>-Werte liegen über 1000 ppm.

Monat	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
			25.	50.	75.			>1000 ppm [%]	>800 ppm [%]
Sep	460	5422	525	615	765	240	686	9	21
Okt	460	5769	728	958	1287	559	1067	46	67
Nov	460	6767	936	1271	1720	784	1386	70	85
Dez	460	6176	996	1364	1840	844	1474	75	87
Jan	460	6905	1003	1396	1888	885	1510	75	87
Feb	460	5251	856	1172	1595	739	1284	63	80
Mär	460	4986	819	1103	1497	678	1213	59	77
Apr	460	5830	748	1005	1377	629	1124	50	70
Mai	460	5296	629	801	1064	435	898	30	50
Jun	460	5216	569	710	939	370	805	21	38
Jul	460	3031	501	571	706	204	643	6	16
Year	460	6905	720	1013	1448	729	1158	51	67

#### 4.2.2.3 CO<sub>2</sub>-Konzentration gemäß Raumklassifizierung (Test und Kontrolle)

Die von den Kontrollsensoren (mit deaktivierten Displays) in den Klassenzimmern aufgezeichneten täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind tendenziell höher als die von den Testsensoren (mit aktiven Displays) in den Klassenzimmern gemessenen, insbesondere in den kälteren Monaten (Abb. 4-15). Die saisonalen Verteilungen<sup>18</sup> (Abb. 4-16 und Tab. 4-8) zeigen moderate Unterschiede zwischen den Daten der Kontroll- und Testsensoren, wobei die Häufigkeit der Schwellenwertüberschreitungen nur um wenige Prozentpunkte voneinander abweicht (Tab. 4-8). Diese Unterschiede werden auf monatlicher Ebene deutlicher, wo die Schwankung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werte zwischen Kontroll- und Testsensoren in den kälteren Monaten offensichtlicher ist (Anhang C.1.2.3, Tab. A-7).

Dieser Vergleich konzentriert sich ausschließlich auf die Gesamtunterschiede zwischen den Kontroll- und Testklassenzimmern, ohne andere potenziell einflussreiche Variablen wie die Art der Belüftung oder die Zuordnung von Kontroll- und Testsensoren zu berücksichtigen. Eine genauere Analyse der Zuordnung von Kontroll- und Testsensoren, bei der diese zusammenwirkenden Faktoren berücksichtigt werden, wird in Abschnitt 4.4 vorgestellt.

<sup>18</sup> Hinweis: Bei der Interpretation der Sommerdaten ist Vorsicht geboten, da sowohl der Sommer 2023 als auch der Sommer 2024 nur eine Woche bzw. zwei Wochen an Daten repräsentieren.



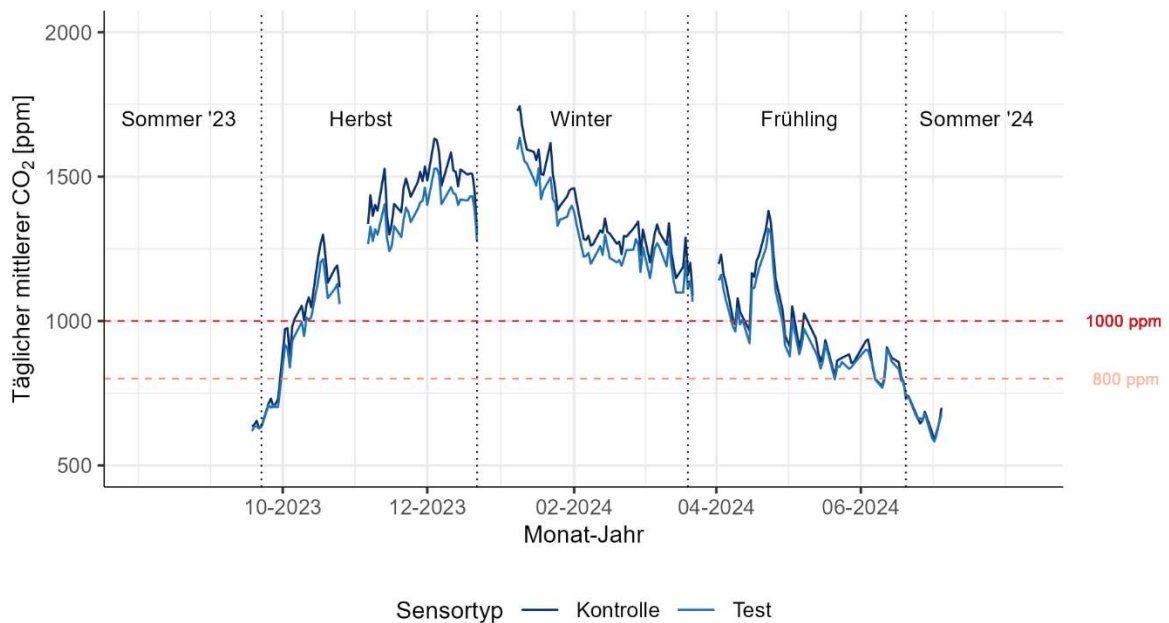


Abbildung 4-15 Überblick über die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern, kategorisiert nach Sensortyp, wobei die wichtigsten Trends in Bezug auf den CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert in Innenräumen (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und das Ziel (Schwellenwert 800 ppm, gestrichelte rosa Linie) hervorgehoben werden.

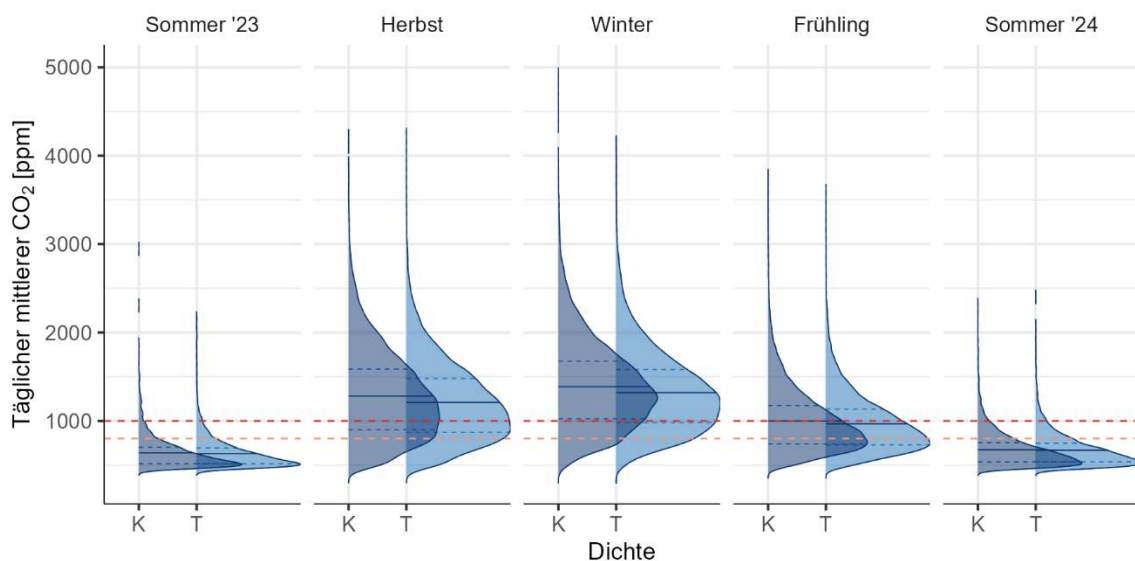


Abbildung 4-16 Saisonale Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Raumtyp (K = Kontrolle, T = Test), einschließlich CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und Zielschwellenwert (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75-Perzentil markieren.

Eine Zusammenfassung der saisonalen und jährlichen täglichen mittleren Überschreitungen des 1000 ppm-Einhaltungsgrenzwerts und des 800-ppm-Zielgrenzwerts ist in Tabelle 4-8 enthalten. Im Jahresverlauf überschreiten 57 % der Klassenräume mit einem Kontrollsensor die 1000 ppm im Vergleich zu 53 % der Klassenräume mit einem sichtbaren Testsensor. Bei dem niedrigeren Zielgrenzwert von 800 ppm ist der Unterschied zwischen den beiden Gruppen vernachlässigbar (1 %).

Wie bereits erwähnt, werden bei diesen Vergleichen jedoch keine potenziellen Störfaktoren berücksichtigt, die in Abschnitt 4.4 untersucht werden.

**Tabelle 4-8 Saisonale statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Raumtyp (K = Kontrolle, T = Test), einschließlich der Häufigkeit von CO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen in Innenräumen im Verhältnis zu den Grenzwerten von 1000 ppm und 800 ppm. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf tägliche mittlere Überschreitungen.**

Jahreszeit	Raumtyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm [%]	> 800 [%]
Sommer '23	K	460	2947	516	586	702	186	638	5	13
	T	461	2158	516	585	694	178	630	3	12
Herbst	K	460	4165	901	1215	1586	685	1281	67	83
	T	460	4184	871	1144	1480	609	1210	63	81
Winter	K	461	4856	1024	1327	1676	652	1388	77	90
	T	463	4084	981	1261	1582	600	1320	73	89
Frühling	K	460	3759	740	920	1174	434	999	41	66
	T	460	3589	729	901	1133	405	967	38	64
Sommer '24	K	460	2313	536	625	753	217	673	6	19
	T	460	2401	537	622	747	210	668	6	18
Jahr	K	460	4856	792	1082	1461	669	1172	57	74
	T	460	4184	779	1036	1377	598	1119	53	73

#### 4.2.2.4 CO<sub>2</sub>-Konzentration nach Art des Lüftungssystems

Die Analyse der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenzimmer in Abhängigkeit vom Typ des Lüftungssystems (natürlich oder mechanisch) trägt dazu bei, die Vorteile der mechanischen gegenüber der natürlichen Belüftung in einem „realen“ Kontext besser zu verstehen. Dies ist ein wichtiger Aspekt, da zahlreiche Studien über die „Leistungslücke“ zwischen der Entwurfsspezifikation und der tatsächlichen Leistung mechanischer Lüftungssysteme vor Ort berichtet haben (Dorer und Breer, 1998; Wouters et al., 2000; McLeod und Swainson, 2017). Darüber hinaus weisen natürliche Lüftungssysteme oft deutliche Anzeichen für saisonale Schwankungen in ihrer Leistung auf; dies gilt jedoch in geringerem Maße auch für mechanische Systeme.

Die vergleichende Analyse der Lüftungsarten (Abb. 4-17, Anhang C.1.2.4) zeigt, dass Schulen mit natürlicher Lüftung (NV) während des gesamten Schuljahres höhere tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufweisen als Schulen mit mechanischer Lüftung (MV), außer in der letzten Schulwoche im Juli, in der die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Allgemeinen sehr niedrig sind. In mechanisch belüfteten Klassenzimmern wird der tägliche mittlere Konformitätsgrenzwert von 1000 ppm in 21 % der Zeit überschritten, verglichen mit 59 % der Zeit in NV-Klassenzimmern (Tab. 4-9). Die größten Unterschiede zwischen den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den mechanisch belüfteten Räumen und den nicht mechanisch belüfteten Räumen sind im Winter zu beobachten (Abb. 4-18 und Tab. 4-9), wo 28 % der MV-Werte den Schwellenwert von 1000 ppm überschreiten, verglichen mit 80 % der NV-Werte. Umgekehrt ist der Unterschied zwischen den Klassenräumen mit mechanischer und natürlicher Belüftung in den Sommermonaten fast unbedeutend, da nur 1 % der Klassenräume mit mechanischer Belüftung den Schwellenwert von 1000 ppm überschreiten, verglichen mit 6 % der Klassenräume mit natürlicher Belüftung (im Sommer 2024). Weitere Informationen über die monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind in Anhang C.1.2.4 zu finden.

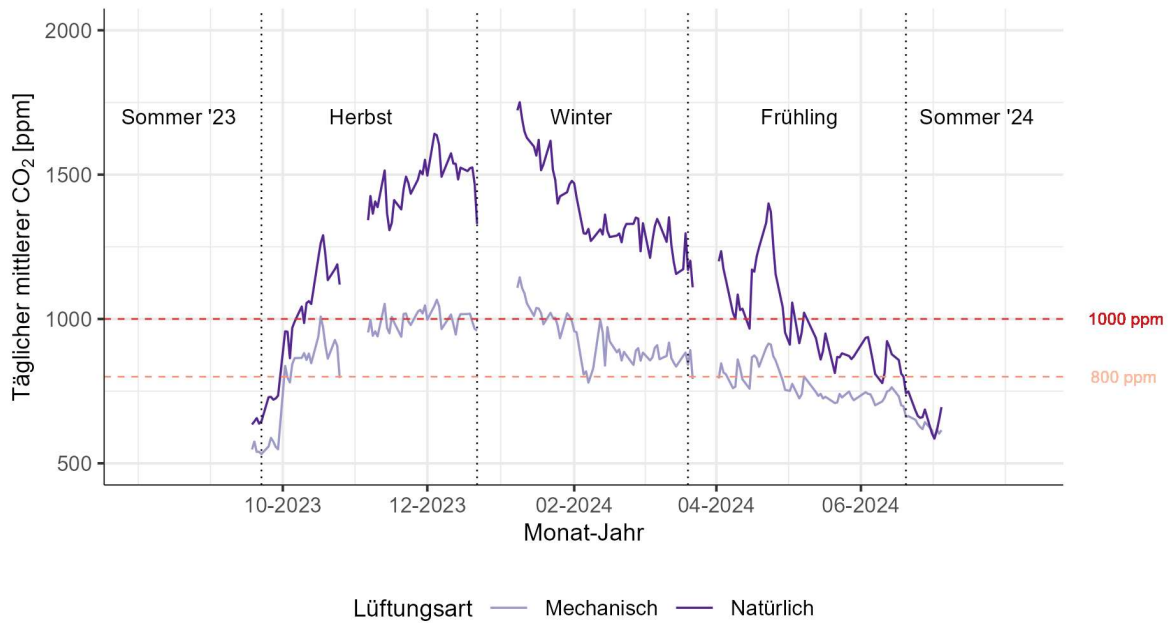


Abbildung 4-17 Überblick über die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern, kategorisiert nach Lüftungsart, mit Hervorhebung der wichtigsten Trends sowie des CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielschwellenwert (800 ppm, gestrichelte rosa Linie).

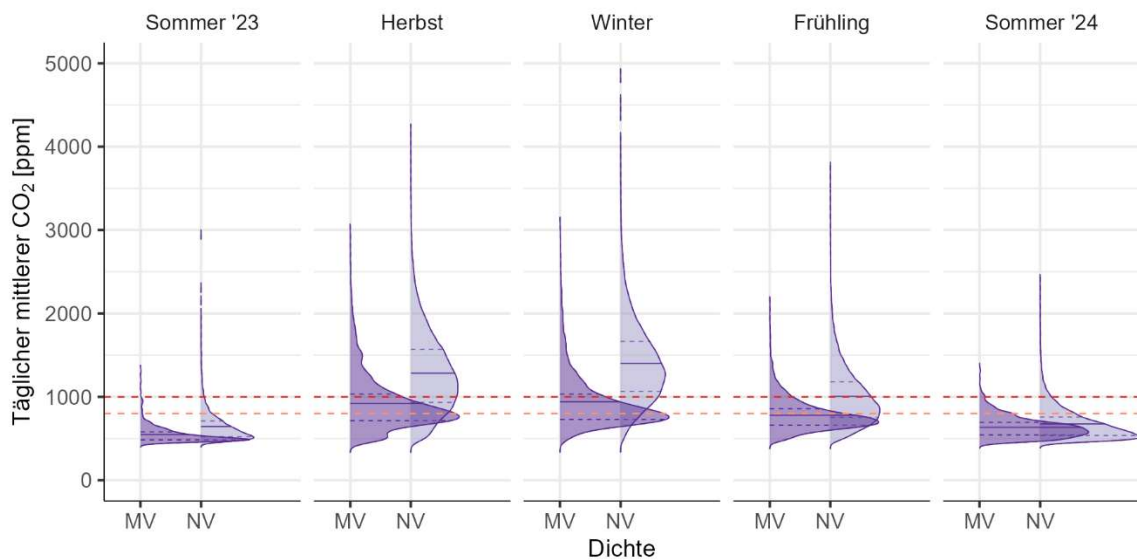


Abbildung 4-18 Saisonale Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Lüftungsart, einschließlich CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und Zielschwellenwert (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil markieren.

Eine statistische Zusammenfassung, in der die saisonalen und jährlichen Unterschiede zwischen den Klassenräumen mit mechanischer und natürlicher Lüftung bei verschiedenen Perzentilen der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion verglichen werden, einschließlich der täglichen mittleren Minimal- und Maximalwerte, ist in Tabelle 4-9 zusammengefasst. Insgesamt zeigt sich, dass mechanische

Lüftungssysteme deutlich besser abschneiden als natürliche Lüftungssysteme und dass der Nutzen bezogen auf die Verringerung der Häufigkeit hoher CO<sub>2</sub>-Werte im Winter am deutlichsten ist.

**Tabelle 4-9 Saisonale Statistik der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Lüftungsart, einschließlich der Häufigkeit von Überschreitungen des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts in Innenräumen in Bezug auf die Grenzwerte von 1000 ppm und 800 ppm. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf tägliche mittlere Überschreitungen.**

Jahreszeit	Lüftungsart	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm [%]	>800 ppm [%]
Sommer '23	MV	460	1310	484	513	579	96	547	1 %	3 %
	NV	460	2947	523	596	710	186	644	4 %	14 %
Herbst	MV	460	2950	714	837	1032	318	920	28 %	57 %
	NV	460	4184	933	1224	1568	635	1283	69 %	85 %
Winter	MV	463	3036	729	841	1032	303	940	28 %	58 %
	NV	461	4856	1065	1340	1665	600	1400	80 %	93 %
Frühling	MV	460	2121	659	740	856	198	779	11 %	34 %
	NV	460	3759	754	938	1182	428	1006	43 %	69 %
Sommer '24	MV	460	1316	542	612	694	151	634	1 %	11 %
	NV	460	2401	536	625	757	221	675	6 %	20 %
Jahr	MV	460	3036	676	784	950	275	856	21 %	46 %
	NV	460	4856	819	1103	1456	637	1178	59 %	77 %

Die Einhaltung der Schwellenwerte (z. B. 800 ppm und 1000 ppm) kann auch auf individueller Schulebene betrachtet werden. In den folgenden Tabellen wird der Prozentsatz der Schulen aufgeführt, die die jeweiligen Schwellenwerte für den Tagesmittelwert während des gesamten Schuljahres (Tab. 4-10) und auch während der Winterperiode (Tab. 4-11) einhalten. Es ist ersichtlich, dass 82 % der mechanisch belüfteten Schulen es schaffen, einen mittleren täglichen CO<sub>2</sub>-Wert von unter 1000 ppm über das gesamte Jahr hinweg einzuhalten, während weniger als 18 % der natürlich belüfteten Schulen diesen Wert unterschreiten (Tab. 4-10).

Im Winter können zwar 82 % der mechanisch belüfteten Schulen den Grenzwert von 1000 ppm einhalten, aber weniger als 5 % der natürlich belüfteten Schulen sind dazu in der Lage. Darüber hinaus liegt in fast einem Drittel (32,1 %) der natürlich belüfteten Schulen der tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Wert im Winter über 1500 ppm (Tab. 4-11). In Bezug auf das „gesundheitsbasierte“ Ziel von 800 ppm können nur 27 % der mechanisch belüfteten Schulen dieses Ziel während des gesamten Winters einhalten, während weniger als 1 % der natürlich belüfteten Schulen dazu in der Lage sind.

Tabelle 4-10 Prozentsatz der Schulen, in denen die tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration das ganze Jahr über einen bestimmten Schwellenwert einhält

Lüftungsart	CO <sub>2</sub> < 800 ppm [%]	CO <sub>2</sub> < 1000 ppm [%]	1000 < CO <sub>2</sub> < 1500 ppm [%]	CO <sub>2</sub> > 1500 ppm [%]	CO <sub>2</sub> > 2000 ppm [%]
Mechanische Lüftung	63,6	81,8	18,2	0,0	0,0
Natürliche Lüftung	2,8	17,9	79,2	2,8	0,0
Beide Lüftungsvarianten	20,0	60,0	40,0	0,0	0,0
Alle Varianten	9,0	25,4	72,1	2,5	0,0

Tabelle 4-11 Prozentsatz der Schulen, in denen die tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration einen bestimmten Schwellenwert einhält, Winterperiode

Lüftungsart	CO <sub>2</sub> < 800 ppm [%]	CO <sub>2</sub> < 1000 ppm [%]	1000 < CO <sub>2</sub> < 1500 ppm [%]	CO <sub>2</sub> > 1500 ppm [%]	CO <sub>2</sub> > 2000 ppm [%]
Mechanische Lüftung	27,3	81,8	18,2	0,0	0,0
Natürliche Lüftung	0,9	4,7	63,2	32,1	0,9
Beide Lüftungsvarianten	0,0	20,0	60,0	20,0	0,0
Alle Varianten	3,3	12,3	59,0	28,7	0,8

#### 4.2.2.5 CO<sub>2</sub>-Konzentration nach Schultyp

Zwischen den mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen verschiedener Schultypen sind deutliche Unterschiede zu erkennen (Abb. 4-19). Diese Unterschiede sind in der Wintersaison am stärksten ausgeprägt und im Sommer deutlich geringer ausgeprägt. Sonderschulen (SS)<sup>19</sup> wiesen im Vergleich zu allen anderen Schultypen signifikant niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf (Abb. 4-19 und 4-20 sowie Anhang C.1.2.5).

Die täglichen Durchschnittswerte in Sonderschulen überschritten selten den Schwellenwert von 1000 ppm, wobei die höchste Überschreitungshäufigkeit (mit 18 %) in den Wintermonaten auftritt. Obwohl 43 % der Tagesmittelwerte den Schwellenwert von 800 ppm überschreiten, ist dies deutlich weniger als bei allen anderen natürlich belüfteten Schultypen. Dieses Ergebnis spiegelt wahrscheinlich zum Teil die für diesen Schultyp typische geringere Belegungsdichte wider (Abb. 4-9). Volksschulen (VS) meldeten auch viel niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen als andere Schularten (mit 61 % Überschreitung des Grenzwerts von 1000 ppm im Winter), was jedoch auf die geringeren ausgeatmeten CO<sub>2</sub>-Mengen in dieser jüngeren Altersgruppe (6–10 Jahre) im Vergleich zu Schulen mit älteren Kindern zurückzuführen sein könnte (Persily, 2022) (Abschnitt 3.4.1).

<sup>19</sup> Hinweis: Bei der Extrapolation dieser Ergebnisse auf alle Sonderschulen (SS) ist Vorsicht geboten, da in der ImpAQS-Studie insgesamt nur zwei Sonderschulen berücksichtigt wurden.

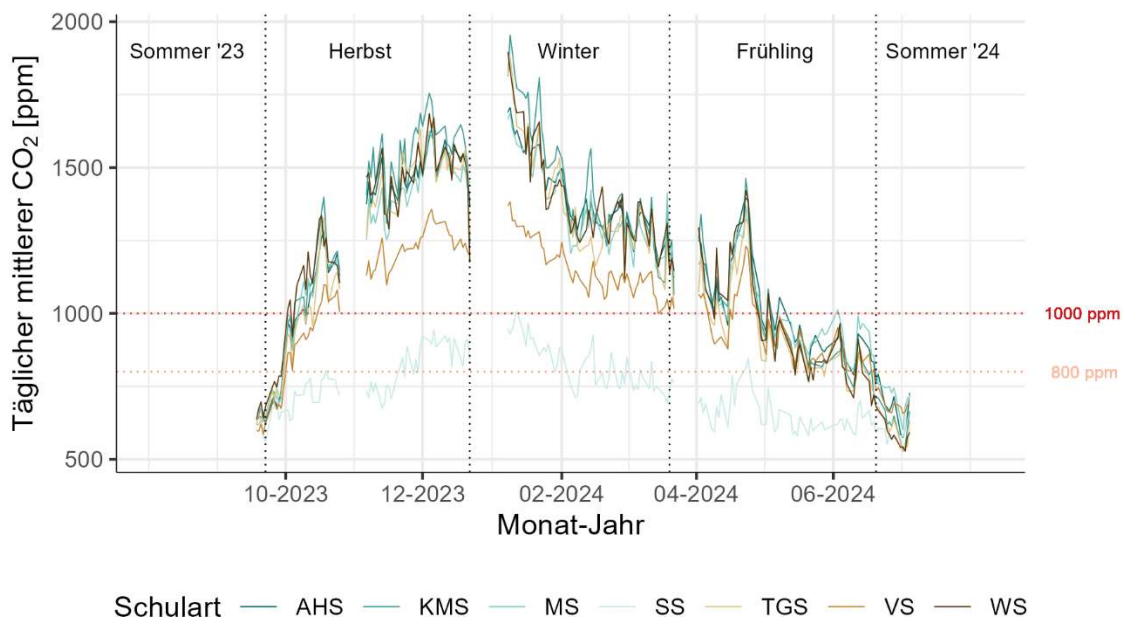
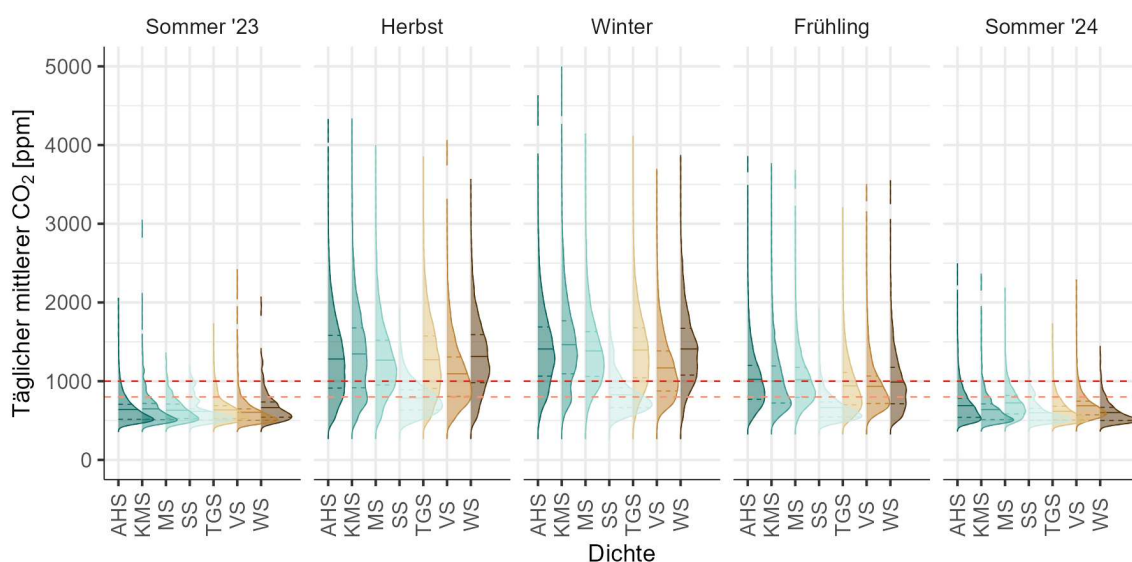


Abbildung 4-19 Überblick über die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern, kategorisiert nach Schultyp, mit Hervorhebung der wichtigsten Trends sowie des CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielschwellenwerts (800 ppm, gestrichelte rosa Linie).

Die Unterschiede in den täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zwischen den verschiedenen Schultypen sind im Winter am ausgeprägtesten und nehmen im Sommer stark ab (Abb. 4-20 und Anhang C.1.2.5). Insgesamt leiden die Schularten ABHS, KMS und MS unter den höchsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, während SS-Schulen, gefolgt von VS-Schulen<sup>20</sup>, durchweg die niedrigsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen melden.



<sup>20</sup> Hinweis: Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist Vorsicht geboten, da jüngere Kinder geringere CO<sub>2</sub>-Emissionsraten aufweisen als ältere Kinder (siehe Abschnitt 3.4.1).

Abbildung 4-20 Saisonale Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Schulart, einschließlich CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwelle in Innenräumen (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und Zielschwelle (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil markieren.

Im Sommer wird der tägliche mittlere Konformitätsschwellenwert (von 1000 ppm) von 94 % oder mehr der Schulen in jeder Schulartkategorie problemlos eingehalten. Im Frühjahr können 55 % oder mehr aller Schularten diesen Schwellenwert einhalten. Im Herbst ändert sich die Situation erheblich, da der Grenzwert für den Tagesmittelwert von der Mehrheit der Schulen überschritten wird, mit Ausnahme der Sonderschulen. Im Winter können die Schulen des Typs SS<sup>21</sup> den Grenzwert von 1000 ppm die meiste Zeit (82 %) einhalten, während die Mehrheit aller anderen Schularten diesen Grenzwert nicht einhalten kann (einschließlich die Schulen des Typs WS für 82 % der Zeit, der Schulen des Typs ABHS für 80 % der Zeit, KMS und MS für 79 % der Zeit, Schulen des Typs TGS und Schulen des Typs VS für 61 % der Zeit). Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass das Ziel von 1000 ppm in fast allen Schultypen (mit Ausnahme von Sonderschulen) weitestgehend verfehlt wird (Anhang C.1.2.5).

Mit Ausnahme von Sonderschulen wird der „gesundheitsbasierte“ Schwellenwert von 800 ppm von der Mehrheit aller anderen Schularten auf Jahresbasis nicht eingehalten, wobei die Häufigkeit der Überschreitung des Tagesmittelwerts zwischen 68 % (VS) und 80 % (MS) liegt. Diese Erkenntnis deutet darauf hin, dass der Zielwert von 800 ppm weitestgehend nicht eingehalten wird (Anhang C.1.2.5).

#### 4.2.2.6 CO<sub>2</sub>-Konzentration nach städtischem oder ländlichem Standort

Es werden moderate Unterschiede in der CO<sub>2</sub>-Konzentration zwischen ländlichen und städtischen Gebieten beobachtet (Abb. 4-21, Anhang C.1.2.6). Schulen in ländlichen Gebieten oder Ortschaften weisen im Allgemeinen höhere tägliche CO<sub>2</sub>-Mittelwerte auf als Schulen in städtischen Gebieten. Diese erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen lassen sich teilweise auf die konservativeren Lüftungspraktiken in ländlichen Schulen zurückführen, wie die Umfrage unter den Schulleiter\*innen (Abschnitt 5.1) ergab. Darüber hinaus wurden in größeren Städten wie Wien während der COVID-19-Pandemie mehrere Richtlinien umgesetzt (Szendi & Sárosi-Blága, 2022), was möglicherweise zu einer größeren Akzeptanz der Nutzung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und der Notwendigkeit verbesserter Belüftungsstrategien sowohl bei den LuL als auch bei den SuS geführt hat.

Städtische Gebiete werden weiter in Stadtrandgebiete (Vorstadt) und zentrale Gebiete (Zentral) unterteilt, wobei zentral gelegene Schulen höhere tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufweisen als Schulen in Stadtrandgebieten. Die höheren CO<sub>2</sub>-Werte in zentral gelegenen Schulen sind wahrscheinlich auf den erhöhten Verkehrslärm und die Umweltverschmutzung zurückzuführen, die typischerweise in Stadtzentren zu finden sind und die neben der Temperatur als der größte ausschlaggebende Parameter identifiziert wurden, der LuL daran hindert, Klassenzimmer zu lüften (Abschnitt 5.2).

Wie in den vorherigen Abschnitten erwähnt, sind diese Unterschiede in der kalten Jahreszeit am stärksten ausgeprägt. Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede bei den täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den wärmeren Monaten minimal, wie die sich überschneidenden saisonalen Verteilungen für die Frühlings- und Sommerperioden zeigen (Abb. 4-21 and 4-22). Während des

---

<sup>21</sup> Man beachte, dass diese Zahl mit Vorsicht zu behandeln ist, da sie nur auf den zwei SS-Schulen in dieser Studie basiert.

gesamten Schuljahres weisen ländliche Gebiete die höchste Häufigkeit von Überschreitungen des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts auf (Tabelle 4-12), wobei der Grenzwert von 1000 ppm in 59 % der Fälle überschritten wird (75 % über 800 ppm). Umgekehrt weisen städtische Gebiete niedrigere Überschreitungsraten auf, wobei der Grenzwert von 1000 ppm in zentralen Gebieten in 55 % der Fälle und in Randgebieten in 53 % der Fälle überschritten wird. Monatliche Verteilungen und Statistiken der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen nach Gebietstyp sind in Anhang C.1.2.6 zu finden.

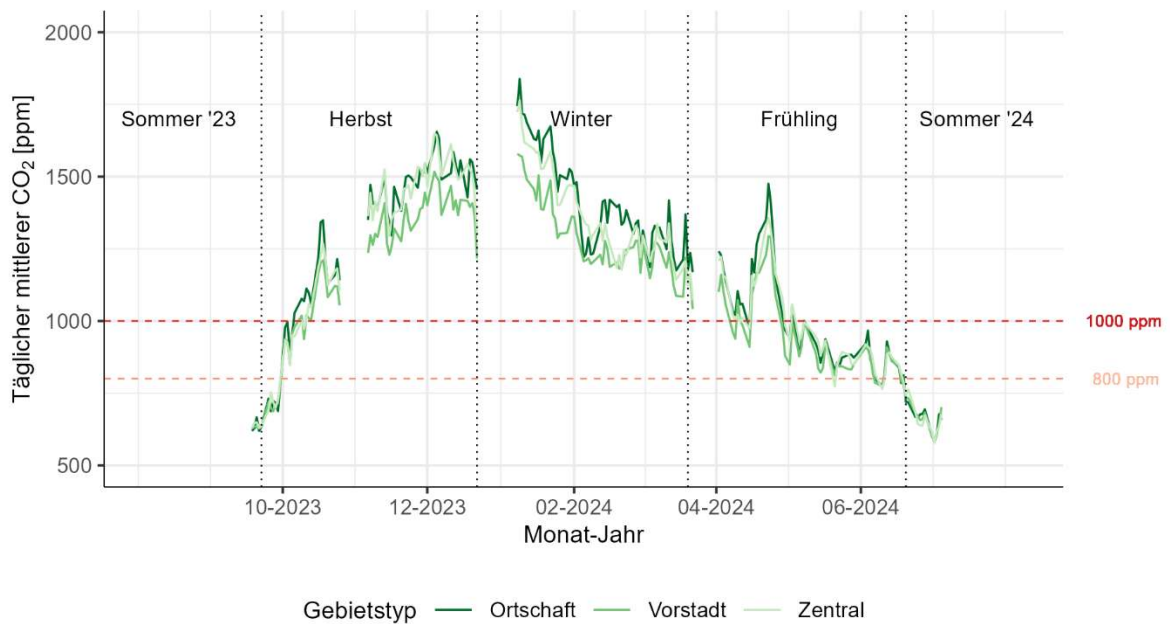


Abbildung 4-21 Überblick über die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern, kategorisiert nach Gebietstyp (ländlich: Ortschaft, städtisch: Vorstadt, Zentral), wobei die wichtigsten Trends sowie der CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und der Zielschwellenwert (800 ppm, gestrichelte rosa Linie) hervorgehoben werden.



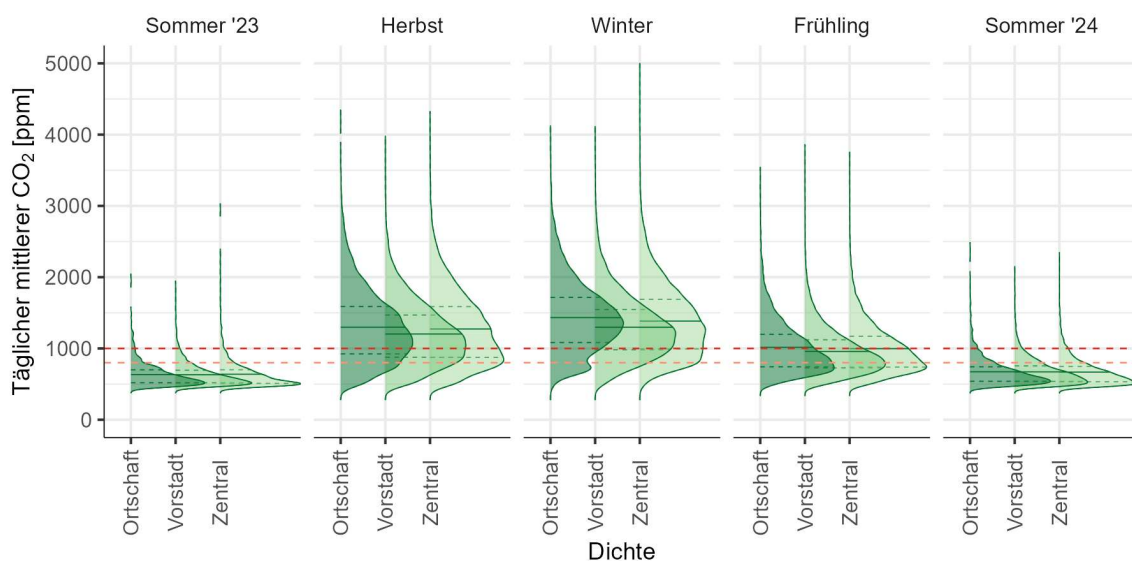


Abbildung 4-22 Saisonale Verteilung der mittleren täglichen CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Gebietstyp (ländlich: Ortschaft; städtisch: Vorstadt, Zentral), einschließlich CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und Zielschwellenwert (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75-Perzentil markieren.

Tabelle 4-12. Saisonale Statistik der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Gebietstyp, einschließlich der Häufigkeit von CO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen in Innenräumen im Verhältnis zu den Grenzwerten von 1000 ppm und 800 ppm. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf tägliche mittlere Überschreitungen

Jahreszeit	Gebietstyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR	Mittelw [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm [%]	>800 ppm [%]
Sommer '23	Ortschaft	461	1951	520	586	700	180	633	4	12
	Vorstadt	460	1862	519	585	694	175	631	3	12
	Zentral	460	2947	511	587	700	190	639	5	13
Herbst	Ortschaft	462	4184	924	1230	1588	664	1299	69	84
	Vorstadt	460	3831	877	1148	1469	592	1203	64	82
	Zentral	460	4165	874	1199	1587	713	1273	65	82
Winter	Ortschaft	461	3954	1084	1387	1717	633	1433	80	90
	Vorstadt	461	3954	982	1244	1548	566	1298	73	89
	Zentral	462	4856	994	1317	1689	695	1384	74	89
Frühling	Ortschaft	460	3431	743	931	1199	456	1015	43	67
	Vorstadt	460	3759	727	894	1121	394	959	37	64
	Zentral	460	3650	738	925	1171	433	997	41	66
Sommer '24	Ortschaft	460	2401	540	620	742	203	673	6	18
	Vorstadt	460	2069	539	628	756	217	672	5	20
	Zentral	460	2258	533	620	747	214	668	6	18
Jahr	Ortschaft	460	4184	800	1115	1493	693	1197	59	75
	Vorstadt	460	3954	778	1032	1359	580	1108	53	73
	Zentral	460	4856	787	1066	1459	672	1169	55	74

#### 4.2.2.7 CO<sub>2</sub>-Konzentration nach Region

Bei den täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen wurden ausgeprägte regionale Unterschiede festgestellt, wobei Schulen in Kärnten mit 67 % die höchsten jährlichen täglichen Überschreitungen des Grenzwerts von 1000 ppm verzeichneten, während das Burgenland mit 36 % die wenigsten Überschreitungen aufwies. Diese interregionalen Unterschiede waren im Winter noch ausgeprägter (Abb. 4-23 und 4-24), da sowohl Kärnten als auch Oberösterreich in 88 % der Fälle den Grenzwert nicht einhielten, während das Burgenland den Grenzwert in 46 % der Fälle überschritt. Im Winter war der gesundheitsbasierte Zielwert von 800 ppm für die überwiegende Mehrheit der Schulen nicht erreichbar, wobei Kärntner Schulen dieses Ziel in 97 % der Fälle und burgenländische Schulen in 61 % der Fälle verfehlten (Anhang C.1.2.7). Weitere Informationen zu regionalen Unterschieden finden sich in Anhang C.1.2.7.

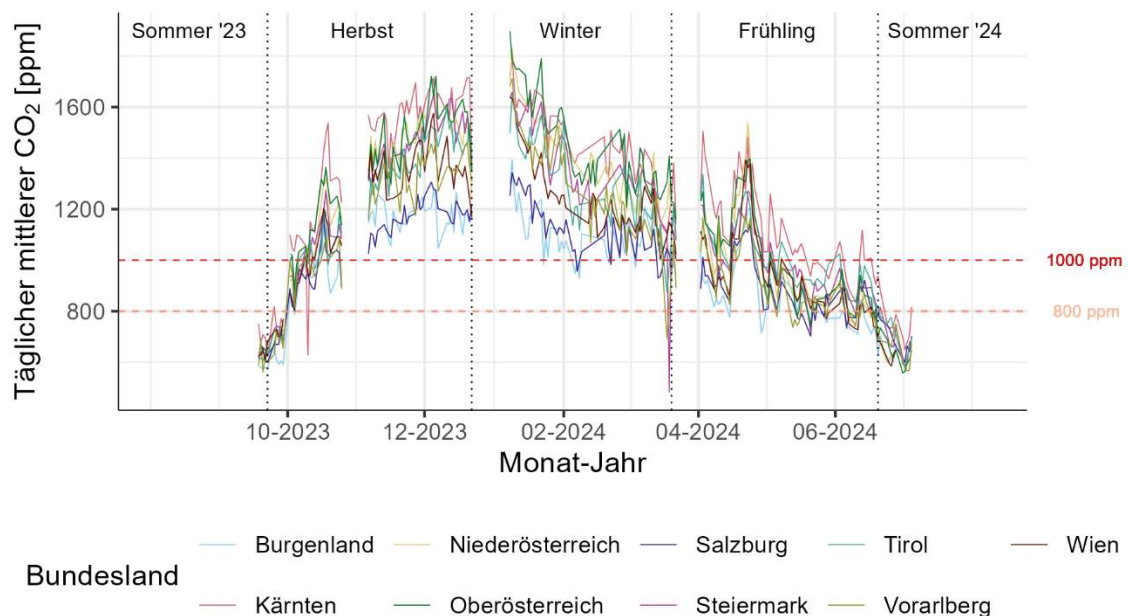


Abbildung 4-23 Überblick über die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in österreichischen Klassenzimmern, kategorisiert nach Region, mit Hervorhebung der wichtigsten Trends sowie des CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielschwellenwerts (800 ppm, gestrichelte rosa Linie).

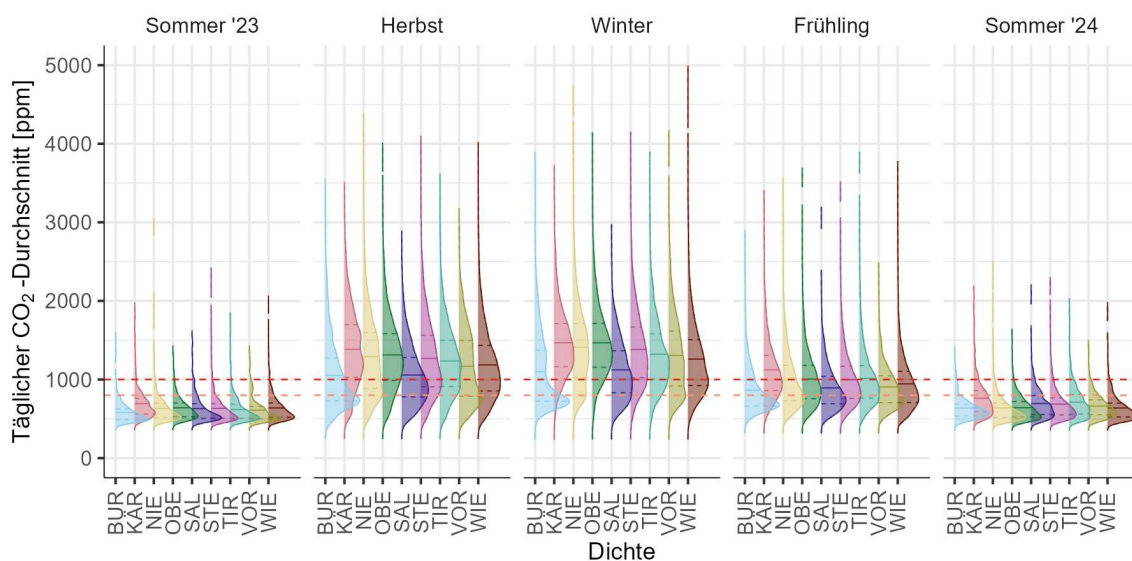


Abbildung 4-24 Saisonale Verteilung der mittleren täglichen CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Region, einschließlich CO<sub>2</sub>-Einhaltungsschwellenwert für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und Zielschwellenwert (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25· und 75· Perzentil markieren.

#### 4.2.2.8 CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Vergleich der Schulen mit der besten und der schlechtesten Leistung

Von den insgesamt 120 ImpAQS-Schulen wurden 118 in Bezug auf ihre tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration im Winter in eine Rangfolge vom besten zum schlechtesten Wert gebracht. Dies wurde durchgeführt, um die Schwankungen zu veranschaulichen, die auf beiden Seiten des Medians auftreten (Abb. 4-25), mit daraus resultierenden Auswirkungen auf Gesundheits- und Leistungsungleichheiten. Zwei Schulen (Schulen Nr. 21 und 59) wurden in der Rangliste ausgelassen, da sie hauptsächlich als Abendschulen betrieben werden und ihre Einbeziehung den Vergleich mit den anderen Schulen verzerren würde, da sie während der Kernzeit des Tages (von 8:00 bis 14:00 Uhr) oft nicht belegt sind. Es sollte auch beachtet werden, dass identifizierende Informationen, wie z. B. Schultyp und Standort, in dieser Abbildung bewusst ausgelassen wurden, um die öffentliche Identifizierung einzelner Schulen zu vermeiden.

Die Schulen mit der niedrigsten täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration befinden sich im unteren Quartil (Q1) und sind dunkelblau gefärbt, Schulen im zweiten Quartil (Q2) sind hellblau, während das dritte Quartil (Q3) orange und das höchste Quartil (Q4) rot ist (Abbildung 4-25). Auffallend ist, dass die tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Schule mit der besten Leistung im Winter (gemittelt über die 10 teilnehmenden Klassenräume in jeder Schule) etwa 1400 ppm niedriger ist als in der Schule mit der schlechtesten Leistung. Es ist auch zu erkennen, dass die größte Abweichung an den Enden von Q1 und Q4 auftritt, wo die 10 leistungsstärksten und die 10 leistungsschwächsten Schulen visuell identifiziert werden können. Diese Erkenntnis deutet darauf hin, dass es möglicherweise einzigartige Faktoren oder eine Kombination davon gibt, die erklären, warum die besten 10 Schulen den Rest ihres Quartils übertreffen und die schlechtesten 10 Schulen den Rest ihres Quartils unterbieten.

Ein entscheidender Faktor für diese Rangfolge ist die Art des Lüftungssystems, da viele der Schulen mit mechanischer Lüftung besser abschneiden als Schulen mit natürlicher Lüftung. Mechanische Lüftungssysteme sind so konzipiert, dass sie einen kontrollierten Luftstrom gewährleisten und (bei

ordnungsgemäßer Wartung und Bedienung) die mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration, wie in Abbildung 4-28 dargestellt, durch einen konstanten Luftaustausch erheblich senken können. Diese Fähigkeit und die Möglichkeit, die Außenluft zusätzlich zu filtern, sind besonders in Umgebungen wichtig, in denen die Qualität der Außenluft beeinträchtigt sein kann (Section 4.3.2).

Die Rangliste zeigt jedoch auch, dass allein das Vertrauen auf mechanische Belüftung keinen Platz in den Top 10 garantiert. Auch wenn die natürliche Belüftung als Mittel zur Kontrolle der Raumluftqualität bei kalten Außentemperaturen weniger akzeptabel sein kann, spielt auch die Belegungsdichte im Klassenzimmer eine wichtige Rolle. In dieser Hinsicht schneiden die zwei SS-Schulen und andere natürlich belüftete Schulen mit größerer Fläche pro SuS besser ab als viele der mechanisch belüfteten Schulen, da ihre räumliche Dichte im Vergleich zu anderen Schulen viel höher ist (Abschnitt 4.2.1.7).

Ein weiterer Faktor, der Volksschulen zugutekommt (und dazu führt, dass vier Volksschulen unter den zehn leistungsstärksten Schulen sind), sind die niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emissionswerte bei jüngeren Kindern im Vergleich zu älteren Kindern, wodurch es für natürlich belüftete Volksschulen einfacher ist, vergleichsweise niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im stationären Zustand zu erreichen (Abschnitt 3.4.1). Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass sie eine bessere Belüftung bereitstellen (Abschnitt 4.2.3).

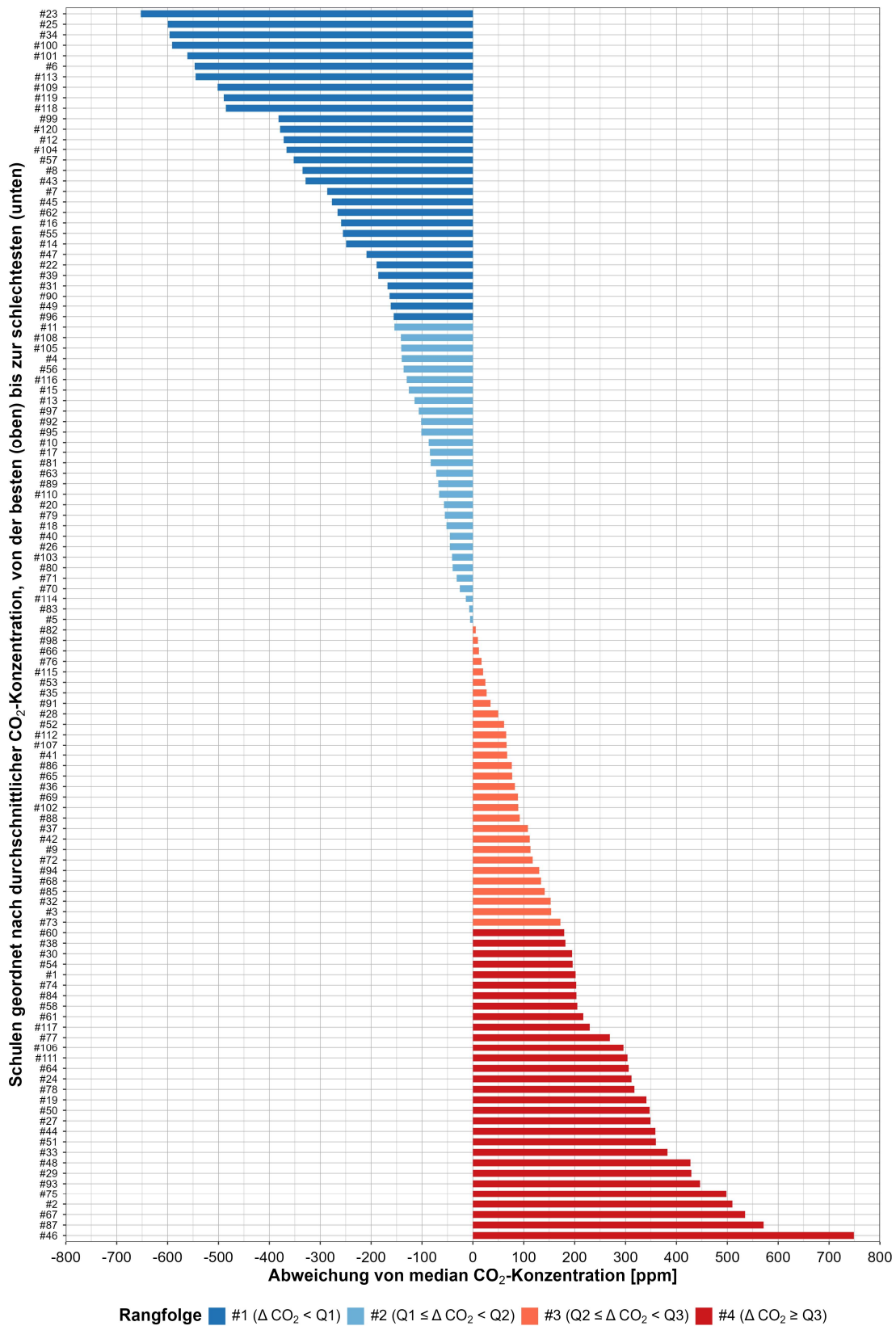


Abbildung 4-25 Horizontales Balkendiagramm – Rangfolge von 118 ImpAQS-Schulen (von den besten bis zu den schlechtesten) nach dem täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Wert im Winter

### 4.2.3 Lüftungsraten in österreichischen Klassenzimmern

Die Luftwechselrate ist eine wichtige Variable, da sie das Volumen an Frischluft beschreibt, das jedem Bewohner eines Raums zur Verfügung gestellt wird, in entweder [ $\text{m}^3/(\text{h}\cdot\text{Person})$ ] oder [ $\text{l}/(\text{s}\cdot\text{Person})$ ]. In natürlich belüfteten Räumen ist es ein komplexes Verfahren, die Luftstromraten direkt zu messen, was zum Teil auf die transiente Natur der Kräfte zurückzuführen ist, die den natürlichen Luftstrom antreiben (Mustafa et al., 2025), sowie auf die Tatsache, dass Luft gleichzeitig in eine Fensteröffnung hinein- und aus ihr herausströmen kann. Es gibt verschiedene Methoden, die auf Massenbilanzgleichungen basieren, die auf Annahmen über die von den Bewohnern ausgeatmete  $\text{CO}_2$ -Rate und die  $\text{CO}_2$ -Konzentration im Freien beruhen (Batterman, 2017).

Die durchschnittlichen täglichen Luftstromraten wurden unter Verwendung eines stationären Ansatzes gemäß der Definition in Wood et al. (2024) für alle 1200 Klassenzimmer abgeleitet (Abschnitt 3.4). Dieser Ansatz ermöglichte Schätzungen der Lüftungsraten während der Unterrichtszeiten, ohne dass direkte und komplexe Messungen der Luftströme erforderlich waren. Da für diese Analyse nur die Kernzeiten relevant waren, in denen die Klassenzimmer belegt waren, wurden nur die an Schultagen zwischen 8:00 und 14:00 Uhr aufgezeichneten Daten berücksichtigt. Wochenenden, Feiertage und andere Tage (an denen die tägliche durchschnittliche  $\text{CO}_2$ -Konzentration in diesem Zeitraum unter 600 ppm lag) wurden für diese Analyse ausgeschlossen, da solch niedrige Konzentrationen auf eine begrenzte Belegung oder einen Nichtbetrieb der Klassen hinweisen. Die Einbeziehung von teilweise oder nicht belegten Räumen in die Lüftungsanalyse (ohne Kenntnis der tatsächlichen Belegung) würde möglicherweise zu unrealistisch hohen Schätzungen der Lüftungsraten führen.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden in den folgenden Abschnitten als Dichteplots der saisonal aggregierten täglichen mittleren Lüftungsrate (pro Person) und als erweiterte Zeitreihendiagramme dargestellt, um saisonale Trends in den kombinierten mittleren Lüftungsluftstromraten zu veranschaulichen.

#### 4.2.3.1 Lüftungsraten in Klassenzimmern

Abbildung 4-26 zeigt die täglichen mittleren Lüftungsraten [ $\text{l}/(\text{s}\cdot\text{Person})$ ] zusammen mit den entsprechenden täglichen mittleren  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen [ppm] über den Messzeitraum von September 2023 bis Juli 2024. Die  $\text{CO}_2$ -Messungen wurden über alle 1200 in den Klassenzimmern installierten Sensoren gemittelt. Die Lüftungsraten sind auf der primären y-Achse dargestellt. Die schwarze Linie stellt die täglichen durchschnittlichen Belüftungsraten in allen 1200 Klassenzimmern dar, wobei das graue Band den Interquartilbereich (25. bis 75. Perzentil) der Belüftungsraten angibt. In ähnlicher Weise zeigt die blaue Linie die tägliche mittlere  $\text{CO}_2$ -Konzentration, wobei das blaue Band den Interquartilbereich der  $\text{CO}_2$ -Messungen darstellt. Vom Sommer 2023 bis zum frühen Winter 2024 ist ein deutlicher Rückgang der täglichen mittleren Belüftungsraten und ein entsprechender Anstieg der  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen zu verzeichnen. Dies ist wahrscheinlich auf die geringere Belüftungshäufigkeit aufgrund der sinkenden Außentemperatur zurückzuführen. Im Frühjahr und Sommer 2024 kehrt sich das Muster um, mit steigenden Belüftungsraten und sinkenden  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen. Von Mai bis Juli übersteigen die durchschnittlichen täglichen Belüftungsraten meist 10  $\text{l}/(\text{s}\cdot\text{Person})$ , was wahrscheinlich auf die häufigere Belüftung bei wärmerem Wetter zurückzuführen ist.

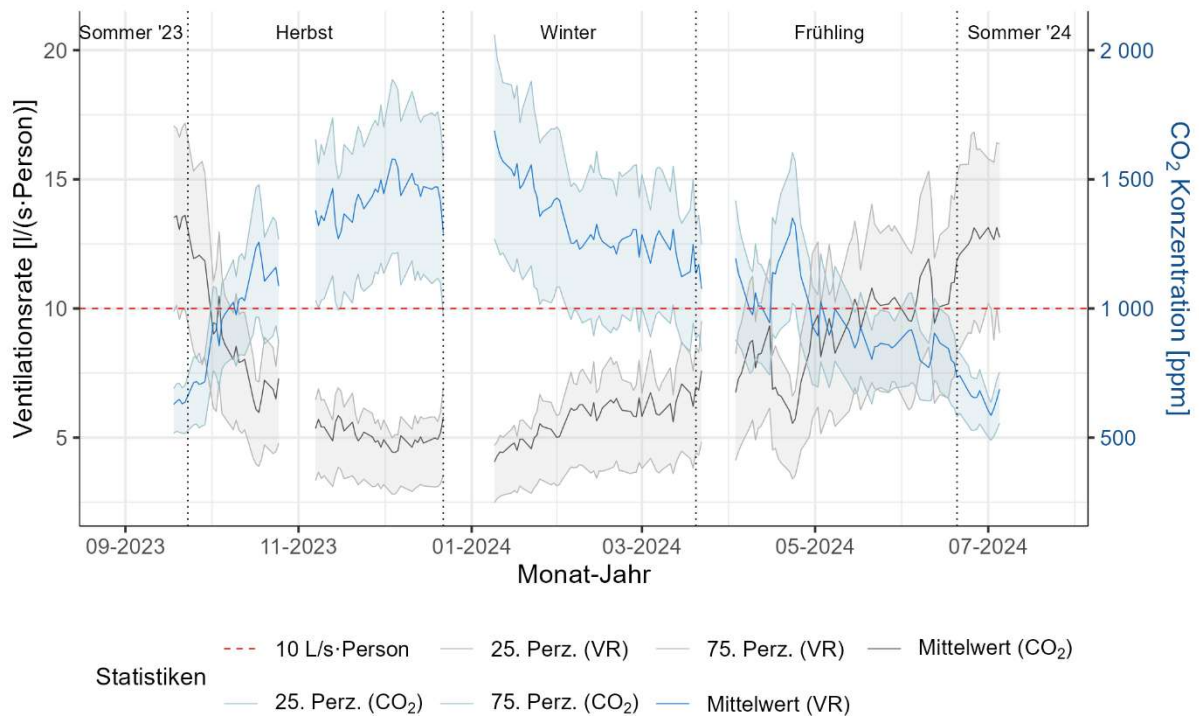


Abbildung 4-26 Zeitreihenanalyse – hypothetische mittlere Lüftungsrate und Interquartilsbereich (IQR) aller Klassenräume über das gesamte Schuljahr

#### 4.2.3.2 Lüftungsraten in Klassenzimmern nach Jahreszeit

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und die statistische Verteilung der täglichen durchschnittlichen Belüftungsraten in den 1200 Klassenzimmern in Abhängigkeit von der Jahreszeit sind in Abb. 4-27 und Tab. 4-13 dargestellt. Bei der Analyse des 75. Perzentils zeigt sich, dass die Mehrheit der täglichen Mittelwerte unter 9,5 l/(s·Person) aufweist und somit nicht die Standardwerte von 10 l/(s·Person) erfüllt, die für die Kategorie IEQ<sub>1</sub> in EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) festgelegt wurden. Die mediane Lüftungsrate beträgt 5,9 l/(s·Person), während die arithmetische mittlere Lüftungsrate mit 7,4 l/(s·Person) deutlich höher ist, was auf eine rechtsverzerrte Verteilung hinweist (wahrscheinlich aufgrund höherer Werte, die in der Sommersaison gemessen wurden). Besonders besorgniserregend ist, dass das 25. Perzentil angibt, dass in 25 % der Zeit in Klassenzimmern Luftwechselraten von weniger als oder gleich 4 l/(s·Person) auftraten, was der von EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) empfohlenen Mindestrate entspricht. Diese Verteilung verdeutlicht die großen Unterschiede bei den Lüftungspraktiken in den österreichischen Klassenzimmern, wobei der IQR der jährlichen täglichen mittleren Lüftungsrate zwischen 4 und 9,5 l/(s·Person) liegt (Tab. 4-13).

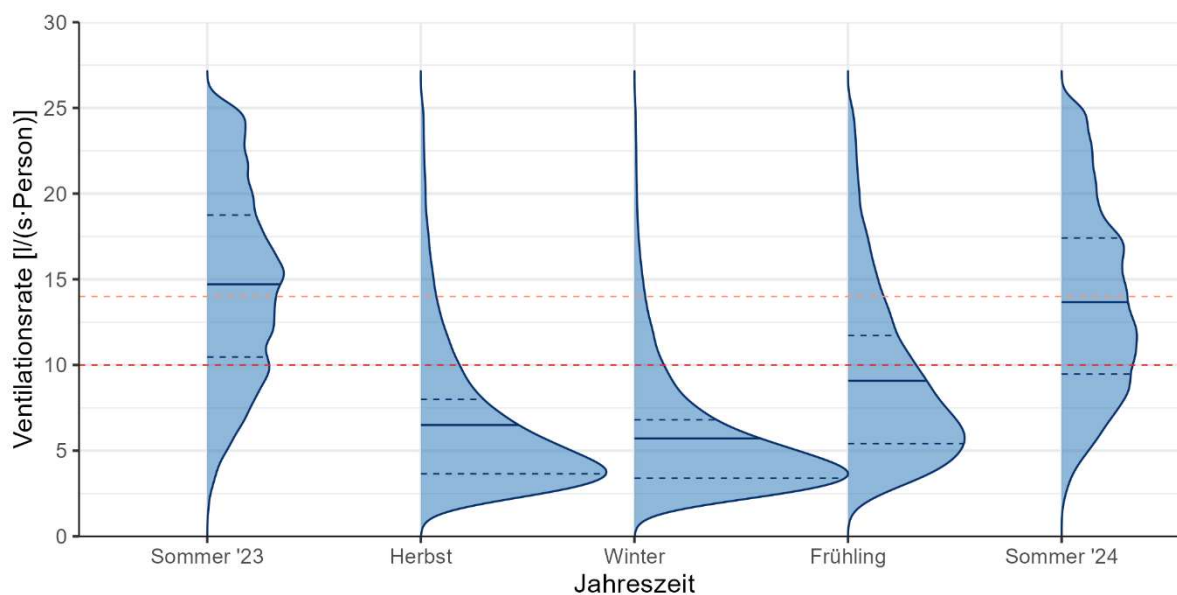


Abbildung 4-27 Saisonale Verteilung der VR in l/(s·Person) aus den kombinierten Test- und Kontrollsensoren einschließlich des Grenzwerts nach EN 16798-1 (10 l/(s·Person), IEQ1, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil angeben.

Tabelle 4-13 quantifiziert die in Abb. 4-27 dargestellten saisonalen Schwankungen weiter. Ein signifikanter Anstieg der durchschnittlichen Lüftungsraten um etwa 140 % ist von den Wintermonaten (5,7 l/(s·Person)) bis zum Frühsommer (13,7 l/(s·Person)) zu verzeichnen. Im Durchschnitt liegen 77 % der täglichen mittleren Lüftungsraten in allen 1200 Klassenzimmern unter 10 l/(s·Person) und erfüllen daher nicht den Standard der Kategorie 1 der EN 16798-1 (CEN, 2019). Darüber hinaus weisen die Klassenzimmer aus „gesundheitsbezogener“ Sicht in 89 % der Fälle eine Belüftungsrate (VR) von weniger als 14 l/(s·Person) auf und erfüllen damit nicht das von der Lancet COVID-19 Commission (2022) empfohlene Ziel für die nicht-infektiöse Luftzufuhr (NADR).

Tabelle 4-13 Saisonale Statistiken der VR einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitungen des VR-Schwellenwerts

Jahreszeit	Min [l/(s·P.)]	Max [l/(s·P.)]	Perzentile			Mittelw. [l/(s·P.)]	Unterschreitung	
			25 [l/(s·P.)]	50 [l/(s·P.)]	75 [l/(s·P.)]		<14l/(s·P.) [%]	<10l/(s·P.) [%]
Sommer '23	1,7	25,4	10,5	14,6	18,7	14,7	45,8	22
Herbst	0,9	25,4	3,7	5,2	8,0	6,5	93	84
Winter	1,0	25,4	3,4	4,7	6,8	5,7	96	89
Frühling	1,0	25,4	5,4	7,9	11,7	9,1	84	66
Sommer '24	1,8	25,4	9,5	13,2	17,4	13,7	55	28
Jahr	0,9	25,4	4,0	5,9	9,5	7,4	89	77

#### 4.2.3.3 Lüftungsrate nach Art des Lüftungssystems

Die saisonale Verteilung der Belüftungsraten zwischen mechanisch belüfteten (MV) und natürlich belüfteten (NV) Klassenzimmern wird in Abb. 4-28 und Tab. 4-14 verglichen. Die Daten zeigen, dass die durchschnittlichen Lüftungsraten in MV-Klassenzimmern durchweg höher sind als in NV-Klassenzimmern. Darüber hinaus weisen MV-Klassenzimmer eine größere Variabilität auf, insbesondere in den kälteren Monaten (Tab. 4-14). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Schulen möglicherweise unterschiedliche Richtlinien und Standards befolgen, was zu einem breiten Spektrum von Sollwerten für den Betrieb der mechanischen Systeme führt.



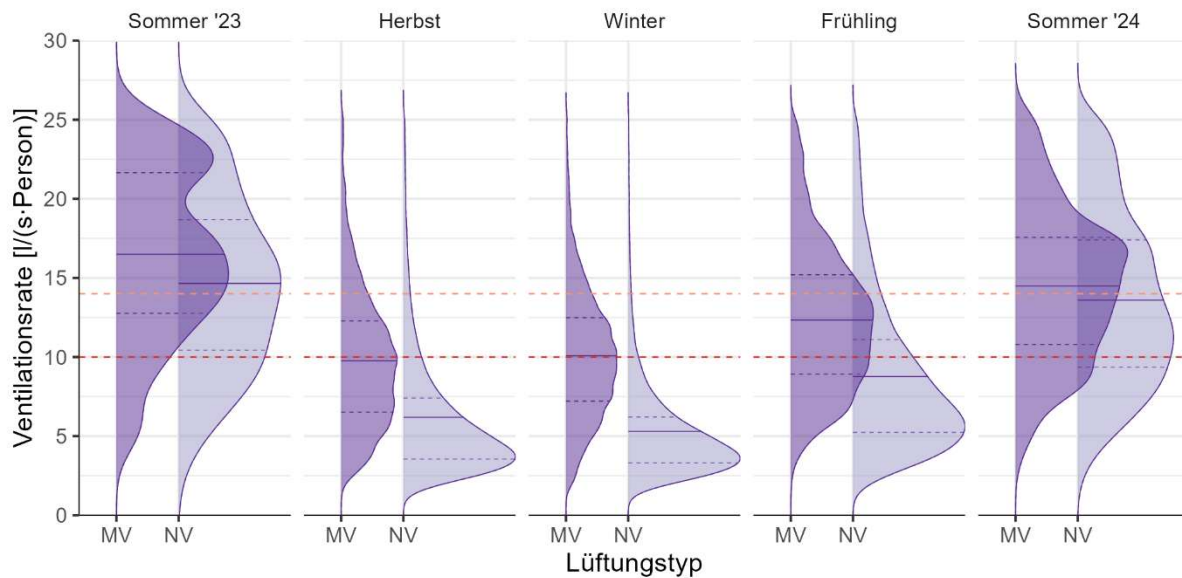


Abbildung 4-28 Saisonale Verteilung der VR in l/(s·Person) für mechanische (MV) und natürliche (NV) Belüftung, getrennt, einschließlich EN 16798-1 IEQ<sub>1</sub>-Schwellenwert (10 l/(s·Person), gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil angeben.

Im Sommer 2024 sind die täglichen mittleren Lüftungsraten zwischen Klassenräumen mit mechanischer und natürlicher Lüftung relativ ähnlich, wobei Klassenräume mit mechanischer Lüftung durchschnittlich 14,5 l/(s·Person) und Klassenräume mit natürlicher Lüftung 13,6 l/(s·Person) aufweisen. Beide Lüftungsarten funktionieren in dieser Jahreszeit gut, wobei nur 29 % der Klassenräume mit natürlicher Lüftung und 20 % der Klassenräume mit mechanischer Lüftung unter den Schwellenwert von 10 l/(s·Person) fallen. Diese Resultate deuten darauf hin, dass die natürliche Belüftung unter wärmeren Bedingungen eine vergleichbare Leistung wie mechanische Systeme erzielen kann.

Im Winter ist ein deutlicherer Unterschied zu beobachten. In MV-Klassenzimmern wird eine tägliche mittlere Belüftungsrate von durchschnittlich 9,6 l/(s·Person) aufrechterhalten, während NV-Klassenzimmer mit 5,3 l/(s·Person) (Tab. 4-14) deutlich darunterliegen. Der Anteil der täglichen mittleren Belüftungsraten, die den Standard von 10 l/(s·Person) nicht erfüllen, ist in NV-Klassenzimmern (93 %) deutlich höher als in MV-Klassenzimmern (57 %) (Tab. 4-14). Dieser Unterschied unterstreicht die Einschränkungen von NV-Systemen in kälteren Monaten, in denen ein reduzierter Luftaustausch wahrscheinlich durch die Reaktion der Nutzer\*innen auf niedrigere Lufttemperaturen verursacht wird, was zu unzureichenden Lüftungsraten führt.

Darüber hinaus unterschreiten sowohl MV- als auch NV-Klassenzimmer häufig den empfohlenen Mindestaußenluftstrom aus EN 16798-1 (CEN, 2024), der empfiehlt, dass die Lüftungsraten nicht unter 4 l/(s·Person) fallen sollten, um vom Menschen verursachte Schadstoffe zu berücksichtigen. Dieses Problem ist besonders in den kälteren Monaten ausgeprägt, in denen die 25. Perzentilwerte für NV-Klassenzimmer im Herbst bei 3,5 l/(s·Person) und im Winter bei 3,3 l/(s·Person) liegen, was auf eine unzureichende Belüftung für ein Viertel aller Klassenzimmer in diesen Zeiträumen hindeutet.

Darüber hinaus erfüllen viele tägliche mittlere Lüftungsraten in MV-Klassenzimmern nicht die Anforderungen der österreichischen Arbeitsstättenverordnung (AStVO), die für Räume, in denen leichte körperliche Arbeit verrichtet wird, eine Mindestmenge von 35 m<sup>3</sup> Außenluft pro Person und Stunde (entspricht ca. 9,7 l/(s·Person)) vorschreibt. Im Herbst liegt der tägliche Median der Lüftungsraten in MV-Klassenzimmern bei 8,9 l/(s·Person) und unterschreitet damit diesen Grenzwert, wobei die Nichteinhaltung im Winter mit einem Median von 9,3 l/(s·Person) ähnlich hoch ist. Während das obere Quartil der MV-Werte die AStVO-Anforderung ganzjährig erfüllen, wird während eines erheblichen Teils der Belegungszeiten in MV-Klassenzimmern immer noch keine ausreichende Belüftung erreicht, insbesondere in den kälteren Monaten.

**Tabelle 4-14 Saisonale Statistik der VR einschließlich des Prozentsatzes der VR-Überschreitungen des VR-Schwellenwerts für mechanische (MV) und natürliche (NV) Belüftung getrennt**

Jahreszeit	Vent.-typ [l/(s·P.)]	Min [l/(s·P.)]	Max [l/(s·P.)]	Perzentile			Mittelw. [%]	Unterschreitung	
				25 [l/(s·P.)]	50 [l/(s·P.)]	75 [l/(s·P.)]		<14 l/(s·P.) [%]	<10l/(s·P.) [%]
Sommer '23	MV	4,9	25,4	12,9	16,8	21,8	16,9	29	12
	NV	1,7	25,4	10,4	14,5	18,6	14,6	47	23
Herbst	MV	1,7	25,4	6,0	8,9	12,0	9,4	85	59
	NV	0,9	25,4	3,5	4,9	7,4	6,2	94	87
Winter	MV	1,7	25,3	6,3	9,3	12,2	9,6	86	57
	NV	1,0	25,4	3,3	4,4	6,2	5,3	97	93
Frühling	MV	1,8	25,4	8,6	11,7	15,0	12,1	68	36
	NV	1,0	25,4	5,2	7,5	11,1	8,7	86	69
Sommer '24	MV	3,5	25,3	10,8	14,5	17,6	14,5	46	20
	NV	1,8	25,4	9,3	13,0	17,4	13,6	56	29
Jahr	MV	1,7	25,4	6,9	10,0	13,4	10,5	78	50
	NV	0,9	25,4	3,8	5,6	8,8	7,1	91	80

#### 4.2.3.4 Lüftungsrate nach Schultyp

Abbildung 4-29 und Tabelle 4-15 vergleichen die saisonale Verteilung der Lüftungsraten in verschiedenen Schularten. Die Daten zeigen ein konsistentes Muster, das in früheren Analysen ebenfalls beobachtet wurde, mit niedrigeren Lüftungsraten in kälteren Monaten und höheren Raten in wärmeren Perioden.

Im Winter liegen die mittleren Lüftungsraten für die meisten Schultage zwischen 5,5 und 5,7 l/(s·Person), wobei die Medianwerte jedoch etwa 1 l/(s·Person) unter den Mittelwerten liegen, was darauf hindeutet, dass eine geringere Anzahl besser belüfteter Klassenräume die Verteilung verzerrt. Bemerkenswert ist, dass Sonderschulen (SS)<sup>22</sup> mit einer mittleren Lüftungsrate von 12,5 l/(s·Person) deutlich besser abschneiden, was auf eine höhere Luftqualität in diesen Schulen in den kälteren Monaten hindeutet. Mit steigenden Temperaturen verbessern sich die Lüftungsraten in allen Schularten. Im Sommer 2024 liegen die durchschnittliche tägliche mittleren Lüftungsraten

<sup>22</sup> Bei der Verallgemeinerung der Ergebnisse der Sonderschulen ist Vorsicht geboten, da nur zwei Sonderschulen in die Studie einbezogen wurden.

zwischen 11,1 l/(s·Person) in Volksschulen (VS) und 15,9 l/(s·Person) in WS, wobei die Lüftungsraten in den verschiedenen Schularten einheitlicher werden.

Bemerkenswert ist, dass VS-Schulen, obwohl sie relativ niedrige CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufweisen (im Vergleich zu anderen Schultypen) (Abschnitt 4.2.2), zu den am schlechtesten abscheidenden Schultypen in Bezug auf die Lüftungsraten gehören (Abb. 4-29 und Tab. 4-15); dieses scheinbare Paradoxon lässt sich dadurch erklären, dass jüngere Kinder weniger CO<sub>2</sub> ausstoßen als ältere Kinder (Tabelle 3-1). Deshalb kann der Vergleich von Innenluft-CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ohne Berücksichtigung der Belegungsmerkmale eines Raumes (einschließlich Alter und Stoffwechselrate der Personen) irreführend sein. Im Allgemeinen stellen personenbezogene Außenluftvolumenströme [l/(s·Person)] einen zuverlässigeren Indikator für die Lüftung und die Innenraumluftqualität dar.

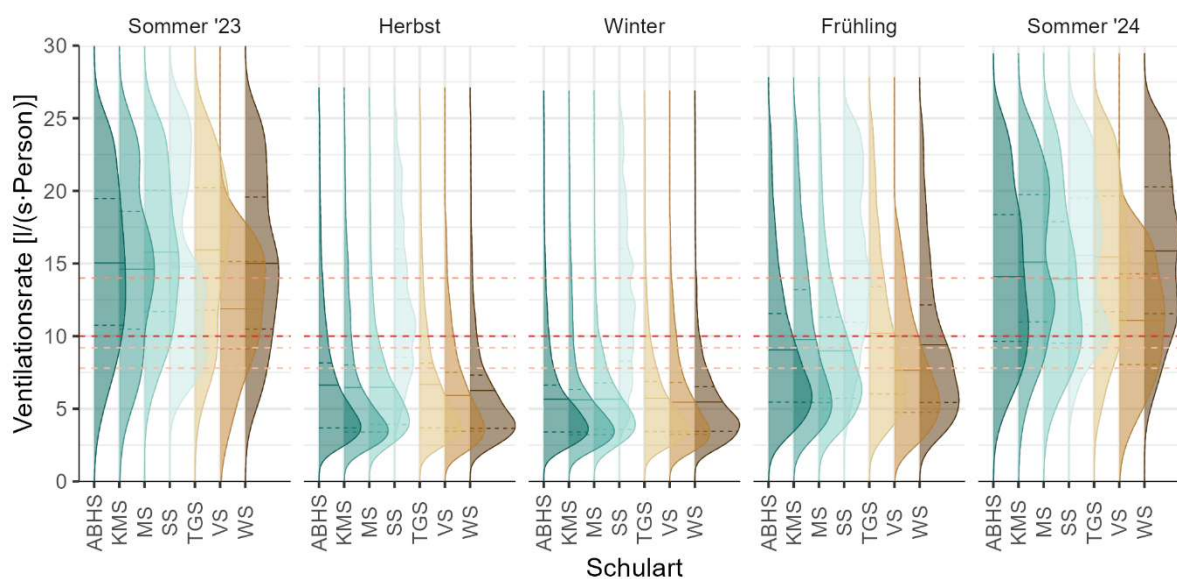


Abbildung 4-29 Saisonale Verteilung der VR in l/(s·Person) für verschiedene Schularten, getrennt, einschließlich EN 16798-1 IEQ<sub>l</sub> Schwellenwert (10 l/(s·Person), gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75-Perzentil angeben.

In Bezug auf die ÖNORM H 6039:2023, die 28 m<sup>3</sup>/(h·Person) (entspricht 7,8 l/(s·Person)) für SuS unter 10 Jahren und 33 m<sup>3</sup>/(h·Person) (entspricht 9,2 l/(s·Person)) für SuS im Alter von 11 bis 18 Jahren, sollten Volksschulen (VS) das Schwellenwertziel von 7,8 l/(s·Person) erreichen. Im Winter unterschreiten VS-Klassenzimmer diesen Grenzwert in 81 % der Fälle, bei einer durchschnittlichen Belüftungsrate von 5,5 l/(s·Person). Obwohl die Lüftung im Sommer 2024 verbessert ist, unterschreiten VS-Klassenzimmer dennoch 24 % der Zeit die Anforderung von 7,8 l/(s·Person), obwohl sie eine durchschnittliche Lüftungsrate von 11,1 l/(s·Person) aufweisen.

Sonderschulen, die SuS im Alter von etwa 6 bis 15 Jahren aufnehmen, müssen sowohl den Grenzwert von 7,8 l/(s·Person) für jüngere SuS als auch den Grenzwert von 9,2 l/(s·Person) für ältere SuS berücksichtigen<sup>23</sup>. Im Winter erfüllen die Klassenräume von Sonderschulen in 31 % der Zeit den Grenzwert von 9,2 l/(s·Person) nicht, obwohl die durchschnittliche Lüftungsrate bei 12,5 l/(s·Person) liegt. Im Sommer 2024 verbessert sich die Einhaltung jedoch erheblich, da die Klassenzimmer diesen

<sup>23</sup> Das bedeutet, dass altersgemischte Klassen mit der höheren Rate lüften müssten, um der ÖNORM zu entsprechen.

Grenzwert in weniger als 10 % der Fälle nicht einhalten, bei einer durchschnittlichen Lüftungsrate von 15,6 l/(s·Person).

Für andere Schularten, darunter ABHS, KMS, MS, TGS und WS, die SuS im Alter von 11 bis 18 Jahren unterrichten, empfiehlt die ÖNORM H 6039:2023 einen Mindestlüftungsgrenzwert von 9,2 l/(s·Person). Im Winter wird dieser Wert bei einem hohen Anteil (86–90 %) der täglichen mittleren Lüftungsraten in Klassenzimmern dieser Schularten nicht erreicht, wobei die mittleren Lüftungsraten zwischen 5,5 und 5,7 l/(s·Person) liegen. Im Sommer 2024 verbessert sich die Belüftung jedoch deutlich, mit Mittelwerten zwischen 13,9 und 15,9 l/(s·Person).

Tabelle 4-15 Saisonale Statistiken zu täglichen mittleren VR, einschließlich des Prozentsatzes der Unterschreitung der VR-Schwelle für verschiedene Schularten.

Jahreszeit	Schul-typ	Min [l/(s·P.)]	Max [l/(s·P.)]	Perzentile			Mittelwert [l/(s·P.)]	Unterschreitung			
				25 [l/(s·P.)]	50 [l/(s·P.)]	75 [l/(s·P.)]		<14 l/(s·P.) [%]	<10 l/(s·P.) [%]	<9,2 l/(s·P.) [%]	<7,8 l/(s·P.) [%]
Sommer '23	ABHS	2,8	25,4	10,8	15,0	19,5	15,0	45	21	17	10
	KMS	1,7	25,3	10,5	14,5	18,6	14,6	47	25	21	13
	MS	5,3	25,4	11,7	15,5	20,0	15,8	40	17	10	6
	SS	6,9	25,3	9,9	13,7	19,8	14,8	55	27	23	9
	TGS	3,6	25,4	11,8	16,3	20,2	15,9	35	18	14	7
	VS	1,7	18,2	9,1	12,3	15,1	11,9	63	32	25	17
	WS	2,8	25,3	10,5	14,8	19,6	15,0	45	21	18	12
Herbst	ABHS	1,2	25,4	3,7	5,2	8,2	6,6	93	83	80	73
	KMS	1,2	25,3	3,4	4,9	8,0	6,5	92	82	80	74
	MS	1,3	25,4	3,9	5,4	7,8	6,5	95	87	83	75
	SS	3,4	25,3	8,6	11,5	16,0	12,6	64	36	30	19
	TGS	1,3	25,4	3,7	5,3	8,1	6,7	93	83	80	73
	VS	0,9	18,2	3,5	5,0	7,5	5,9	97	88	84	77
	WS	1,5	25,3	3,7	5,0	7,3	6,3	94	87	84	78
Winter	ABHS	1,1	25,4	3,4	4,6	6,6	5,7	96	90	87	82
	KMS	1,0	25,3	3,2	4,4	6,3	5,6	95	88	86	82
	MS	1,2	25,3	3,6	4,9	6,8	5,7	97	92	90	83
	SS	3,4	25,4	8,3	12,0	16,0	12,5	63	36	31	23
	TGS	1,2	25,4	3,4	4,7	6,9	5,7	97	90	88	81
	VS	1,0	18,2	3,2	4,6	6,8	5,5	98	90	87	81
	WS	1,3	25,3	3,5	4,6	6,5	5,5	97	93	90	85
Frühling	ABHS	1,3	25,4	5,5	7,8	11,6	9,1	85	67	61	50
	KMS	1,3	25,4	5,4	8,4	13,2	9,8	78	60	55	46
	MS	1,4	25,4	5,7	8,0	11,3	9,0	87	67	61	48
	SS	3,2	25,4	11,0	14,7	20,0	15,2	44	20	16	9
	TGS	1,6	25,3	6,0	8,9	13,4	10,2	78	58	52	42
	VS	1,0	18,2	4,8	6,9	10,0	7,7	92	75	70	59
	WS	1,4	25,4	5,4	8,1	12,2	9,4	81	65	59	47
Sommer '24	ABHS	2,2	25,4	9,6	13,6	18,4	14,1	52	28	22	14
	KMS	2,4	25,3	11,0	14,7	19,7	15,1	47	20	17	9
	MS	2,6	25,4	9,5	13,4	17,9	13,9	53	28	21	13
	SS	6,1	25,1	10,8	15,7	19,5	15,6	41	18	10	3
	TGS	3,6	25,2	11,7	15,3	19,7	15,5	42	17	13	7
	VS	1,8	18,2	8,0	11,1	14,3	11,1	73	41	35	24
	WS	4,8	25,3	11,6	16,2	20,3	15,9	39	15	11	6
Jahr	ABHS	1,1	25,4	4,0	5,9	9,5	7,5	89	77	73	66
	KMS	1,0	25,4	3,7	5,7	10,2	7,6	87	75	71	65
	MS	1,2	25,4	4,3	6,2	9,4	7,5	90	78	74	65
	SS	3,2	25,4	9,1	12,6	17,2	13,3	58	31	26	17
	TGS	1,2	25,4	4,1	6,1	10,0	7,8	87	75	71	64
	VS	0,9	18,2	3,7	5,6	8,7	6,6	94	82	78	70
	WS	1,3	25,4	4,0	5,7	9,1	7,3	89	79	76	68

## 4.2.3.5 Lüftungsrate nach Region

Es wurden regionale Unterschiede bei den täglichen mittleren Lüftungsraten in den Schulen festgestellt, wobei Schulen in Kärnten die niedrigsten jährlichen Tagesmittelwerte verzeichnete und Schulen in Burgenland insgesamt eine bessere Leistung aufwies (Abbildung 4-30 und Tabelle 4-16).

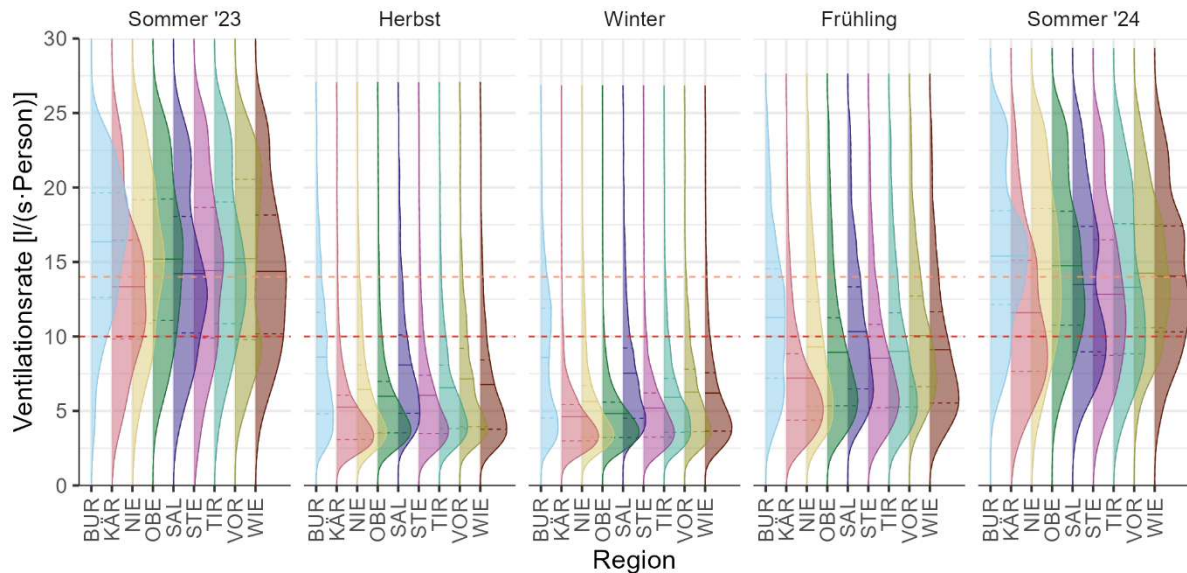


Abbildung 4-30 Saisonale Verteilung der VR in l/(s·Person) für verschiedene Regionen separat einschließlich EN 16798-1-Schwellenwert (10 l/(s·Person), IEQ<sub>1</sub>, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75-Perzentil angeben

Diese regionalen Unterschiede waren im Winter am ausgeprägtesten, wo die Kärntner Schulen mit einer mittleren täglichen Lüftungsrate von 4,6 l/(s·Person) in 96 % der Fälle den empfohlenen Schwellenwert von 10 l/(s·Person) nicht erreichten. Im Burgenland wurde dieser Schwellenwert dagegen am seltensten überschritten, wobei 62 % der täglichen durchschnittlichen Lüftungsraten in den Klassenzimmern unter dem Schwellenwert lagen und eine mittlere Lüftungsrate von 8,6 l/(s·Person) verzeichnet wurde.

Die Lüftungsraten verbesserten sich im Sommer 2024, wobei die täglichen Durchschnittswerte zwischen 11,6 l/(s·Person) in Kärnten und 15,4 l/(s·Person) im Burgenland lagen. Die meisten Regionen wiesen Werte über dem Schwellenwert von 10 l/(s·Person) auf, wobei Kärnten in 43 % der Zeit Tagesdurchschnittswerte unter dem Schwellenwert verzeichnete, verglichen mit nur 19 % der Zeit in Burgenland.

Tabelle 4-16 Saisonale Statistiken der VR einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitung der VR-Schwelle für verschiedene Regionen.

Jahreszeit	Bundesland	Min [l/(s·P.)]	Max [l/(s·P.)]	Perzentile			Mittelw. [l/(s·P.)]	Unterschreitung	
				25 [l/(s·P.)]	50 [l/(s·P.)]	75 [l/(s·P.)]		<14 l/(s·P.) [%]	<10l/(s·P.) [%]
Sommer '23	BUR	4,1	23,9	12,6	16,8	19,6	16,4	28	10
	KÄR	3,0	25,2	9,8	12,9	16,5	13,3	55	27
	NIE	1,7	25,4	10,9	15,2	19,2	15,0	42	21
	OBE	4,0	25,4	11,1	15,4	19,2	15,2	43	20
	SAL	4,0	25,3	10,2	13,6	18,1	14,2	54	24
	STE	1,7	25,3	9,9	14,7	18,7	14,4	47	25
	TIR	3,3	25,1	10,9	14,7	19,0	15,0	46	19
	VOR	4,9	25,3	9,8	15,1	20,5	15,2	42	29
	WIE	2,8	25,4	10,2	14,0	18,2	14,4	50	24
Herbst	BUR	1,5	25,4	4,8	7,6	11,6	8,6	86	66
	KÄR	1,3	25,2	3,1	4,2	6,1	5,3	96	92
	NIE	1,2	25,4	3,5	5,0	8,1	6,4	93	83
	OBE	1,2	25,4	3,5	4,8	7,0	6,0	95	88
	SAL	1,9	25,4	4,8	6,8	10,1	8,1	89	75
	STE	0,9	25,4	3,5	4,9	7,4	6,0	95	88
	TIR	1,3	25,3	3,8	5,4	8,1	6,6	94	85
	VOR	1,7	25,3	3,9	5,8	9,2	7,2	92	79
	WIE	1,2	25,3	3,8	5,5	8,4	6,8	93	82
Winter	BUR	1,3	25,3	4,5	7,9	11,9	8,6	87	62
	KÄR	1,2	24,9	3,0	4,0	5,4	4,6	99	96
	NIE	1,1	25,3	3,2	4,4	6,7	5,6	96	88
	OBE	1,2	25,3	3,2	4,2	5,6	4,8	98	96
	SAL	1,9	25,4	4,5	6,4	9,2	7,5	91	79
	STE	1,0	25,1	3,2	4,5	6,2	5,2	98	94
	TIR	1,3	25,2	3,6	5,0	7,2	5,9	97	89
	VOR	1,2	25,4	3,6	5,2	7,8	6,3	96	86
	WIE	1,0	25,4	3,6	5,1	7,6	6,2	95	87
Frühling	BUR	1,9	25,4	7,2	10,9	14,5	11,3	72	44
	KÄR	1,2	25,3	4,4	6,2	8,8	7,2	93	82
	NIE	1,4	25,4	5,3	8,1	12,3	9,3	82	63
	OBE	1,4	25,4	5,3	7,7	11,3	8,9	85	68
	SAL	1,6	25,4	6,5	9,3	13,3	10,3	78	56
	STE	1,0	25,3	5,2	7,4	10,8	8,5	88	70
	TIR	1,3	25,4	5,3	7,8	11,6	9,0	84	66
	VOR	1,8	25,3	6,6	9,1	12,7	10,1	81	58
	WIE	1,2	25,4	5,5	7,9	11,7	9,1	84	66
Sommer '24	BUR	4,9	25,2	12,1	15,3	18,4	15,4	40	19
	KÄR	1,9	25,3	7,7	10,8	15,1	11,6	68	43
	NIE	2,2	25,3	10,3	14,2	18,6	14,5	49	23
	OBE	3,0	25,3	10,8	14,2	18,4	14,8	48	20
	SAL	2,6	25,3	9,0	12,8	17,4	13,5	55	32
	STE	1,8	25,4	8,7	12,3	16,5	12,8	61	34
	TIR	2,7	25,2	8,8	12,6	17,6	13,3	58	33
	VOR	3,5	25,4	10,6	13,9	17,5	14,2	51	21
	WIE	3,0	25,3	10,3	13,6	17,4	14,0	53	24
Jahr	BUR	1,3	25,4	5,4	9,1	13,0	9,7	80	56

KÄR	1,2	25,3	3,4	4,9	7,4	6,2	94	86
NIE	1,1	25,4	3,8	5,7	9,7	7,3	89	76
OBE	1,2	25,4	3,8	5,4	8,6	7,0	90	81
SAL	1,6	25,4	5,2	7,6	11,5	8,9	84	68
STE	0,9	25,4	3,8	5,7	8,7	7,0	92	81
TIR	1,3	25,4	4,2	6,1	9,6	7,6	89	77
VOR	1,2	25,4	4,4	7,0	10,7	8,2	87	71
WIE	1,0	25,4	4,2	6,2	9,6	7,6	89	77

#### 4.2.3.6 Lüftungsraten im Vergleich der Schulen und Klassenräume mit der besten und der schlechtesten Leistung

Von den insgesamt 120 ImpAQS-Schulen wurden 118 in Bezug auf ihre tägliche mittlere Lüftungsrate im Winter in eine Rangfolge von der Besten zur Schlechtesten gebracht. Dies wurde durchgeführt, um die Schwankungen zu veranschaulichen, die auf beiden Seiten des Medians auftreten (Abb. 4-31). Gemäß Abschnitt 4.2.2.8 wurden zwei Schulen (Schulnummer 21 und 59) nicht in die Rangliste aufgenommen, da sie hauptsächlich als Abendschulen betrieben werden und dies den Vergleich mit den anderen Schulen verzerren würde, da sie während der Kernzeit des Tages (von 8:00 bis 14:00 Uhr) oft nicht belegt sind. Es ist zu beachten, dass identifizierende Informationen wie Schultyp und Standort in dieser Abbildung bewusst weggelassen wurden, um die öffentliche Identifizierung einzelner Schulen zu vermeiden.

Die Schulen mit der niedrigsten täglichen mittleren Lüftungsrate befinden sich im unteren Quartil (Q1) und sind rot gefärbt, die Schulen im zweiten Quartil (Q2) sind orange, während die Schulen im dritten Quartil (Q3) hellblau und die Schulen im höchsten Quartil (Q4) dunkelblau sind (Abbildung 4-31). Auffallend ist, dass die tägliche mittlere Lüftungsrate in der Schule mit der besten Leistung (gemittelt über die 10 teilnehmenden Klassenräume in jeder Schule) mehr als 10 l/(s·Person) höher ist als in der Schule mit der schlechtesten Leistung. Es ist auch zu erkennen, dass die größte Abweichung an den Enden von Q1 und Q4 auftritt, wo die 10 leistungsstärksten und die 10 leistungsschwächsten Schulen visuell identifiziert werden können. Diese Erkenntnis deutet darauf hin, dass es möglicherweise einzigartige Faktoren oder eine Kombination davon gibt, die erklären, warum die besten 10 Schulen besser abschneiden als der Rest ihres Quartils und die schlechtesten 10 Schulen schlechter abschneiden als der Rest ihres Quartils. Unabhängig von den zugrunde liegenden Ursachen weist dieses Ergebnis auf das Potenzial erheblicher gesundheitlicher und leistungsbezogener Ungleichheiten in österreichischen Schulen hin, das sich aus der ausgeprägten Variation der Lüftungsraten ergibt.

Ein entscheidender Faktor für diese Rangfolge ist die Art des Lüftungssystems, da viele der Schulen mit mechanischer Lüftung besser abschneiden als Schulen mit natürlicher Lüftung. Mechanische Lüftungssysteme sind so konzipiert, dass sie einen kontrollierten Luftstrom gewährleisten und (bei ordnungsgemäßer Wartung und Bedienung) die mediane Lüftungsrate, wie in Abbildung 4-37 dargestellt, durch einen konstanten Luftaustausch erheblich erhöhen können. Diese Fähigkeit und die Möglichkeit, die Außenluft zusätzlich zu filtern, sind besonders in Umgebungen wichtig, in denen die Qualität der Außenluft beeinträchtigt sein kann (Abschnitt 4.3.2).



Die Rangliste zeigt jedoch auch, dass allein das Vertrauen in eine mechanische Belüftung keinen Platz in den Top 10 garantiert. Auch wenn die natürliche Belüftung als Mittel zur Kontrolle der Raumluftqualität bei kalten Außentemperaturen weniger akzeptabel sein kann, spielt auch die Belegungsichte im Klassenzimmer eine wichtige Rolle. In dieser Hinsicht schneiden die SS-Schulen besser ab als viele der mechanisch belüfteten Schulen, da ihre räumliche Dichte im Vergleich zu anderen Schulen viel höher ist (Abschnitt 4.2.1.7).

Im Gegensatz zur durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration werden Volksschulen aufgrund ihrer geringeren Lüftungsrate benachteiligt, da die CO<sub>2</sub>-Emissionsrate bei Kindern unter 11 Jahren niedriger ist als bei Kindern über 11 Jahren. Das bedeutet, dass eine Volksschulklasse (VS) eine niedrigere Lüftungsrate benötigt als ein Klassenzimmer mit älteren SuS (aufgrund ihres geringeren Stoffwechsels), um die gleiche stabile CO<sub>2</sub>-Konzentration zu erreichen. Dies erschwert es natürlich belüfteten Volksschulen, vergleichsweise hohe Lüftungsraten zu erreichen, ohne strengere CO<sub>2</sub>-Ziele festzulegen (Abschnitt 3.4.1). Daher sind nur zwei Volksschulen (obwohl mechanisch belüftet) unter den zehn leistungsstärksten Schulen im Vergleich zu vier Schulen, wenn mittlere tägliche CO<sub>2</sub>-Werte verglichen werden (Abb. 4-25).

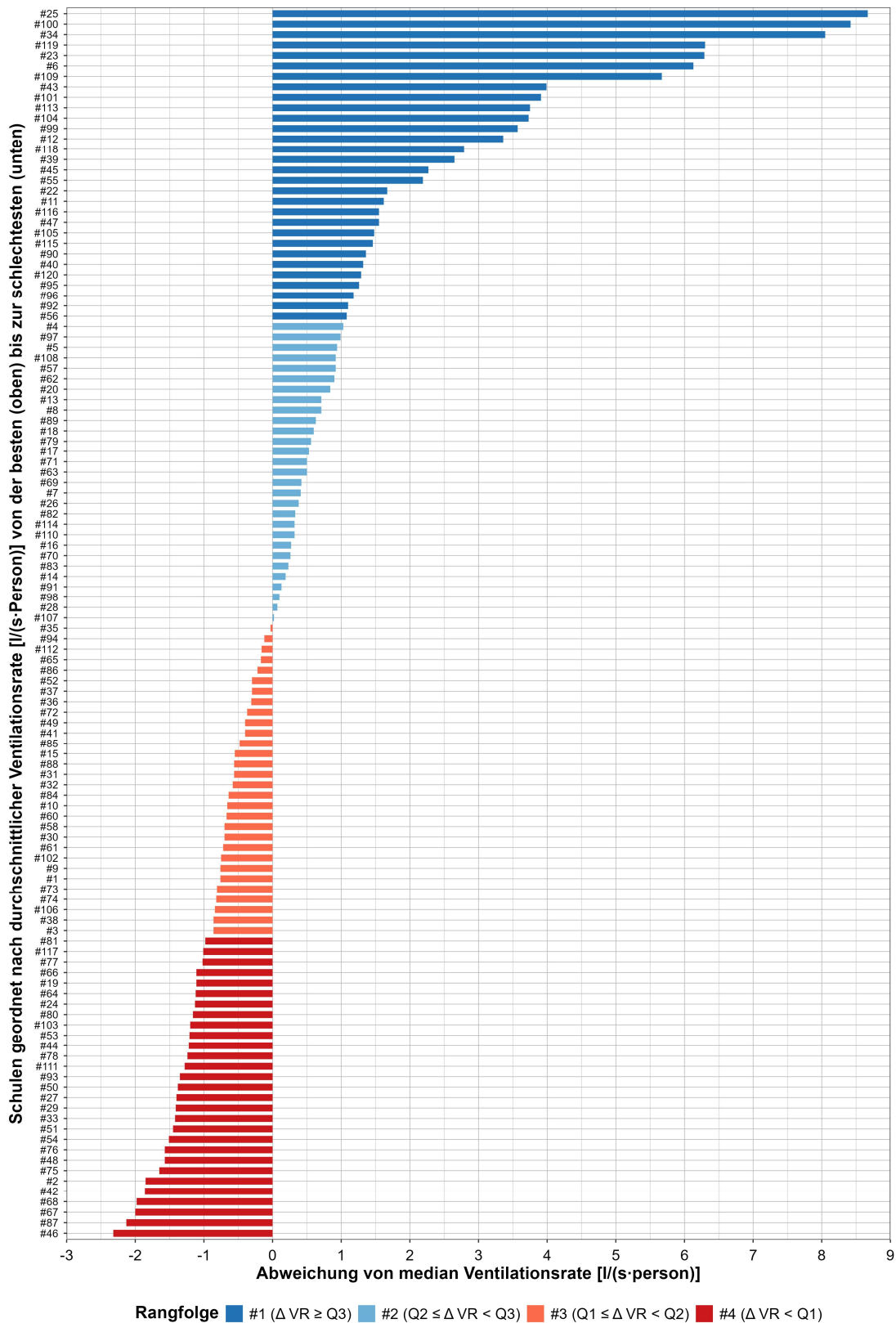


Abbildung 4-31 Horizontales Balkendiagramm – Rangfolge von 118 ImpAQS-Schulen (von den besten bis zu den schlechtesten) nach der mittleren Belüftungsrate

## 4.3 Einfluss lokaler Umweltqualitätsfaktoren auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen

In diesem Abschnitt soll die **Forschungsfrage 2** beantwortet werden: „Hängen die Ergebnisse für die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Lüftungspraktiken von der Jahreszeit und/oder anderen lokalen Umweltfaktoren (z. B. thermischer Komfort, Luftverschmutzung usw.) ab?“

Um die möglichen Auswirkungen von Umweltfaktoren (die außerhalb des Klassenzimmers auftreten) auf die resultierenden CO<sub>2</sub>- und Belüftungsraten in den Klassenzimmern zu verstehen, ist es wichtig, Umweltdaten in der Nähe der Schulen auszuwerten. Zunächst werden die CO<sub>2</sub>-Messungen im Freien analysiert, die am Standort der einzelnen Schulen aufgezeichnet wurden (Abschnitt 4.3.1). Zweitens werden vier Hauptluftschadstoffe (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>) untersucht, die in der Nähe der Schulen gemessen wurden (Abschnitt 4.3.2). Schließlich wird die Beziehung zwischen den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen und anderen Umweltfaktoren, die den thermischen Komfort beeinflussen, einschließlich der Außen- und Innenlufttemperatur, bewertet (Abschnitt 4.3.3). Eine zusätzliche subjektive Analyse der Auswirkungen von Außenlärm auf die Fähigkeit von LuL, ihre Klassenräume zu lüften, findet sich in Abschnitt 5.2.2 und 5.2.4.

### 4.3.1 CO<sub>2</sub>-Messungen im Freien

Die Schwankungen der CO<sub>2</sub>-Messungen im Freien an den ImpAQS-Schulen im Zeitraum 2023-24 sind in Abb. 4-32 dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Werte in Abb. 4-32 ausgeglichen wurden, um Höhenunterschiede zwischen den Schulen zu korrigieren (Anhang B.3). Diese Werte variieren im Laufe des Jahres entsprechend dem saisonalen CO<sub>2</sub>-Trend, der durch die saisonale Kohlenstoffbindung der Biomasse im Frühjahr und Herbst sowie durch die verstärkte Verbrennung fossiler Brennstoffe aufgrund der Nutzung von Heizsystemen im Winter beeinflusst wird. Darüber hinaus gibt es lokale Einflüsse, bei denen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in städtischen Gebieten aufgrund der höheren Verkehrs- und Industriedichte oft erhöht sind. Auch lokale Luftströmungsmuster und saisonale Wettertrends können die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen beeinflussen. Die Schwankungen der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration im Freien der ImpAQS-Schulen (Abb. 4-32) können mit den CO<sub>2</sub>-Hintergrundkonzentrationen am Sonnblick-Observatorium (die in der Regel niedriger sind als anderswo in Österreich) und der städtischen CO<sub>2</sub>-Konzentration am Arsenal Tower in Wien verglichen werden, die auf die höheren Konzentrationen hinweisen, die typischerweise in einem städtischen Kontext zu finden sind (Abb. 3-11).

Die Schwankungen der täglichen mittleren Außenluft-CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (Abb. 3-11 und 4-32) (sowie Daten mit höherer Auflösung) können sich über einen relativ kurzen Zeitraum um bis zu 75 ppm (oder mehr) verändern, was Auswirkungen auf die konsistente Messung normativer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen hat. Aus diesem Grund verwenden EN 16798-1 (CEN, 2019) und ISO 17772 (ISO, 2017) relative Referenzwerte, die als Funktion der lokalen Außenluft-CO<sub>2</sub>-Konzentration festgelegt werden (Tab. 2-6). Da jedoch andere weit verbreitete Standards (z.B. BMK, ISO 16000-41) und frühere Studien absolute Schwellenwerte verwendet haben, wurden die Innenraum-CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (Abschnitt 4.2.2) auf diese Weise bewertet.

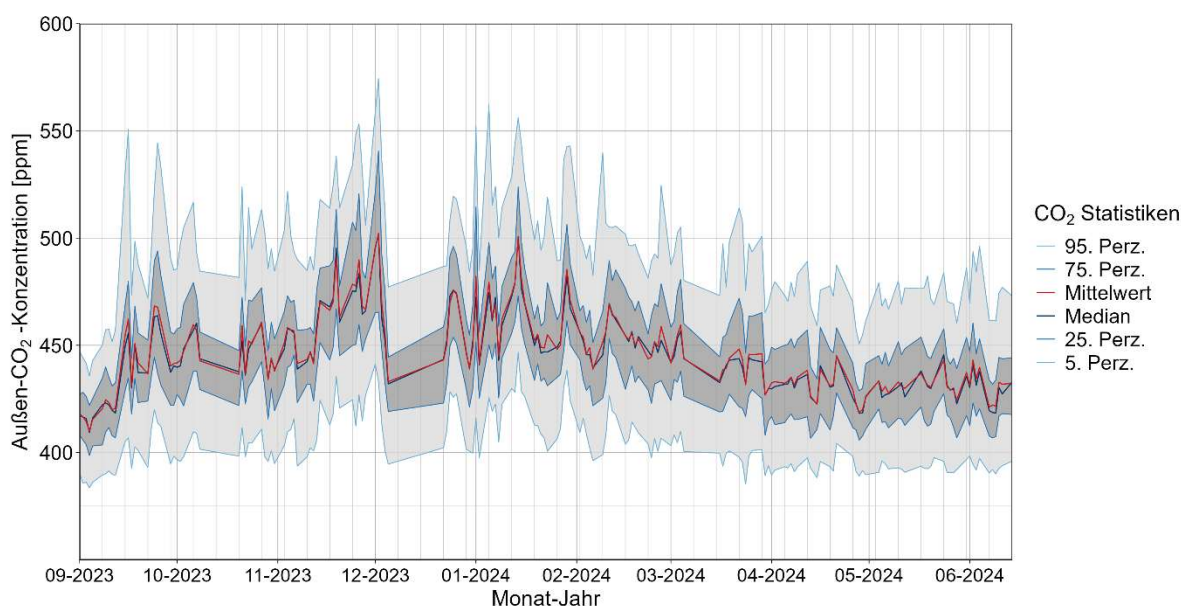


Abbildung 4-32 Tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Freien an ImpAQS-Schulen<sup>24</sup> für das Schuljahr 2023-24

#### 4.3.2 Schadstoffkonzentrationen in der Außenluft (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>)

Die nächstgelegene UBA-Messstation für Schadstoffe im Freien wurde mithilfe von Ratschlägen von UBA-Expert\*innen in Österreich der entsprechenden Schule zugeordnet (Abb. 3-12). Die in der folgenden Analyse dargestellten Werte können mithilfe von Tab. A-3 in Anhang B.9 den einzelnen Schulen zugeordnet werden. Bei der Interpretation der folgenden Daten (Abb. 4-33 bis 4-36) sollten die angegebenen Werte als Richtwerte für die lokalen Hintergrundkonzentrationen in der Region der Schulen angesehen werden, da die vorgestellten Messungen nicht am spezifischen Standort jeder Schule durchgeführt wurden. Da die Anzahl der Überwachungsstationen im Netzwerk begrenzt ist, sollte außerdem die Entfernung zur nächstgelegenen Überwachungsstation und die vorherrschenden Windrichtungen bei der Bewertung dieser Ergebnisse auf der Ebene der einzelnen Schulen berücksichtigt werden (Tab. A-3 in Anhang B.9).

##### 4.3.2.1 PM<sub>2,5</sub>-Konzentrationen in der Außenluft

Eine Zusammenfassung der Auswirkungen von PM<sub>2,5</sub> auf die menschliche Gesundheit und die relevanten Schwellenwerte der EU und der WHO sind in Abschnitt 3.7.2 beschrieben. In diesem Abschnitt werden die überwachten Daten für das Schuljahr 2023–24 vorgestellt, die von der nächstgelegenen Überwachungsstation des Umweltbundesamtes (UBA) zu jeder Schule stammen. Ziel dieser Analyse ist es, die typischen Hintergrundwerte von PM<sub>2,5</sub> in der Region der teilnehmenden Schulen zu ermitteln.

<sup>24</sup> Die an den ImpAQS-Schulen erfassten CO<sub>2</sub>-Werte beinhalten einen Höhenausgleich, jedoch wurden die Daten nicht angepasst, um Schwankungen der Lufttemperatur und des Luftdrucks auszugleichen. Dies liegt daran, dass die von den Geräten erfassten Luftdruckmessungen in vielen Fällen als unzuverlässig eingestuft wurden.

Die WHO-Richtlinien besagen, dass die jährliche Durchschnittskonzentration von  $\text{PM}_{2,5}$   $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  nicht überschreiten sollte. Es gilt auch ein Tagesgrenzwert (24 Stunden) von  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beim 99. Perzentil der Jahresverteilung (entspricht drei bis vier Überschreitungstagen pro Jahr) (WHO, 2021b). Die Mehrheit (98 %) der UBA-Stationen in dieser Studie (mit Ausnahme der UBA-Station ZOE2) überschreitet den Grenzwert für die jährliche mittlere  $\text{PM}_{2,5}$ -Konzentration. In einem Fall (UBA-Station 0170) liegt der Jahresmittelwert mehr als dreimal über dem Schwellenwert der Luftqualitätsrichtlinie (AQG). In Bezug auf den Tagesgrenzwert zeigen fast alle (98 %) Stationen 3 oder mehr Überschreitungen des AQG-Grenzwerts für  $\text{PM}_{2,5}$  pro Jahr (Abb. 4-33). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass fast jede Schule in der ImpAQS-Studie (mit Ausnahme einer Schule in Niederösterreich, die sich in der Nähe der UBA-Station ZOE2 befindet) wahrscheinlich den  $\text{PM}_{2,5}$ -Expositionsgrenzwert der WHO überschreitet. Um dieses Ergebnis zu bestätigen, wären weitere Messungen am Standort der einzelnen Schulen erforderlich.

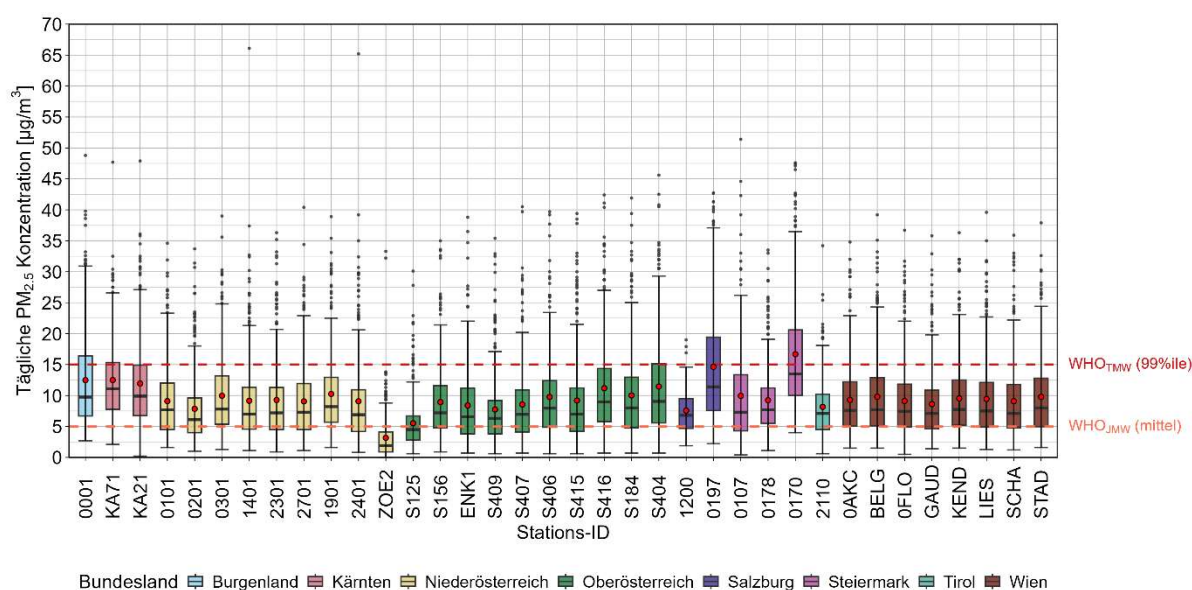


Abbildung 4-33 Boxplot mit jährlicher Variation des Tagesmittelwerts von  $\text{PM}_{2,5}$ , Konzentration der nächstgelegenen UBA-Messtation im Vergleich zu den AQG-Schwellenwerten der WHO für Tages- und Jahresmittelwerte, rote Punkte stellen den Jahresmittelwert dar

#### 4.3.2.2 $\text{PM}_{10}$ -Konzentrationen in der Außenluft

Eine Zusammenfassung der Auswirkungen von  $\text{PM}_{10}$  auf die menschliche Gesundheit und der relevanten EU- und WHO-Grenzwerte ist in Abschnitt 3.7.3 beschrieben. In diesem Abschnitt werden die Überwachungsdaten für das Schuljahr 2023–24 vorgestellt, die von der nächstgelegenen Überwachungsstation des Umweltbundesamtes (UBA) zu jeder Schule stammen. Ziel dieser Analyse ist es, die typischen Hintergrundwerte von  $\text{PM}_{10}$  in der Region der teilnehmenden Schulen zu ermitteln. Die Entfernungen zwischen den Schulen und den jeweiligen Überwachungsstationen sind in Tab. A-3 in Anhang B.9 aufgeführt.

Der Jahresmittelwert der AQG für  $\text{PM}_{10}$  der WHO beträgt  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , während der tägliche (24-Stunden-) Grenzwert von  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beim 99. Perzentil gilt (was 3–4 Überschreitungstagen pro Jahr entspricht). Es ist ersichtlich (Abb. 4-34), dass etwa die Hälfte (49 %) der Stationen den Jahresmittelwert der AQG überschreitet. Während der tägliche AQG-Schwellenwert an mehr als der Hälfte (59 %) der Stationen mehr als dreimal pro Jahr überschritten wird. Obwohl dies weniger

Überschreitungen als bei PM<sub>2,5</sub> darstellt, deutet dies darauf hin, dass die Mehrheit der österreichischen Schulen wahrscheinlich die PM<sub>10</sub>-Expositionsgrenzwerte der WHO überschreitet. Um dieses Ergebnis zu bestätigen, wären weitere Messungen an den einzelnen Schulen erforderlich.

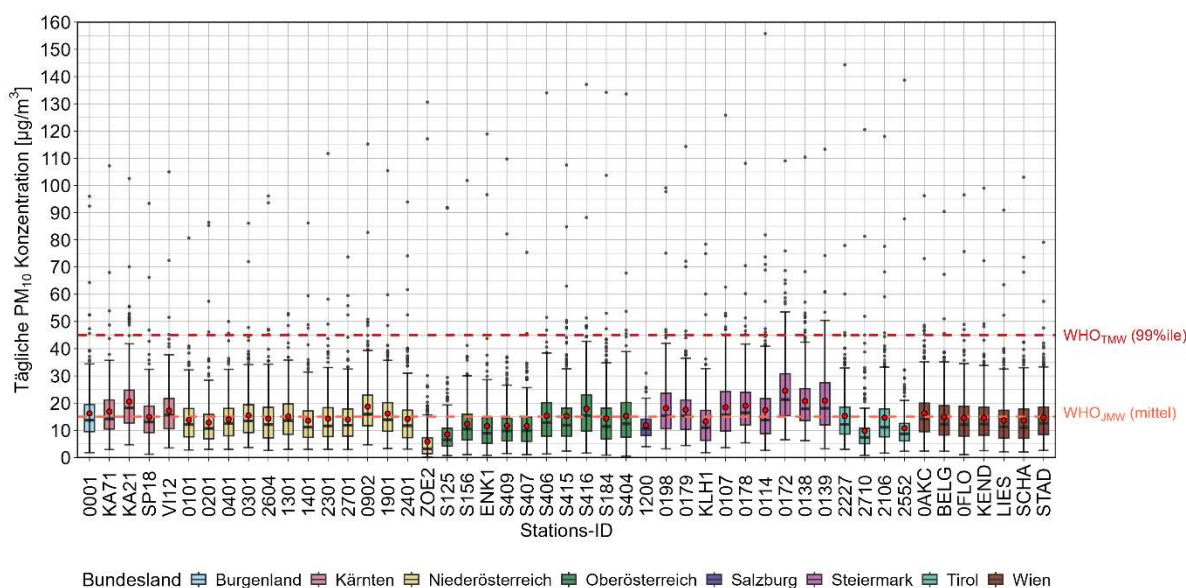


Abbildung 4-34 Boxplot mit jährlicher Variation der täglichen PM<sub>10</sub>-Konzentration der nächstgelegenen UBA-Messtation im Vergleich zu den AQG-Schwellenwerten der WHO für Tages- und Jahresmittelwerte. Rote Punkte stellen den Jahresmittelwert dar

#### 4.3.2.3 NO<sub>2</sub>-Konzentrationen in der Außenluft

Eine Zusammenfassung der Auswirkungen von NO<sub>2</sub> auf die menschliche Gesundheit und der relevanten EU- und WHO-Schwellenwerte ist in Abschnitt 3.7.4 beschrieben. In diesem Abschnitt werden die Überwachungsdaten für das Schuljahr 2023–24 vorgestellt, die von der nächstgelegenen Überwachungsstation des Umweltbundesamtes (UBA) zu jeder Schule stammen. Ziel dieser Analyse ist es, die typischen Hintergrundwerte von NO<sub>2</sub> in der Region der teilnehmenden Schulen zu ermitteln. Die Entfernungen zwischen den Schulen und den jeweiligen Überwachungsstationen sind in Tab. A-3 in Anhang B.9 aufgeführt.

Für NO<sub>2</sub> werden drei WHO-AQG-Werte angegeben: ein Jahresgrenzwert von 10 µg/m<sup>3</sup>, ein Tagesgrenzwert von 25 µg/m<sup>3</sup> und ein Ein-Stunden-Grenzwert von 200 µg/m<sup>3</sup>, wobei der Tagesgrenzwert am 99. Perzentil und der Jahresgrenzwert als Mittelwert gilt. Stündliche Überschreitungen werden hier nicht gemeldet, da Messungen mit dieser Auflösung am genauen Standort der Schule durchgeführt werden müssen, um sicherzustellen, dass kurzfristige lokale Einflüsse erfasst werden. In Bezug auf den Jahresgrenzwert von 10 µg/m<sup>3</sup> ist ersichtlich (Abb. 4-35), dass die Mehrheit (82 %) der Stationen den AQG-Grenzwert überschreitet. Während der Tagesgrenzwert von 25 µg/m<sup>3</sup> beim 99. Perzentil von 94 % der Stationen überschritten wird. Dies deutet darauf hin, dass fast jede Schule in der Studie (mit Ausnahme von drei Schulen) wahrscheinlich NO<sub>2</sub>-Werten ausgesetzt ist, die über den Grenzwerten der WHO liegen. Um dieses Ergebnis zu bestätigen, wären weitere Messungen am Standort der einzelnen Schulen erforderlich.

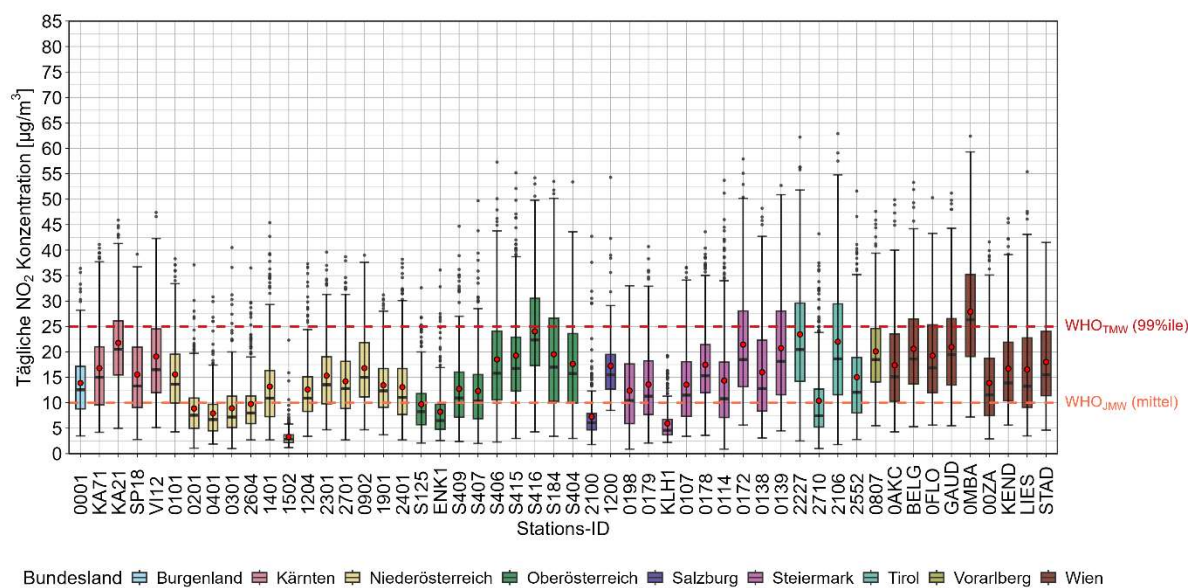


Abbildung 4-35 Boxplot mit jährlicher Variation der externen NO<sub>2</sub>-Konzentration, Konzentration der nächstgelegenen Messstation pro Region im Vergleich zu den AQG-Schwellenwerten der WHO für Tages- und Jahresmittelwerte, rote Punkte stellen den Jahresmittelwert dar

#### 4.3.2.4 O<sub>3</sub>-Konzentrationen in der Außenluft

Eine Zusammenfassung der Auswirkungen von O<sub>3</sub> auf die menschliche Gesundheit und der relevanten EU- und WHO-Grenzwerte ist in Abschnitt 3.7.5 beschrieben. In diesem Abschnitt werden die Überwachungsdaten für das Schuljahr 2023–24 vorgestellt, die von der nächstgelegenen Überwachungsstation des Umweltbundesamtes (UBA) zu jeder Schule stammen. Ziel dieser Analyse ist es, die typischen Hintergrundwerte von O<sub>3</sub> in der Region der teilnehmenden Schulen zu ermitteln. Die Entfernungen zwischen den Schulen und den jeweiligen Überwachungsstationen sind in Tab. A-3 in Anhang B.9 aufgeführt.

Die WHO-Richtlinien sehen zwei AQG-Schwellenwerte für Ozon vor. Ein maximaler 8-Stunden-Mittelwert von 100 µg/m<sup>3</sup>, bewertet am 99. Perzentil, und ein Saisonaler Spitzenwert von 60 µg/m<sup>3</sup> in der Hochsaison. Der Wert für die Hochsaison ist definiert als Durchschnitt der maximalen 8-Stunden-Mittelwertkonzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Sechsmonats-Durchschnittskonzentration von O<sub>3</sub>. In Bezug auf den maximalen täglichen 8-Stunden-Mittelwert ist zu erkennen (Abb. 4-36), dass jede UBA-Station den täglichen 8-Stunden-Mittelwert von 100 µg/m<sup>3</sup> beim 99. Perzentil deutlich überschreitet, was darauf hindeutet, dass alle Schulen in der Nähe dieser Stationen wahrscheinlich den AQG-Grenzwert der WHO nicht einhalten würden.

Zur Bewertung der Ozon-Spitzenkonzentrationen wurden die täglichen 8-Stunden-Höchstwerte berechnet, indem die höchste durchschnittliche Konzentration über einen beliebigen aufeinanderfolgenden 8-Stunden-Zeitraum innerhalb eines jeden Tages herangezogen wurde. Anschließend wird für jeden Monat ein 6-Monats-Mittelwert berechnet, indem die täglichen 8-Stunden-Höchstwerte des laufenden Monats und der vorangegangenen 5 Monate gemittelt werden. Diese Bewertung bietet eine stabile, langfristige Sicht auf die anhaltende Ozonbelastung und ermöglicht die Identifizierung des Spitzenmonats. Die Ozonwerte erreichten ihren Höchststand im September, basierend auf dem 6-Monats-Mittelwert (der die täglichen Höchstwerte der wärmsten Monate von April bis September mittelt). Die abgeleiteten Spitzenwerte liegen deutlich über dem von

der WHO festgelegten Grenzwert von  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  für die Hauptsaison an allen Stationen (Anhang C.1.3), wobei die gleitenden 6-Monats-Durchschnittswerte im September 2023 zwischen  $85,1$  und  $103,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  lagen. Daraus lässt sich schließen, dass der Wert für die Hauptsaison für  $\text{O}_3$  in der Nähe jeder Schule  $42\text{--}72\%$  über dem WHO Grenzwert liegt. Wie erwartet sinken die Ozonwerte in den Wintermonaten aufgrund des geringeren Sonnenlichts und der kühleren Temperaturen deutlich, obwohl nur etwa die Hälfte (55 %) aller Stationen im Winter unter den WHO-Grenzwert für die Hauptsaison fällt. Zur Bestätigung dieser Ergebnisse wären weitere Messungen am Standort der einzelnen Schulen erforderlich.

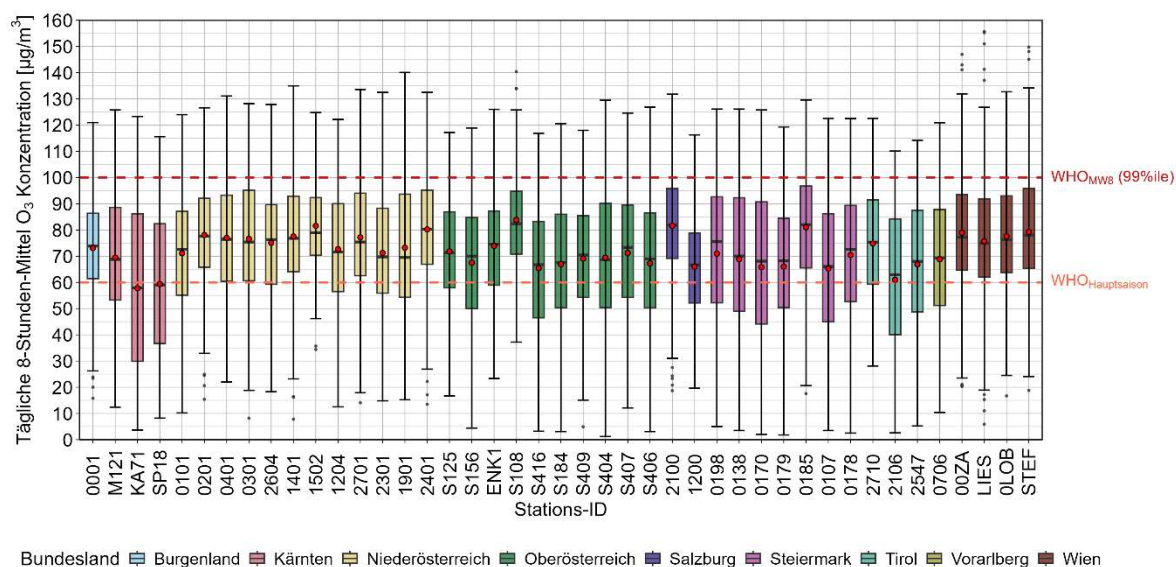


Abbildung 4-36 Boxplot mit jährlicher Variation der externen  $\text{O}_3$ -Konzentration, Konzentration der nächstgelegenen Messstation pro Region im Vergleich zu den Achtstundenmittelwert- und Hauptsaison Grenzwerten der WHO, rote Punkte stellen den Jahresmittelwert dar

### 4.3.3 Zusammenhang zwischen $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Innenräumen und Außen- und Innentemperaturen

Abbildung 4-37 veranschaulicht die Beziehung zwischen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen in Innenräumen und Außen-/Innentemperaturen in österreichischen Klassenzimmern, wobei die Daten aller 120 Schulen aggregiert wurden, um eine einzige tägliche Darstellung für den gesamten Datensatz zu erhalten. Das erste Diagramm (Abb. 4-37, links) zeigt den Zusammenhang zwischen der täglichen durchschnittlichen  $\text{CO}_2$ -Konzentration in Innenräumen und der Außenlufttemperatur, wobei separate glatte Linien für natürlich und mechanisch belüftete Klassenzimmer verwendet werden. Mit steigenden Außentemperaturen sinken die  $\text{CO}_2$ -Werte bei beiden Belüftungsarten. Bei niedrigeren Temperaturen gibt es jedoch einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Belüftungsarten. Dieser Unterschied macht sich bemerkbar, wenn die Außentemperaturen unter  $20^\circ\text{C}$  fallen, zu welchem Zeitpunkt die  $\text{CO}_2$ -Werte in natürlich belüfteten Gebäuden steil ansteigen, während die mechanisch belüfteten Schulen gleichmäßigere und niedrigere  $\text{CO}_2$ -Werte aufweisen. Mechanisch belüftete Schulen sind in der Lage, im Winter deutlich niedrigere  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen aufrechtzuerhalten, wobei sich ein Unterschied von über  $500 \text{ ppm}$  zwischen den beiden Lüftungstypen zeigt, wenn die täglichen mittleren Außentemperaturen unter  $5^\circ\text{C}$  fallen. Wenn die Temperaturen in Richtung Sommer steigen, nähern sich die  $\text{CO}_2$ -Werte für beide Belüftungsarten an, was wahrscheinlich auf das



häufigere Öffnen der Fenster in wärmeren Perioden zurückzuführen ist, wodurch ähnliche Belüftungsbedingungen geschaffen werden.

Im zweiten Diagramm (Abb. 4-37, rechts), das die Beziehung zwischen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen und der Innentemperatur untersucht, ist ein ähnlicher Trend zu beobachten, aber der Unterschied zwischen den beiden Lüftungsarten ist bei höheren Temperaturen weniger ausgeprägt. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die wärmsten Innentemperaturen im Sommer auftreten, wenn die natürliche Belüftung besser vertragen wird. Dennoch gibt es immer noch einen deutlichen Unterschied bei den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, insbesondere bei den niedrigeren Innentemperaturen. Bei Innentemperaturen unter 22°C weisen natürlich belüftete Klassenzimmer CO<sub>2</sub>-Werte auf, die 200-400 ppm höher sind als mechanisch belüftete Klassenzimmer. Dies deutet darauf hin, dass mechanische Lüftungssysteme während der Heizperiode einen erheblichen Vorteil bei der Aufrechterhaltung niedrigerer CO<sub>2</sub>-Werte bieten, obwohl der Unterschied mit steigenden Innentemperaturen geringer wird. Insgesamt ist die mechanische Belüftung zwar durchweg besser bei der Kontrolle der CO<sub>2</sub>-Werte, aber der Unterschied ist in den kälteren Monaten stärker ausgeprägt, insbesondere bei niedrigen Außentemperaturen.

Bei Außentemperaturen von 10 °C oder darunter weisen mechanisch belüftete Klassenräume im Durchschnitt 450–600 ppm niedrigere tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf (Abb. 4-37). Diese Erkenntnis ist im österreichischen Kontext wichtig, da die durchschnittliche Lufttemperatur in Österreich im Jahr 2024 bei 9,3 Grad Celsius lag (etwa 1,9 Grad über dem Durchschnitt von 1991–2020) (Statista, 2025) und da Schulen während der wärmsten Monate (Juli und August) typischerweise geschlossen sind.

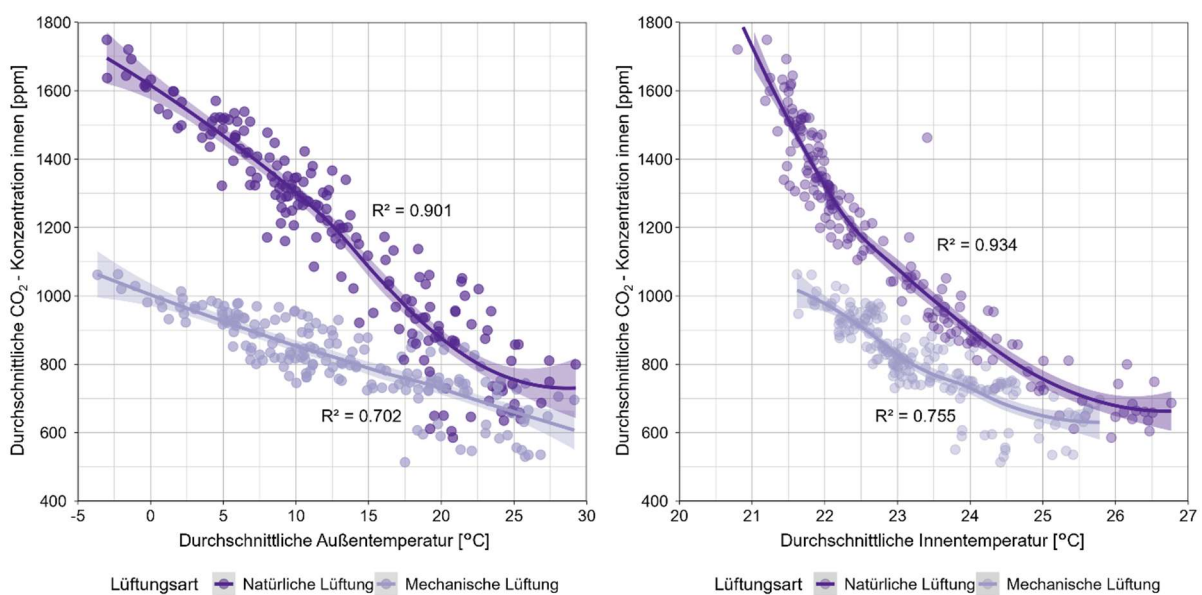


Abbildung 4-37 (Links) Streudiagramm-Korrelation von Außenlufttemperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen mit mechanischer und natürlicher Belüftung und (rechts) Streudiagramm-Korrelation von Innenlufttemperatur und CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen mit mechanischer und natürlicher Belüftung

#### 4.4 Auswirkungen von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und Lüftungsempfehlungen auf die Belüftungsergebnisse in Klassenzimmern

In diesem Abschnitt soll die **Forschungsfrage 3** beantwortet werden: „Erzielen Klassenzimmer, die mit CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und grundlegenden Lüftungsanweisungen ausgestattet sind, bessere Lüftungsergebnisse (niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen) als Klassenzimmer ohne Überwachungsgeräte?“

Um diese Frage zu beantworten, werden direkte Vergleiche zwischen den Kontroll- und Testklassenräumen als passende Paare angestellt (Abschnitt 3.5.4.1). Dies umfasst die Bewertung des Unterschieds zwischen der jährlichen Leistung der gepaarten Klassenräume sowie die Betrachtung dieser Unterschiede auf saisonaler und monatlicher Basis, um zu beurteilen, ob die Vorteile sichtbarer Sensoren zu bestimmten Jahreszeiten stärker ausgeprägt sind (Abschnitt 4.4.1).

Die Analyse in diesem Abschnitt konzentriert sich auf die Vorteile des Einsatzes von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten in natürlich belüfteten Schulen. Da die Nutzer\*innen mechanisch belüfteter Klassenzimmer in der Regel wenig oder gar keine Kontrolle über die Belüftung haben (insbesondere im Winter, wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration am höchsten ist), würde ihre Einbeziehung in diesen Vergleich die Ergebnisse verzerren. Tägliche und stündliche Daten werden wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben bereinigt und aggregiert, um einen fairen Vergleich zwischen Kontroll- und Testklassenzimmern zu gewährleisten. Insbesondere wird ein dynamischer Grenzwert verwendet, um gepaarte Test- und Kontrollklassenräume auszuschließen, die wahrscheinlich unbesetzt oder nur teilweise besetzt sind.

Zur Bewertung der Leistung von Klassenräumen mit Kontroll- und Testsensoren leiten wir zwei Metriken ab, die die vorzeichenbehaftete Differenz und die relative vorzeichenbehaftete Differenz zwischen den übereinstimmenden Paaren erfassen. Die Metriken sind wie folgt definiert:

$$CTD = C - T \quad [4-1]$$

$$CTO = \frac{C - T}{O} \cdot 100 \quad [4-2]$$

Dabei steht  $C$  für die CO<sub>2</sub>-Konzentration eines Kontrollensors,  $T$  bezeichnet die CO<sub>2</sub>-Konzentration des passenden Testensors und  $O$  ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration des in der jeweiligen Schule installierten Außensensors.  $CTD$  gibt die in ppm gemessene Differenz zwischen dem passenden Kontroll- und Testsensor an. Positive Werte zeigen an, dass der C-Sensor im Vergleich zum passenden  $T$  Sensor höhere CO<sub>2</sub>-Werte registriert.  $CTO$  ist die in Prozent angegebene Differenz zwischen dem passenden Kontroll- und Testsensor in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Außenumgebung, ausgedrückt als Prozentsatz.

Abgeglichene Differenzen werden in Abschnitt 4.4.1 auf der Grundlage der  $CTD$  Metrik in absoluten Zahlen und in Abschnitt 4.4.2 auf der Grundlage der  $CTO$  Metrik in relativen Zahlen analysiert.

Es werden sowohl stündliche als auch tägliche Daten untersucht. Auf stündlicher Ebene beziehen sich die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf stündliche Mittelwerte, die aus den Daten mit einer Auflösung von 15 Minuten aggregiert wurden. Auf täglicher Ebene stellen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen tägliche Mittelwerte

dar, die aus stündlichen Daten aggregiert wurden, und umfassen somit die mittleren CO<sub>2</sub>-Werte, die von einem Sensor während der Kernzeiten erfasst wurden (Abschnitt 3.4.2).

Zunächst werden die täglichen Daten dargestellt, um einen Überblick über die übereinstimmenden Unterschiede auf täglicher Ebene zu geben. Anschließend werden zusammenfassende Statistiken und statistische Testergebnisse sowohl für die täglichen als auch für die stündlichen Daten bereitgestellt. Da die Daten nicht normalverteilt sind, wie durch den Shapiro-Test bestätigt wurde (Tab. A-15 in Anhang C.1.4), sind die Annahmen des gepaarten t-Tests nicht erfüllt und somit konnte dieser parametrische Test nicht angewendet werden. Stattdessen haben wir den nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichenstest angewendet, der keine Datennormalisierung erfordert. Bei der *CTD* Metrik wird der Wilcoxon-Test für Vorzeichenranglisten verwendet, um zu beurteilen, ob der Median der Vorzeichenunterschiede gleich Null ist. Bei Anwendung auf die *CTO* Metrik wird der Wilcoxon-Test für Vorzeichenranglisten verwendet, um zu bestimmen, ob der Median der vorzeichenbehafteten relativen Unterschiede gleich null Prozent ist.

#### 4.4.1 Vergleichende Analyse der Vorzeichenunterschiede im Zeitverlauf (jährlich, saisonal und monatlich)

Abbildung 4-38 zeigt die unterzeichneten Differenzen zwischen übereinstimmenden Kontroll- und Testensoren auf Tagesebene (*CTD* Metrik). Sie verdeutlicht, dass die mittleren gepaarten Differenzen (*rote durchgezogene Linie*) während des gesamten Schuljahres durchweg über 0 ppm (*rote gestrichelte Linie*) liegen, außer in den Sommermonaten, in denen sich die mittleren gepaarten Differenzen 0 ppm nähern. Zusammenfassende Statistiken (einschließlich der monatlichen, saisonalen und jährlichen Mittelwerte) sind in Tabelle 4-17 aufgeführt, wobei die kleinste monatliche mittlere Differenz von 34 ppm im Juli beobachtet und die größte mittlere Differenz von 224 ppm im November gemessen wurde. Ähnliche Überlegungen gelten für die Median-Differenzen (50. Perzentil). Der Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben, der zur Ableitung der Median-Differenz verwendet wird, schätzt, dass der jährliche Median der gepaarten Differenz 152 ppm beträgt (95 % KI: 149 ppm bis 155 ppm). Wie der niedrige p-Wert zeigt, gibt es genügend Beweise dafür, dass der jährliche Median der gepaarten Differenzen signifikant von 0 abweicht. Darüber hinaus weichen die Medianwerte für jede Jahreszeit und jeden Monat signifikant von Null ab. Der größte Medianwert wird im Herbst, insbesondere im November, beobachtet und wird auf 225 ppm geschätzt (95 % KI: 216 bis 234). Ähnliche Ergebnisse werden bei den stündlichen Daten sowohl in Bezug auf die Mittel- und Medianwerte als auch bei den Testergebnissen gefunden (Abb. 4-39 und Tab. 4-18). Die Minimal- und Maximalwerte für die stündlichen Daten weisen auf einen breiteren Wertebereich hin als bei den täglichen Daten, was die Auswirkungen des Aggregationsprozesses widerspiegelt.

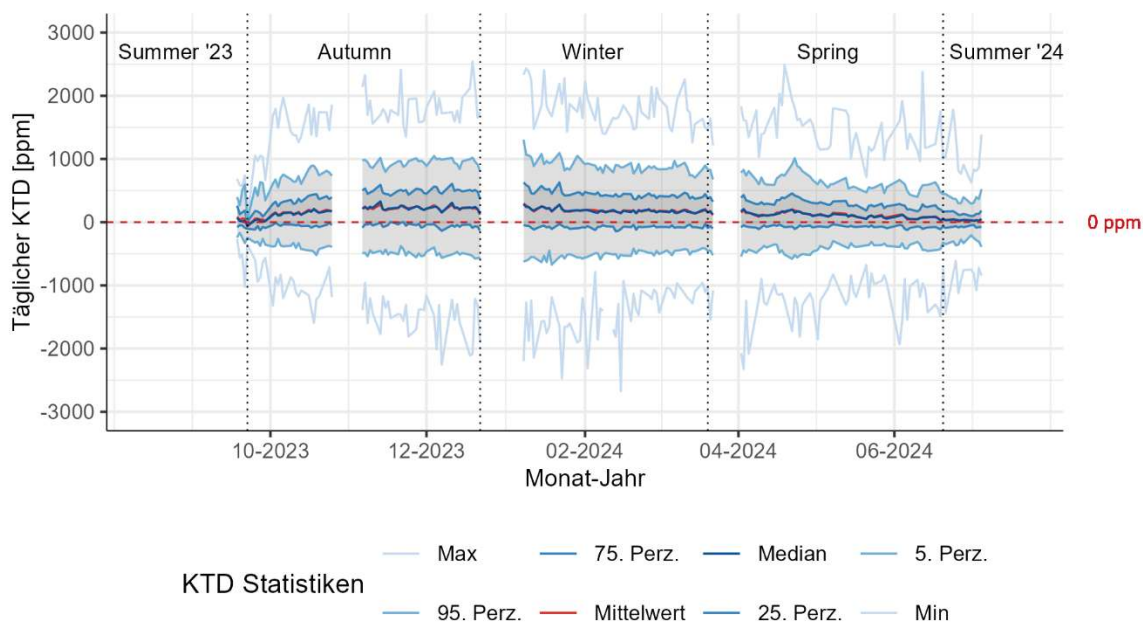


Abbildung 4-38 Übersicht über die gepaarten Differenzen mit Vorzeichen (*CTD* Metrik) in den täglichen durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, wobei die wichtigsten Trends und die Differenz von null ppm (gestrichelte rote Linie) hervorgehoben werden

Tabelle 4-17 Monatliche, saisonale und jährliche statistische Zusammenfassung der Vorzeichenunterschiede (*CTD* Metrik) für tägliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, einschließlich der Ergebnisse des nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichenrangtests, wie z. B. der p-Wert, die Schätzung des Medians und sein 95 %-Konfidenzintervall.

Monat / Jahreszeit/ Jahr	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Wilcoxon signed-rank test			
			25.	50.	75.			p-value	Hochr. [ppm]	95 % CI [ppm]	
Sep	-1023	1054	-83	22	146	229	44	< 0.001	31	16	46
Okt	-1596	1969	-45	147	351	396	158	< 0.001	152	146	159
Nov	-1810	2414	-41	227	490	531	224	< 0.001	225	216	234
Dez	-2254	2542	-71	215	496	567	215	< 0.001	216	206	226
Jan	-2470	2434	-76	210	506	582	213	< 0.001	212	202	222
Feb	-3501	2221	-80	173	426	506	177	< 0.001	175	166	184
Mär	-1544	2259	-76	162	403	479	168	< 0.001	164	155	173
Apr	-2322	2490	-71	140	351	421	143	< 0.001	141	135	148
Mai	-1854	1803	-70	95	271	341	100	< 0.001	98	92	105
Jun	-1932	2379	-81	57	204	285	61	< 0.001	59	54	64
Jul	-1079	1387	-66	28	126	193	34	< 0.001	31	22	41
Sommer '23	-1023	740	-64	15	160	225	49	0.007	37	9	68
Herbst	-2254	2542	-51	186	439	490	197	< 0.001	193	188	198
Winter	-3501	2434	-77	183	449	526	188	< 0.001	186	180	191
Frühling	-2322	2490	-75	106	299	374	114	< 0.001	110	106	114
Sommer '24	-1427	1780	-70	34	141	211	34	< 0.001	34	29	40
Jahr	-3501	2542	-69	142	380	449	159	< 0.001	152	149	155

Tabelle 4-18 Monatliche, saisonale und jährliche statistische Zusammenfassung der Vorzeichenunterschiede (*CTD* Metrik) für stündliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, einschließlich der Ergebnisse des nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichenrangtests, wie z. B. der p-Wert, die Schätzung des Medians und sein 95 %-Konfidenzintervall.

Monat / Jahreszeit / Jahr	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Wilcoxon signed-rank test			
			25.	50.	75.			p-value	Hochr. [ppm]	95 % CI [ppm]	
Sep	-1163	1492	-79	24	148	227	49	< 0.001	33	23	43
Okt	-3287	4311	-128	149	455	583	174	< 0.001	161	157	166
Nov	-3964	4046	-157	225	632	789	244	< 0.001	236	230	241
Dez	-4422	4592	-182	216	640	822	233	< 0.001	226	219	232
Jan	-4521	4715	-191	216	645	836	232	< 0.001	225	219	231
Feb	-3924	4110	-184	185	555	739	195	< 0.001	188	182	194
Mär	-3466	3961	-171	171	525	696	183	< 0.001	176	170	182
Apr	-4529	4125	-163	148	466	629	160	< 0.001	152	148	157
Mai	-4081	3264	-135	103	347	481	109	< 0.001	105	101	109
Jun	-3227	3368	-127	62	264	391	72	< 0.001	67	64	70
Jul	-1620	1755	-63	32	144	207	43	< 0.001	37	32	42
Sommer '23	-1023	1492	-60	19	150	210	46	< 0.001	35	17	53
Herbst	-4422	4592	-150	190	570	720	217	< 0.001	205	202	208
Winter	-4521	4715	-184	192	582	766	206	< 0.001	198	195	202
Frühling	-4529	4125	-148	113	388	536	127	< 0.001	119	116	121
Sommer '24	-2120	2816	-91	38	172	263	41	< 0.001	40	37	43
Jahr	-4529	4715	-154	146	493	647	177	< 0.001	163	162	165

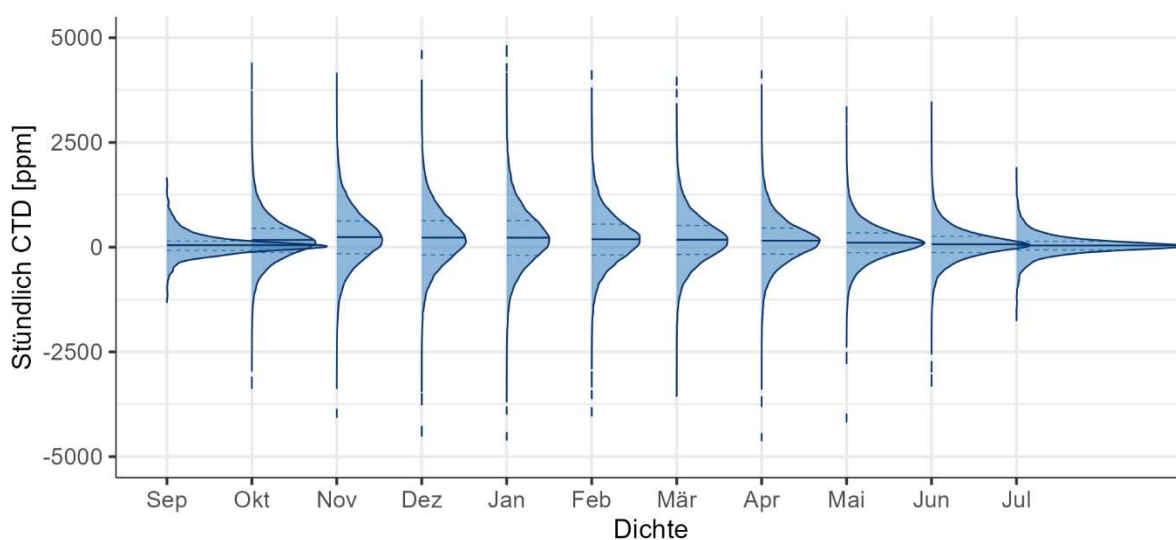


Abbildung 4-39 Monatliche Verteilung der Differenzen (*CTD* Metrik) für stündliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

#### 4.4.2 Vergleichende Analyse der relativen Vorzeichenunterschiede im Zeitverlauf (jährlich, saisonal und monatlich)

Abbildung 4-40 veranschaulicht die Vorzeichenunterschiede in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Freien (*CTO* Metrik) auf Tagesbasis. Der Trend des 25. Perzentils bleibt während des gesamten Schuljahres nahe bei 0 % (rote gestrichelte Linie), was darauf hindeutet, dass die relativen Unterschiede zwischen den aufeinander abgestimmten Kontroll- und Testsensoren in 75 % der Fälle

nahe bei oder größer als 0 % sind. Tabelle 4-19 fasst die statistischen Ergebnisse der täglichen Datenanalyse zusammen. Sie zeigt, dass im November ein mittlerer *CTO* Wert von 50 % beobachtet wird, was bedeutet, dass die mittlere Differenz 50 % der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Freien beträgt. Bei einer CO<sub>2</sub>-Konzentration im Freien von 420 ppm entspricht die mittlere *C – T* Differenz daher 210 ppm. Es ist auch wichtig zu beachten, dass die 75. Perzentilwerte von November bis Januar 100 % übersteigen, was zeigt, dass 25 % der Beobachtungen (der obere Rand der *CTO* Verteilung) Kontroll- und Testunterschiede aufweisen, die doppelt so hoch sind wie die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Freien. Tabelle 4-20 fasst die Ergebnisse der Analyse der Stundendaten zusammen, die in Abb. 4-41 dargestellt sind. Hier erreicht die *CTO* Metrik im November Werte von bis zu 55 % (Mittelwert) und 141 % (75 % Perzentil).

Statistische Tests zeigen, dass der *CTO* Medianwert während des gesamten Schuljahres bei 36 % liegt und sich signifikant von 0 % unterscheidet. Ebenso gibt es genügend Belege dafür, dass der *CTO* Medianwert für jede Jahreszeit und jeden Monat statistisch von 0 % abweicht.

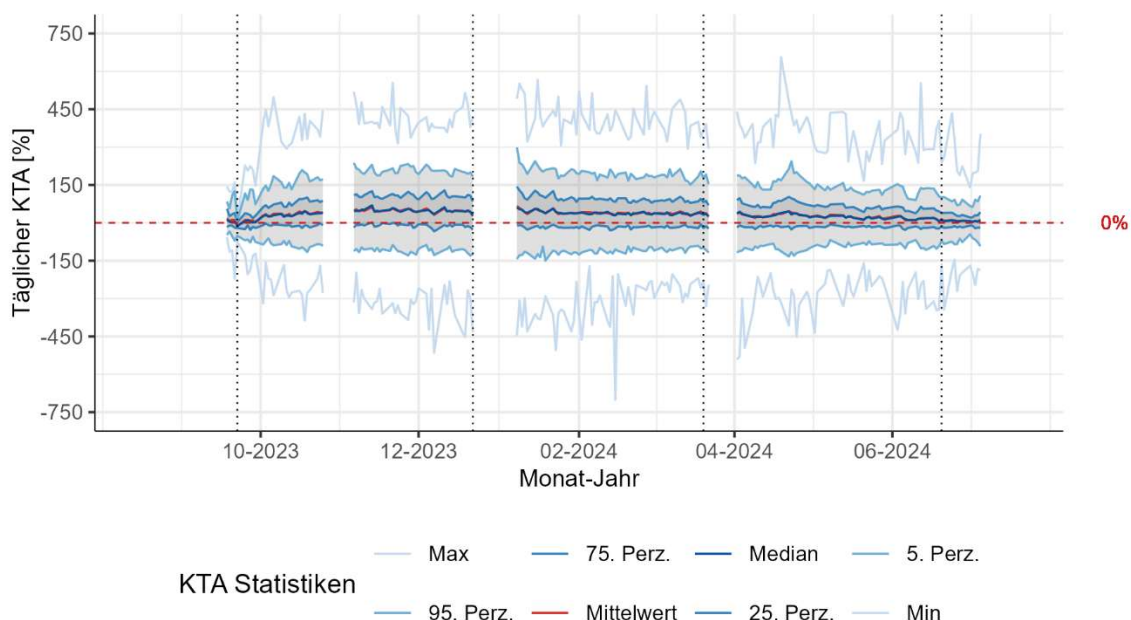


Abbildung 4-40 Übersicht über die relativen Differenzen (*CTO* Metrik) der täglichen durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, wobei die wichtigsten Trends und der 1 %-Wert (**gestrichelte rote Linie**) hervorgehoben werden.

Tabelle 4-19 Monatliche, saisonale und jährliche statistische Zusammenfassung der vorzeichenbehafteten relativen Differenzen (CTO Metrik) für tägliche durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, einschließlich der Ergebnisse des nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichentest, wie z. B. der p-Wert, die Schätzung des Medians und sein 95 %-Konfidenzintervall.

Monat / Jahreszeit / Jahr	Min [%]	Max [%]	Perzentile [%]			IQR [%]	Mittelw. [%]	Wilcoxon signed-rank test			
			25.	50.	75.			p-value	Hochr. [%]	95 % CI [%]	
Sep	-222	227	-17	5	31	48	9	< 0.001	7	3	10
Okt	-388	497	-10	33	79	89	36	< 0.001	34	33	36
Nov	-385	555	-9	51	109	118	50	< 0.001	50	48	52
Dez	-515	514	-15	46	106	121	46	< 0.001	46	44	48
Jan	-504	566	-16	45	109	126	46	< 0.001	46	44	48
Feb	-779	543	-17	38	93	110	39	< 0.001	38	36	40
Mär	-331	488	-17	36	89	106	37	< 0.001	36	34	38
Apr	-541	655	-16	32	81	97	33	< 0.001	33	31	34
Mai	-436	439	-16	22	63	79	24	< 0.001	23	22	25
Jun	-445	553	-19	13	47	66	14	< 0.001	14	12	15
Jul	-246	353	-15	7	30	46	8	< 0.001	7	5	10
Sommer '23	-222	160	-14	3	34	48	10	< 0.001	8	2	14
Herbst	-515	555	-11	41	97	108	43	< 0.001	42	41	44
Winter	-779	566	-17	40	98	115	41	< 0.001	41	39	42
Frühling	-541	655	-17	24	69	86	26	< 0.001	25	25	26
Sommer '24	-344	434	-17	8	33	50	8	< 0.001	8	7	9
Jahr	-779	655	-15	32	85	100	36	< 0.001	34	33	35

Tabelle 4-20 Monatliche, saisonale und jährliche statistische Zusammenfassung der unterzeichneten relativen Differenzen (CTO Metrik) für stündliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, einschließlich der Ergebnisse des nichtparametrischen Wilcoxon-Vorzeichentest, wie z. B. der p-Wert, die Schätzung des Medians und sein 95 %-Konfidenzintervall.

Monat / Jahreszeit / Jahr	Min [%]	Max [%]	Perzentile [%]			IQR [%]	Mittelw. [%]	Wilcoxon signed-rank test			
			25.	50.	75.			p-value	Hochr. [%]	95 % CI [%]	
Sep	-248	313	-17	5	31	48	10	< 0.001	7	5	9
Okt	-797	1050	-28	33	101	129	39	< 0.001	36	35	37
Nov	-915	935	-35	50	141	176	55	< 0.001	53	51	54
Dez	-1030	895	-39	46	135	174	50	< 0.001	48	46	49
Jan	-958	1102	-41	46	139	180	50	< 0.001	49	47	50
Feb	-804	1064	-39	40	121	160	43	< 0.001	41	40	42
Mär	-772	846	-38	38	116	154	41	< 0.001	39	38	40
Apr	-973	924	-37	34	106	144	37	< 0.001	35	34	36
Mai	-959	749	-31	24	81	112	26	< 0.001	24	24	25
Jun	-753	782	-29	14	61	90	17	< 0.001	15	15	16
Jul	-369	440	-15	8	34	49	10	< 0.001	9	8	10
Sommer '23	-222	313	-13	4	32	45	10	< 0.001	7	4	11
Herbst	-1030	1050	-33	42	125	158	48	< 0.001	45	44	46
Winter	-958	1102	-40	42	127	167	45	< 0.001	43	43	44
Frühling	-973	924	-34	26	89	123	30	< 0.001	27	27	28
Sommer '24	-507	718	-21	9	40	62	10	< 0.001	9	9	10
Jahr	-1030	1102	-34	33	109	144	39	< 0.001	36	36	37

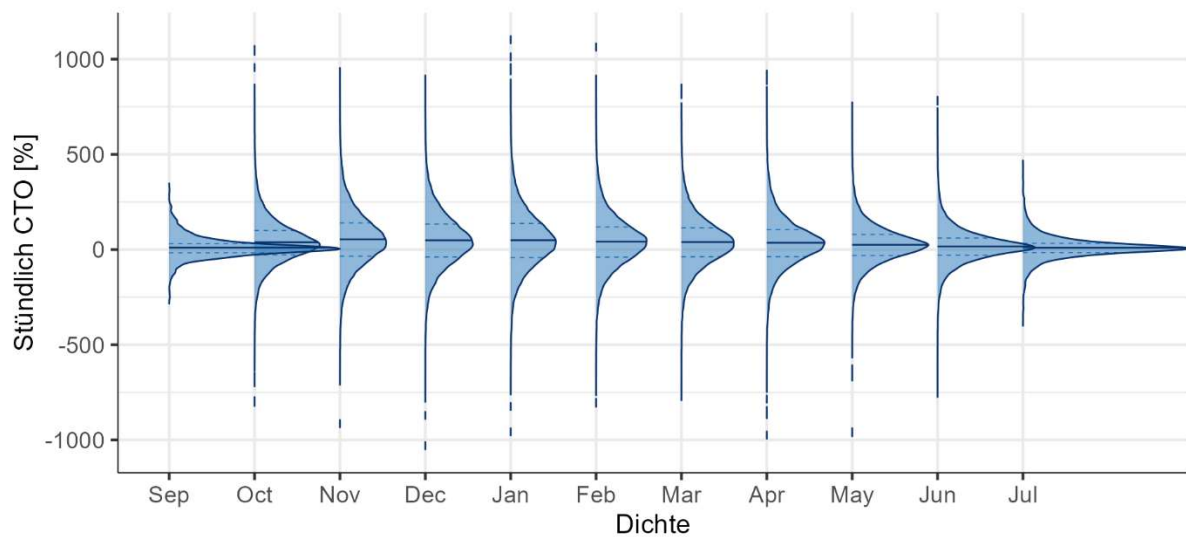


Abbildung 4-41 Monatliche Verteilung der relativen Differenzen (CTO Metrik) für stündliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

#### 4.5 Einfluss der Luftqualität in Innenräumen auf das Risiko von durch die Luft übertragenen Krankheiten

In diesem Abschnitt soll die **Forschungsfrage 4** beantwortet werden: „Bietet die Verbesserung der Luftqualität in Innenräumen (in Klassenzimmern, die mit CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten ausgestattet sind) einen statistisch signifikanten Vorteil in Bezug auf die Verringerung des Risikos einer durch die Luft übertragenen Krankheit?“

Da keine kontinuierlichen Tests auf SARS-CoV-2, Influenza-A, Masern und andere durch die Luft übertragbare Krankheiten durchgeführt werden, müssen Informationen zur Beantwortung dieser Frage aus analytischen Modellen und statistischen Schlussfolgerungen gewonnen werden. Der Einfluss von Belegung und Belüftung auf das Risiko einer weiträumigen Übertragung von SARS-CoV-2 durch die Luft wird anhand eines analytischen Modells untersucht (Abschnitt 4.5.1). Durch die anschließende Kopplung dieses Modells an die individuellen Belüftungsraten in den Klassenzimmern wird die zeitliche Variation des relativen Infektionsrisikos in einzelnen Klassenzimmern untersucht (Abschnitt 4.5.2). Schließlich wird der Zusammenhang zwischen den Fehlzeiten und den Umweltvariablen (wie der CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Belüftungsrate) sowie der Zusammenhang zwischen den Fehlzeiten und der Prävalenz von SARS-CoV-2 in der Bevölkerung (unter Verwendung nationaler Abwasserdaten) untersucht (Abschnitt 4.5.3).

##### 4.5.1 Infektionsrisiken durch die Luft und Belüftung

Der folgende Abschnitt soll eine Analyse des Risikos einer weiträumigen Übertragung von SARS-CoV-2 durch die Luft unter Verwendung eines analytischen Modells liefern, das von Forscher\*innen des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC), Deutschland, und des Cyprus Institute, Zypern, entwickelt wurde (Lelieveld et al., 2020).



In dieser Analyse wird das Gruppeninfektionsrisiko unter verschiedenen Bedingungen der Belegung, der Belüftungsraten und der Expositionsdauer bewertet. In diesem Zusammenhang bezieht sich der Begriff „Gruppenrisiko“ auf die Wahrscheinlichkeit, dass sich mindestens eine Person innerhalb einer Gruppe infiziert, durch luftgetragene virale Übertragung, wobei davon ausgegangen wird, dass sich eine infektiöse Person im Raum befindet. Das hier verwendete Modell wurde so parametrisiert, dass es die Übertragungseigenschaften der ursprünglichen Omicron-Variante von SARS-CoV-2 unter der Annahme eines gut durchmischten Luftvolumens mit gleichmäßiger Viruskonzentration im gesamten Raum modelliert. Die Analyse berücksichtigt keine Übertragung über kurze Distanzen oder die Übertragung durch Ansteckungsträger von Oberflächen, sodass das Gesamtrisiko erheblich höher sein könnte, als die modellierte Analyse vermuten lässt.

#### 4.5.1.1 Einfluss von Belegung und Belüftung auf das Risiko der Übertragung über große Entfernungen in der Luft

Abbildung 4-42 zeigt die Beziehung zwischen dem Infektionsrisiko in der Gruppe und der Belegung bei unterschiedlichen Expositionsdauern (zwischen 0-10 Stunden) bei einer konstanten Belüftungsrate von 250 l/s. Bei 25 Personen ergibt sich eine Belüftungsrate von 10 l/(s·Person), was der höchsten IEQ-Klasse gemäß EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) entspricht. Die Ergebnisse zeigen, dass das Infektionsrisiko mit zunehmender Belegung und Expositionszeit steigt. So führt beispielsweise der Unterricht in einer kleinen Gruppe von 15 Personen über einen Zeitraum von 6 Stunden zu einem Gruppeninfektionsrisiko von etwa 35 %. Im Gegensatz dazu führt eine größere Gruppe von 30 Personen unter den gleichen Bedingungen zu einem Risiko von etwa 60 %.

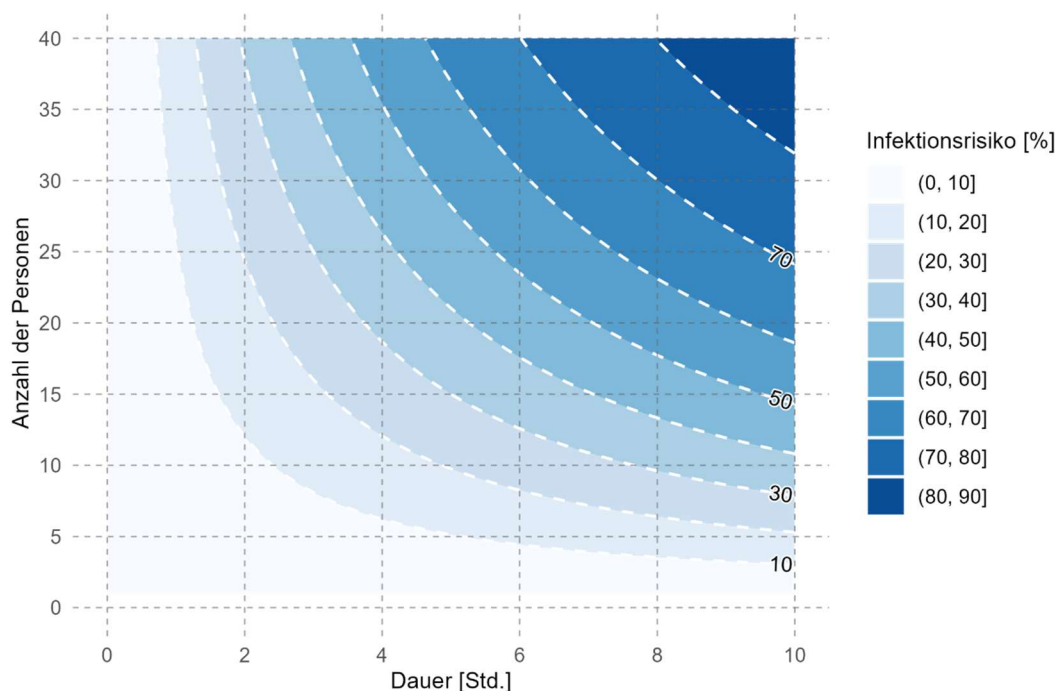


Abbildung 4-42 Beispiel für das Infektionsrisiko in der Gruppe (SARS-CoV-2) im Vergleich zur Expositionszeit

Abbildung 4-43 zeigt das Infektionsrisiko in der Gruppe als Funktion der Belüftungsrate und der Expositionsdauer unter der Annahme einer konstanten Raumbellegung von 25 Personen. Die Grafik veranschaulicht, wie höhere Belüftungsraten zu einer Verringerung des Infektionsrisikos führen.

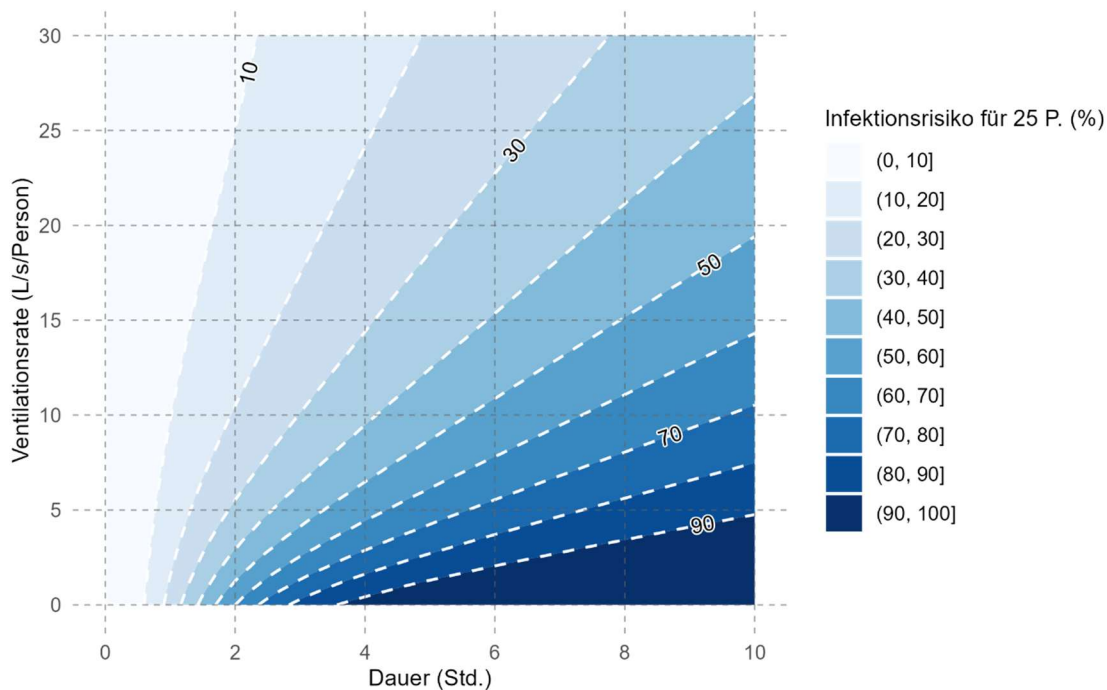


Abbildung 4-43 Beispiel für das luftgetragene Übertragungsrisiko über große Entfernungen (SARS-CoV-2) bei unterschiedlichen Luftstromraten

Beispielsweise führt IEQ<sub>III</sub>-Kategorie aus EN 16798.1:2019 (CEN, 2019) mit einer Luftstromrate von 4 l/(s·Person) nach 6 Stunden Exposition zu einem Gruppeninfektionsrisiko von etwa 74 %. IEQ-Kategorie 2 mit 7 l/(s·Person) reduziert das Risiko auf 60 %. IEQ-Kategorie mit 10 l/(s·Person) reduziert das Risiko weiter auf 50 %. Im Vergleich dazu senkt die Empfehlung der Lancet-Kommission für nicht-infektiöse Luftzufuhr (NADR) von 14 l/(s·Person) das Infektionsrisiko in der Gruppe auf 43 % (The Lancet COVID-19 Commission, 2022), und die Empfehlung des ASHRAE-Standards 241:2023 zur Kontrolle infektiöser Aerosole von 20 l/(s·Person) senkt das Risiko auf 32 %.

Zur Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, Belüftung und Infektionsrisiko: Bei einer Standard-CO<sub>2</sub>-Emissionsrate von 20 l/(h·Person), wie in EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) und CEN/TR 16798-2:2019 (CEN, 2019) definiert, würden die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Gleichgewichtskonzentrationen für die oben genannten Belüftungsraten etwa 1810 ppm für 4 l/(s·Person), 1210 ppm für 7 l/(s·Person), 980 ppm für 10 l/(s·Person), 820 ppm für 14 l/(s·Person) und 700 ppm für 20 l/(s·Person) ergeben. Man beachte jedoch, dass in einer Schule der CO<sub>2</sub>-Ausstoß der Personen unter Umständen unter 20 l/(h·Person) liegt und zwischen 11,16 l/(h·Person) in Volksschulen und 15,55 l/(h·Person) in weiterführenden Schulen liegt (Abschnitt 3.4.1).

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine verstärkte Belüftung in Innenräumen eine wichtige Maßnahme zur Minimierung des Risikos einer Übertragung von Krankheiten durch die Luft ist. Darüber hinaus zeigen die Abbildungen 4-42 und 4-43, dass eine Verkürzung der Expositionsdauer das Infektionsrisiko weiter senkt, was die Bedeutung sowohl einer ausreichenden Belüftung als auch einer kürzeren Expositionsdauer bei der Kontrolle der Übertragung von Krankheiten durch die Luft unterstreicht.

## 4.5.2 Zeitliche Schwankungen des Infektionsrisikos, abgeleitet aus den Daten der CO<sub>2</sub>-Überwachung

Im folgenden Abschnitt werden saisonale Trends der modellierten täglichen mittleren Gruppeninfektionsrate in den 1200 ImpAQS-Klassenzimmern analysiert. Das Gruppeninfektionsrisiko wird anhand des Infektionsrisikomodells (Abschnitt 3.8) in Verbindung mit der täglichen mittleren Belüftungsrate für jedes Klassenzimmer (Abschnitt 3.4.1) berechnet. Als Vergleichswert wird ein Referenzszenario mit einer Lüftungsrate von 10 l/(s·Person) für 25 Personen angegeben, das zu einem Gruppeninfektionsrisiko von 52 % führt, dass mindestens eine Person mit SARS-CoV-2 infiziert wird (bei einer angenommenen Expositionsdauer von 6 Stunden pro Tag). Es ist zu beachten, dass das hier beschriebene Referenzszenario ein „Wellen-Höhenpunkt-Szenario“ abbilden soll und nicht einen typischen Tag und es basiert auf einem Ansatz, der im „Positionspapier zur Bewertung von Innenräumen in Hinblick auf das Infektionsrisiko durch SARS-CoV-2“ (BMK, 2021) beschrieben wird, siehe Anhang B.11 für weitere Informationen.

### 4.5.2.1 Infektionsrisiko in Klassenzimmern

Das hypothetische tägliche individuelle Infektionsrisiko für 1200 Klassenzimmer (von September 2023 bis Juli 2024) ist in Abb. 4-44 dargestellt. Diese Daten stammen aus dem mit Lüftungsraten gekoppelten Infektionsrisikomodell, das anschließend mit einem Referenzszenario verglichen werden.

Die schwarze Linie stellt das durchschnittliche tägliche Gruppeninfektionsrisiko in allen 1200 Klassenzimmern dar, unter der Annahme einer Belegung von 25 Personen. Das graue Band zeigt den Interquartilbereich (25. bis 75. Perzentil) der täglichen durchschnittlichen Gruppeninfektionsrisiken an. Die gestrichelte rote Linie stellt das Referenzszenario dar.

Ähnlich wie bei den Daten zur Belüftungsrate (Abschnitt 3.4.1) folgt das Infektionsrisiko einem saisonalen Muster, mit einem höheren Risiko in den kälteren Monaten und einem geringeren Risiko in den wärmeren Monaten. Von Herbst bis Winter ist in allen 1200 Klassenzimmern ein deutlicher Anstieg des Gruppeninfektionsrisikos zu verzeichnen, mit täglichen Werten zwischen etwa 50 % und 75 %. Dieser Anstieg des Infektionsrisikos hängt eng mit den geringeren Lüftungsraten bei kaltem Wetter zusammen. Im Gegensatz dazu sinkt das Gruppeninfektionsrisiko deutlich, wenn der Sommer näher rückt. Von Juni bis Juli fällt das Gruppeninfektionsrisiko meist unter das Referenzszenario (basierend auf einer konstanten Lüftungsrate von 10 l/(s·Person) was auf verbesserte Lüftungsraten und ein geringeres Risiko bei steigenden Außentemperaturen zurückzuführen ist.

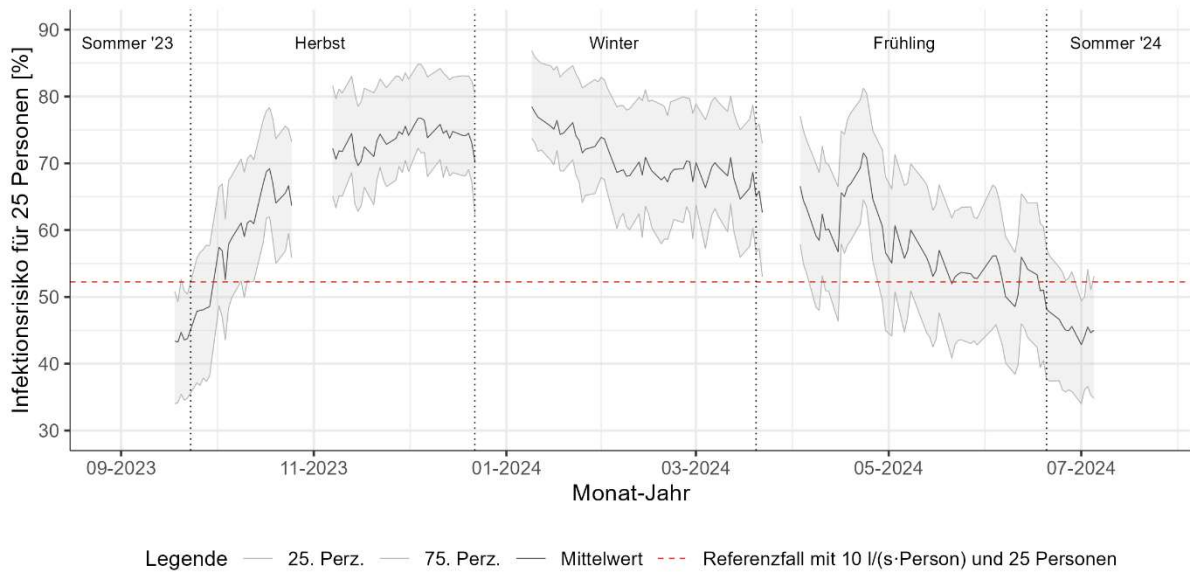


Abbildung 4-44 Zeitreihe – hypothetisches mittleres Gruppeninfektionsrisiko und Perzentile aller Klassenzimmer über das gesamte Schuljahr 2023-24

#### 4.5.2.2 Infektionsrisiko in Klassenzimmern nach Jahreszeit

Abbildung 4-45 veranschaulicht die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und Tabelle 4-21 zeigt die Statistik des hypothetischen Gruppeninfektionsrisikos über verschiedene Jahreszeiten hinweg, basierend auf den täglichen Bedingungen von September bis Juli.

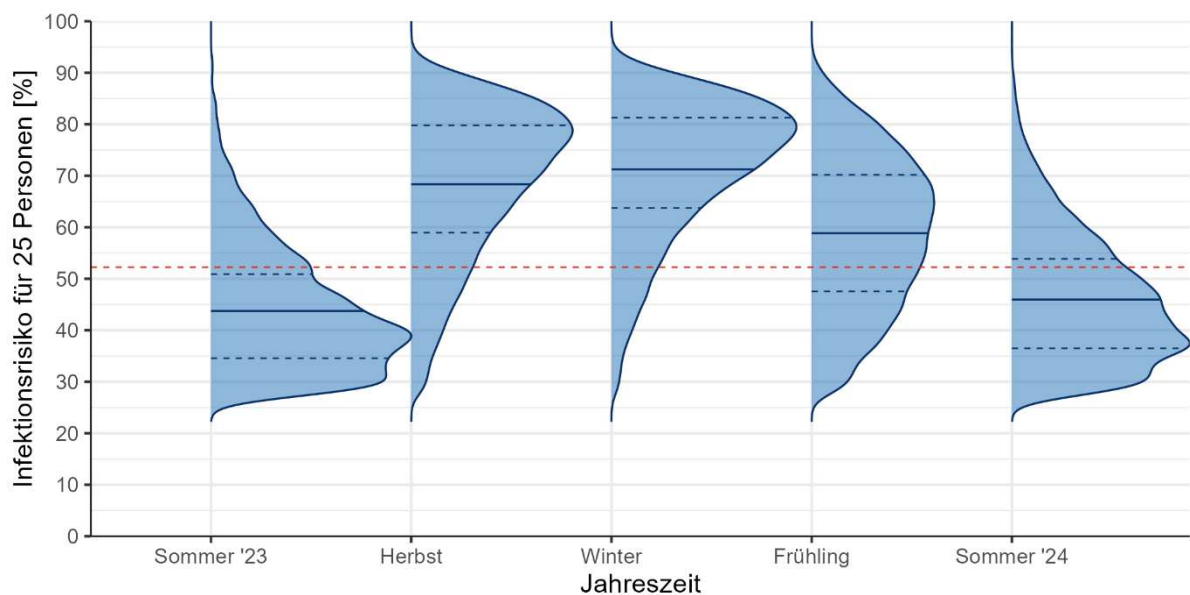


Abbildung 4-45 Saisonale Verteilung des Infektionsrisikos für einen Klassenraum (mit 25 Personen) im Vergleich zu einem Referenzszenario mit EN 16798-1-Schwellenwert (10 I/(s-Person), IEQ<sub>1</sub>, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil angeben.

Das 75. Perzentil zeigt, dass die Mehrheit der Klassenzimmer ein Gruppeninfektionsrisiko von über 70 % aufweist, was den Referenzrisikowert von 52 %, berechnet für eine Belüftungsrate von

10 l/(s-Person), bei Weitem übersteigt. Im Winter liegt das durchschnittliche Infektionsrisiko in allen 1200 Klassenzimmern bei 71 %, wobei 89 % der Klassenzimmer das Referenzszenario überschreiten. Im Gegensatz dazu zeigt der Sommer 2024 eine deutliche Verringerung des Infektionsrisikos, mit einem Mittelwert von 44 % und nur 22 % der Klassenzimmer, die das Referenzszenario überschreiten. Das mittlere Infektionsrisiko über alle Klassenzimmer und alle Jahreszeiten hinweg beträgt 65 %, was darauf hindeutet, dass im Durchschnitt das Risiko, dass sich mindestens eine Person in einem Klassenzimmer infiziert, das Referenzszenario übersteigt.

Tabelle 4-21 Saisonale Statistik des Infektionsrisikos für einen Klassenraum mit 25 Personen, einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitungen des Referenzfalls

Jahreszeit	Min [%]	Max [%]	Perzentile			Mittelw. [%]	Überschr. > Ref. Sz. [%]
			25 [%]	50 [%]	75 [%]		
Sommer '24	27	92	35	41	51	44	22
Herbst	27	96	59	71	80	68	84
Winter	27	95	64	74	81	71	89
Frühling	27	95	48	59	70	59	66
Sommer '23	27	91	36	44	54	46	28
Jahr	27	96	54	68	78	65	77

#### 4.5.2.3 Infektionsrisiko nach Klassenzimmerkategorie (T oder K)

Das tägliche durchschnittliche Infektionsrisiko, das in den Klassenräumen mit Kontrollsensoren (K) aufgezeichnet wurde, ist tendenziell etwas höher als das in den Klassenräumen mit Testsensoren (T) gemessene, insbesondere in den kälteren Monaten. Die saisonalen Verteilungen in Abbildung 4-46 und Tabelle 4-22 zeigen nur relativ geringe Unterschiede zwischen den Kontroll- und Testsensoren, wobei die Überschreitungshäufigkeiten des Referenzfalls um einige Prozentpunkte voneinander abweichen.

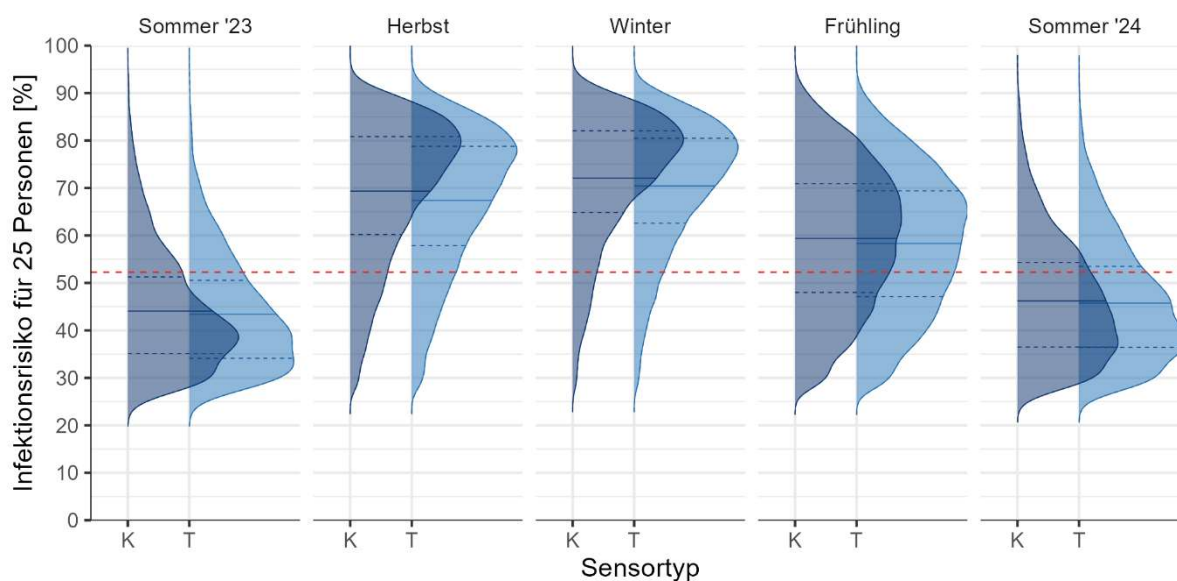


Abbildung 4-46 Saisonale Verteilung des Infektionsrisikos für ein Klassenzimmer mit 25 Personen für Test- (T) und Kontrollsensoren (K) separat, einschließlich Referenzszenario mit dem Standardschwellenwert der Norm EN 16798-1 (10 l/(s·Person), IEQ<sub>1</sub>, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil angeben.

Im Winter weisen Klassenzimmer mit Kontrollsensoren einen Mittelwert des täglichen Infektionsrisikos von 72 % auf (was über dem Referenzszenario liegt), verglichen mit 70 % für die Räume mit Testsensoren. Die niedrigsten Gesamtinfektionsrisiken werden in den Sommermonaten beobachtet, in denen die durchschnittlichen Lüftungsraten zwischen Kontroll- und Testsensoren vergleichbar sind: Im Sommer 2024 liegt das durchschnittliche tägliche mittlere Infektionsrisiko für Klassenzimmer mit Kontroll- und Testsensoren bei 46 %. Wie bereits erwähnt, werden in dieser Analyse jedoch keine anderen Faktoren berücksichtigt, die die Unterschiede in den Lüftungsraten zwischen Klassenräumen mit und ohne sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensor beeinflussen könnten (einschließlich Teilbelegung oder Art des Lüftungssystems), die in Abschnitt 4.4 näher untersucht werden.

Tabelle 4-22 Saisonale Statistik des Infektionsrisikos für einen Klassenraum mit 25 Personen, einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitungen des Referenzfalls für Klassenräume mit Test- (T) und Kontrollsensoren (K) getrennt.

Jahreszeit	Sensor - typ	Min [%]	Max [%]	Perzentile			Mittelw. [%]	Überschr. > Ref. Sz. [%]
				25 [%]	50 [%]	75 [%]		
Sommer '23	K	27	92	35	41	51	44	23
	T	27	91	34	41	51	43	22
Herbst	K	27	95	60	73	81	69	85
	T	27	96	58	70	79	67	83
Winter	K	27	95	65	75	82	72	90
	T	27	95	63	73	80	70	89
Frühling	K	27	95	48	60	71	59	67
	T	27	94	47	59	69	58	65
Sommer '24	K	27	91	36	44	54	46	29
	T	27	90	36	44	53	46	27
Jahr	K	27	95	54	69	79	66	78
	T	27	96	53	67	77	64	76

#### 4.5.2.4 Infektionsrisiko je nach Art des Lüftungssystems

Abbildung 4-47 und die entsprechende Tabelle 4-23 vergleichen die saisonalen Verteilungen des Infektionsrisikos zwischen mechanisch belüfteten (MV) und natürlich belüfteten (NV) Klassenzimmern. Im Sommer 2024 sind die Mittelwerte des Infektionsrisikos zwischen Klassenräumen mit und ohne mechanische Belüftung relativ ähnlich, wobei Klassenräume mit mechanischer Belüftung einen Mittelwert für das tägliche Infektionsrisiko von 44 % und Klassenräume ohne mechanische Belüftung einen Mittelwert von 46 % aufweisen. Im Winter ist eine deutlichere Diskrepanz zu beobachten. In Klassenräumen mit mechanischer Belüftung liegt das durchschnittliche Infektionsrisiko bei 56 %, während es in Klassenräumen mit natürlicher Belüftung deutlich auf 73 % ansteigt. Der Anteil der Klassenräume, die das Infektionsrisiko des Referenzfalls (Infektionsrisiko von 52 % für 10 l/(s·Person)) in Winter überschreiten, ist in Klassenräumen mit natürlicher Belüftung (93 % der Zeit) deutlich höher als in Klassenräumen mit mechanischer Belüftung (57 % der Zeit).

Insgesamt zeigen die Daten (Tab. 4-23), dass das durchschnittliche Infektionsrisiko in NV-Klassenzimmern durchweg höher ist als in MV-Klassenzimmern. Darüber hinaus weisen NV-Klassenzimmer eine größere Variabilität ihres Infektionsrisikos auf, insbesondere in den kälteren Monaten.

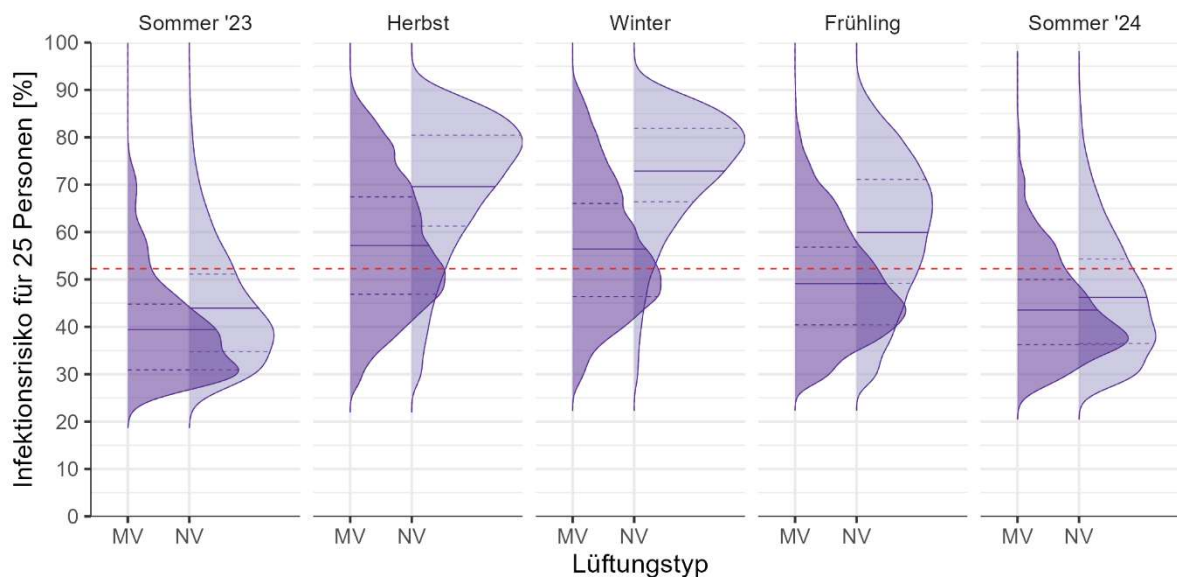


Abbildung 4-47 Saisonale Verteilung des Infektionsrisikos für einen Klassenraum mit 25 Personen für mechanische (MV) und natürliche (NV) Belüftung, getrennt, einschließlich Referenzszenario mit EN 16798-1-Schwellenwert (10 l/(s·Person), IEQ<sub>1</sub>, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil angeben.

Tabelle 4-23 Saisonale Statistik des Infektionsrisikos für einen Klassenraum mit 25 Personen, einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitungen des Referenzfalls für mechanische (MV) und natürliche (NV) Belüftung getrennt.

Jahreszeit	Vent.-typ	Min [%]	Max [%]	Perzentile			Mittelw. [%]	Überschr. > Ref. Sz. [%]
				25 [%]	50 [%]	75 [%]		
Sommer '23	MV	27	73	31	37	45	39	12
	NV	27	92	35	41	51	44	23
Herbst	MV	27	91	47	56	67	57	59
	NV	27	96	61	73	80	70	87
Winter	MV	27	92	46	55	66	56	57
	NV	27	95	66	75	82	73	93
Frühling	MV	27	91	40	48	57	49	36
	NV	27	95	49	61	71	60	69
Sommer '24	MV	27	81	36	41	50	44	20
	NV	27	91	36	44	54	46	29
Jahr	MV	27	92	44	52	63	54	50
	NV	27	96	56	69	79	66	80

#### 4.5.2.5 Infektionsrisiko nach Schultyp

Abbildung 4-48 und Tabelle 4-24 vergleichen die saisonale Verteilung der Gruppeninfektionsrisiken in verschiedenen Schularten. Die Daten zeigen ein konsistentes Muster, wie in früheren Analysen beobachtet, mit höheren Infektionsrisiken in kälteren Monaten und niedrigeren Risiken in wärmeren

Perioden. Die Unterschiede im täglichen Infektionsrisiko in Gruppen sind bei verschiedenen Schularten im Winter am ausgeprägtesten, während sie in den Sommermonaten geringer sind. Insgesamt weisen die meisten Schularten ähnliche Infektionsrisiken in Gruppen auf, wobei Schulen mit SS im Winter vergleichsweise geringere Risiken aufweisen und Schulen mit VS im Sommer etwas höhere Risiken aufweisen.

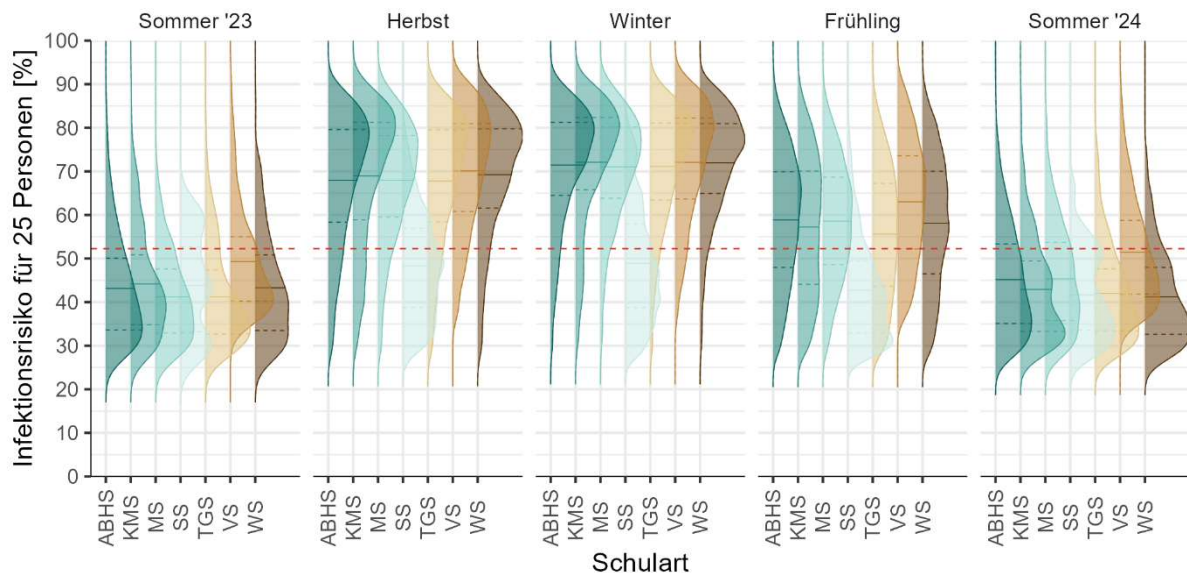


Abbildung 4-48 Saisonale Verteilung des Infektionsrisikos für ein Klassenzimmer mit 25 Personen für verschiedene Schularten, getrennt, einschließlich Referenzszenario mit dem Standardgrenzwert der EN 16798-1 (10 l/(s·Person), IEQ<sub>1</sub>, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75- Perzentil angeben.

Im Winter liegt der Durchschnittswert des täglichen mittleren Gruppeninfektionsrisikos für Schularten wie ABHS, KMS, MS, TGS, VS und WS zwischen 71 und 72 %, während Klassenzimmer in SS-Schulen aufgrund ihrer besseren Luftvolumenstromraten ein viel geringeres tägliches Durchschnittsrisiko von 49 % aufweisen. Bis zum Sommer 2024 nähern sich diese Werte an, wobei der Durchschnitt der täglichen Mittelwerte zwischen 41 und 45 % für ABHS-, KMS-, MS-, SS-, TGS- und WS-Schulen liegt. Allerdings weisen Klassenzimmer in VS-Schulen ein etwas höheres Infektionsrisiko auf, mit einem Durchschnittswert von 51 % im Sommer.



Tabelle 4-24 Saisonale Statistik des Infektionsrisikos für ein Klassenzimmer mit 25 Personen, einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitungen des Referenzfalls für verschiedene Schularten.

Jahreszeit	Schultyp	Min	Max	Perzentile			Mittelw.	Überschr. > Ref. Sz.
				25	50	75		
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Sommer '23	ABHS	27	85	34	40	50	43	21
	KMS	27	91	35	41	51	44	25
	MS	27	71	33	40	48	41	17
	SS	27	63	33	43	53	44	27
	TGS	27	80	33	38	47	41	18
	VS	35	92	40	46	55	49	32
	WS	27	85	33	41	51	43	21
Herbst	ABHS	27	95	58	71	80	68	83
	KMS	28	95	59	73	81	69	82
	MS	27	94	60	70	78	68	87
	SS	28	81	39	48	57	48	36
	TGS	27	94	58	71	80	68	83
	VS	35	96	61	72	81	70	88
	WS	27	93	62	72	80	69	87
Winter	ABHS	27	95	64	74	81	71	90
	KMS	27	95	66	76	82	72	88
	MS	27	94	64	73	80	71	92
	SS	27	81	39	47	58	49	36
	TGS	27	94	63	74	81	71	90
	VS	35	95	64	74	82	72	90
	WS	27	94	65	75	81	72	93
Frühling	ABHS	27	94	48	60	70	59	67
	KMS	27	94	44	58	70	57	60
	MS	27	93	49	59	69	59	67
	SS	27	82	33	41	50	43	20
	TGS	27	92	44	56	67	56	58
	VS	35	95	52	63	74	63	75
	WS	27	93	46	59	70	58	65
Sommer '24	ABHS	27	89	35	43	53	45	28
	KMS	27	88	33	41	49	43	20
	MS	27	86	36	44	54	45	28
	SS	28	67	34	39	50	42	18
	TGS	28	80	33	40	48	42	17
	VS	35	91	42	49	59	51	41
	WS	27	74	33	38	48	41	15
Jahr	ABHS	27	95	54	68	78	65	77
	KMS	27	95	52	69	79	65	75
	MS	27	94	54	66	76	64	78
	SS	27	82	37	45	55	47	31
	TGS	27	94	52	67	77	64	75
	VS	35	96	57	69	79	67	82
	WS	27	94	55	69	78	66	79

## 4.5.2.6 Infektionsrisiko nach Region

Die saisonale Verteilung der Infektionsrisiken in verschiedenen Regionen wird in Abb. 4-49 und der entsprechenden Tab. 4-25 verglichen. Die Daten zeigen saisonale Schwankungen, wobei die höchsten Infektionsrisiken in der Regel in den kälteren Monaten beobachtet werden und im Sommer deutlich geringere Risiken auftreten.

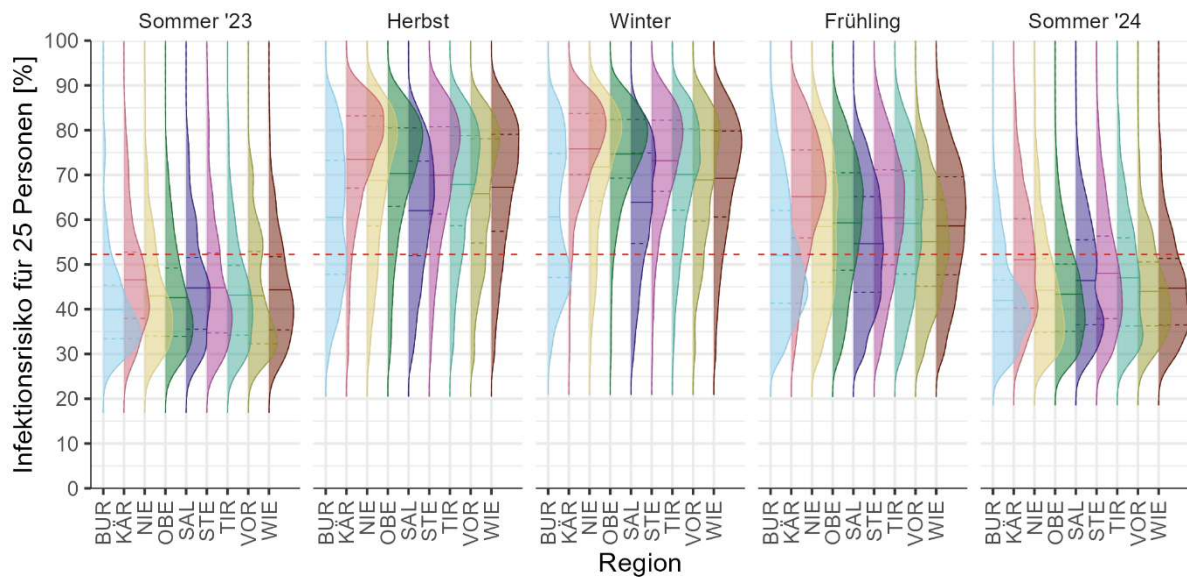


Abbildung 4-49 Saisonale Verteilung des Infektionsrisikos für ein Klassenzimmer mit 25 Personen für verschiedene Regionen, getrennt nach Referenzszenario mit EN 16798-1-Grenzwert ( $10 \text{ l}/(\text{s}\cdot\text{Person})$ , IEQ<sub>1</sub>, gestrichelte rote Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung gibt den Mittelwert an, während die gestrichelten Linien das 25- und 75-Perzentil angeben.

Im Winter wird der höchste Wert des mittleren täglichen Infektionsrisikos in Kärnten verzeichnet, mit einem durchschnittlichen Risiko von 76 % und Klassenzimmern, die in 96 % der Fälle den Schwellenwert des Referenzszenarios überschreiten. Im Gegensatz dazu schneiden die Klassenzimmer im Burgenland am besten ab, mit einem durchschnittlichen täglichen Risikowert von 61 % und Klassenzimmern, die in 62 % der Fälle das Risiko des Referenzszenarios überschreiten, was auf eine relativ bessere Luftqualität und Infektionskontrolle in diesem Zeitraum hindeutet.

Bis zum Sommer 2024 sind die Infektionsrisiken in allen Regionen deutlich geringer. Die Mittelwerte des täglichen Infektionsrisikos liegen zwischen 42 % im Burgenland und 51 % in Kärnten, wobei die Mehrheit der Regionen eine verbesserte Belüftung und Infektionskontrolle aufweist. In Kärnten überschreiten Klassenzimmer immer noch in 43 % der Fälle das Risiko des Referenzszenarios, während das Burgenland die wenigsten Überschreitungen verzeichnet, wobei Klassenzimmer nur in 19 % der Fälle den Schwellenwert überschreiten.

Tabelle 4-25 Saisonale Statistik des Infektionsrisikos für einen Klassenraum mit 25 Personen, einschließlich des Prozentsatzes der Überschreitungen des Referenzfalls für verschiedene Regionen. Infektionsrisiko im Vergleich der Klassenräume mit der besten, mittleren und schlechtesten Leistung

Jahreszeit	Bundes-land	Min [%]	Max [%]	Perzentile			Mittelw. [%]	Überschr. > Ref. Sz. [%]
				25 [%]	50 [%]	75 [%]		
Sommer '23	BUR	29	77	33	37	45	40	10
	KÄR	28	84	38	45	53	47	27
	NIE	27	91	34	40	50	43	21
	OBE	27	78	34	40	49	43	20
	SAL	27	78	36	43	52	45	24
	STE	27	92	35	41	53	45	25
	TIR	28	82	34	41	50	43	19
	VOR	28	73	32	40	53	43	29
	WIE	27	85	35	42	52	44	24
Herbst	BUR	27	93	48	61	73	61	66
	KÄR	28	94	67	77	83	73	92
	NIE	27	95	59	72	81	69	83
	OBE	27	95	63	73	81	70	88
	SAL	27	90	52	64	73	62	75
	STE	27	96	61	73	81	70	88
	TIR	28	94	59	70	79	68	85
	VOR	27	91	55	68	78	66	79
	WIE	28	94	57	70	79	67	82
Winter	BUR	27	94	47	59	75	61	62
	KÄR	28	94	70	78	84	76	96
	NIE	27	95	64	75	82	72	88
	OBE	27	94	69	77	82	75	96
	SAL	27	91	55	66	75	64	79
	STE	28	95	66	75	82	73	94
	TIR	28	94	62	72	80	70	89
	VOR	27	94	60	71	80	69	86
	WIE	27	95	61	72	80	69	87
Frühling	BUR	27	91	41	50	62	52	44
	KÄR	27	94	56	67	76	65	82
	NIE	27	93	46	59	71	58	63
	OBE	27	93	49	60	70	59	68
	SAL	27	92	44	54	65	55	56
	STE	27	95	50	61	71	60	70
	TIR	27	94	48	60	71	59	66
	VOR	27	91	45	55	64	55	58
	WIE	27	94	48	59	70	59	66
Sommer '24	BUR	28	73	35	40	47	42	19
	KÄR	28	90	40	50	60	51	43
	NIE	27	89	35	42	51	44	23
	OBE	27	84	35	42	50	43	20
	SAL	27	86	37	45	56	46	32
	STE	27	91	38	46	56	48	34
	TIR	28	86	36	45	56	47	33
	VOR	27	81	36	43	51	44	21
	WIE	27	84	36	43	51	45	24

	BUR	27	94	44	55	70	57	56
	KÄR	27	94	61	73	81	70	86
	NIE	27	95	53	69	79	66	76
	OBE	27	95	57	70	79	67	81
Jahr	SAL	27	92	48	60	71	59	68
	STE	27	96	56	69	79	67	81
	TIR	27	94	53	67	77	64	77
	VOR	27	94	50	63	75	62	71
	WIE	27	95	53	66	77	64	77

#### 4.5.2.7 Infektionsrisiko im Vergleich der Klassenräume mit der besten, mittleren und schlechtesten Leistung

Abbildung 4-50 und Abbildung 4-51 veranschaulichen die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und die Dynamik der Viruslast unter drei verschiedenen „realen“ Szenarien: beste, durchschnittliche und schlechteste Tage. Diese Szenarien wurden aus den überwachten Daten ausgewählt, um eine Reihe typischer Betriebsbedingungen in Klassenzimmern darzustellen. Die Auswahl dieser Tage basierte auf ihrer Übereinstimmung mit dem 25. Perzentil (bester Tag), dem Mittelwert (durchschnittlicher Tag) und dem 95. Perzentil (schlechtester Tag) der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die in 1200 Klassenzimmern beobachtet wurden.

Abbildung 4-50 zeigt die tägliche Entwicklung der 2-minütigen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen für jedes Szenario, wobei die gestrichelte rote Linie die durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Konzentration für jeden Fall darstellt.

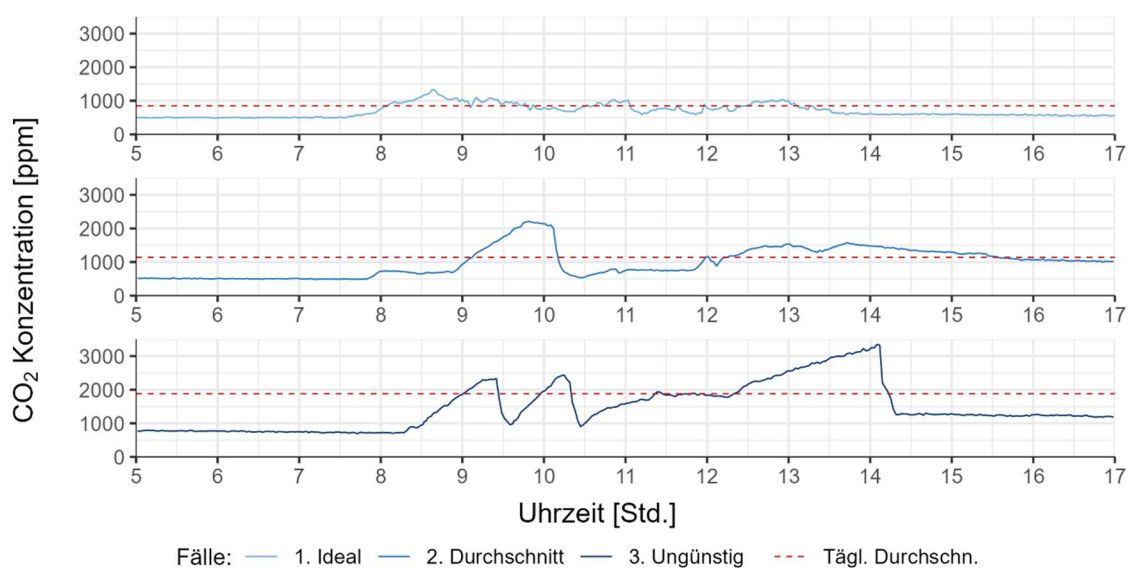


Abbildung 4-50 Beispiel einer Zeitreihe mit repräsentativen CO<sub>2</sub> Konzentration in Referenz-Klassenzimmern im besten (25. Perzentil), durchschnittlichen (Mittelwert), und schlechtesten (95. Perzentil) Fall

Abbildung 4-51 zeigt die entsprechenden Viruskonzentration ( $c_v(t)$ ) in den drei repräsentativen Klassenzimmern (primäre y-Achse) und die kumulative Anzahl der von den SuS eingeatmeten Viruspartikel ( $n_v(t)$ ) (sekundäre y-Achse). Diese Werte wurden auf der Grundlage der täglichen durchschnittlichen Belüftungsrate für jedes Szenario berechnet. Wie in Abb. 4-51 dargestellt, wird in allen drei Fällen je nach Belüftungsrate innerhalb von 0,5 bis 2 Stunden ein stationäres Gleichgewicht zwischen Virusemission und -entfernung erreicht.

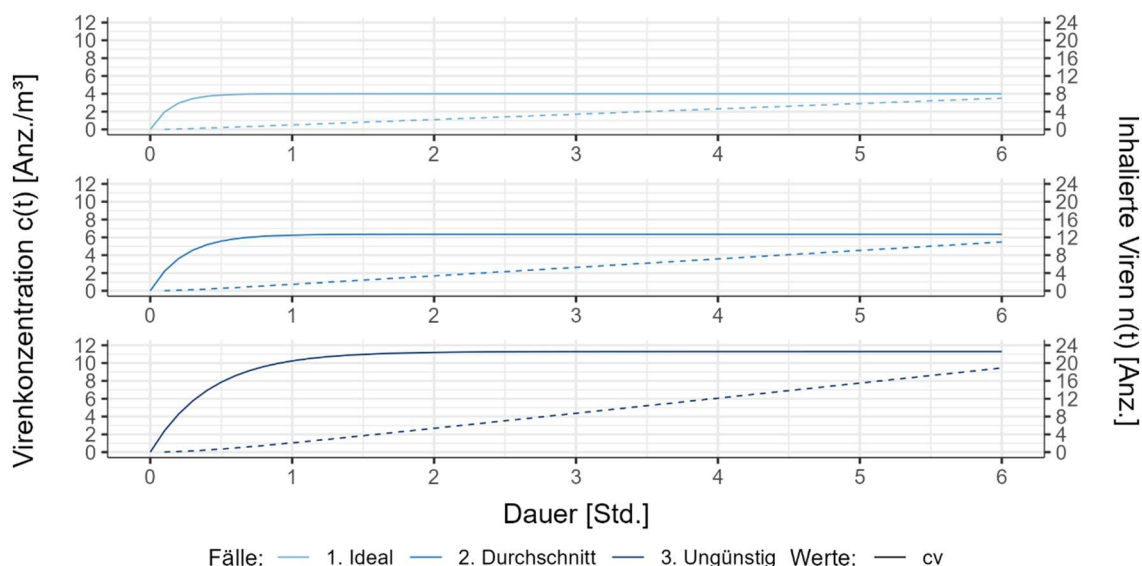


Abbildung 4-51 Zeitreihe – Beispiel für die Viruskonzentration  $c(t)$  und die Anzahl der eingeatmeten Viruspartikel  $n(t)$  in Klassenräumen im besten, durchschnittlichen und schlechtesten Fall

Tabelle 4-26 zeigt die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Lüftungsrate, die Viruskonzentration pro m<sup>3</sup>, die Anzahl der eingeatmeten Viruspartikel und das Gruppeninfektionsrisiko für die jeweiligen Fälle. Im Best-Case-Szenario, das durch eine Lüftungsrate von 10,2 l/(s·Person) gekennzeichnet ist, bleibt die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit durchschnittlich 852 ppm relativ niedrig. Dieser effektive Luftaustausch trägt dazu bei, die Viruskonzentration in der Luft zu minimieren, und stabilisiert sich bei 4 Viruspartikeln/m<sup>3</sup>. Dadurch wird das Gruppeninfektionsrisiko bei 53 % gehalten. Das Szenario des durchschnittlichen Falls mit einer Belüftung von 6,1 l/(s·Person) zeigt einen moderaten Anstieg der CO<sub>2</sub>-Werte auf einen Tagesdurchschnitt von 1140 ppm und eine Viruskonzentration von 6 Partikeln/m<sup>3</sup>. Dies führt zu einem höheren Gruppeninfektionsrisiko von 69 %, was zeigt, wie sich eine reduzierte Belüftung auf die Luftqualität und das Übertragungsrisiko auswirkt. Im schlimmsten Fall, bei einer Belüftung von nur 3,0 l/(s·Person), steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt deutlich auf durchschnittlich 1877 ppm an, und die Viruskonzentration erreicht 11 Partikel/m<sup>3</sup>. Bei diesem Szenario steigt das Infektionsrisiko auf 87 %, was zeigt, wie eine unzureichende Belüftung das Risiko einer Übertragung von Viren über die Luft schnell erhöht.

Tabelle 4-26 Beispiele für das tägliche Infektionsrisiko – ein Klassenzimmer mit 25 Personen unter 3 verschiedenen Lüftungsbedingungen (bester, mittlerer und schlechtester Fall).

Fälle	Tägliche Durchschnittswerte				
	CO <sub>2</sub> Konz.	VR	Virus Konz. c(t)	Inhalierete Viren n(t)	Gruppen Inf. Risiko
	[ppm]	[l/(s·Person)]	[Anz./m <sup>3</sup> ]	[Anz.]	[%]
Bester	852	10,2	4	7	53
Mittlerer	1140	6,1	6	11	69
Schlechtester	1877	3,0	11	19	87

### 4.5.3 Zusammenhang zwischen Fehlzeiten und Umweltvariablen

Da es sich beim ImpAQS-Projekt überwiegend um eine Beobachtungsstudie handelt (die einzige Intervention besteht in der kontrollierten Matched-Pair-Prüfung von CO<sub>2</sub>-Sensoren), können Beziehungen zwischen Variablen mithilfe von Assoziationsmaßen wie der Pearson-Korrelation ( $r$ ), der Spearman-Korrelation und der Kreuzkorrelation untersucht werden. Es ist jedoch wichtig, sich daran zu erinnern, dass Korrelation nicht Kausalität bedeutet: Zwei Variablen können eine Assoziation ohne direkte Ursache-Wirkungs-Beziehung aufweisen und durch zusätzliche nicht gemessene Variablen beeinflusst werden. Daher liegt es außerhalb des Rahmens des ImpAQS-Projekts, endgültige kausale Schlussfolgerungen über diese Beziehungen zu ziehen.

Dennoch ist es für die Untersuchung kausaler Zusammenhänge in zukünftigen Forschungsstudien von Interesse, die Art der mäßigen oder starken Zusammenhänge zwischen Luftqualität, Belüftung und Fehlzeiten zu verstehen. Bei der Kategorisierung der Stärke von Korrelationen in einem gesundheitsbezogenen oder epidemiologischen Kontext werden für absolute Werte von 0–0,19 in der Regel als sehr schwach, 0,2–0,39 als schwach, 0,40–0,59 als mäßig, 0,6–0,79 als stark und 0,8–1 als sehr starke Korrelation (BMJ, 2024) betrachtet, aber dies sind willkürliche Grenzen, und der Kontext der Ergebnisse sollte immer berücksichtigt werden.

#### 4.5.3.1 Pearson-Korrelationsanalyse

Die Pearson-Korrelationsmethode wurde verwendet, um die Stärke linearer Beziehungen zwischen Fehlzeiten und Umweltfaktoren wie CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen, Außentemperatur, Feinstaub PM<sub>2,5</sub> im Freien, SARS-CoV-2-Abwassergene, Belüftungsraten und Infektionsrisiko zu bewerten, die über 120 Schulen hinweg aggregiert wurden. Die Korrelationen wurden anhand der wöchentlichen aggregierten Mittelwerte für diese Variablen berechnet. Dieser Ansatz bietet einen umfassenden Überblick darüber, wie diese Variablen auf nationaler Ebene zusammenhängen, wobei tägliche Schwankungen und individuelle Schwankungen zwischen den Schulen ausgeglichen werden.

Die Pearson-Korrelation bewertet die Stärke linearer Beziehungen zwischen zwei Variablen, wobei eine Zunahme oder Abnahme einer Variablen einer proportionalen Änderung der anderen entspricht. Diese Methode steht im Gegensatz zur Spearman-Korrelation, die monotone Beziehungen untersucht – Situationen, in denen sich Variablen in die gleiche relative Richtung bewegen, wenn auch nicht unbedingt mit konstanter Geschwindigkeit. Die Pearson-Korrelation bietet eine Momentaufnahme der linearen Gesamtbeziehung zwischen zwei Variablen, ohne zeitliche Abhängigkeiten oder verzögerte Effekte zu berücksichtigen, und ist daher nützlich, um zu verstehen, wie sich Variablen auf aggregierter (d. h. nationaler) Ebene gemeinsam bewegen, unabhängig vom Zeitpunkt dieser Veränderungen.

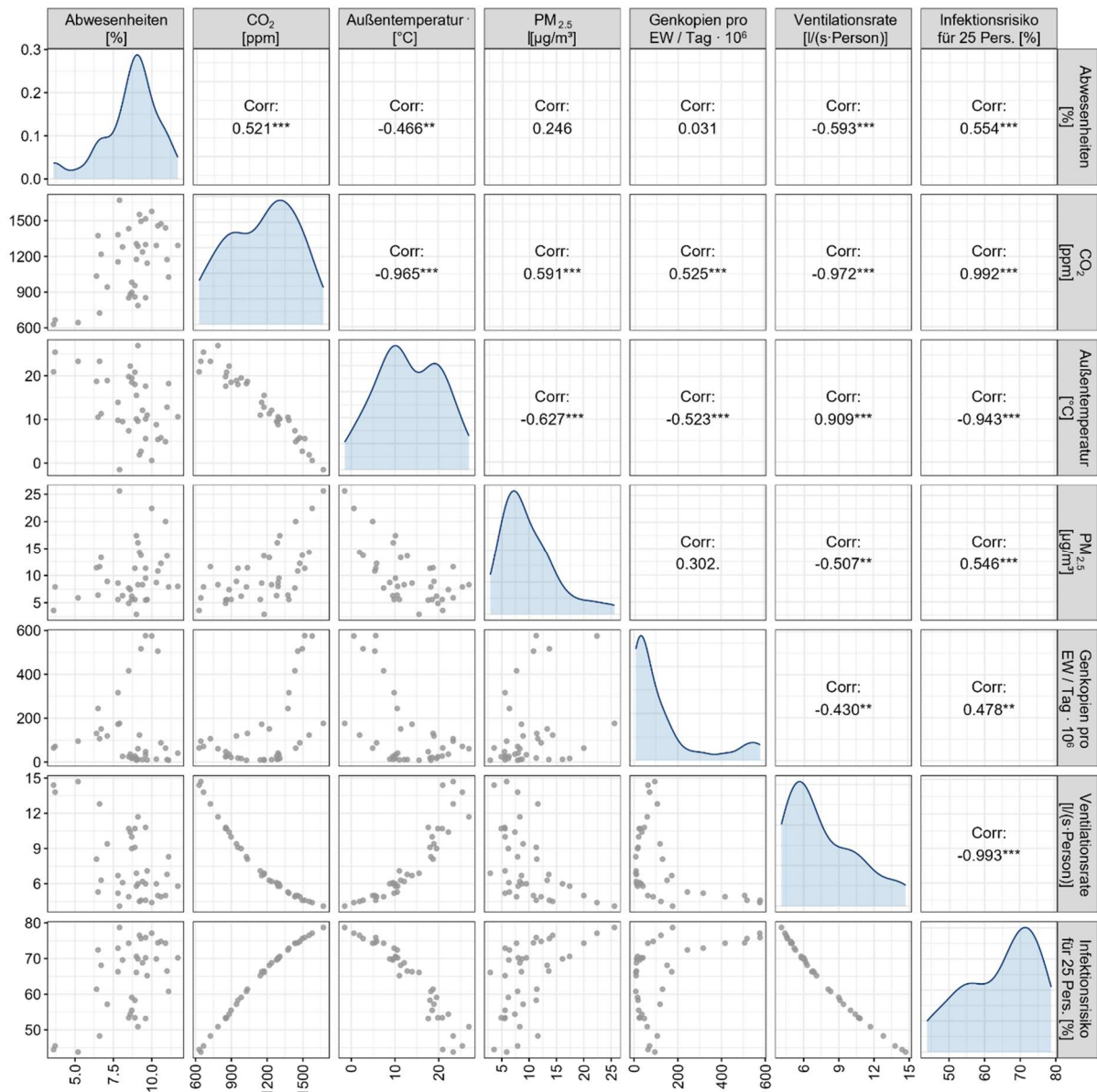


Abbildung 4-52 Pearson-Korrelationsanalyse zwischen Fehlzeiten und Umweltvariablen

Die Pearson-Korrelationsanalyse (Abb. 4-52) ergab eine mäßig positive Korrelation ( $r = 0,521$ ) zwischen dem CO<sub>2</sub>-Gehalt in Innenräumen und Fehlzeiten, was darauf hindeutet, dass höhere CO<sub>2</sub>-Werte, ein Zeichen für schlechte Belüftung, mit einer Zunahme der Abwesenheit von SuS in Verbindung stehen. Im Gegensatz dazu wurde eine moderate negative Korrelation ( $r = -0,466$ ) zwischen der Außentemperatur und den Fehlzeiten beobachtet, was darauf hindeutet, dass kälteres Wetter tendenziell mit höheren Fehlzeiten zusammenhängt, möglicherweise aufgrund einer Zunahme saisonaler Krankheiten in kälteren Perioden. Die Belüftungsraten zeigten eine mäßige bis starke negative Korrelation mit den Fehlzeiten ( $r = -0,593$ ), was die Annahme bestätigt, dass eine bessere Belüftung dazu beiträgt, Fehlzeiten zu reduzieren, indem sie die Luftqualität in Innenräumen verbessert und die Ausbreitung von Krankheiten, die über die Luft übertragen werden, minimiert. Schließlich gab es eine mäßig positive Korrelation ( $r = 0,554$ ) zwischen dem theoretisch abgeleiteten Infektionsrisiko (Anhang B.10) und den Fehlzeiten, was darauf hindeutet, dass mit zunehmendem Infektionsrisiko auch die Fehlzeiten der SuS zunehmen, was wahrscheinlich auf die Auswirkungen von Krankheitsausbrüchen zu diesem Zeitpunkt zurückzuführen ist.

#### 4.5.3.2 Analyse der Kreuzkorrelationsfunktion (CCF)

Die Kreuzkorrelation (CC) misst die Ähnlichkeit zwischen zwei Zeitreihen im Laufe der Zeit, wodurch potenzielle Vorlauf- und Nachlaufbeziehungen zwischen Variablen untersucht werden können. Um potenzielle Vorlauf- und Nachlaufbeziehungen zwischen Fehlzeiten und Umweltvariablen (wie CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen, Außentemperatur, PM<sub>2,5</sub>-Werte im Freien, Belüftungsraten und Infektionsrisiko) zu untersuchen, haben wir zunächst eine Kreuzkorrelationsanalyse (CCF) der täglichen Daten durchgeführt. Die CCF ermöglichte es uns zu untersuchen, ob Veränderungen dieser Umweltfaktoren Veränderungen bei den Fehlzeiten vorausgehen oder folgen, um mögliche zeitverzögerte Zusammenhänge aufzuzeigen.

Die Ergebnisse dieser ersten Analyse deuteten auf einige interessante Vorlauf-Verzögerungs-Beziehungen hin. Beispielsweise schienen höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen einem Anstieg der Fehlzeiten um einige Tage vorauszugehen, während kältere Außentemperaturen nach einer kurzen Verzögerung mit höheren Fehlzeiten in Verbindung gebracht wurden. Diese Ergebnisse deuteten auf mögliche Zusammenhänge zwischen schlechter Belüftung, saisonalen Bedingungen und Abwesenheit von SuS hin. Diese Lead-Lag-Beziehungen spiegelten jedoch wahrscheinlich eher breitere, längerfristige Trends wie saisonale Schwankungen wider als direkte kurzfristige Ursache-Wirkungs-Beziehungen.

Um diese Ergebnisse besser zu verstehen, haben wir die CCF-Analyse mit differenzierten Daten wiederholt, d. h. Daten, bei denen langfristige Trends wie saisonale Muster entfernt wurden. Durch die Differenzierung der Daten konnten wir uns auf kurzfristige Schwankungen konzentrieren, indem wir die übergreifenden Trends eliminierten, die sonst die direkten kurzfristigen Beziehungen zwischen den Variablen verschleiern oder übertreiben könnten. Wir führten diese Analyse sowohl mit täglichen als auch mit wöchentlichen differenzierten Daten durch, um zu untersuchen, wie die Umweltvariablen mit Fehlzeiten zusammenhängen, sobald diese langfristigen Trends berücksichtigt wurden.

Nach Anwendung des CCF auf die differenzierten Daten verschwanden die in der undifferenzierten Analyse ermittelten Lead-Lag-Beziehungen. Keine der untersuchten Variablen (d. h. CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen, Außentemperatur, PM<sub>2,5</sub>-Konzentration im Freien, Belüftungsraten oder SARS-CoV-2 Infektionsrisiko) zeigte in der differenzierten Analyse signifikante kurzfristige Vorlaufeffekte auf Fehlzeiten.

## 4.6 Zusammenfassung und Konsolidierung der Ergebnisse der quantitativen Analyse

Die in Abschnitt 4 (oben) analysierten quantitativen Ergebnisse lieferten Belege für die ersten vier Forschungsfragen des ImpAQS-Projekts (Abschnitt 1.4). In den folgenden Unterabschnitten wird eine zusammengefasste Antwort auf jede Forschungsfrage gegeben.

### 4.6.1 Antwort auf Forschungsfrage 1

*Wie viel Prozent der österreichischen Klassenzimmer werden gemäß den bestehenden Normen und den neuen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsrichtlinien angemessen/unzureichend belüftet?*

Die Mehrheit (55 %) der jährlichen Tagesmittelwerte für CO<sub>2</sub>, die für alle Schulen aufgezeichnet wurden, überschreiten den Schwellenwert von 1000 ppm, der in der ÖNORM H 6039 (ASI, 2023), der EN 16798-1 Kategorie 1 (CEN, 2019) und der BMK-Klasse A (BMK, 2019) festgelegt ist. Die mediane



Lüftungsrate über alle Schulen hinweg betrug 5,9 l/(s·Person), was mehr als 41 % unter den 10 l/(s·Person) liegt, die in der Kategorie IEQ in EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) und 36 % unter der altersbezogenen Luftstromrate (für 11–18-Jährige) gemäß ÖNORM H 6039:2023 (ASI, 2023) (Tab. 2-3). Bemerkenswert ist, dass in 25 % der Klassenzimmer während des Schuljahres die tägliche mittlere Luftwechselrate unter 4 l/(s·Person) lag, was darauf hindeutet, dass eine beträchtliche Anzahl österreichischer Klassenzimmer weniger als die von der EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) empfohlene Mindestlüftungsrate (von 4 l/(s·Person)) bietet (Tab. 4-11).

In Bezug auf die Einhaltung der „gesundheitsbasierten“ Zielwerte für die Belüftung würden über 90 % der Schulen die entsprechenden Richtlinien täglich nicht einhalten (einschließlich des BMK-Ziels der Klasse A+ (BMK, 2024b), des gesundheitsbasierten REHVA-Ziels von 800 ppm (RE HVA, 2022) oder die von der Lancet-Kommission empfohlene Belüftungsrate von 14 l/(s·Person) (The Lancet COVID-19 Commission, 2022) (Tab. 4-10). Im Winter steigt die Nichteinhaltung der „gesundheitsbezogenen“ Zielwerte auf über 96 %, was darauf hindeutet, dass weniger als 4 % der österreichischen Schulen derzeit in der Lage sind, diese Ziele das ganze Jahr über einzuhalten (Tab. 4-11).

Insgesamt bedeutet dies eine weit verbreitete Nichteinhaltung der Mindeststandards, der in den aktuellen österreichischen, europäischen und internationalen Richtlinien für die Belüftung von Klassenzimmern festgelegt sind.

#### 4.6.2 Antwort auf Forschungsfrage 2

*Hängen die Ergebnisse für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern und die Lüftungspraktiken von der Jahreszeit und/oder anderen lokalen Umweltfaktoren (z. B. Lärm, thermische Behaglichkeit, externe Luftverschmutzung usw.) ab?*

Die Daten zeigen eine starke Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Lüftungsraten in den Klassenzimmern von der Jahreszeit. Vom Sommer 2023 bis zum Winter 2023–24 ist ein deutlicher Rückgang der täglichen mittleren Lüftungsraten und ein entsprechender Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zu verzeichnen. Im Winter beträgt die mediane Lüftungsrate 4,7 l/(s·Person), wobei 25 % der Klassenzimmer nur 3,4 l/(s·Person) oder weniger verzeichnen. Dies ist wahrscheinlich auf die geringere Häufigkeit des Fensterlüftens als Folge kälterer Außentemperaturen zurückzuführen. Im Frühjahr 2024 beginnt sich das Muster umzukehren, mit steigenden Lüftungsraten und sinkenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen. Im Frühjahr und Frühsommer liegen die mediane täglichen Lüftungsraten bei 7,9 bzw. 13,2 l/(s·Person), was wahrscheinlich auf häufigere und längere Lüftungsperioden in den Räumen als Folge des wärmeren Wetters zurückzuführen ist.

Die Analyse der Beziehung zwischen den CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen und ihrer Verbindung mit den Außentemperaturen (Abschnitt 4.3.3) zeigte, dass bei steigenden Außentemperaturen die CO<sub>2</sub>-Werte sowohl bei natürlicher als auch bei mechanischer Belüftung sinken. Bei niedrigeren Temperaturen (entsprechend den Wintermonaten) gibt es jedoch einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Belüftungsarten. Mechanisch belüftete Schulen sind in der Lage, deutlich niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufrechtzuerhalten, mit einem Unterschied von über 450–600 ppm zwischen den beiden Lüftungstypen während der kältesten Jahreszeit.

Externer Lärm wurde in dieser Studie nicht explizit gemessen, hat aber bekanntermaßen einen starken Einfluss auf das Öffnungsverhalten von Fenstern. Das subjektive Problem der Lärmbelästigung

in Bezug auf die Lüftungspraktiken im Klassenzimmer wird aus der Sicht der Lehrkräfte in Abschnitt 5.2.2.1 (in Bezug auf die Winterumfrage) und 5.2.4.1 (in Bezug auf die Sommerumfrage) bewertet.

### 4.6.3 Antwort auf Forschungsfrage 3

*Erzielen Klassenzimmer, die mit CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und grundlegenden Lüftungshinweisen ausgestattet sind, bessere Lüftungsergebnisse (niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen) als Klassenzimmer ohne Überwachungsgeräte?*

Klassenzimmer mit sichtbaren CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und Lüftungshinweisen schnitten im Allgemeinen besser ab als Klassenzimmer ohne sichtbare Informationen. Die Ergebnisse sind jedoch nuanciert, und in den aggregierten Jahresdaten (Abb. 4-15) ist der volle Nutzen von sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensoren nicht sofort ersichtlich. Dies liegt daran, dass Störfaktoren, die in einem heterogenen Datensatz natürlich auftreten, den vollen Nutzen des Einsatzes von CO<sub>2</sub>-Sensoren im Zusammenhang mit voll besetzten, natürlich belüfteten Klassenzimmern verschleiern. Ein wichtiger Störfaktor ist die Einbeziehung von teilweise oder nicht belegten Räumen in den paarweisen Vergleich von T- und K-Klassenzimmern. Dies liegt daran, dass Klassenzimmer mit geringer Belegung nicht fair mit voll besetzten Klassenzimmern verglichen werden können, ohne die Ergebnisse zu verzerren. Aus diesem Grund wurden zusätzliche Screening-Methoden auf die T- und K-Daten angewendet (Abschnitt 4.4), um eine Verzerrung des Vergleichs zu vermeiden. Zusätzlich wurden mechanisch belüftete T- und K-Klassenzimmer aus den Daten der Matched-Pair Analyse entfernt (da die Personen in einem mechanisch belüfteten Raum mit einem T-Sensor normalerweise nicht mit den Fenstern interagieren müssen, um akzeptable CO<sub>2</sub>-Werte aufrechtzuerhalten).

Durch diese Bereinigung der Daten konnte ein echter Vergleich der Vorteile von sichtbaren CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten gezogen werden (Abschnitte 4.4.1 und 4.4.2). Die Daten zeigen, dass CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräte in den kälteren Monaten, in denen die CO<sub>2</sub>-Werte am höchsten sind, den größten Nutzen bieten. Im November und Dezember betrug der monatliche Medianunterschied zwischen den K- und T-Sensoren 227 bzw. 215 ppm, was einen klaren Vorteil für die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren zu diesem Zeitpunkt zeigt (Tabelle 4-17). Im Gegensatz dazu war der Unterschied zwischen den K- und T-Sensoren im Juni und Juli deutlich geringer, wo der monatliche Medianunterschied nur 57 bzw. 28 ppm betrug.

Der größte Nutzen der Verwendung von sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensoren wurde im oberen Quartil der Klassenräume festgestellt (d.h. die am schlechtesten belüfteten Räume), wo ersichtlich ist (Tab. 4-17), dass im Dezember und Januar 25 % der T-Klassenräume (mit einem sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensor) im Vergleich zu den entsprechenden K-Klassenräumen ungefähr 500 ppm niedrigere monatliche Median CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (496 bzw. 506 ppm) meldeten.

Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass die meisten natürlich belüfteten Klassenzimmer durch den Einsatz eines sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensors (mit klarer Anleitung) eine spürbare Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Konzentration erreichen. Darüber hinaus ist der Nutzen von CO<sub>2</sub>-Sensoren in den kälteren Monaten, in denen die Belüftung im Allgemeinen schlecht ist, am größten. In etwa einem Viertel aller Klassenzimmer führt dieser Vorteil zu einer Reduzierung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration um ungefähr 500 ppm in den kältesten Monaten des Jahres. Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die LuL keine formelle Schulung in Bezug auf die korrekte Verwendung

eines CO<sub>2</sub>-Sensors oder geeignete Lüftungsstrategien erhalten haben (abgesehen von zwei kleinen, an der Wand montierten Anzeigepostern in den T-Klassen, siehe Appendix B.6).

#### 4.6.4 Antwort auf Forschungsfrage 4

*Bietet die Verbesserung der Raumluftqualität in Klassenzimmern einen statistisch signifikanten Vorteil in Bezug auf die Verringerung des Risikos einer durch die Luft übertragenen Infektion?*

Die Frage, ob eine Verbesserung der Raumluftqualität durch bessere Lüftungspraktiken dazu beitragen kann, das Risiko einer Übertragung von Krankheiten durch die Luft in Klassenzimmern zu verringern, wurde mithilfe einer analytischen Modellierung des Übertragungsrisikos des SARS-CoV-2-Virus durch die Luft beantwortet. Durch die Anwendung dieses Modells (Abschnitt 4.5.1) auf die für jedes Klassenzimmer ermittelten täglichen mittleren Lüftungsraten (Abschnitt 4.2.3.1) kann das relative Risiko einer Infektion durch die Luft verglichen werden (Abschnitt 4.5.2).

Die Analyse zeigt, dass die Klassengröße, die Expositionsdauer und die Belüftungsrate eine entscheidende Rolle für das Infektionsrisiko durch die Luft spielen. Wenn beispielsweise eine kleine Gruppe von 15 SuS über einen Zeitraum von 6 Stunden unterrichtet wird, ergibt sich ein Gruppeninfektionsrisiko (Wahrscheinlichkeit, dass eine weitere Person in einem Raum mit einer infektiösen Person infiziert wird) von etwa 35 %. Im Gegensatz dazu führt der Unterricht in einer größeren Gruppe von 30 Personen unter den gleichen Bedingungen zu einem Risiko von 60 %.

Im Rahmen dieser Studie, bei der 25 % der Klassenzimmer eine jährliche mediane Luftwechselrate von 4 l/(s·Person) oder weniger erreichen, ergibt sich nach 6 Stunden Exposition eine Wahrscheinlichkeit für eine Gruppeninfektion von etwa 74 %. Im Vergleich dazu reduziert ein identischer Klassenraum mit einer Luftstromrate von 7 l/(s·Person) (Kategorie IEQ<sub>II</sub>) das Risiko auf 60 % (19 % relative Risikoreduzierung). Ein Klassenraum mit einer Luftstromrate von 10 l/(s·Person) (IEQ-Kategorie 1) reduziert das Risiko weiter auf 50 % (32 % relative Risikoreduzierung). Im Gegensatz dazu würde ein Klassenzimmer, das die Empfehlung des ASHRAE-Standards 241:2023 (ASHRAE, 2023) zur Kontrolle infektiöser Aerosole mit einer Mindestluftstromrate von 20 l/(s·Person) anwendet, das Risiko einer Gruppeninfektion auf 32 % (57 % relative Risikoreduzierung) senken.

Es ist zu beachten, dass diese Analyse keine Übertragung über kurze Entfernungen (d.h. direkt über die Luft) oder die Übertragung durch infizierte Oberflächen einschließt und daher das Infektionsrisiko insgesamt erheblich höher sein könnte als in der modellierten Analyse. Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Verwendung geeigneter Belüftungs- und Luftreinigungsstrategien in Kombination mit anderen prophylaktischen Maßnahmen (z. B. Maskentragen und Abstandhalten) zu Zeiten des Jahres, in denen das Risiko der Übertragung von Krankheitserregern über die Luft hoch ist.



## 5 Qualitative Umfrageantworten

Dieser Abschnitt soll die **Forschungsfrage 5** beantworten: „*Nehmen LuL die Installation und Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren positiv, negativ oder gleichgültig wahr? Und wenn positiv oder negativ, was sind die größten Triebkräfte und Hindernisse für die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten und die Umsetzung angemessener Lüftungspraktiken in Klassenzimmern?*“

Dieser Abschnitt unterstützt ferner qualitative Informationen in Bezug auf den zweiten Teil der **Forschungsfrage 2**: „*Hängen die Ergebnisse für die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern und die Lüftungspraktiken von der Jahreszeit und/oder anderen lokalen Umweltfaktoren (z. B. Lärm, thermische Behaglichkeit, externe Luftverschmutzung usw.) ab?*“, in Bezug auf *andere lokale Umweltfaktoren wie Lärm, thermische Behaglichkeit und andere persönliche Hindernisse, die von Klassenlehrer\*innen und Schulleiter\*innen wahrgenommen werden.*

Zur Beantwortung dieser Fragen wurden im Rahmen des ImpAQS-Projekts insgesamt vier Umfragen durchgeführt. Zwei dieser Umfragen richteten sich an Schulleiter\*innen (Abschnitt 5.1), da diese eine sehr einflussreiche Rolle bei der Entwicklung und Umsetzung von Schulrichtlinien und der Unterrichtung von LuL spielen. Darüber hinaus richteten sich zwei saisonale Umfragen (Winter und Sommer) an Klassenlehrer\*innen (Abschnitt 5.2), da ihr Verhalten und ihr Wissen eine entscheidende Rolle bei den täglichen Lüftungspraktiken auf Klassenebene spielen. Eine Zusammenfassung der in diesem Kapitel durchgeführten Analysen findet sich in Abschnitt 5.3, wo auch eine Antwort auf die Forschungsfrage 5 sowie zusätzliche Informationen zur Unterstützung der Forschungsfrage 2 (die in Abschnitt 1.4 gestellt wurde) gegeben werden.

Um zwischen direkten und indirekten Zitaten in diesem Kapitel zu unterscheiden, wurde der Text wie folgt formatiert: doppelte Anführungszeichen werden in Kombination mit Kursivschrift verwendet, um direkte Zitate anzuzeigen, während einfache Anführungszeichen in Kombination mit Kursivschrift verwendet werden, um indirekte Zitate zu kennzeichnen (d.h. wenn der zitierte Text möglicherweise zur besseren Verständlichkeit umformuliert oder gekürzt wurde).

### 5.1 Befragung der Schulleiter\*innen

#### 5.1.1 Erste Umfrage – Ergebnisse

Die erste Umfrage sollte zu Beginn des Schuljahres 2023 von den 120 Schulleiter\*innen beantwortet werden. Der erste Kontakt mit den Schulleiter\*innen wurde am 21.09.2023 hergestellt (Abb. 5-1), was auch das Datum war, an dem die Umfrage offiziell eröffnet wurde. Am 25.09. und 26.09. wurden weitere Telefonate geführt, und die Umfrage wurde am 27.09.2023 abgeschlossen. Der kurze Zeitrahmen der Umfrage ergab sich aus der Frist für den Zwischenbericht, der Ende September 2023 fällig war und in den die Antworten der ersten Umfrage einfließen.

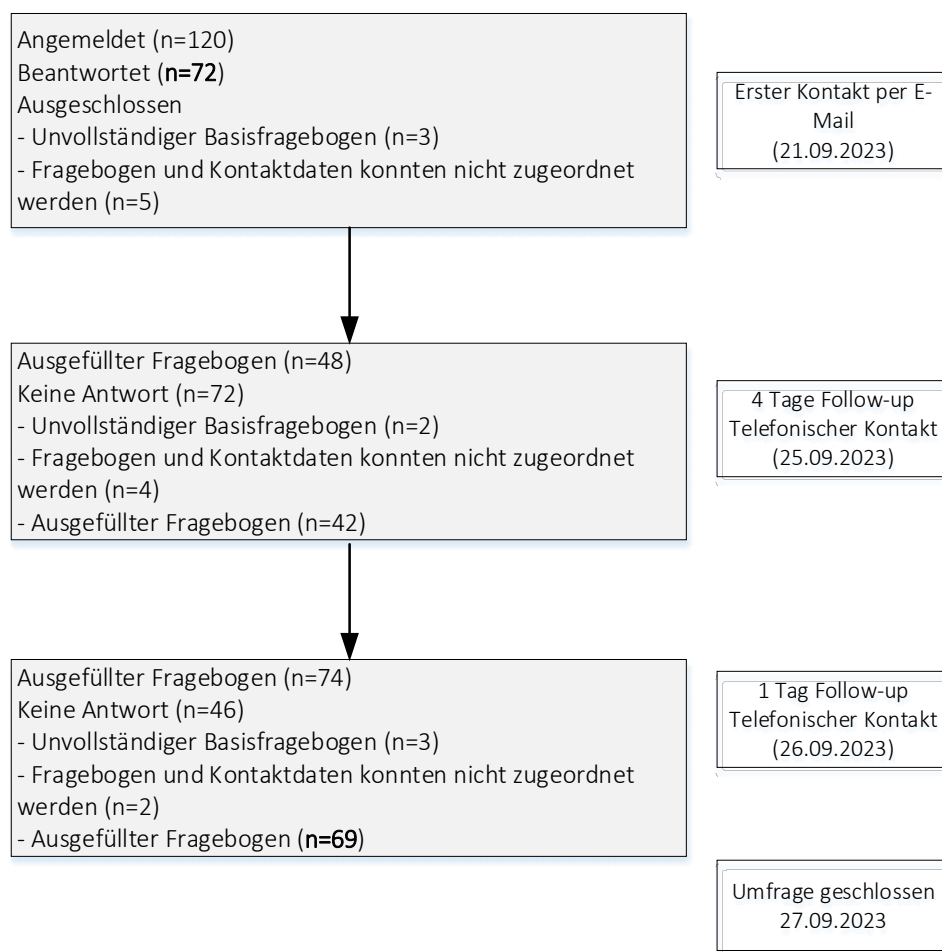


Abbildung 5-1 Arbeitsablauf der ersten Schulleiterumfrage, einschließlich Zeitplan und Kontaktmethode

Die Ergebnisse der Umfrage wurden weiter im Detail analysiert, um zu verstehen, ob es statistisch signifikante Zusammenhänge zwischen den einzelnen Umfrageantworten und anderen Variablen (wie Schultyp, Geschlecht, Regionen etc.) bestehen. Eine detailliertere Analyse befindet sich in Anhang C.2.1.1.

Als Mittel zur Erhöhung der Rücklaufquote und der Qualität der Antworten erwies sich der Aufbau einer Beziehung zu den Schuldirektor\*innen (vor der Durchführung der Umfrage) als vorteilhaft. Durch Bereitstellung klarer Anweisungen, die Gewährleistung der Vertraulichkeit und die Betonung der Wichtigkeit ihres Feedbacks wurde eine maximale Teilnahme angestrebt. Der Erstkontakt für die allgemeine Teilnahme der Schulen an der ImpAQS-Studie wurde über E-Mail im Mai 2023 hergestellt. Es wurde festgestellt, dass die Schulen in Graz relativ schnell auf die Aussendung reagierten (wahrscheinlich aufgrund früherer Kontakte mit einigen der Schulen), während die Antworten in Schulen außerhalb der Steiermark weniger schnell kamen, weshalb die Kontaktstrategie auf Telefonanrufe umgestellt wurde.

Die Anwerbung für die erste Umfrage unter den Schuldirektor\*innen begann im September 2023 mit einer ersten E-Mail-Einladung. In der Folge wurden zwei Telefonanrufe getätigt, um die Teilnahme in einem so kurzen Zeitraum zu erhöhen (Abb. 5-1). Die Umfrage richtete sich an die 120 teilnehmenden Schulleiter\*innen, von denen schließlich 72 teilnahmen, wobei 69 gültige Antworten aufgezeichnet wurden (Abb. 5-1). Basierend auf insgesamt 5921 Schulen in Österreich (Statistik Austria, 2024) und

120 teilnehmenden Schulen ergibt sich ein Konfidenzniveau von 88 % bei einem Stichprobenfehlerrisiko von 12 %, was somit einen guten Kompromiss zwischen Sicherheit und Stichprobengröße darstellt, um daraus Schlussfolgerungen zu ziehen.

Alle Tortendiagramme und Boxplots, die die Umfrageergebnisse zusammenfassen, befinden sich in Anhang C.2.1.1. Die Abbildungen fassen die Umfrageergebnisse zusammen. Bei Betrachtung der Umfrageantworten und in Bezug auf die Bedeutung der Belüftung (Frage 2) stimmte die Mehrheit der Befragten zu, dass die Belüftung in Klassenzimmern entweder *„sehr wichtig“* oder *„äußerst wichtig“* ist (97,1 %), dass sie einen *„sehr hohen“* oder *„äußerst hohen“* Einfluss auf die Leistung der SuS hat (83,8 %) und dass die Luftqualität in Bezug auf die Übertragung von viralen Aerosolen und anderen luftgetragenen Schadstoffen in Klassenzimmern *„sehr“* oder *„äußerst“* wichtig ist (91,1 %) (Anhang C.2.1.1).

Bei Frage 3 (*„Warum ist Ihrer Meinung nach Belüftung wichtig?“*) gab es einige absichtlich eingefügte falsche Antworten, z. B. G (*„Verbesserte Verdauung“*), H (*„Steigerung der Nachhaltigkeit“*) und J (*„Veränderung der Melatoninwerte“*). An der Verteilung der Ja- und Nein-Antworten lässt sich erkennen, dass dies funktioniert hat und die meisten Direktor\*innen diese falschen Assoziationen erkannt haben. Es fiel jedoch auch auf, dass die meisten von ihnen den physikalischen Zusammenhang zwischen *„Lüftungsraten, Luftfeuchtigkeit und Kondensation“* (C), der *„Reduzierung von Verunreinigungen wie Rauch und Staub“* (E) und der *„Entfernung giftiger Chemikalien und Ausgasungen aus Materialien“* (K) nicht wussten (Anhang C.2.1.1).

In Bezug auf die bestehenden Lüftungsmuster (Frage 4) gaben alle an, dass sie *„mindestens einmal täglich“* (13,2 %) *„jede Stunde“* (22,1 %), *„unregelmäßig, z. B. stündlich zur Entlüftung“* (41,2 %), oder *„kontinuierlich“* (16,2 %) lüften (Anhang C.2.1.1). Dies deutet darauf hin, dass nur eine kleine Minderheit der Schulleiter\*innen die Bedeutung einer kontinuierlichen Lüftung versteht oder über die Mittel verfügt, sie umzusetzen.

Zu den Herausforderungen und Hindernissen beim Lüften (Frage 5) gehörten *„Außenlärm“* (45,5 %) und *„die Außenlufttemperatur“* (19,7 %). Als weniger problematisch wurden *„Geräusche durch mechanische Lüftung“*<sup>25</sup> (1,5 %), *„Zugluft“* (0 %) und *„verschmutzte Außenluft“* (7,6 %) angesehen (Anhang C.2.1.1). Am auffälligsten sind die folgenden Aussagen: 50 % gaben an, dass sie *„Schwierigkeiten haben, ein mechanisches oder hybrides Lüftungssystem zu bedienen“*; 60,6 % antworteten, dass *„der Schulbesitzer\*in sie aufgefordert hat, Energie zu sparen“* (was sich auf ihr Lüftungsverhalten ausgewirkt hat). 77,6 % antworteten, dass *„sie nur das tun, was andere tun“*, nur 38,8 % antworteten, dass *„sie unabhängig davon, was andere sagen, lüften würden“*. In Kombination deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass nur etwa ein Drittel der Schulleiter\*innen von ihrer Lüftungsstrategie überzeugt ist und diese als Priorität betrachtet.

In Frage 6 wurde nach der zulässigen CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern mithilfe eines Schiebereglers gefragt.

Frage 6 untersuchte ihr Verständnis von CO<sub>2</sub>-Grenzwerten, indem gefragt wurde: *„Was denken Sie, sollte der maximale CO<sub>2</sub>-Wert sein, wenn Sie eine gesunde Arbeitsumgebung in einem Klassenzimmer*

---

<sup>25</sup> Man beachte, dass diese Zahl auch die Antworten von Schulen ohne mechanische Belüftung umfasst.

sicherstellen wollen?“. Die Direktor\*innen wurden gebeten, die maximal zulässige CO<sub>2</sub>-Konzentration (ppm) auf einer Skala von 0 ppm bis 5000 ppm auszuwählen. Als Antwort auf diese Frage: 45% gaben Werte von ‚900 ppm oder weniger‘ an, 35% gaben Werte ‚zwischen 1000 ppm und 1800 ppm‘ an. 19% aller Befragten gaben Werte von ‚2000 ppm und mehr‘ an, wobei der höchste Wert bei ‚3700 ppm‘ lag. Die Antwort, die am häufigsten gegeben wurde (d.h. von 20 % aller Befragten), war ‚1000 ppm‘. Diese Antwort lässt darauf schließen, dass die Mehrheit der Schulleiter\*innen nicht wusste, was die aktuellen Lüftungsrichtlinien empfehlen.

Auch bei der Identifizierung von Einflussfaktoren auf die Innenraumluftqualität (Frage 7) wurden einige falsche Antworten gegeben, die von den Befragten jedoch überwiegend erkannt wurden (Anhang C.2.1.1). Antworten wie ‚Lehrmittel‘ (16,4 %), ‚künstliche Beleuchtungsstärke‘ (10,4 %), ‚Lärmpegel von außen‘ (4,5 %) und ‚Lärmpegel im Innenraum‘ (3 %) wurden nur von einer Minderheit ausgewählt. 85,1 % wussten, dass die ‚Anzahl der Personen in einem Raum‘ sowie die ‚Art der Aktivität im Raum‘ (74,6 %) und die ‚Art und Anzahl der Fensteröffnungen‘ (74,6 %) Einfluss haben.

Bei Frage 8 stimmten 80,6 % der Direktor\*innen zu, dass ‚SuS über die Folgen schlechter Luftqualität informiert werden sollten‘.

In Frage 9 gaben 88,1 % an, dass ‚sie der Meinung sind, dass SuS eine viel aktivere Rolle bei der Aufrechterhaltung der Luftqualität in Innenräumen spielen sollten‘, wobei 75 % von ihnen angaben, dass es ‚in jeder Klasse einen CO<sub>2</sub>-Champion (d. h. einen Schüler oder Schülerin, der oder die als CO<sub>2</sub>-Beauftragter fungiert und zum Handeln aufruft) geben sollte‘ (Anhang C.2.1.1). Es zeigte sich jedoch auch, dass diese Rolle altersabhängig ist (wobei die von den Befragten angegebene Altersspanne auf eine recht gleichmäßige Verteilung der Antworten hinweist). Dennoch war die Mehrheit der Befragten der Meinung, dass ‚Kinder ab 12 Jahren eine aktive Rolle bei der Verbesserung der Luftqualität spielen sollten‘.

Frage 10 befasste sich mit der Annahme, dass ein CO<sub>2</sub>-Sensor mit Anleitung möglicherweise die Luftqualität verbessern könnte. Niemand (0 %) antwortete, dass ‚sie kein Interesse an der Luftqualität haben‘, während 76,1 % angaben, dass ‚sie einen CO<sub>2</sub> Sensor sehr hilfreich fänden‘.

### 5.1.2 Zusätzliche Kommentare – offene Fragen

Die meisten Antworten der Direktor\*innen auf die offenen Textantworten bezogen sich auf die Themen Verantwortung und Bewusstsein. Die Direktor\*innen erklärten, dass ‚alle SuS dazu erzogen werden sollten, regelmäßig zu lüften‘ und dass ‚Bewusstsein‘ und ‚Informationen dazu führen würden, dass alle SuS daran denken, regelmäßig zu lüften.‘ Sie merkten jedoch auch an, dass ‚die Sensibilisierung aller Menschen Schwächen aufweist und nur in begrenztem Umfang hilft, wenn nicht alle SuS von ihrer Bedeutung überzeugt sind‘.

Einige Direktor\*innen bestätigten, dass sie ‚Lüftungsbeauftragte in den Klassen‘ hätten oder es sogar ein ‚Lüftungssignal ... nach etwa einer halben Stunde‘ im Unterricht geben würden und dass die SuS ermutigt würden, ‚die LuL zu unterstützen/daran zu erinnern, wenn sie vergessen, den Raum zu lüften‘. Es wurde darauf hingewiesen, wie wichtig es sei, alle in diesen Prozess einzubeziehen, d. h. ‚alle SuS und alle LuL‘.



Ein Schulleiter antwortete auf die Frage nach der Luftqualität in Innenräumen: „*Jedes Kind sollte dafür verantwortlich gemacht werden, auf schlechte Luft zu reagieren!*“ D. h., dass es statt eines SuS eine ganze Klasse von CO<sub>2</sub>-Beauftragten oder -Champions geben sollte.

Ein anderer Schulleiter merkte an: „*Ein Ampelsystem ist hilfreich. Wenn die Ampel von Grün auf Orange wechselt, weisen die SuS den Lehrkörper selbstständig darauf hin. Es ist wahrscheinlich keine autorisierte Person dazu erforderlich.*“

### 5.1.3 Zweite Umfrage – Ergebnisse

Am Ende des Messzeitraums, im September 2024, ein Jahr nach Durchführung der ersten Umfrage, wurden die Schulleiter\*innen erneut befragt und ihnen wurden dieselben Fragen zur Belüftung ein zweites Mal gestellt. Damit sollte festgestellt werden, ob sich die Wahrnehmung der Wichtigkeit geändert hatte und ob sich das Wissen über Belüftung und Schwellenwerte verbessert hatte. Die Umfrage wurde am 13.08.2024, fast ein Jahr nach der ersten Umfrage, an die 120 Schulleiter\*innen geschickt. Von den 120 Schulleiter\*innen antworteten 92, von denen am Ende 88 gültige Ergebnisse vorlagen, wodurch sich das Konfidenzniveau auf fast 90 % erhöhte, bei einem Stichprobenfehler von 10 % (Anhang C.2.1.2).

Um die Rücklaufquote zu maximieren, blieb die Umfrage dieses Mal vier Wochen lang offen und es wurden Zwischen-Erinnerungen.

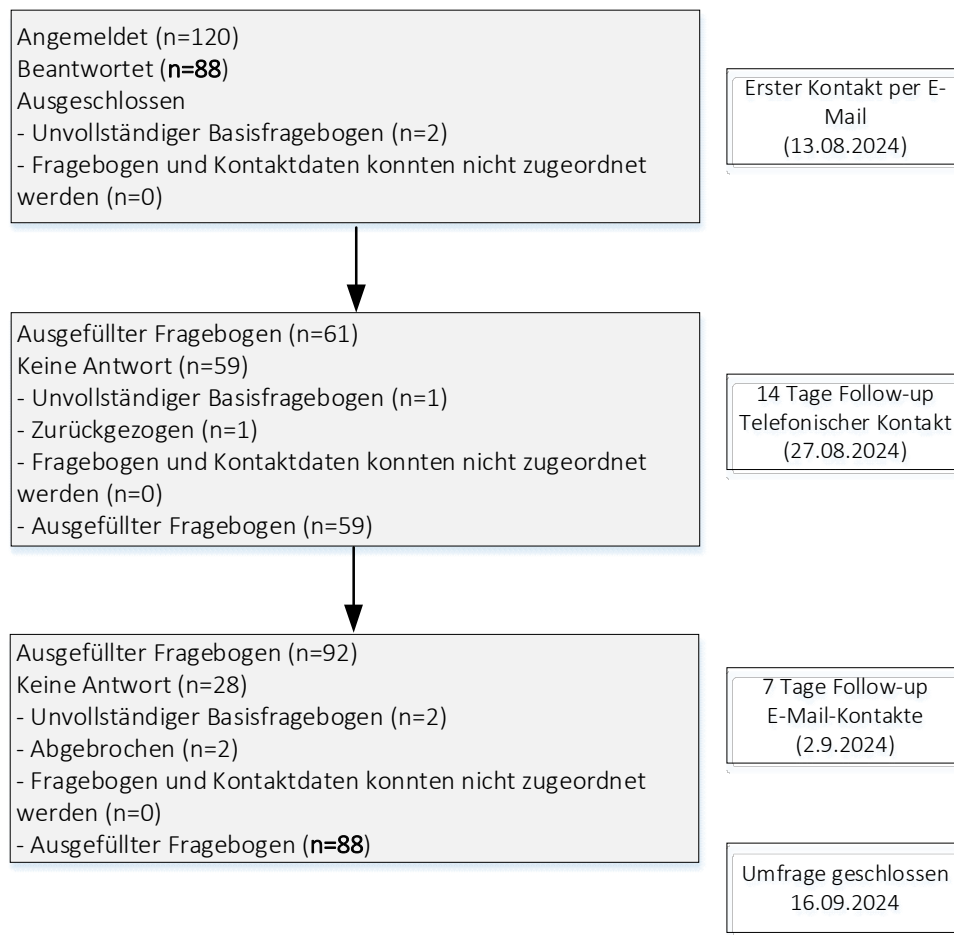


Abbildung 5-2 Arbeitsablauf der zweiten Direktor\*innenumfrage mit Zeitplan und Kontaktmethode.

Im folgenden Abschnitt werden die Antworten auf die zweite Umfrage unter den Direktor\*innen zusammengefasst. Anschließend folgt eine vergleichende Analyse der Antworten in Bezug auf die erste Direktor\*innen-Umfrage. Alle unterstützenden Grafiken, die den einzelnen Fragen der Umfrage entsprechen, sind in Anhang C.2.1.2 zu finden.

Erste Frage (Frage 2-A) untersuchte, "Für wie wichtig halten Sie die Belüftung im Klassenzimmer?" 50 % der Direktor\*innen fanden dies ‚sehr wichtig‘ und 46,4 % ‚äußerst wichtig‘.

Auf Frage 2-B, „Inwieweit glauben Sie, dass die Luftqualität in Innenräumen die schulische Leistung der SuS beeinflusst“, antworteten 16,7 % mit ‚Äußerst‘, 61,9 % mit ‚Sehr‘ und 17,9 % mit ‚Ziemlich‘. Auf Frage 2-C, „Für wie wichtig halten Sie die Luftqualität in Innenräumen im Hinblick auf die Gesundheit und die Übertragung von Krankheiten durch die Luft (z. B. Grippe, Masern, SARS-CoV-2 usw.)?“, antworteten 39,3 % mit ‚Äußerst‘, 41,7 % mit ‚Sehr‘ und 14,3 % mit ‚Ziemlich‘.

Auf Frage 3, „Warum ist Ihrer Meinung nach Belüftung wichtig?“, antworteten die meisten Direktor\*innen (96,4 %), dass ‚sie für frische Luft sorgen‘. Die zweithäufigste Antwort war die ‚Entfernung von CO<sub>2</sub> und verbrauchter Luft‘ mit 91,7 %. 75 % antworteten, dass sie ‚schlechte Gerüche beseitigen und für Frische sorgen‘ sowie ‚Bakterien und Viren in der Luft verdünnen und entfernen‘. Nur 57,1 % gaben an, dass ‚Belüftung wichtig ist, um das Risiko von Überhitzung und hohen Temperaturen zu verringern‘. 35,7 % wählten die ‚Kontrolle der Luftfeuchtigkeit‘, 19 % die ‚Entfernung

giftiger Chemikalien aus Materialien' und 26,2 % die ‚Verteilung von Verunreinigungen wie Rauch und Staub‘. Die inkorrekten Antworten wie ‚verbesserte Verdauung‘, ‚Verbesserung der Nachhaltigkeit von Gebäuden‘ und ‚Veränderung des Melatoninspiegels‘ wurden nur von 3,6 %, 11,9 % bzw. 3,6 % ausgewählt.

Frage 4: „Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt am besten Ihre Herangehensweise an die Belüftung?“ Die Mehrheit, d. h. 47,6 %, antwortete: ‚Unregelmäßig während jeder Unterrichtsstunde (d.h. Stoßlüftung)‘, 26,2 % sagten: ‚Jede Stunde (vor oder nach einer Unterrichtsstunde)‘, 8,3 % sagten: ‚Kontinuierlich‘ und 13,1 % sagten: ‚Gelegentlich (mindestens einmal am Tag, aber nicht stündlich)‘.

Auf Frage 5, „Mit welchem der folgenden Sätze können Sie sich identifizieren?“, antwortete die Mehrheit (83,3 %), dass ‚sie lüften würden, auch wenn andere es für sinnlos halten‘. 56 % gaben jedoch auch an, dass es ‚ihre persönliche Entscheidung sei, keine Energie zu verschwenden‘, oder dass ‚der Schulbesitzer\*in angewiesen habe, keine Energie zu verschwenden‘ (34,5 %). 25 % klagten über ‚das Gefühl von Zugluft‘. Was mechanische Systeme betrifft, so empfanden es 8,3 % als ‚schwierig, mechanische Lüftung, Luftreiniger oder Hybridsysteme zu bedienen‘, und 50 % gaben an, dass sie ‚den Lärm von Lüftungsgeräten nicht mögen‘. 39,3 % gaben an, dass sie ‚einen CO<sub>2</sub>-Sensor verwenden, der ihnen anzeigt, wann sie lüften müssen‘. Nur 8,3 % antworteten, dass sie ‚manchmal unsicher sind, ob sie lüften sollen‘. 15,5 % ‚mögen es nicht, Fenster zu öffnen, weil es draußen laut ist‘, während 4,8 % angaben, dass es ihnen ‚beim Lüften zu heiß oder zu kalt‘ wird; 2,4 % finden es ‚schwierig, Fenster zu öffnen‘; 2,4 % empfinden ‚das Lüften als störend und unpraktisch‘ und 11,9 % gaben an, dass es ‚in ihrer Klasse ruhig ist, wenn sie nicht lüften‘. Nur ein kleiner Prozentsatz, nämlich 2,4 %, gab an, dass sie ‚immer darauf achten, was andere tun‘.

In Frage 6 wurde das Verständnis der CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte in Frage gestellt, indem gefragt wurde: „Was denken Sie, sollte der maximale CO<sub>2</sub>-Wert sein, wenn Sie eine gesunde Arbeitsumgebung in einem Klassenzimmer sicherstellen wollen?“ Die Schulleiter\*innen wurden gebeten, die maximal zulässige CO<sub>2</sub>-Konzentration (ppm) auf einer gleitenden Skala von 0 ppm bis 5000 ppm zu wählen. 60 von insgesamt 84 Direktor\*innen, d. h. 71 %, gaben an, dass der maximale CO<sub>2</sub>-Wert in einem Klassenzimmer bei ‚1000 ppm oder weniger‘ liegen sollte. 11 nannten Werte von ‚1200 bis 1500 ppm‘. Nur drei Direktor\*innen (3,5 %) gaben Werte ‚über 2500 ppm‘ an.

Auf Frage 7, „Wissen Sie, welche Faktoren die Luftqualität in einem Klassenzimmer beeinflussen?“, wählten die meisten (90,5 %) ‚die Anzahl der Personen im Raum‘. Darauf folgten ‚die Art der Aktivität im Raum‘ (86,9 %) und ‚die Anzahl und Größe der Fenster‘ (72,6 %) angaben. Weitere Auswahlmöglichkeiten waren: ‚Luftvolumen‘ (65,5 %), ‚Qualität der Außenluft‘ (60,7 %), ‚Durchflussrate des mechanischen Ventilators‘ (53,6 %), ‚Luftfeuchtigkeit‘ (51,2 %), ‚Baumaterialien‘ (48,8 %), ‚im Unterricht verwendete Materialien‘ (17,9 %). Die falschen Antworten ‚Raum- und Außentemperatur‘ und ‚künstliche Beleuchtung‘ wurden von 44 % bzw. 8,3 % ausgewählt. Während 21,4 % antworteten, dass sie ‚sich nicht sicher sind‘.

In Bezug auf Frage 8, „Denken Sie, dass SuS über die Auswirkungen von Lüftungsverfahren und die Luftqualität im Klassenzimmer informiert werden sollten?“, stimmten 78,6 % zu, dass ‚alle SuS über Lüftungspraktiken und Raumluftqualität informiert werden sollten‘. 17,9 % antworteten, dass dies ‚von ihrem Alter abhängt‘ (wobei 13,3 % antworteten, dass ‚die Kinder 5 Jahre oder älter sein sollten‘, 13,3 % sagten ‚5 Jahre oder älter‘, 20 % wählten ‚8 Jahre oder älter‘, 13,3 % antworteten ‚10 Jahre

oder älter', 26,7 % wählten ‚12 Jahre oder älter‘ und 26,7 % ‚15 Jahre oder älter‘. 3,6 % sagten, dass ‚dies nicht in ihren Verantwortungsbereich fällt‘).

Auf Frage 9: „Sind Sie der Meinung, dass SuS eine Rolle bei der Aufrechterhaltung der Belüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten?“ antwortete die große Mehrheit (84,5 %) mit ‚Ja‘, sie sollten einen SuS ernennen, der für die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Belüftung des Klassenzimmers verantwortlich ist. 10,7 % antworteten mit ‚Nein‘ und 4,8 % mit ‚Vielleicht‘. Von denjenigen, die mit ‚Vielleicht‘ antworteten, gaben 77,8 % an, dass dies von ihrem Alter abhängt. Von denjenigen, die mit ‚Nein‘ antworteten, gab die Mehrheit (75 %) an, dass ‚dies in der Verantwortung des Lehrpersonals liege‘, während 25 % angaben, dass ‚dies in der Verantwortung der Schule liege‘.

Als Antwort auf Frage 10, „Glauben Sie, dass ein CO<sub>2</sub>-Sensor (mit einer farbigen Ampelanzeige) und eine Anleitung zu dessen Verwendung dazu beitragen würden, die Luftqualität in Ihren Klassenzimmern zu verbessern?“, gab es vier ‚Nein‘-Optionen, zwei ‚Vielleicht‘ und zwei ‚Ja‘. Niemand wählte ‚Nein, weil meine Schule mich daran hindert, die Fenster zu öffnen‘, aber eine Person antwortete mit ‚Nein, weil ich kein Interesse an der Luftqualität habe‘ (1,2 %) und ‚Nein, weil ich die Fenster in meinem Klassenzimmer nicht einfach öffnen kann‘ (1,2 %). Drei sagten ‚Nein, weil mein Raum mechanisch belüftet wird und ich keine Kontrolle darüber habe‘ (3,6 %). ‚Vielleicht, es kommt darauf an, wie kompliziert es ist‘ wurde von 14,3 % und ‚Vielleicht, wenn es mich nicht vom Unterrichten ablenkt‘ von 4,8 % ausgewählt. Die Mehrheit beantwortete diese Frage jedoch positiv: 72,6 % sagten ‚Ja, das wäre sehr hilfreich‘ und 41,7 % ‚Ja, wenn ein SuS ernannt wird, der für die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Belüftung des Klassenzimmers verantwortlich ist‘.

#### 5.1.4 Unterschiede in den Antworten

Auf die Frage „Für wie wichtig halten Sie die Belüftung im Klassenzimmer?“, antworteten mehr Direktor\*innen, dass sie ‚sehr wichtig‘ ist (2023: 39,7 %; 2024: 50 %), aber weniger antworteten, dass sie ‚äußerst wichtig‘ ist (2023: 57,4 %; 2024: 46,4 %). Insgesamt nahm die Wahrnehmung der Direktor\*innen hinsichtlich der Bedeutung der Belüftung im Laufe der Zeit leicht ab.

Bei der Frage „Inwieweit glauben Sie, dass die Luftqualität in Innenräumen die schulische Leistung der SuS beeinflusst?“ antworteten auch hier 2024 weniger Personen mit ‚äußerst stark‘ (2023: 20,6 %; 2024: 16,7 %) und mehr mit ‚ziemlich stark‘ (2023: 13,2 %; 2024: 17,9 %).

Bei Frage 2-C, „Für wie wichtig halten Sie die Luftqualität in Innenräumen im Hinblick auf die Gesundheit und die Übertragung von Krankheiten durch die Luft (z. B. Grippe, Masern, SARS-CoV-2 usw.)?“, antworteten weniger Personen mit ‚äußerst wichtig‘ (2023: 42,6 %; 2024: 39,3 %) und mehr sagten ‚sehr‘ (2023: 48,5 %; 2024: 41,7 %) und ‚ziemlich‘ (2023: 7,4 %; 2024: 14,3 %). Diese veränderte Einstellung könnte eine veränderte Sichtweise widerspiegeln, die sich im Laufe der Zeit seit dem Höhepunkt der COVID-19-Pandemie ergeben hat.

Insgesamt hat in Bezug auf Frage 2 bei keiner der beiden Umfragen jemand mit ‚Ich weiß es nicht‘ geantwortet. Allerdings hat eine Person bei der zweiten Umfrage (im Jahr 2024) mit ‚überhaupt nicht‘ geantwortet, während zuvor (d.h. bei der Umfrage 2023) niemand diese Antwort gegeben hatte.

Bei Frage 3, „*Warum ist Ihrer Meinung nach Belüftung wichtig?*“, gab es bei den folgenden Antworten nur geringe Unterschiede zwischen den Jahren 2023 und 2024 (in Klammern sind die Prozentzahlen für die Jahre 2023 und 2024 angegeben): *„Aufrechterhaltung frischer Luft“* (2023: 97,1 %, 2024: 96,4 %); *„Beseitigung von CO<sub>2</sub> und verbrauchter Luft“* (2023: 88,2 %, 2024: 91,7 %); *„Verringerung des Risikos von Überhitzung und hohen Temperaturen“* (2023: 50 %, 2024: 57,1 %); *„Reduzierung und Verteilung von Verunreinigungen wie Rauch und Staub“* (2023: 33,8 %, 2024: 26,2 %); *„Reduzierung von luftübertragenen Bakterien und Viren“* (2023: 79,4 %, 2024: 75 %); *„Beseitigung von Gerüchen und Bereitstellung von Frische“* (2023: 73,5 %, 2024: 75 %) und *„Entfernung giftiger Chemikalien aus Materialien“* (2023: 20,6 %, 2024: 19 %). Die *„Beseitigung von CO<sub>2</sub> und verbrauchter Luft“* sowie die *„Aufrechterhaltung frischer Luft“* waren hier die einzigen Antworten, die 2024 von mehr Befragten ausgewählt wurden; die anderen Optionen wurden weniger häufig gewählt als im Vorjahr. Die *„Kontrolle der Luftfeuchtigkeit“* wurde 2024 von deutlich weniger Befragten ausgewählt (2023: 47,1 %, 2023: 35,7 %), was jedoch darauf zurückzuführen sein könnte, dass die zweite Umfrage während der Sommerzeit stattfand. Es war erfreulich zu sehen, dass weniger Direktorinnen die absichtlich falschen Antworten ausgewählt haben: *„Verbesserte Verdauung“*, *„Verbesserung der Nachhaltigkeit von Gebäuden“* und *„Veränderung der Melatoninwerte“* im Vergleich zu 2023 zurückgegangen ist (*„Verbesserte Verdauung“* 2023: 4,4 %, 2024: 3,6 %; *„Verbesserung der Nachhaltigkeit von Gebäuden“* im Jahr 2023: 22,1 %, im Jahr 2024: 11,9 %; *„Veränderung der Melatonin-Werte“* im Jahr 2023: 13,2 % und im Jahr 2024: 3,6 %).

Auf die Frage 4: „*Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt am besten Ihre Herangehensweise an die Belüftung?*“ Der Unterschied zwischen den meisten Antworten lag unter 5 %, insbesondere bei den Antworten *„Unregelmäßig während jeder Unterrichtsstunde“* (2023: 41,2 %, 2024: 47,6 %), *„Jede Stunde (vor oder nach)“* (2023: 22,1 %, 2024: 26,2 %) und *„Gelegentlich (mindestens einmal täglich)“* (2023: 13,2 %, 2024: 13,1 %). Nur die Zahl derjenigen, die *„kontinuierlich“* geantwortet haben, hat sich von 2023 bis 2024 halbiert (2023: 16,2 %, 2024: 8,3 %). Diese Veränderung könnte darauf zurückzuführen sein, dass SARS-CoV-2 im Laufe der Zeit weniger im Mittelpunkt stand, insbesondere da die zweite Umfrage unter wärmeren Sommerbedingungen durchgeführt wurde, unter denen kontinuierliches Lüften wahrscheinlicher ist.

Frage 5, „*mit welchen der folgenden Sätze können Sie sich identifizieren?*“, zeigte die größte Überraschung, da die Antworten 2024 im Vergleich zu 2023 recht unterschiedlich ausfielen. Bei sieben Aussagen stieg der Prozentsatz der *„Ja“-Antworten*, z. B. *„Ich benutze einen CO<sub>2</sub>-Sensor, der mir anzeigt, wann ich lüften soll“* (2023: 16,7 %, 2024: 39,3 %), *„Ich mag den Lärm von Lüftungsgeräten im Haus nicht“* (2023: 1,5 %, 2024: 50 %), *„Gefühl von Zugluft“* (2023: 0 %, 2024: 25 %), *„Manchmal unsicher, ob gelüftet werden soll“* (2023: 3 %, 2024: 8,3 %), *„Persönliche Entscheidung, keine Energie zu verschwenden“* (2023: 3 %, 2024: 56 %), *„Meine Klasse ist ruhiger, wenn ich nicht lüfte“* (2023: 1,5 %, 2024: 11,9 %), *„Ich würde lüften, selbst wenn andere denken, dass es sinnlos sei“* (2023: 38,8 %, 2024: 83,3 %).

Bei den folgenden Aussagen ist der Prozentsatz der Zustimmung im Vergleich zum Vorjahr gesunken: *„Ich öffne ungern Fenster, weil es draußen laut ist“* (2023: 45,5 %, 2024: 15,5 %), *„Es wird mir zu heiß oder zu kalt, wenn ich lüfte“* (2023: 19,7 %, 2024: 4,8 %), *„Es fällt mir schwer, Fenster zu öffnen“* (2023: 10,6 %, 2024: 2,4 %), *„Ich finde es schwierig, mechanische Belüftung, Luftreiniger oder Hybridsysteme zu bedienen“* (2023: 50 %, 2024: 8,3 %), *„Schuleigentümer\*in hat angewiesen, keine Energie zu verschwenden“* (2023: 60,6 % und 2024: 34,5 %), *„Ich finde die Belüftung störend und unpraktisch“* (2023: 6,1 %, 2024: 2,4 %), *„Ich schaue immer, was andere tun“* (2023: 77,6 %, 2024:

2,4 %). Zum Teil könnten diese Veränderungen eine Reaktion auf eine veränderte Wahrnehmung sein, die sich aus dem Vorhandensein von CO<sub>2</sub>-Sensoren und einer Lüftungsanleitung in den Klassenzimmern ergibt.

Es ist positiv zu vermerken, dass ca. 23 % mehr Direktor\*innen einen Sensor zur Belüftung verwenden (seit die erste Umfrage durchgeführt wurde), was darauf hinweist, dass insgesamt fast 40 % der Schuldirektor\*innen nun ein CO<sub>2</sub>-Messgerät als Teil ihrer Lüftungsstrategie einsetzen. Darüber hinaus ist es interessant festzustellen, dass die negative Wahrnehmung mechanischer Systeme abgenommen hat, da 50 % sich über den Lärm mechanischer Systeme beschwerten. Ebenso ist das Problem der negativen Wahrnehmung von Geräuschen beim Öffnen von Fenstern um 30 % zurückgegangen. Vor dem Hintergrund, dass ca. 45 % mehr Direktor\*innen (d. h. 83,3 %) bestätigen, dass sie sogar lüften würden, wenn andere es für sinnlos halten, ist es ermutigend zu sehen, dass deutlich weniger (75,2 %) von dem beeinflusst werden, was andere tun. Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass sich Schuldirektor\*innen nach einem Jahr der Nutzung von CO<sub>2</sub>-Messgeräten (und klarer Informationen über relevante CO<sub>2</sub>-Grenzwerte und Lüftungsmethoden) im Allgemeinen sicherer fühlen, was ihre Fähigkeit betrifft, Räume angemessen zu lüften.

In Bezug auf die maximal zulässigen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte in einem Klassenzimmer antworteten im Jahr 2023 mehr als 20 %, dass Werte über 1500 ppm akzeptabel sind, wobei fast 10 % der Werte über 2500 und drei Werte über 3000 ppm angaben. Im Jahr 2024, am Ende der Studie, antworteten 14 %, dass die Werte über 1500 ppm akzeptabel sind (also weniger als 2023) und nur eine Person gab an, dass ein Wert von über 3000 ppm angemessen sei. Berücksichtigt man gleichzeitig, dass die Gesamtzahl der Befragten gestiegen ist (von n=64 auf n=84), zeigt dies, dass eine deutliche Verbesserung des Wissens über angemessene CO<sub>2</sub>-Werte stattgefunden hat: 67 % gaben im Jahr 2023 Zielwerte von 1200 ppm oder weniger an; im Jahr 2024 stieg dieser Anteil auf 76 %. Der Prozentsatz derjenigen, die 1000 ppm als Grenzwert angaben, änderte sich jedoch nicht. Im Jahr 2023 gaben n=13 diesen Wert an, im Jahr 2024 waren es n=17. In Anbetracht der höheren Anzahl der Befragten entsprechen beide Werte etwa 20 % der Gesamtzahl.

Auf Frage 7, „Wissen Sie, welche Faktoren die Luftqualität in einem Klassenzimmer beeinflussen?“, gab es ähnliche Antworten in Bezug auf das Luftvolumen, die Anzahl und Größe der Fenster, die Innen- und Außentemperatur und mechanischen Luftvolumenstromraten. Unterschiede gab es bei den folgenden Antworten: ‚Luftfeuchtigkeit‘ (2023: 41,8 %, 2024: 51,2 %), ‚Qualität der Außenluft‘ (2023: 52,2 %, 2024: 60,7 %), ‚Anzahl der Personen im Raum‘ (2023: 85,1 %, 2024: 90,5 %), ‚Art der Aktivität im Raum‘ (2023: 74,6 %, 2024: 86,9 %).

Frage 8: „Denken Sie, dass SuS über die Auswirkungen von Lüftungspraktiken und die Luftqualität in Klassenzimmern informiert werden sollten?“ Die meisten Direktor\*innen waren sich einig, dass ‚Alle SuS über Lüftungspraktiken und die Luftqualität in Innenräumen informiert werden sollten‘, und daran hat sich im Laufe der Projektdauer nicht viel geändert (2023: 80,6 % vs. 2024: 78,6 %). Ungefähr 18 % gaben an, dass es in beiden Jahren ‚von ihrem Alter abhängt‘, wobei es jedoch unterschiedliche Altersgruppen gibt: 5 Jahre oder älter (2023: 16,7 %, 2024: 13,3 %), 8 Jahre oder älter (2023: 16,7 %, 2024: 20 %), 10 Jahre (2023: 25 %, 2024: 13,3 %), 12 Jahre oder älter (2023: 16,7 %, 2024: 26,7 %) und 15 Jahre oder älter (2023: 25 %, 2024: 26,7 %). Während in 2023 50 % der Meinung waren, dass die SuS entweder 10 oder sogar 15 Jahre älter sein sollten, waren in 2024 53,4 % der Meinung, dass die SuS 12 oder 15 Jahre älter sein sollten, was die Altersgrenzen leicht nach oben verschiebt. Dass es

„nicht in ihrer Verantwortung liegt“, wurde von einer Person im Jahr 2023 und von drei Direktor\*innen im Jahr 2024 beantwortet (im Jahr 2023: 1,5 %, im Jahr 2024: 3,6 %).

Auf Frage 9: „Sind Sie der Meinung, dass SuS eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Belüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten“, antwortete eine ähnliche Anzahl von Direktor\*innen mit *„Ja, wir sollten eine/n SuS ernennen, der/die für die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Belüftung des Klassenzimmers verantwortlich ist“* (2023: 88,1 %, 2024: 84,5 %). Bei denjenigen, die mit *„Nein“* antworteten (2023: 4,5 %, 2024: 4,8 %), hat sich der Anteil derer, die die Verantwortung übernehmen sollten, von einem Jahr zum nächsten geändert. Während 2023 zwei Drittel der Meinung war, dass dies in der Verantwortung der Schulen liegt (2023: 66,7 %, 2024: 25 %), waren 2024 drei Viertel der Schulleiter\*innen der Meinung, dass es Aufgabe des Lehrpersonals ist, sich darum zu kümmern (2023: 33,3 %, 2024: 75 %).

Frage 10: „Glauben Sie, dass ein CO<sub>2</sub>-Sensor (mit farbiger Ampelanzeige) und eine Anleitung zu dessen Verwendung dazu beitragen würde, die Luftqualität in Klassenzimmern zu verbessern?“ Die Zahlen sind insgesamt sehr ähnlich und die Zahl der Personen, die mit *„Nein“* antworteten, hat sich von einem Jahr zum nächsten nicht wesentlich verändert. *„Nein, weil ich kein Interesse an der Luftqualität habe“* (2023: 0 % und 2024: 1,2 %); *„Nein, weil mein Raum mechanisch belüftet ist und ich keine Kontrolle darüber habe“* (2023: 4,5 % und 2024: 3,6 %); *„Nein, weil ich die Fenster in meinem Klassenzimmer nicht einfach öffnen kann“* (2023: 0 % und 2024: 1,2 %); *„Nein, weil meine Schule mich davon abhält, die Fenster zu öffnen“* (2023: 0 % und 2024: 0 %). Auch bei den Antworten *„Vielleicht“* und *„Ja“* gab es keine großen Veränderungen. Einige wenige Menschen schienen sich Sorgen zu machen, dass die Verwendung von Sensoren zu kompliziert sein könnte: *„Vielleicht, es kommt darauf an, wie kompliziert es ist“* (2023: 10,4 %, 2024: 14,6 %), weniger Direktor\*innen machten sich Sorgen über Ablenkung: *„Vielleicht, wenn es mich nicht vom Unterrichten ablenkt“* (2023: 6 % und 2024: 4,8 %). Etwas weniger (im Vergleich zum Vorjahr) hielten es für sehr hilfreich (2023: 76,1 %, 2024: 72,6 %) und etwas mehr hielten es für die Verantwortung der SuS: *„Ja, wenn ein SuS ernannt wird, der für die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Belüftung des Klassenzimmers verantwortlich ist“* (2023: 38,8 % und 2024: 41,7 %). Insgesamt zeigen diese Ergebnisse, dass die meisten Direktorinnen CO<sub>2</sub>-Sensoren und Lüftungsanweisungen für sehr hilfreich halten.

## 5.2 Befragung der Lehrer\*innen

### 5.2.1 Erste Umfrage (Winter) – Ergebnisse

Die erste Online-Umfrage wurde vier Monate nach Beginn der CO<sub>2</sub>-Messphase an die 1200 ImpAQS-Klassenlehrer\*innen verschickt. Diese Umfrage wurde so terminiert, dass sie mit der Mitte des Winters (24.01.2024) zusammenfiel. Dies geschah, um die Einstellung und das Wissen der LuL in Bezug auf die Belüftung zu verstehen und um spezifische Probleme im Zusammenhang mit der Wintersaison aufzudecken. Im Februar wurden Erinnerungen verschickt, und die Umfrage wurde Anfang März 2024 abgeschlossen (Abb. 5-3).

An der Winterumfrage nahmen 771 Personen teil, davon 554 (72 %) aus Klassenräumen mit sichtbaren Displays (T) und 217 (28 %) ohne sichtbare Displays (K). Alle Diagramme, die die Antworten auf diese Umfrage dokumentieren, finden Sie in Anhang C.2.2.1.

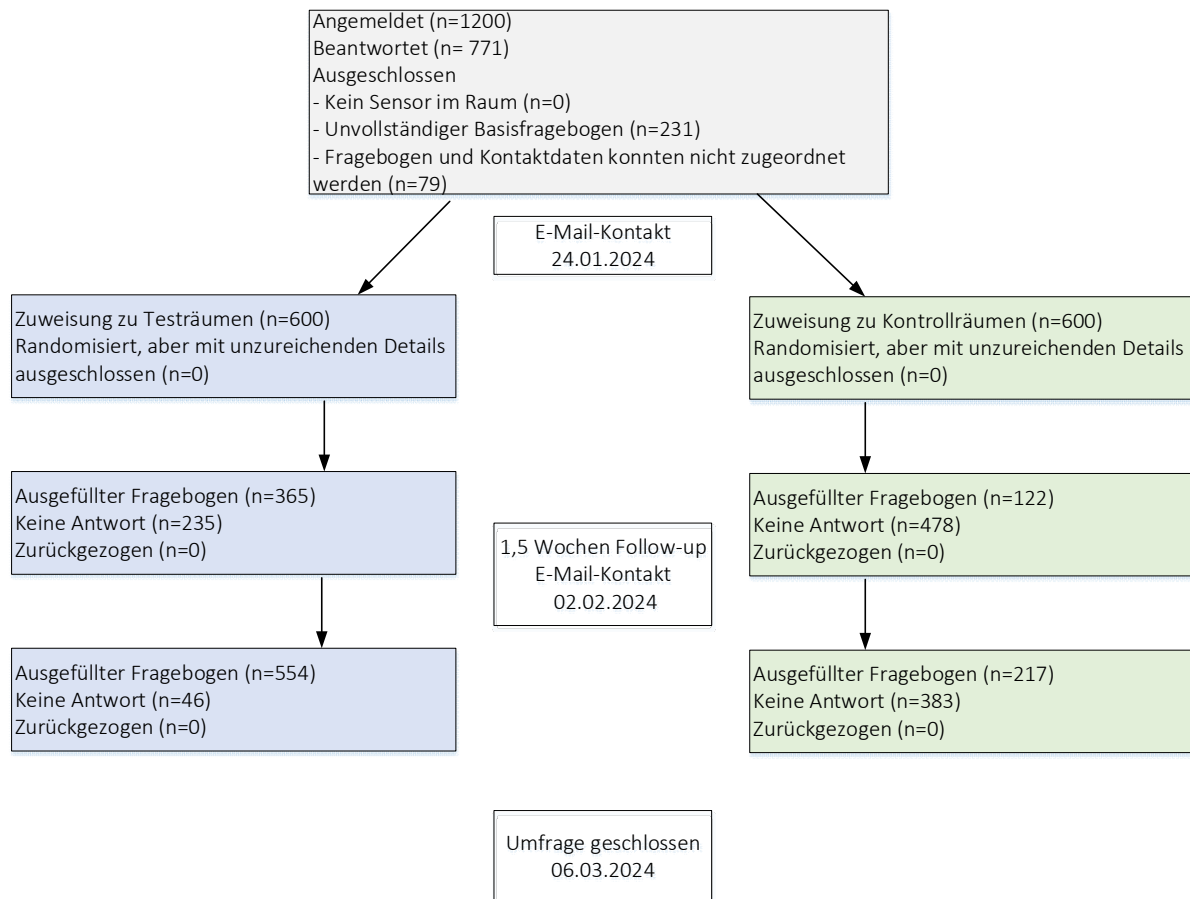


Abbildung 5-3 Arbeitsablauf der ersten Lehrkörperumfrage, einschließlich Zeitplan und Kontaktmethode

Bezüglich der Raumtemperatur beim Lüften antworteten 26,2 %, dass sie die Temperaturen beim Lüften ‚*nie*‘ oder ‚*selten*‘ zu warm oder zu kalt empfanden. 39 % antworteten, dass die Temperaturen ‚*manchmal*‘ zu niedrig seien, 31,5 % fanden ‚*oft*‘ und weitere 3,4 % gaben an, dass sie ‚*immer*‘ zu niedrig seien. Dies entspricht der darauffolgenden Antwort, dass 35,1 % die Temperaturen ‚*oft*‘ oder ‚*immer*‘ wärmer haben möchten, und 42,5 % nur ‚*manchmal*‘; 22,5 % gaben ‚*selten*‘ oder ‚*nie*‘ an. Dies deutet darauf hin, dass ein beträchtlicher Teil der LuL die Klassenräume im Winter als zu kalt empfindet und nur die Hälfte der LuL mit den Bedingungen zufrieden ist. Diese Tatsache beeinflusst wahrscheinlich die Bereitschaft der LuL, im Winter zu lüften.

Bezüglich Zugluft fielen die Antworten positiver aus. 70 % gaben an, dass sie ‚*keine Zugluft wahrnehmen*‘ oder sie als ‚*angenehm*‘ oder sogar ‚*sehr angenehm*‘ empfinden. Demgegenüber gaben 30 % an, dass sie dies als ‚*unangenehm*‘ oder sogar ‚*sehr unangenehm*‘ empfinden. 33,6 % würden zumindest ‚*etwas mehr Luftbewegung*‘ bevorzugen, während 34,5 % ‚*keine Änderung*‘ wünschen und die übrigen ‚*weniger Luftbewegung*‘ bevorzugen würden.

Beim Thema Außenlärm empfanden 42,8 % diesen als ‚*störend*‘ oder sogar ‚*sehr störend*‘, während 14,7 % ‚*neutral*‘ antworteten und 42,5 % ihn als ‚*kaum störend*‘ oder ‚*nicht störend*‘ empfanden.

In Bezug auf die Auswirkung der Belüftung auf die Konzentration waren die Meinungen geteilt: 30,1 % gaben an, dass die Konzentration der SuS durch die Belüftung verbessert wurde; 28 % antworteten, dass die Belüftung die Konzentration verschlechterte.



18 % hatten *„Probleme, die Fenster zu öffnen (z. B. Hindernisse, verschlossene Fenster usw.)“*, 28,8 % *„waren sich nicht sicher, ob sie lüften sollten“*. Interessant ist, dass in der Winterumfrage ebenso viele LuL angaben, dass es zu warm (36,9 %) wie auch zu kalt (38 %) war.

Interessanterweise gaben 47,1 % an, dass *„die Schulrichtlinien sie daran hinderten, die Fenster zu öffnen, um Energie zu sparen“*. Für 57,4 % war es *„eine persönliche Entscheidung, keine Energie zu verschwenden“*. 29 % gaben an, dass *„ihre Klasse unruhig wird, wenn sie lüften“*, und 20,4 % antworteten, dass *„das Lüften ablenkt und unangenehm ist“*. 46,8 % betrachteten *„Lärm von außen beim Lüften“* als Problem, 30,6 % betrachteten *„unangenehme Zugluft“* als Problem. Nur 6,9 % betrachteten die *„Luftverschmutzung (schlechte Außenluftqualität)“* als Problem.

Frage 9 versuchte zu ermitteln, *„Was hat Ihnen geholfen, besser zu lüften?“* Die meisten Lehrkörper gaben an, dass es ein *„CO<sub>2</sub>-Sensor mit numerischer Anzeige“* (28,4 %) war, gefolgt von *„CO<sub>2</sub>-Sensor mit numerischer Anzeige und Ampel“* (24,1 %), gefolgt von einer *„CO<sub>2</sub>-Richtlinie mit Erläuterungen zu Grenzwerten“* (17,1 %), gefolgt von einem *„CO<sub>2</sub>-Sensor mit Ampel“* (9,2 %) und schließlich der *„Lüftungsrichtlinie“* (7,6 %). Bemerkenswerterweise antworteten weniger als ein Viertel (21,3 %), dass eine *„vollautomatische mechanische Lüftung“* die bevorzugte Belüftungsoption wäre, während mehr als ein Drittel (34,2 %) antworteten, dass *„keine der oben genannten Möglichkeiten“* ihnen geholfen hat, besser zu lüften<sup>26</sup>.

In Frage 10 wurde gefragt, *„Was würde Ihnen helfen, für eine bessere Belüftung zu sorgen?“* Die Antworten werden vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: *„eine Stoppuhr oder ein Timer (um die Dauer des Fensteröffnens zu messen)“* (36,3 %), *„spezifische Empfehlungen zu den Energie- und CO<sub>2</sub>-Kosten für die Belüftung ihres Klassenzimmers“* (19,3 %), ein *„persönlicher Besuch eines Lüftungsexperten“* (19,2 %) und *„spezifische Anleitungen zur Vermeidung von Zugluft bei der Fensterlüftung“* (17,9 %).

In Bezug auf die Einhaltung des empfohlenen CO<sub>2</sub>-Bereiches antworteten 26,2 %, dass sie es *„nie oder selten schaffen, den empfohlenen CO<sub>2</sub>-Grenzwert einzuhalten“*. 50,2 % antworteten, dass sie es *„manchmal oder immer schaffen, den empfohlenen CO<sub>2</sub>-Grenzwert einzuhalten“*. Während 13,5 % antworteten, dass es *„schwierig oder sogar sehr schwierig ist, mit einem CO<sub>2</sub>-Sensor richtig zu lüften“*. Hingegen antworteten 63,1 %, dass es *„sehr einfach oder einfach ist, mit Hilfe eines Sensors richtig zu lüften“*.

Als Nächstes wurden die LuL gefragt, welche Schwierigkeiten sie bei der Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Sensors sehen. Die Antworten werden vom höchsten zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 63,5 % haben *„keine Schwierigkeiten“*, 5,8 % gaben an, dass *„der Sensor sich oft auf Unerwartete Weise verhält“*, 3,7 % *„fanden die Sensoranzeige verwirrend“*, 3,1 % *„müssen immer die Anleitung ansehen, wenn sie den Sensor benutzen“*, 2,1 % *„fanden die Sensoranleitung nicht verständlich“*, 1,6 % *„fanden die Lüftungsanleitung nicht verständlich“*. Insgesamt wird dies sehr positiv gesehen, da die absolute Mehrheit keine Schwierigkeiten bei der Verwendung des CO<sub>2</sub>-Sensors hat<sup>26</sup>.

---

<sup>26</sup> Es ist zu beachten, dass die Antworten auf die Lehrkörperumfrage sowohl von Lehrpersonen aus T-Klassen (72 %) als auch aus C-Klassen (28 %) stammen. Daher werden die Antworten auf Fragen im Zusammenhang mit dem Nutzen oder der Interaktion mit sichtbaren Interventionen (wie CO<sub>2</sub>-Sensoren und Lüftungsanleitungen) durch diesen Umstand beeinflusst.

Auf die Frage, welche der vorgegebenen Aussagen zutreffend ist, gaben 51,1 % an, dass sie *keine Probleme mit dem CO<sub>2</sub>-Sensor haben*, und 21,2 % antworteten, dass es *mit der neuen Einrichtung (CO<sub>2</sub>-Sensor und Aleitung zur Belüftung) einfacher ist, die CO<sub>2</sub>-Werte in einem guten Bereich zu halten*.

In Bezug auf das zukünftige Lüftungsverhalten werden die Antworten vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 42,4 % gaben an, dass sie *planen, besser zu lüften*, 18,6 % antworteten, dass sie noch *üben, wie man richtig lüftet*. 17 % sagten, dass sie mit *Widerstand von SuS und Schulpersonal zu kämpfen haben*. 13,5 % gaben an, dass sie *unsicher sind, wie sie die Belüftung aufrechterhalten können*, 8,8 % antworteten, dass sie *noch üben, den Sensor zu verstehen*.

In Bezug auf die Auswirkungen von CO<sub>2</sub> und die Anleitung zum Lüftungsverhalten werden die Antworten vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 63,4 % gaben an, dass sie *häufigeres Lüften für eine gute Idee halten*. 48,1 % *hielten den neuen CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanleitung für eine gute Idee*. 27,8 % *bemühten sich nun, mit Hilfe des CO<sub>2</sub>-Sensors und der erlernten Lüftungstechniken eine gute Luftqualität im Klassenzimmer aufrechtzuerhalten*. 12,5 % *verfügen nun über das Wissen und die Mittel, um richtig zu lüften*. Nur 8,9 % *hielten den CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanweisungen für sinnlos*. 8,8 % waren sich *nicht sicher, ob die CO<sub>2</sub>-Messung und Lüftung eine gute Idee sind*. Nur ein sehr kleiner Prozentanteil (3,7 %) gab an, dass sie *den Zweck der CO<sub>2</sub>-Messung und Lüftung nicht verstanden haben*.

Die Antworten zur Bedeutung von CO<sub>2</sub>-Messungen als Mittel zur Regulierung des Lüftungsverhaltens werden in absteigender Reihenfolge der Zustimmung dargestellt: 54,5 % gaben an, dass sie *die Fenster mehrmals täglich öffnen*; 33,6 % *schauten nur selten auf den CO<sub>2</sub>-Sensor*; 22,9 % *schauten oft (oder mehrmals) auf den CO<sub>2</sub>-Sensor*; 21,4 % *neigen dazu, den neuen CO<sub>2</sub>-Sensor als Richtwert für ihr Lüftungsverhalten zu verwenden, anstatt die Fenster geschlossen zu halten*; 16,9 % haben *nie auf den CO<sub>2</sub>-Sensor geschaut*; 16,6 % *beobachteten den CO<sub>2</sub>-Wert mit großer Aufmerksamkeit und lüfteten dann mehrmals täglich, um die beste Raumluftqualität zu erzielen*.

Die Antworten zur Wahrnehmung des CO<sub>2</sub>-Sensors werden vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 43 % gaben an, dass sie *gerne auf den CO<sub>2</sub>-Sensor schauen*; 16,2 % sagten, dass *der CO<sub>2</sub>-Sensor für sie nicht von Interesse sei*. 14,4 % sagten, dass sie *keine Zeit hätten, den CO<sub>2</sub>-Sensor zu benutzen*; 7,2 % sagten sogar, dass *der Sensor sie deprimiere*. 6,1 % antworteten, dass sie *das Fenster so oft öffnen und schließen, dass es sie ablenkt*. 2,1 % gaben an, dass sie sich *nicht für die Luftqualität in Innenräumen interessieren*<sup>26</sup>.

## 5.2.2 Offene Antworten – Winterumfrage

### 5.2.2.1 Probleme bei der Lüftung und individuelle Strategien

Bei einer Reihe von Fragen konnten in einem Abschnitt mit dem Titel „Sonstiges“ Kommentare hinzugefügt werden. Zum Beispiel wurde im Anschluss an Frage 7 eine offene Frage gestellt: *„Wenn Sie auf eines oder mehrere der oben genannten Probleme gestoßen sind und eine Lösung gefunden haben, beschreiben Sie das Problem bitte genauer und wie Sie es gelöst haben.“*

Viele der aufgetretenen Probleme hingen damit zusammen, wann und wie gelüftet werden sollte, da in widersprüchlichen Aussagen entweder für Stoßlüftung oder Kipplüftung geworben wurde. Trotz

einiger Behauptungen, dass dies energieineffizient sei, nutzten viele **gekippte Fenster** und *„kippten das Fenster oft dauerhaft, wenn nur wenige Personen anwesend waren und es nicht so kalt war“*, oder *„öffneten das Fenster nur vollständig, wenn der Baulärm erträglich war. Ansonsten kippten sie nur.“* Es herrscht ein energieeffizientes Denken vor, da einige *„keine Energie durch das Kippen der Fenster verschwenden wollen“* – wenn also alle Fenster geöffnet sind, *„schalten sie die Heizkörper aus“*.

In Bezug auf die **Stoßlüftung** sagten viele, sie sei *„kein Problem“*, *„kurz und intensiv!“*. *„Stoßlüftung“* ist ihre bevorzugte Methode, d. h. sie *„lüften kurz, aber mehrmals“*. Einige *„lüften nur maximal 2 Minuten, damit die Störung kurz bleibt.“* Oder wenn es im Raum zu warm ist. Einige lüften auch bei Kälte weiter, z. B. *„die Luftqualität war einfach zu schlecht, wir haben alle Fenster geöffnet und den Klassenraum für 3 Minuten verlassen.“* Anstatt die Fenster ganz zu öffnen, ließen einige die Oberlichter offen. Einige *„lüften häufiger und kürzer“*, um die Raumtemperatur zu senken und die *„Lärmbelastung von außen“* zu minimieren.

Der **Zeitpunkt der Lüftung** wurde als wichtig erachtet. Um den Unterricht nicht zu stören, fanden die LuL verschiedene Zeitpunkte zum Lüften. Einige schrieben: *„Es ist oft gut, den Raum zu lüften, wenn man den Klassenraum betritt, um die Aufmerksamkeit zu erhöhen ...“* Einige kommen eine oder zwei Minuten früher zum Unterricht und lüften dann zu Beginn oder bevorzugen das Lüften zu Beginn und am Ende des Unterrichts. Einige machen zwischendurch *„mehrere kurze Lüftungspausen“*, andere empfinden dies jedoch als *„störend“*. Viele lüften selten während des Unterrichts. Einige lüften in den Pausen oder beides, *„kamen vorher herein und lüfteten in der Pause“* oder *„lüfteten nach jeder Lernphase, nicht währenddessen“*, und nur wenige *„lüften in den Pausen und nach dem Unterricht“*. Einige passen sich den Jahreszeiten an und verwenden *„Stoßlüftung im Winter; mit kontinuierlichem Fensteröffnen in der warmen Jahreszeit“*.

Es wurden Probleme mit **Bau, Sicherheit und Risiken beim Öffnen von Fenstern** erwähnt, z. B. *„Aufgrund der baulichen Maßnahmen (KEINE Schiebefenster mehr) sitzen ein oder zwei SuS mitten im Fensterflügel oder haben den Fensterflügel direkt vor den Augen?“*. Einige schrieben, dass die *„neuen Fenster mit Brandschutz nicht geöffnet werden können“*, *„auch die Position der Fenster kann ein Problem sein“* oder *„die Fenster sind sehr groß und direkt neben einer Reihe von Schreibtischen, was bedeutet, dass die Köpfe der SuS beim Lüften im Weg sind oder ihre Sicht ‚behindert‘ wird und es im Winter für die Sitznachbarn schnell zu kalt wird. Kann nicht geändert werden.“* Eine andere Person schrieb, dass *„die Fensterform (unten quadratisch) für die Belüftung völlig ungeeignet ist“* oder *„die Fenster beim Öffnen gegen die Tische schlagen und den SuS im Weg sind. Sie müssen die Tische freiräumen. Es gibt keine Lösung.“*

Mehrere LuL berichteten von **Wartungs- und Sicherheitsproblemen** mit Fenstern, die nicht geöffnet werden konnten (z. B. aufgrund von Reparaturen). In einigen Fällen konnten alternative Fenster im Klassenzimmer geöffnet werden. Eine Person wollte in Zukunft das Öffnen von Fenstern erlauben, die mechanisch verriegelt sind.

Einige Schulen haben **Oberlichter** installiert, die die Belüftungseffektivität verbessern können. Einige berichteten jedoch von Problemen und dass *„die elektrische Öffnung der Oberlichter defekt ist“*. *„Das Problem mit der Belüftung in unserer Schule ist, dass die Oberlichter und Fenster nicht in bestem Zustand sind, um es höflich auszudrücken. Da das Gebäude von der Stadt Graz verwaltet wird, ist es unwahrscheinlich, dass diese bald ersetzt werden.“* In einer Schule wurde eine Lösung gefunden, indem ein zusätzlicher Griff am hochgestellten Fenster angebracht wurde, sodass es manuell geöffnet

werden konnte, mit der Bemerkung, dass „Dadurch wurde ein Teil der abgestandenen Luft im Deckenbereich ersetzt.“

Die Schulen ohne Oberlichter versuchten, die **Querlüftung** zu nutzen, und stellten fest, dass sich „der Luftstrom deutlich verbesserte“, wenn sie auch „Fenster auf der anderen Seite des Gebäudes“ oder die Klassenzimmertür öffneten. Mit der Feststellung, dass „Dadurch zirkuliert die Luft schneller.“ Ein Lehrkörper schrieb, dass sie „die Tür zusätzlich zu den drei Fenstern öffneten“, um „eine bessere Raumluftqualität zu erreichen“. Dadurch entstand mehr Luftzug, wodurch mehr CO<sub>2</sub> aus dem Raum transportiert wurde. Gleichzeitig wurde es im Raum unangenehm kalt. Eine Person bemerkte jedoch, dass „wenn die Klassenzimmertüren während des Lüftens ebenfalls geöffnet sind, verbrauchte Luft aus den Gängen in den Klassenraum gelangt. Dadurch erhöhte sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration.“

Zugluft wurde je nach Außentemperaturen sowohl als angenehm als auch als unangenehm empfunden. Einige beschwerten sich, dass Zugluft die Dokumente durcheinanderbringe und dass „die Notizen weggeweht werden, wenn man die Tür öffnet – daher wird die Tür geschlossen gehalten“.

Die **Temperatur** wurde im Winter als großes Problem angesehen. „Viele Kinder frieren schnell, besonders wenn sie am Fenster sitzen.“ In einigen Schulen wurde die Temperaturregelung für die Heizung als sehr schlecht empfunden. Da die Fenster in vielen Schulen nicht luftdicht sind, ist es manchmal sehr kalt, auch ohne sie zu öffnen, und die Raumtemperaturen werden als Problem gemeldet. In diesem Zusammenhang sollte angemerkt werden, dass Kaltlufteinfall durch kalte Fensterflächen auch ohne Luftundichtigkeit entstehen kann, allein aufgrund der niedrigen Innentemperaturen der Verglasung im Winter.

LuL schrieben, dass einige Kinder „unter der kalten Luft leiden, insbesondere diejenigen an den Fenstern“. „Wenn der Wert über 1000 liegt, ist es kaum möglich, langfristig niedrigere Werte zu erreichen; man müsste alle 10 Minuten lüften.“ Obwohl die Temperatur hier ein Problem darstellte, gab ein Lehrkörper zu, dass die Raumtemperatur nur kurzzeitig zu niedrig war (was vor allem von SuS bemerkt wurde) – „und nach dem Lüften stieg sie bald wieder auf eine angenehme Temperatur an.“

Die Temperaturen werden sogar in den Pausen als Problem angesehen, wenn die SuS im Klassenzimmer bleiben wollen. „Dann sitzen sie mit ihren Winterjacken im Klassenzimmer.“ Einige berichteten, dass die SuS temperaturempfindlicher seien als die LuL. „Den SuS war kalt, wenn die Fenster geöffnet wurden, den LuL aber nicht.“ Und dass es „Beschwerden von SuS gibt, dass es zu kalt ist, wenn die Fenster geöffnet werden“. Eine Person schrieb: „Die SuS sind sehr verärgert, wenn ich die Räume lüfte, wenn es sehr kalt ist. Aber ich lüfte nur kurz und manchmal öffne ich auch die Tür und schließe dann alles schnell wieder, damit sie nicht erfrieren.“ Ein Lehrkörper beschwerte sich, dass er im Winter das empfohlene CO<sub>2</sub>-Ziel nicht erreichen konnte: „Es war sehr kalt (Winter) und man musste fast ständig lüften, um die gewünschte Maßeinheit zu erreichen. Das ist für die sitzenden Kinder nicht zumutbar.“ Einige berichteten von Problemen mit der Heizung in ihren Klassenzimmern: „Der Raum ist ständig kalt, weil die Heizkörper kalt sind.“ Es gab einige Kommentare zu externen Ablenkungen und Diskussionen zwischen LuL und SuS. In Bezug auf Ablenkungen, z. B. „Die Kinder werden nur zu Beginn des Lüftens abgelenkt. Wenn die Fenster länger geöffnet sind, gewöhnen sich die SuS an die Umgebungsgeräusche.“ „Die Fenster werden geöffnet, auch wenn es kurzzeitig unangenehm ist. Aber für den Rest der Stunde haben wir bessere Luft. Das ist es wert.“ Zu Diskussionen zwischen LuL und SuS: „Im Winter führt das Lüften immer zu der Diskussion ‚es ist zu kalt‘ – das stört den Unterricht.“ oder „Im Winter beschwerten sich die Kinder über die Kälte, wenn die Fenster geöffnet werden. Da die Fenster fast zweimal pro Stunde geöffnet werden müssen, ist dies ein

*Störfaktor (und es ist laut draußen). Wir haben keine Lösung gefunden.*“ Einige berichteten, dass es Streit zwischen den SuS gibt, weil einige viel frische Luft wollen und andere (oft besonders die Mädchen) frieren. Einigen SuS ist es unangenehm, wenn gelüftet wird (vor allem, weil es zu kalt ist) und einige wollen die Fenster offenlassen – auch im Winter.

Diese Streitigkeiten werden als große Ablenkung und Störung im Unterricht angesehen. Ein Lehrkörper schrieb: *„Deshalb entscheide nur ich, wie lange und wie oft die Fenster geöffnet werden. Mit mir streiten sie nicht.“* Ein weiterer schrieb: *„Aus der Klasse, in der das Messgerät installiert wurde, kann ich keine Unruhe melden, aber es gibt viele Klassen, in denen ein Stoßlüften Diskussionen auslöst. Die SuS, die am weitesten vom Fenster entfernt sitzen, beschwerten sich über die zu warme Raumtemperatur und bitten um frische Luft, während die SuS, die am Fenster sitzen, sich nach etwa einer Sekunde bei geöffnetem Fenster über die Kälte beschwerten. Infolgedessen werden sie von ihren Klassenkamerad\*innen gebeten, sich mehr anzuziehen, da einige von ihnen im Unterricht in kurzen T-Shirts sitzen, und die Diskussion geht weiter.“* Die Sitzposition der SuS in Bezug auf das Öffnen der Fenster wurde mehrfach erwähnt: *„Aufgrund der kalten Jahreszeit ist die Belüftung ein Problem, weil es einfach zu kalt ist, um die eisige Luft während des Unterrichts durch die Fensterreihe hereinzulassen.“* Das Problem der Temperatur ist besonders für diejenigen SuS schwierig, die näher an den Fenstern sitzen. Oder ähnlich: *“Oft ist es draußen so kalt, dass man das Fenster nicht öffnen möchte, wenn die SuS zu nah dran sitzen. Die SuS, die an den Fenstern sitzen, ziehen sich Jacken an, nachdem sie sich über die sehr kalten Zugluft von außen beschwert haben.“*

Einige geben an, dass sie lüften: *„Auch wenn es einigen SuS im Winter am Fenster kalt ist, lüfte ich trotzdem konsequent.“* Im Winter ist das *„Hauptproblem, dass SuS, die vor den offenen Fenstern sitzen, frieren (verständlich). Jacken könnten in einigen Fällen helfen.“* Als Lösung für das Lüften im Winter wird die **Kleiderordnung** genannt, da die SuS unruhig sind, *„weil einigen schneller kalt wurde als anderen und sie dann meckerten – ihnen wurde dann gesagt, sie sollten Jacken oder Ähnliches anziehen.“* Viele LuL berichten, dass sie die SuS aktiv auffordern, sich mehr Kleidung oder ihre Jacken *„zum Wärmen“* anzuziehen, *„als Mittel zum Zweck“*. LuL schreiben auch, dass SuS im Unterricht Winterjacken tragen und dass *„das als SuS unerträglich und nervig ist.“* oder dass *„die SuS im Unterricht Decken/Jacken benutzen dürfen (beim Sitzen spürt man schnell die Kälte)“*. Das Problem der kalten Temperaturen wird oft dadurch gelöst, dass man einfach eine geringere Luftqualität in Kauf nimmt, z. B. *„An manchen kalten Tagen wäre es notwendig gewesen, die gesamte Unterrichtsstunde zu lüften, um wieder einen guten Wert zu erreichen. Das habe ich nicht gemacht – also habe ich das Problem gelöst, indem ich weniger gelüftet habe, und wir haben die schlechtere Luftqualität in Kauf genommen.“*

Es gibt einige Missverständnisse, dass die Exposition gegenüber kalter Luft direkt zu einer Krankheit führen kann, was wissenschaftlich nicht fundiert ist<sup>27</sup>. Z. B.: *„Lüften im Winter ist ein Problem, weil es einfach zu kalt ist, damit die Fensterreihe während des Unterrichts eisige Luft hereinlassen kann. Die Kinder frieren und werden dann krank.“* Einige andere schrieben: *„Alle sind krank von der kalten Luft.“* *„Das Problem ist, dass den SuS schnell zu kalt wird. Wer am Fenster sitzt, läuft Gefahr, sich zu*

---

<sup>27</sup> Obwohl wissenschaftliche Erkenntnisse darauf hindeuten, dass Innentemperaturen unter 18 °C mit negativen gesundheitlichen Auswirkungen verbunden sind, sind die Belege nicht ausreichend, um klare Schlussfolgerungen über die direkten Auswirkungen bestimmter Temperaturschwellen für verschiedene Bevölkerungsgruppen zuzulassen (d.h. unabhängig von den Auswirkungen einer erhöhten Anzahl zirkulierender Atemwegserreger in der Winterzeit) (Janssen et al., 2023).

erkälten.“ Eine Lehrkraft drückt es so aus: „Das größte Problem im Zusammenhang mit der Belüftung ist, dass die SuS glauben, sie könnten sich erkälten, wenn die Fenster geöffnet werden! Leider glauben das auch einige Kolleg\*innen, was dazu führt, dass bei jedem Lüftungsvorgang kollektiv gejammert wird, was wiederum den Unterricht stört!“

Ein weiteres Problem im Unterricht hängt mit **äußeren Lärm** zusammen: „Stadtlärm“, „Straßenlärm ist ein Problem bei der Arbeit an Lerninhalten“ und „Außenlärm wird als sehr störend empfunden“. Hinzu kommen Baustellen, bei denen „der Lärm kurzfristig oft unerträglich laut ist“ oder „wenn der Rasenmäher im Herbst oder Winter draußen sein muss“. Dies führt dazu, dass LuL die Fenster schließen und schreiben, dass „es fast unmöglich ist, zu hören, was die SuS sagen, wenn das Fenster offen ist“. Die LuL gaben auch an, dass sie sich angepasst haben: „Bei störendem Lärm von außen (z. B. Müllabfuhr vor dem Fenster) wurden die Fenster vorübergehend geschlossen und dann wieder geöffnet.“ Auch hier wird der Zeitpunkt der Lüftung als Lösung angesehen und die Zuweisung von Lern-/Lehrphasen für das Lüften oder das Geschlossenhalten der Fenster: „Lüften während ruhiger Arbeitsphasen funktioniert gut. Das Öffnen der Fenster und gleichzeitige Erklären ist aufgrund des Straßenlärms nicht möglich.“

Auch wird über **inneren Lärm** aus angrenzenden Fluren berichtet, der von LuL verursacht wird, die versuchen, bei geöffneten Türen quer zu lüften. „Die Luft zirkuliert schlecht im Klassenzimmer, wenn Stoßlüftung betrieben wird, die Tür zum Klassenzimmer muss auch weit geöffnet werden. Dies verursacht Lärm von außen und vom Flur“, „Wenn es draußen sehr laut ist, öffnen Sie die Tür von Zeit zu Zeit und lüften Sie den Flur.“ „Viel zu viel Lärm auf der Straße, um ohne Lärm zu lüften! Außerdem ist es manchmal laut im Flur, um problemlos zu lüften. Und eine nachweisbare Lüftung funktioniert nur, wenn die Tür ebenfalls geöffnet wird. Eine Lüftung nur durch das Fenster hat laut Messgerät viel zu wenig Einfluss auf das Ergebnis.“ Oder: „Öffnen von Fenstern und Türen zum Flur, um Zugluft zu erzeugen, wenn es draußen sehr heiß ist, wodurch sich der Raum aufheizt (gegen Ende des Unterrichts wird die Konzentration jedoch durch den Lärm aus dem Flur beeinträchtigt)“.

Die Verwendung des Konzepts der **sensorgesteuerten Lüftung** wurde von vielen positiv erwähnt: „Lüften bei nachweislich schlechter Luftqualität ist gut und sinnvoll und war nur durch die rote Warnleuchte so durchsetzbar.“ Ein Lehrkörper merkte an, dass sie „in den letzten drei Jahren“ sogar ein „eigenes, selbstgebautes CO<sub>2</sub>-Messgerät hatten, das sehr gut funktioniert und aus einer Entfernung von 10 Metern leicht abzulesen ist.“; und „Die SuS an unserer HTL haben sich an dieses System gewöhnt und nutzen es, um automatisch zu lüften!“, „Die SuS sehen einfach nach, ob es rot leuchtet.“ Ebenso wurde die Verwendung eines **CO<sub>2</sub>-Champions** im Unterricht als eine Lösung genannt und die Einrichtung eines Dienstes für SuS, bei dem „jede Woche ein anderes Kind für das Lüften des Raums verantwortlich ist“.

In diesem Zusammenhang werden von einigen LuL die **Aufklärung** von SuS und LuL, das **Schaffen von Bewusstsein** für die Bedeutung des Lüftens und die Förderung von Akzeptanz als entscheidende Faktoren genannt. „Erklärung des Lüftungsprozesses und der CO<sub>2</sub>-Werte in einer Klasse“ wird als Lösung für einige der oben genannten Probleme genannt. „Die Messstationen, die den Wert anzeigen, sind sehr hilfreich und die SuS akzeptieren das Lüften auf diese Weise eher“. Oder ähnlich, „die Anzeige hilft als Rechtfertigung für das Öffnen der Fenster.“ Schließlich schrieb ein gut informierter Lehrkörper: „Ich bin der Meinung, dass SuS und LuL regelmäßig, mindestens jedoch einmal im Jahr, darüber informiert werden sollten (von externen Expert\*innen!), dass man sich in schlecht belüfteten, warmen Klassenzimmern ‚erkältet‘ und nicht in gut belüfteten, kurzzeitig kühlen Klassenzimmern!“

#### 5.2.2.2 Gemeinsame Lösungen und Wissensweitergabe

Wenn es darum geht zu dokumentieren, was LuL beim Lüften geholfen hat, werden viele recht subjektive Antworten aufgeführt, die nur wenig mit dem Sensor selbst zu tun haben. Lärm und gesunder Menschenverstand wurden häufig genannt, ebenso wie subjektive Wahrnehmungen von „schlechter Luft“, „Wissen aus erster Hand“, „Geruch“ und andere persönliche Einschätzungen der Luftqualität (z. B. „weil das Atmen schwieriger wird“).

Die Befragten antworteten, dass sie „lüften, wenn nötig“ (z. B. wegen verbrauchter Luft oder zu viel Wärme), dass sie ihrer eigenen Intuition folgen, ihrem eigenen Gefühl für schlechte Luftqualität, und dem Geruch, wenn sie den Klassenraum betreten, z. B. wenn es stickig ist. Ein Lehrkörper schrieb beispielsweise: *„Meine Nase, die merkt, wenn es in der Klasse stinkt, und mein Kopf, der zu schmerzen beginnt, wenn die Luft schlecht ist. Natürlich viel zu spät.“* oder *“Die CO<sub>2</sub>-Sättigung im Raum steigt mit der Zeit, je nach Anzahl der Personen. Dafür braucht man keine App oder einen Sensor. Die Empfindlichkeiten der SuS müssen berücksichtigt werden (zu heiß/zu kalt/zugig).“*

Jemand, der den Sensor als störend empfand, schrieb: *„Wir haben immer gelüftet, wenn es nötig war. Die Ampeln des Systems waren eine große Störung des Unterrichts und sorgten immer für Unruhe und hitzige Diskussionen unter den SuS, da einige, die direkt neben den Heizkörpern sitzen, das Lüften als angenehm empfinden, während diejenigen, die weit davon entfernt sind, ständig frieren und ihre Winterjacken tragen müssen. Ich kann in meiner Klasse mit gesundem Menschenverstand lüften. Trotzdem hatten und haben wir viele Corona-Patienten und verschiedene Grippefälle.“*

Viele LuL erwähnten auch die sensorgesteuerte und CO<sub>2</sub>-bezogene Belüftung, z. B.: *„MIT der Sensoranzeige ist es einfacher, den SuS zu erklären, dass jetzt gelüftet werden muss.“* Einige berichteten sogar, dass *„die SuS sogar selbstständig lüfteten“* und die LuL nicht wirklich etwas tun mussten. Einige Schulen berichteten, dass sie zusätzliche Sensoren installiert haben, einige sogar mit einem akustischen Signal bei 1400 ppm.

Die Sensibilisierung, eine verbesserte Kommunikation und das Anstoßen von Gesprächen über die CO<sub>2</sub>-Sensoren (auch wenn einige keine sichtbaren Daten anzeigten) wurden als wichtig erachtet, damit die SuS häufiger lüfteten. Einige berichteten von ihren *„großartigen Erfahrungen“*, da die SuS sie daran erinnerten oder die LuL darauf aufmerksam machten, dass der Grenzwert überschritten wurde. Einige betonten die Bedeutung der Kinder im Allgemeinen, da ihr Verhalten einen großen Einfluss hatte und einige *„für die Situation sensibilisiert waren und die LuL immer über besorgniserregende Werte informierten“*.

Einige fügten *„Markierungen auf der Klassenuhr hinzu, um sie an regelmäßige Lüftungsintervalle zu erinnern“*, oder verwendeten einen *„Auslöser über die Schulglocke“*. Das *„Wissen, dass man mindestens alle 20 Minuten lüften muss“*, half dabei, die Stoßlüftung einzuhalten oder die Fenster gekippt zu lassen, *„wenn die Temperatur es zuließ“*.

Einige lüfteten einfach routinemäßig, d. h. *„sie lüften jedes Mal, wenn sie den Klassenraum betreten!“* Ein paar wenige wünschten sich eine vollautomatische Lüftung, die sie als *„das Nonplusultra“* bezeichneten. Einige wünschten sich mehr Anweisungen oder beklagten sich darüber, dass *„sie leider überhaupt keine Anweisungen zu den Geräten hatten“*. Einige LuL (in Kontrollklassen) ohne sichtbare Anzeige gaben jedoch auch an, dass sie Anweisungen und Unterstützung von Kolleg\*innen erhalten hätten.

Eine Person schien eher verärgert zu sein und schrieb, dass sie das „*Klassenzimmer nach eigenem Ermessen lüfte und dafür kein zusätzliches Messgerät benötige!!!*“. Der Punkt „*eigenes Ermessen*“ wird von einer anderen Lehrkraft angesprochen, die ebenfalls kein „*Gerät benötige, das ihr mitteilt, wann die Luft schlecht ist*“. Einige weigerten sich, sich zu beteiligen, obwohl sie wussten, dass in ihrem Klassenzimmer ein Sensor vorhanden war, wollten sie einfach keine Anweisungen und schrieben, dass sie „*lüften werden, wenn es passt*“. Das Nachdenken über das Lüften während des Unterrichts wurde hier von einigen als „*zusätzliche Herausforderung*“ angesehen.

Eine interessante und positive Bemerkung wurde von einer Person gemacht (die wahrscheinlich auch auf andere LuL zutrifft, die gelegentlich in Räumen mit einem Sensor unterrichtet haben): Da er/sie „*in einer Klasse mit CO<sub>2</sub>-Sensoren mit und ohne Anzeige unterrichtet*“, hat er/sie gelernt, „*auch die anderen Klassen zu lüften, solange sich die Luft noch gut anfühlt*“, weil er/sie festgestellt hat, dass der Richtwert in der Regel bereits überschritten war, wenn die Luft als abgestanden wahrgenommen wurde. Ebenso gab eine andere Lehrperson aus einem Kontrollraum an, dass trotz der Tatsache, dass es keine sichtbare Anzeige im Raum gibt, „*das Bewusstsein durch die Kampagne gestiegen ist*“.

#### 5.2.2.3 Zusätzliche Ideen zur Unterstützung der Lüftung

Obwohl einige LuL angaben an, dass ihnen alles klar sei, boten viele einfache Lösungen an, die nicht viel Zeit oder Geld kosten würden, zum Beispiel: ‚*Einfacheres Öffnen von Fenstern oder Oberlichtern*‘ oder (anstelle eines automatischen Belüftungssystems) ‚*Freihalten von Fensterflächen*‘, d. h. keine Schulbänke direkt neben den Fenstern aufstellen. Jemand erwähnte die Möglichkeit, ‚*in den Pausen zu lüften*‘ (offenbar verbieten einige Hausordnungen das Lüften in den Pausen), und einige wünschten sich ‚*weniger SuS pro Klasse/größere Klassenzimmer, damit die Luft nicht so schnell verbraucht ist*‘. Was die Raumaufteilung betrifft, wünschten sich einige weniger Tische im Raum und einen besseren Zugang zu den Fenstern. Dadurch würden auch weniger SuS direkt neben offenen Fenstern sitzen. Automatische Fenster- und Beschattungsvorrichtungen wurden als „*Katastrophe*“ und als ‚*Hindernis für eine natürliche Belüftung*‘ angesehen.

„*Ein größerer Raum oder weniger SuS*“ ist etwas, das viele als Hinweis darauf nannten, dass es einfacher ist, im Winter einen guten CO<sub>2</sub>-Wert zu erreichen, da sie erkennen, dass „*einmaliges Stoßlüften vor dem Unterricht nicht ausreicht*“. Abgesehen vom Sensor wünschten sich viele eine Erinnerung an das Lüften der Räume am Lehrertisch. Einige wiesen darauf hin, dass die Schule einen viertelstündlichen Lüftungsgong verwendet. Ein Lehrkörper schrieb: „*Wenn die Werte zu schlecht sind, wird es zu warm*“, dann sollte ein Alarm ertönen, der die LuL daran erinnert, die Räume zu lüften und auch die Fenster wieder zu schließen. Einige berichten sogar von sehr warmen Temperaturen in den Klassenzimmern im Winter und dass es normalerweise zu warm ist, weshalb die Fenster auch im Winter lange geöffnet bleiben.

Eine Lehrkraft wünschte sich „*ein akustisches (einzelnes, unaufdringliches) Signal bei Überschreitung des CO<sub>2</sub> Grenzwerts oder die Möglichkeit, direkt am Gerät per Knopfdruck einen Timer zu starten, der nach einigen Minuten ein akustisches Signal zum Schließen des Fensters abgibt*“ oder ein visuelles Signal, das die SuS sehen und dementsprechend reagieren können, wie z. B. eine vergrößerte Ampel.

Einige wünschten sich im Voraus pädagogische Unterstützung, damit das Lüften nicht vom Unterricht ablenkt, oder „*einfache Tipps auf einer A4-Seite, nichts allzu Kompliziertes*“, die dazu beitragen könnten, „*das regelmäßige Lüften zur Gewohnheit in allen Unterrichtsstunden zu machen*.“ Es wurden allgemeine Informationen darüber angefordert, warum die Sensoren installiert wurden und dass „*die*



*installierten Sensoren tatsächlich relevant sind“ und „nicht nur für Forschungszwecke“. Es wurden praktische Probleme gemeldet, die Vorrang gegenüber der Luftqualität haben, z. B. „das Problem ist, dass es viel mehr SuS gibt, denen es schnell viel zu kalt wird, und wenn die Luft zu Beginn nicht schlecht ist, achte ich während des Unterrichts nicht auf die Luftqualität (ich bin anderweitig beschäftigt).“*

Von den LuL vorgeschlagene Zwischenlösungen und teurere Lösungen waren „größere Fenster, die sich öffnen lassen“, mehr Fenster und „richtige Fenster“, Luftreiniger, CO<sub>2</sub>-Sensoren mit Anzeige und möglicherweise ein akustisches Warnsignal in allen Klassen.

Schwierigere und teurere Optionen (die aber immer noch in der Macht der Schulträger\*innen liegen) wären *„eine permanente mechanische Belüftung“, „Ventilatoren im Sommer und die Bereitstellung von Klimaanlage im Sommer, da die Temperaturen in den Klassenräumen oft schon in der ersten Unterrichtsstunde unerträglich sind“*. In einem Fall behauptete eine Lehrkraft, dass *„Lüften ohnehin sinnlos ist, da nur warme Luft nach innen gelangen würde. Das hat negative Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt und damit auch auf die Leistung der SuS“*.

Die Minderung von Straßen- und Außengeräuschen, um LuL beim Lüften zu unterstützen, ist jedoch sehr schwer umzusetzen. Die meisten Lehrkräfte hörten einfach auf zu lüften, sobald der Außenlärm störend wurde.

Eine kleine Anzahl von Lehrkräften zeigte sich entweder völlig resistent gegenüber oder ablehnend gegenüber der Notwendigkeit des Lüftens. Eine Person schrieb, dass sie *„so lüftet, wie sie es möchte. Wenn der ppm-Wert hoch ist, wenn es stinkt, wenn kein einziges Molekül O<sub>2</sub> mehr im Raum ist.“* Eine andere Person schrieb, dass sie *„nicht auf regelmäßiges Lüften achtet und nicht für das CO<sub>2</sub>-Problem sensibilisiert ist.“*

Umgekehrt äußerten sich einige LuL allerdings sehr positiv und meinten, dass *„die Informationen des Sensors großartig sind“* und dass sie *„keine Wünsche haben, es funktioniert“*. *„Die SuS waren für das Thema sensibilisiert.“*

### 5.2.3 Zweite Umfrage (Sommer) – Ergebnisse

Gegen Ende des Beobachtungszeitraums (nach der Sommerpause) wurden die LuL erneut befragt, um saisonale oder projektbezogene Veränderungen in ihren Antworten zu ermitteln. Die LuL wurden erstmals Anfang Juni kontaktiert und im Juli und September wurden Erinnerungsschreiben verschickt (Abb. 5-4). Die Umfrage blieb bis zum 20.09.2024 offen.

An der Sommerumfrage nahmen 598 Personen teil, davon 427 (71,5 %) mit sichtbarem Bildschirm (T) und 171 (28,5 %) ohne sichtbaren Bildschirm (K). Obwohl die Gesamtanzahl der Antworten bei der Sommerumfrage von 771 auf 598 zurückging, blieb die Verteilung zwischen der Kontroll- und der Testgruppe nahezu identisch. Alle Abbildungen der zweiten Lehrerbefragung befinden sich in Anhang C.2.2.2.

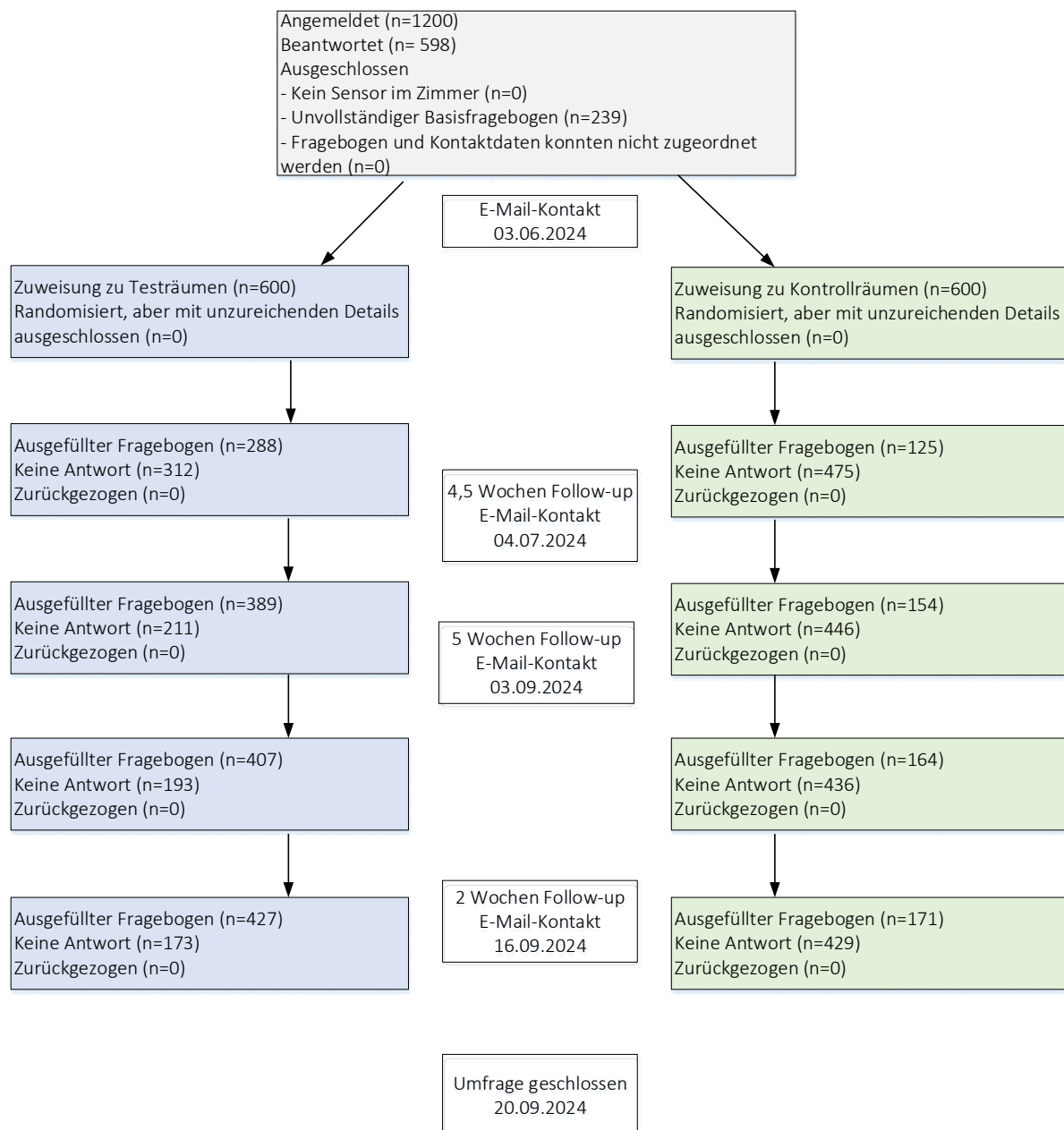


Abbildung 5-4 Arbeitsablauf der zweiten Lehrerumfrage, einschließlich Zeitplan und Kontaktmethode

Nur 27,7 % gaben an, dass die Temperaturen beim Lüften im vergangenen Jahr akzeptabel waren. 29,1 % antworteten, dass die Temperaturen ‚oft‘ zu warm waren, und weitere 2,7 % gaben an, dass sie ‚immer‘ zu warm waren. Dies entspricht der Antwort, dass 36,2 % die Temperaturen ‚oft oder immer‘ kühler haben möchten und 42,5 % nur ‚manchmal‘; während 21,3 % ‚selten oder nie‘ angaben. Dies deutet darauf hin, dass viele Klassenräume im Sommer möglicherweise zu warm sind.

Auf die Frage nach Zugluft im Sommer antworteten 87,6 %, dass sie keine Zugluft spüren oder diese als ‚angenehm‘ oder sogar ‚sehr angenehm‘ empfinden. Im Gegensatz dazu gaben 12,4 % an, dass sie diese als ‚unangenehm‘ oder sogar ‚sehr unangenehm‘ empfinden. 61,2 % würden ‚zumindest etwas mehr Luftbewegung‘ bevorzugen, während 27,9 % ‚keine Veränderung‘ wünschen und die restlichen 10,9 % ‚zumindest etwas weniger Luftbewegung‘ bevorzugen würden.

In Bezug auf Außenlärm empfanden 52,7 % den Lärm von außen als *‚störend oder sogar sehr störend‘*. Während 32,6 % (d. h. fast genauso viele) Außenlärm *‚nicht als störend‘* empfanden und weitere 14,7 % waren *‚neutral‘*.

36,6 % gaben an, dass die *‚Konzentration der SuS durch Belüftung verbessert wird‘*; 20,9 % antworteten, dass *‚Belüftung die Konzentration verschlechtert‘*.

In der Sommerumfrage gaben 59,5 % an, dass die *‚Temperaturen zu warm waren‘*, und 8,9 % aller LuL sagten, dass sie *‚zu kalt waren‘*. 59,5 % betrachteten Lärm von außen als Problem während der Belüftung, 14,7 % betrachteten Zugluft als Problem. Nur 6,2 % betrachteten die Luftverschmutzung im Freien für ein Problem.

17,9 % hatten Probleme beim Öffnen der Fenster (z. B. dauerhaft geschlossene Fenster oder inkompatible Beschattungseinrichtungen), während sich 25,1 % nicht sicher waren, ob sie lüften sollten. Interessanterweise gaben 50,2 % an, dass *‚die Schulvorschriften sie daran hinderten, die Fenster zu öffnen, um Energie zu sparen‘*. Während 63,5 % sagten, dass *‚es eine persönliche Entscheidung war, keine Energie zu verschwenden‘*. 15,6 % gaben an, dass *‚ihre Klasse unruhig wird, wenn sie lüften‘*, und 11,7 % antworteten, dass *‚das Lüften ablenkt und unangenehm ist‘*.

Mit Frage 9 sollte herausgefunden werden, was LuL beim besseren Lüften ihrer Klassenräume geholfen hat. Die meisten LuL gaben an, dass es ein CO<sub>2</sub>-Sensor mit numerischer Anzeige war (29,3%), gefolgt von CO<sub>2</sub>-Sensor mit numerischer Anzeige und Ampel (19,9 %), gefolgt von einer CO<sub>2</sub>-Anleitung mit Erläuterungen zu Grenzwerten (14,9 %), gefolgt von einem CO<sub>2</sub>-Sensor mit Ampel (7,7 %) und schließlich der Lüftungsanleitung (7,7 %). 37,8 % antworteten, dass *‚keine der oben genannten Optionen ihnen geholfen hat, besser zu lüften‘*. Während 18,6 % antworteten, dass eine *‚vollautomatische mechanische Lüftung die bevorzugte Option wäre‘*.

In Frage 10 wurde gefragt, *‚was würde Ihnen helfen für eine bessere Belüftung zu sorgen‘*. Die Antworten werden vom höchsten zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung aufgeführt: *‚eine Stoppuhr oder ein Timer (um die Dauer des Fensteröffnens zu messen)‘* (28,6 %), *‚ein persönlicher Besuch durch Lüftungsexpert\*in‘* (20,4 %), *‚eine spezifische Empfehlung zu den Energie- und CO<sub>2</sub>-Kosten für die Belüftung ihres Klassenzimmers‘* (18,1 %) und *‚eine spezifische Anleitung zur Vermeidung von Zugluft bei der Fensterlüftung‘* (13,4 %).

In der Sommerumfrage wurden vier zusätzliche Fragen aufgenommen, da die Umfrage auch am Ende des Projekts durchgeführt wurde. Die erste zusätzliche Frage betraf das Wissen der LuL über zulässige CO<sub>2</sub>-Werte in Klassenzimmern. Dieselbe Frage war bereits bei den Umfragen unter den Direktor\*innen enthalten. 66 % aller LuL gaben Werte von 1200 ppm oder weniger an, während nur 7 % Werte von über 2000 ppm angaben. Die Auswirkungen der Einführung von Sensoren und Leitfäden lassen sich besonders gut erkennen, wenn man die Kontrollgruppe mit der Testgruppe vergleicht. LuL aus Testklassen (mit sichtbaren Anzeigen) wussten mit einer um über 10 % höheren Wahrscheinlichkeit den korrekten CO<sub>2</sub>-Wert von 1000 ppm (38 % aller Befragten). Außerdem gaben 70 % der LuL mit sichtbarer CO<sub>2</sub>-Anzeige Werte von 1200 ppm oder weniger an, verglichen mit 59 % in Klassenräumen ohne Anzeigen.

Frage 12: *‚Glauben Sie, dass SuS über die Auswirkungen von Lüftungspraktiken und die Luftqualität in Klassenzimmern informiert werden sollten?‘*. Die meisten LuL waren sich einig, dass *‚Alle SuS über die Auswirkungen von Lüftungspraktiken und die Luftqualität in Klassenzimmern informiert werden‘*

sollten' (65,4 %). 22,7 % gaben an, dass dies ‚vom Alter abhängt‘, wobei die folgenden Altersgruppen als geeignet angegeben wurden: ‚5 Jahre oder älter‘ (2,9 %), ‚8 Jahre oder älter‘ (15,4 %), ‚10 Jahre‘ (27,2 %), ‚12 Jahre oder älter‘ (30,1 %) und ‚15 Jahre oder älter‘ (22,8 %).

In Bezug auf Frage 13: *„Denken Sie, dass SuS eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Lüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten?“* antworteten 73,2 % mit *„Ja, wir sollten einen SuS ernennen, der/die für die Überwachung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Belüftung des Klassenzimmers verantwortlich ist“*. Von denjenigen, die mit *„Nein“* antworteten, war die Mehrheit der Meinung, dass dies *„in der Verantwortung der LuL liegt“* (58,3 %). Diese Meinung steht im Gegensatz zur Meinung der Schulleiter\*innen, von denen die Mehrheit der Meinung war, dass dies Aufgabe der Schule ist, die Qualität der Belüftung aufrechtzuerhalten.

Frage 14: *‘Haben Sie derzeit einen CO<sub>2</sub>-Beauftragten (der/die den CO<sub>2</sub>-Gehalt überwacht und für das Lüften verantwortlich ist)?‘* 96,3 % antworteten mit *„Ja“*. 15,4 % gaben an, dass sie es *„nie oder selten schaffen, den empfohlenen CO<sub>2</sub>-Grenzwert einzuhalten“*. 71,9 % antworteten, dass sie es *„manchmal oder immer schaffen, den empfohlenen CO<sub>2</sub>-Grenzwert einzuhalten“*. 17,8 % antworteten, dass es *„schwierig oder sogar sehr schwierig sei, mit einem CO<sub>2</sub>-Sensor richtig zu lüften“*. 70,9 % antworteten, dass es *„sehr einfach oder einfach sei, mit Hilfe eines Sensors richtig zu lüften“*.

Als nächstes wurden die LuL nach den Schwierigkeiten gefragt, die sie bei der Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Sensors sehen. Die Antworten werden vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 73,8 % haben *„keine Schwierigkeiten“*, 5,6 % müssen *„vor der Verwendung des Sensors in der Anleitung nachschlagen“*, 4,4 % gaben an, dass sich *„der Sensor unerwartet verhält“*, 3,5 % *„finden die Sensoranzeige verwirrend“*, 2, *„finden die Belüftungsanleitung nicht klar“*, 2,1 % finden die Sensoranleitung nicht klar. Insgesamt ist dies Ergebnis positiv, da die Mehrheit der Lehrkräfte angab, keine Schwierigkeiten bei der Verwendung des CO<sub>2</sub>-Sensors zu haben.

Auf die Frage, welche der vorgegebenen Aussagen zutreffend ist, gaben 60,2 % an, dass sie *„keine Probleme mit dem Sensor haben“*, und 25,1 % antworteten, dass es *„mit dem neuen CO<sub>2</sub>-Sensor und den Lüftungsanweisungen einfacher ist, die CO<sub>2</sub>-Werte in einem guten Bereich zu halten“*<sup>28</sup>.

In Bezug auf ihr Lüftungsverhalten in der Zukunft werden die Antworten vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 43,1 % gaben an, dass *„sie planen, besser zu lüften“*, 15,2 % antworteten, dass *„sie noch üben, wie man richtig lüftet“*. 14,5 % sagten, dass *„sie unsicher sind, wie sie die Lüftung aufrechterhalten können“*. 9,1 % gaben an, dass *„sie mit Widerstand von SuS und Mitarbeitenden zu kämpfen haben“*, während 8,4 % antworteten, dass *„sie noch dabei sind zu lernen, wie der CO<sub>2</sub>-Sensor funktioniert“*.

In Bezug auf die Auswirkungen des CO<sub>2</sub>-Sensors und die Anleitung zum Lüftungsverhalten werden die Antworten vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 63,9 % gaben an, dass *„sie häufigeres Lüften für eine gute Idee halten“*. 47,5 % *„hielten den neuen CO<sub>2</sub>-Sensor und die*

---

<sup>28</sup> Es ist zu beachten, dass die Antworten auf die zweite Lehrkräftebefragung von LuL stammen, die sowohl in T-Klassenräumen (71 %) als auch in C-Klassenräumen (29 %) unterrichteteten. Die Antworten auf Fragen im Zusammenhang mit dem Nutzen von (oder der Interaktion mit) sichtbaren Interventionen (wie CO<sub>2</sub>-Sensoren und Lüftungsanleitungen) werden durch diesen Umstand beeinflusst und sollten entsprechend interpretiert werden.

*Lüftungsanleitung für eine gute Idee'*. 32,6 % *,bemühten sich nun, mit Hilfe des CO<sub>2</sub>-Sensors und der erlernten Lüftungstechniken eine gute Luftqualität im Klassenzimmer aufrechtzuerhalten'*. 16,2 % *,verfügen nun über das Wissen und die Mittel, um richtig zu lüften'*. Nur 6,1 % *,hielten den CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanweisungen für sinnlos'*. 8,9 % *,waren sich nicht sicher, ob die CO<sub>2</sub>-Messung und Lüftung eine gute Idee sind'*. Während 3,7 % angaben, dass sie *,den Zweck der CO<sub>2</sub>-Messung und Lüftung nicht verstanden haben'*.

Die Antworten zur Bedeutung von CO<sub>2</sub>-Konzentration und der Regulierung der erforderlichen Luftzufuhr werden in absteigender Reihenfolge der Zustimmung aufgeführt: 55,7 % gaben an, dass *,sie mehrmals täglich die Fenster öffnen'*; 32,9 % *,schauten nur selten auf den CO<sub>2</sub>-Sensor'*; 19,7 % *,schauten nie auf den CO<sub>2</sub>-Sensor'*; 18,7 % *,neigen dazu, den neuen CO<sub>2</sub>-Sensor als Orientierungshilfe für ihr Lüftungsverhalten zu nutzen, anstatt die Fenster geschlossen zu halten'*; 17,7 % *,schauten oft (oder mehrmals) auf den CO<sub>2</sub>-Sensor'*; 12,5 % *,beobachteten den CO<sub>2</sub>-Wert mit großer Aufmerksamkeit und lüfteten dann mehrmals am Tag, um die beste Raumluftqualität zu erzielen'*.

Die Antworten zur persönlichen Wahrnehmung des CO<sub>2</sub>-Sensors werden vom höchsten bis zum niedrigsten Prozentsatz der Zustimmung dargestellt: 40,6 % gaben an, dass *,sie gerne auf den CO<sub>2</sub>-Sensor schauen'*; 20,4 % sagten, dass *,das CO<sub>2</sub> für sie nicht von Interesse sei'*. 17,7 % sagten, dass *,sie keine Zeit hätten, den CO<sub>2</sub>-Sensor zu benutzen'*. 5,4 % antworteten, dass *,sie das Fenster so oft öffnen und schließen, dass es sie ablenkt'*. Während 4,2 % angaben, dass *,der Sensor sie deprimiert'*, während ein noch geringerer Prozentsatz (1,5 %) angab, dass *,sie sich nicht für die Luftqualität in Innenräumen interessieren'<sup>25</sup>*.

## 5.2.4 Offene Antworten – Sommerumfrage

### 5.2.4.1 Häufige Probleme und Lösungen

Bei einer Reihe von Fragen war es möglich, in einem Abschnitt mit dem Titel „Sonstiges“ zusätzliche Kommentare hinzuzufügen. Zum Beispiel bei der Frage: *„Wenn Sie auf eines oder mehrere der oben genannten Probleme gestoßen sind und eine Lösung gefunden haben, beschreiben Sie das Problem bitte genauer und wie Sie es gelöst haben.“*

In der Sommer Umfrage befassten sich die meisten Antworten mit dem Thema Lärm. Zum Beispiel *„Leider ist der Straßenlärm draußen hier sehr laut“* oder *„Wenn das Fenster offen ist, ist es nicht mehr möglich, eine Diskussion im Klassenzimmer zu führen, da man sich aufgrund des Straßenlärms nicht mehr hören kann.“* In einigen Fällen schrieben die LuL, dass es noch keine Lösung gibt. Lärm könnte auch mit SuS zusammenhängen, die draußen im Hof spielen, was dazu führte, dass die LuL stattdessen die Türen zu den Fluren öffneten. Andere waren recht pragmatisch und schrieben: *„Wenn der Straßenlärm laut ist, muss ich als Lehrer auch laut sprechen“* oder sie antworteten, dass *„die SuS schnell damit zurechtkamen (1-2 Ermahnungen)“*. Die Mehrheit schloss jedoch einfach die Fenster, um die Lärmbelästigung von außen zu minimieren, oder öffnete die Fenster nur an einer Seite des Klassenzimmers oder lüftete stoßweise oder *„meistens, wenn die SuS nicht so konzentriert sein mussten“* und *„während der Pausen“*. Ein Lehrkörper schrieb, dass man sich manchmal nicht sicher sei, ob man aufgrund von Lärm lüften sollte, und man dann die Klasse einfach nach ihrer Meinung fragte. Einige hielten es für wichtig, die internen Schulvorschriften zu überprüfen, um den Lärm auf dem Schulgelände auch im Hinblick auf die Aufrechterhaltung der Luftqualität in Innenräumen zu minimieren.

Einige LuL wiesen auf das Problem des thermischen Unbehagens hin. Im Sommer betrachteten sie dies als weniger problematisch, da „die Temperaturen angenehm sind“. Ein Lehrkörper antwortete jedoch, dass aufgrund der hohen Außentemperatur „eine gute Belüftung fast unmöglich ist und war“ und dass es manchmal „bereits um 10:00 Uhr fast 30 °C“ hatte, die dann auf mittlere und hohe 30 Grad anstiegen. Als Lösung für „die heiße Luft, die von draußen kommt“ wurde das Klassenzimmer vor Unterrichtsbeginn gelüftet. Außerdem hat die Erfahrung in der Durchführung sensorgestützter Lüftung vielen geholfen, den richtigen Rhythmus beim Lüften in Bezug auf bestimmte Aktivitäten im Klassenzimmer zu finden, z. B. wenn die SuS praktische Arbeiten durchführen und nicht in Phasen, in denen sie zuhören oder etwas erklären müssen. Im Sommer schauten die LuL nicht so oft auf den Sensor, „das Fenster war oft offen, wenn ich den Klassenraum betrat“. Sie berichteten auch von „keiner Diskussion über das Lüften“ (d. h. niemand fror und verlangte, dass die Fenster geschlossen werden). Im Hochsommer waren einige jedoch der Meinung, dass viele „Menschen nicht wissen, wie man richtig lüftet“, um die Temperaturen auf einem Minimum zu halten, und dass sie „das Fenster stundenlang offenlassen, wenn es fast 30°C hat“, sodass sich die Raumtemperatur unnötig erhöht. In kälteren Zeiten (z.B. Frühjahr) war die Situation anders und die LuL schrieben, dass die Klasse es dann „nicht zu schätzen wusste, wenn sie den Raum lüfteten“. Einige öffneten die Fenster trotzdem (insbesondere das dem Lehrertisch nächstgelegene Fenster), um zu vermeiden, dass die SuS froren. Vor allem Mädchen hatten Probleme mit der Kälte und schlossen dann die Fenster. Ähnlich wie die Temperatur wurde auch der Wind als Hindernis für die Belüftung genannt und veranlasste die LuL, die Fenster zu schließen.

Es wurden Probleme bei der Einhaltung der empfohlenen CO<sub>2</sub>-Grenzwerte mit **Nutzung eines Sensors** festgestellt: „Die Belüftung müsste praktisch kontinuierlich erfolgen, um die Luftqualität aufrechtzuerhalten, was zu extremen Temperaturschwankungen und Lärmbelästigung führt.“ Wie bei der Winterumfrage veranlasste dies einige, das Lüftungsverhalten an die Aktivitäten in den Klassenzimmern anzupassen, z. B. wurde die Belüftung bei selbstständigem Arbeiten der SuS im Vergleich zum Frontalunterricht als weniger problematisch angesehen. Thermische Unbehaglichkeit führte dazu, dass einige LuL die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte entspannter sahen, da sie zu dem Schluss kamen, dass „es unangenehm ist, extrem hohe CO<sub>2</sub>-Werte wieder auf ein sicheres Niveau zu bringen.“ Oder: „Manchmal dauert es 15 bis 20 Minuten, um den Wert auf < 1000 ppm zu senken.“ Dies geschah, wenn LuL zwei Stunden lang nicht lüfteten, um „mehr Ruhe im Raum“ zu haben. Letzterer Kommentar deutet darauf hin, dass einige Lehrkräfte möglicherweise bewusst darauf verzichteten, ihre Räume zu lüften, um von der beruhigenden Wirkung erhöhter CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und höherer Temperaturen zu profitieren.

Selbst im Sommer trugen der **Energieverbrauch und die Heizungsregelung** zu den aufgetretenen Problemen bei. Eine Person schrieb, dass „im Allgemeinen das Klassenzimmer zentral (über)heizt wird – wenn es in den Übergangsmonaten warm ist, ist das Klassenzimmer überheizt, weil es zentral beheizt wird und die Heizung nicht ausgeschaltet werden kann“. Eine andere Lehrkraft berichtete von einem ähnlichen Problem und fügte hinzu, dass es „völliger Wahnsinn ist, weil der unnötige Energieverbrauch auch wahnsinnig gesundheitsschädlich ist (trockene Schleimhäute) und man am Ende unerträgliche Raumtemperaturen hat, die die Leistung einfach drastisch reduzieren!!!!“

Es wurden oft Probleme im Zusammenhang mit **Bauarbeiten** erwähnt. Eine Schule wurde renoviert, wobei das „gesamte Schulgebäude mit Gerüsten versehen wurde, einschließlich Plastikabdeckungen an den Fenstern“. Hier halfen sich die LuL, indem sie einige der Abdeckungen aufschnitten, um eine Belüftung zu ermöglichen. Es wurde berichtet, dass Brandschutztüren und -fenster eine Querlüftung

verhinderten. Außerdem erlaubte die Lage der Fenster (manchmal zu hoch oben) einigen nicht, die Fenster physisch zu erreichen und zu öffnen, sodass Tische verschoben werden mussten und die SuS hinaufklettern mussten, um die Fenster zu öffnen. Eine improvisierte Lösung für das Problem, dass sich Fenster von selbst schlossen (auch ohne Luftzug) bestand darin, einen Besen in den Fensterrahmen zu klemmen, um es offen zu halten. Um mehr Luftstrom in die Räume zu ermöglichen, berichteten LuL, dass sie während der Pausen *„alle möglichen Fenster und unsere Klassenzimmertür geöffnet haben, um für ausreichend Luftzug zu sorgen“*, diese dann aber während des Unterrichts wieder schließen mussten.

Eine Reihe von LuL gab an, dass sie keine **zeitbasierte Stoßlüftung** ausprobiert hätten, da *„alle 20 Minuten lüften“* nicht ausreichte bzw. weil *„alle 20 Minuten zu selten“* sei. Es wurde von Nebenwirkungen wie Kopfschmerzen berichtet, weshalb sie *„mindestens ein“* Fenster ständig offenließen. Auch die SuS beteiligten sich aktiv an der Belüftung. Auch hier wurde erwähnt, dass SuS *„im Allgemeinen wärmeempfindlicher sind, was die Belüftung etwas einschränkt“*. Im Gegensatz zu einigen, die der Meinung waren, dass die Belüftung die SuS unruhig macht, berichtete eine Person: *„Die Klasse ist nicht unruhig, wenn ich lüfte. Die Klasse atmet wieder halbwegs normal“*. Nur eine **negative** Antwort war unter den offenen Rückmeldungen enthalten, in der eine Lehrkraft erklärte: *„Die Sensoren sind völliger Müll! Der gesunde Menschenverstand leitet einen verantwortungsbewussten Bürger zum Lüften an!!!“*

#### 5.2.4.2 Der Zeitpunkt der natürlichen Belüftung

Auf die Frage, wie Lehrkräfte den Zeitpunkt der natürlichen Lüftung bestimmten, wurden einige Standardantworten angeboten, darunter *„Sensor mit numerischer Anzeige“*, *„Ampel“*, *„Leitfaden“* usw. Zusätzlich zu diesen vorgegebenen Antwortmöglichkeiten konnten die LuL weitere Kommentare hinzufügen, die überwiegend positiv waren. Ein Lehrkörper antwortete, dass er/sie *„ein Projekt zum CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft mit einem mobilen Gerät durchgeführt hat“*. Einige LuL erwähnten auch ihr eigenes persönliches CO<sub>2</sub>-Messgerät mit akustischem Signal bei bestimmten CO<sub>2</sub>-Grenzwerten, um ihnen beim besseren Lüften zu helfen.

Die Rolle der SuS wurde in dem Sinne hervorgehoben, dass *„die Wünsche der SuS“* oft eine Rolle spielten und dass *„die SuS manchmal auf den Sensor schauten und gelegentlich daran erinnerten, zu lüften“*. Auch das Bewusstsein dafür, dass frische Luft wichtig und gesund ist, hat geholfen, und dass ein *„Klassendienst“* eingeführt wurde, um die Verantwortung für das Belüften zu delegieren. Einige sagten, dass sie keine zusätzliche Erinnerung bräuchten, da sie *„es gewohnt sind zu lüften“* oder *„den ganzen Tag“*, *„das ganze Jahr über“* lüften. *„fast ständig, auch ohne Messgerät, solange die SuS es aushalten“*. Nur eine Person schrieb (0,17 %), dass *„diese Sensoren unnötig sind“* und dass er/sie möchte, dass sie entfernt werden.

Ein wichtiger Hinweis war, dass jede neue Lehrperson, die an der Schule unterrichtet, *„nicht unbedingt mit den Grenzwerten usw. vertraut ist“*, was die Notwendigkeit regelmäßiger Informationsveranstaltungen oder die Bereitstellung von Material zur Information über sensorgestützte Belüftung und die Auswirkungen von Innenraumluftqualität auf Gesundheit und Wohlbefinden der Raumnutzer deutlich macht.

#### 5.2.4.3 Zusätzliche Ideen zur Unterstützung der Belüftung

Eine Reihe von Vorschlägen wurde von den Befragten gemacht, um besseres Lüftungsverhalten zu unterstützen: darunter Videoseminare, ein Timer mit zusätzlichen Ratschlägen oder ein Besuch von Expert\*innen. Einige antworteten bereits, dass *„sie den CO<sub>2</sub>-Sensor mit Anzeige für hilfreich genug hielten“*, aber einige bemerkten auch, dass *„man als Klassenmitglied die schlechte Luft erst spät bemerkt“*, weshalb einige zusätzliche Maßnahmen hilfreich wären. Die vorgeschlagenen Ideen lassen sich in solche kategorisieren, die sich leicht umsetzen lassen, und solche, die schwieriger zu ändern sind.

Aspekte, die sich **leichter** ändern lassen und von den Lehrkräften genannt wurden, waren: *„reparierte Fenster“*; *„Einführung einer automatischen Ansage oder einer regelmäßigen Erinnerung, wann während des Unterrichts gelüftet werden muss“*; *„möglicherweise ein Wecker oder ähnliches“*; *„Installation von CO<sub>2</sub>-Sensoren in allen Klassenzimmern“*. Die Lehrkräfte in Klassenräumen ohne sichtbare Anzeige am Sensor (d. h. K-Klassen) berichteten, dass sie sich einen voll funktionsfähigen Sensor in ihren Räumen wünschen<sup>29</sup>. Auch im Zusammenhang mit der Schulleitung berichteten einige, dass *„es in einigen Klassen Lüftungssysteme gibt, von denen niemand weiß, ob sie überhaupt funktionieren“*, und dass diese *„völlig ineffektiv“* sind. Einige wünschten sich die *„Möglichkeit, nachts kühle Luft in die Räume zu lassen“*. Schließlich, aber nicht weniger wichtig, wünschten sich die LuL, dass die SuS in der Klasse an das Lüften erinnert werden und dass sie *„aktiv einbezogen werden“*.

**Schwieriger** und teurer umzusetzen sind Wünsche, die bauliche Veränderungen betreffen, wie zum Beispiel: *„mehr und größere Fenster“* oder *„Fenster, die sich öffnen lassen“*, *„reparierte Fenster“* und *„die Möglichkeit, Querlüftung zu schaffen“*. Noch teurer (und/oder logistisch komplexer) ist die von zwei LuL gewünschte Installation *„mechanischer Lüftungssysteme“*, oder die Bereitstellung eines *„grundlegend besseren Raumklimas“* (z.B. durch thermische Sanierung oder effizientere Dämmung, um 35°C oder mehr im Klassenzimmer zu vermeiden). Einige LuL wünschten sich auch eine *„geringere Anzahl von SuS pro Klassenzimmer“* als Mittel zur Verbesserung der Luftqualität.

Einige wünschten sich *„einfach eine Lüftung, ohne dass die SuS dabei erfrieren“*, *„eine Lüftung ohne Straßenlärm oder Lärm von draußen“*, erkannten aber auch, dass es *„sehr schwierig ist, Aspekte im Zusammenhang mit Lärm zu ändern“* und dass es *„manchmal sogar unmöglich ist, im Sommer die Fenster zu öffnen, weil es draußen zu laut ist“*. Einige LuL äußerten sich sehr positiv und meinten, dass *„es mit dem Sensor sehr gut funktioniert“*, dass sie nun *„die Rolle des Lüftungsbeauftragten“* in der Klasse eingeführt haben und dass *„es toll wäre, wenn ein solches Gerät (mit einem visuellen Display) in allen Klassen vorhanden wäre“*. Dennoch schien das Lüften ein emotionales Thema zu sein, was sich auch in zwei Antworten in diesem Abschnitt zeigte. Eine Person schrieb, dass diese möglichen Antworten *„als Affront“* empfunden wurden und dass sie allerdings *„erwachsen genug sind, um mit Hilfe der Sensoranzeige angemessen zu lüften“*. Eine andere Person schrieb, dass sie eher *„Überstunden bezahlt bekommen müssen“* und dass sie keine *„technischen Lösungen für die Belüftung!“* benötigen.

---

<sup>29</sup> Man beachte, dass nach Abschluss des Projekts (September 2024) alle Kontrollsensoren mit deaktivierten Anzeigen eingeschaltet wurden.



#### 5.2.4.4 CO<sub>2</sub>-Beauftragter im Klassenzimmer

In der letzten (Sommer-) Umfrage gaben über 90 % aller antwortenden LuL an, dass sie einen CO<sub>2</sub>-Beauftragten in der Klasse haben. Dies wurde von einigen näher erläutert. Die Anzahl der helfenden SuS reichte von einer einzelnen Person über zwei oder drei Personen bis hin zur gesamten Klasse. In einigen Klassen wird diese Person zu Beginn des Schuljahres ernannt und ist dafür verantwortlich, die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu überwachen und entweder die LuL zu informieren oder das Klassenzimmer entsprechend zu lüften. Manche berichteten auch von „Energiebeauftragten in jeder Klasse“, die auch die Belüftung übernehmen. In einem Beispiel, in dem (laut Klassenordnung) zwei SuS pro Klasse bevollmächtigte Vertreter\*innen waren, wurde sogar eine entsprechende Schulung angeboten. Insbesondere ein sogenannte(r) „Klassen-Präsident\*in der Woche“ (welche(r) auch für den Tafel- und Verteilerdienst usw. zuständig war) wurde als gute Möglichkeit angesehen, den CO<sub>2</sub>-Wert im Auge zu behalten.

Was die Auswahl der SuS betrifft, so war es in einigen Klassen einfach „das Paar, das am nächsten am Messgerät sitzt“, das „die Aufgabe hat, auf den Bildschirm zu achten und gegebenenfalls den LuL zu alarmieren, wenn gelüftet werden muss“. Ähnlich wurden manchmal die Schülerinnen in der ersten Reihe mit der Verantwortung fürs Lüften betraut und „wiesen den LuL darauf hin, wenn der Wert über 1000 ppm stieg“ oder „wenn das Gerät blinkte“, da LuL dies oft nicht sofort sehen konnten, weil sie mit dem Rücken zum Gerät standen.

#### 5.2.4.5 Häufige Schwierigkeiten bei der Verwendung eines Sensors

In Bezug auf die Schwierigkeiten, in den Sommermonaten zu lüften, wurden in den meisten Antworten Lärm, Außen- und Innentemperaturen genannt und dass, obwohl einige gerne öfter lüften würden, dies „aufgrund des Lärms“ auf der Straße, auf dem Schulhof usw. nicht immer möglich war, sodass sie nur manchmal den richtigen Wert erreichten.

Trotz regelmäßiger Lüftung zeigten sich einige Befragte frustriert, da sie anscheinend nicht in der Lage waren, hohe CO<sub>2</sub>-Werte zu verhindern, und berichteten, dass „die Werte in unserem Gebäude ständig zu hoch sind“ und „trotz regelmäßiger und ordnungsgemäßer Lüftung die empfohlenen Werte nicht eingehalten werden können“. Trotz Sensoren und offener Fenster konnten sie den erforderlichen Wert nicht erreichen, „weil 1) keine Querlüftung möglich ist und 2) die Fensteröffnungen zu klein sind“.

Einige gaben an, dass „die Sensoren nicht funktionierten“ (bei denen in den Kontrollräumen waren die Anzeigen während der Studie ausgeschaltet)<sup>25</sup>, und dass sie sie deshalb nicht bemerkten und ihnen keine Aufmerksamkeit schenkten. Die LuL stellten auch fest, dass die SuS gerne mit den Sensoren spielten (indem sie hinein atmeten oder rülpsten). Einige verwiesen auf die Größe der Sensoranzeige und kommentierten, dass sie „zu klein war, um aufzufallen“ und dass sie größer sein müsste, um den Wert zu sehen. Eine Person äußerte ihren Unmut, indem sie erklärte, der „Sensor sei nervig“ und sie hätte „keine Zeit, immer an den Sensor zu denken“. Es wurde auf die Bedeutung des fehlenden

Trainings hingewiesen und darauf, dass einige keine „Anleitung erhalten haben“ und dass „Training gewünscht wurde oder fehlte“<sup>30</sup>.

#### 5.2.4.6 Zusätzliche Kommentare – Sommerumfrage

In diesem Abschnitt wurde eine große Anzahl (>50) sehr positiver Kommentare erwähnt. Zunächst einmal wurde berichtet, dass der Sensor „ein guter Indikator dafür ist, wann es Zeit ist, den Raum richtig zu lüften“. Darüber hinaus gab es folgende Antworten: „Der Sensor ist leicht zu verstehen“, „hilfreich“, „gute Idee“, „großartige Unterstützung“ und hilft dabei, „richtig zu lüften“, „es ist großartig“, er ist „mit einem Gefühl des Wohlbefindens verbunden“, er gibt einigen ein „gutes Gefühl, wenn sie den Raum lüften“.

Insgesamt gaben viele an, dass „alles gut funktioniert“ und dass es „ein großartiges Gerät“ ist und dass sie sich auch in Zukunft an das etablierte System der Sensorkontrolle und Lüftung halten werden. Viele sagten auch, dass „die SuS es ständig überprüfen und Alarm schlagen“, wenn der Sensor beispielsweise rot leuchtet. In einigen Fällen gaben LuL an, dass ihnen bereits eine einzige Nutzung geholfen habe, sich sofort anzupassen und die Lüftung richtig durchzuführen.

Das ImpAQS-Projektteam versuchte nicht, in das Lüftungsverhalten einzugreifen oder Schulpersonal zu schulen (abgesehen von den beiden an der Wand befestigten Postern<sup>27</sup>), und es ist daher nicht verwunderlich, dass einige berichteten, dass sie „sich fragen, was die Zahl bedeutet“ und dass sie „irgendwelche Anweisungen“ vermissen und dass ihnen „der Zweck des CO<sub>2</sub>-Sensors nie erklärt“ wurde.

Viele äußerten sich (wie im vorhergehenden Abschnitt erwähnt) enttäuscht darüber, dass die Zielwerte nicht erreicht wurden. Der CO<sub>2</sub>-Sensor funktioniert, „aber es gibt keine Verbesserung der Werte trotz Belüftung“; und dass die „Werte auf einem schlechten Niveau stagnieren“, obwohl gelüftet wird. Oder dass die Raumaufteilung und Fensterkonfiguration nicht hilfreich sind, da „der Sensor nur dann hilfreich ist, wenn man ausreichend lüften kann“. Einige sagten, dass sie gerne lüften würden, weil sie frische Luft für wichtig halten, aber eine Person schrieb, dass „das große Problem in der Schule ist der Bau des ‚neuen Gebäudes‘“ sei, der ‚im Sommer als unerträglich heiß beschrieben wurde‘ (trotz offener Fenster und Türen) und der Lärm vom Sportplatz). Dieses Problem wurde durch den Lärm vom Sportplatz verschärft, der das Lüften verhinderte. Andere schrieben, dass „im Klassenzimmer immer mindestens ein Fenster offen sein“ müsse, nur dann würden die „Zahlen auf dem Sensor passen“.

Es ist kein Wunder, dass es für einige LuL „stressig ist“, zu sehen, dass sie „immer über dem empfohlenen Bereich“ liegen, selbst wenn sie viel lüften. Einige sagen, dass die „Werte sie immer schockieren“ und dass sie das Gefühl haben, dass der Sensor ihnen zeigt, dass sie „keine Chance“ haben, weil z. B. „der Raum zu klein ist“. Um eine Antwort hervorzuheben: „Die Luft wird extrem schnell schlecht. Selbst wenn ich allein im Klassenzimmer bin, steigt der Sensor oft auf über 500,

---

<sup>30</sup> Bei der Konzeption des ImpAQS-Projekts wurde die Idee von Lüftungs- und Sensorenschulungen mit dem BMBWF besprochen (als Mittel zur Maximierung der Beteiligung der Lehrkräfte), jedoch wurde dies als zu zeitaufwändig für die Lehrkräfte angesehen und daher weggelassen.

*obwohl ich normalerweise mit 430–450 beginne. Sobald die ersten SuS den Klassenraum betreten, steigt der Sensorwert rapide an, sodass ich sofort mit dem Lüften beginne.“*

Einige hatten das Gefühl, etwas verpasst zu haben, und dass sie *„gerne eine gute Luftqualität im Klassenzimmer hätten“* und dafür den sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensor verwenden würden, aber dass sie das *„Modell hatten, das nichts anzeigte“*<sup>26</sup>. In Abwesenheit einer sichtbaren Anzeige schreiben einige, dass sie sich auf ihren Instinkt verlassen, da ihr *„Sensor nichts im Klassenzimmer anzeigt“*. Dennoch kann ein starkes Engagement für das Lüften festgestellt werden, da sie (trotz fehlender sichtbarer Anzeigen) berichten, dass im Sommer während des Unterrichts *„immer mindestens ein Fenster vollständig geöffnet ist und manchmal sogar die Tür offensteht, um einen Luftzug hereinzulassen“*. Im Winter kann es vorkommen, dass sie erst lüften, wenn die Luft bereits sehr abgestanden ist, oder dass sie Regeln aufstellen, wie z. B. *„jede Stunde zu lüften, wenn es draußen kalt ist“*.

Einige waren sehr pragmatisch und gaben an, dass sie den Sensor *„fast stündlich nach dem Zufallsprinzip“* überprüfen und *„wenn der Messwert hoch ist“*, lüften sie und dass *„der CO<sub>2</sub>-Sensor dabei hilft, den spätesten Zeitpunkt zum Lüften zu erkennen“*. Einige LuL haben ihr eigenes zusätzliches Messgerät, das sie mitbringen. Es herrscht die Meinung vor, dass Lüften wichtig und *„somit selbstverständlich“* ist, was dazu führt, dass viele *„sehr oft lüften“* und Fenster beispielsweise nur aus Sicherheitsgründen oder bei Kälte oder Lärm draußen schließen.

LuL waren sich auch einig, dass ein wesentliches übergeordnetes Argument für den Einsatz eines CO<sub>2</sub>-Sensors darin besteht, *„Akzeptanz für mehr Lüften zu schaffen“* und *„das Bewusstsein zu schärfen“*, aber auch, dass er *„mit dem Temperatur-“* oder Energieproblem *„kollidiert“*. SuS sind gelegentlich nicht bereit zu lüften, wenn es draußen kühl ist, weisen paradoxerweise aber dennoch darauf hin, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu hoch ist.

Zwei LuL wünschten sich Sensoren mit größeren Displays und waren der Meinung, dass der aktuelle Sensor zu unauffällig ist und sie ihn daher nicht genug bemerken. Einige beklagten sich auch darüber, dass der Sensor oft *„sehr verzögerte Messwerte“* liefert<sup>31</sup>.

Auf der negativen Seite sagte ein Lehrkörper, er/sie sei *„der Meinung, dass diese Studie Zeitverschwendung ist! Es führt kein Weg an einer automatischen Belüftung der Räume vorbei, und genau das wird diese Studie hervorbringen!“* Eine andere Person schrieb: *„Leider wird sie an der Finanzierung scheitern und alle Schulen, vor allem aber die Privatschulen, werden in dieser Frage so weitermachen wie bisher.“*

Insgesamt ist die Lüftung von Klassenräumen ein polarisierendes Thema und einige Lehrkräfte zeigen sich eindeutig skeptisch, ob die Studie zu einer sinnvollen Veränderung beitragen wird. Die überwiegende Mehrheit der Antworten war jedoch sehr positiv, wobei die LuL die Installation der Geräte begrüßten und funktionierende Sensoren forderten (in den Räumen ohne sichtbare Anzeige) Im Allgemeinen wurden CO<sub>2</sub>-Sensoren in allen Klassenzimmern gewünscht, zusammen mit weiterer Schulung und fachliche Unterstützung.

---

<sup>31</sup> Die CO<sub>2</sub>-Sensoren waren so eingestellt, dass sie alle zwei Minuten neue Messwerte liefern, jedoch bedeutet die Position des Sensors (abseits der Fenster) an einer Innenwand, dass es manchmal ein paar Minuten dauern kann, bis sich die Raumluft mit frischer Luft vermischt und dies vom Sensor erfasst wird.

### 5.3 Zusammenfassung und Konsolidierung der Ergebnisse der qualitativen Analyse

Bei der Betrachtung der Unterschiede zwischen der Winter- und der Sommerumfrage unter Lehrkräften gaben etwa nahezu gleich viele LuL an, dass die Temperaturen beim Lüften oft zu niedrig oder zu warm seien (in 2023: 31,5 %; in 2204: 29,1 %).

Was Zugluft betrifft, gaben in der Sommerumfrage unter Lehrkräften mehr Menschen (32,9 %) an, dass sie keine Zugluft spüren, verglichen mit der Winterumfrage (23,2 %). Ein deutlich größerer Prozentsatz würde im Sommer etwas oder mehr Luftbewegung bevorzugen (61,2 %) im Vergleich zum Winter (33,6 %). Lärm wird im Sommer als größeres Problem wahrgenommen, wobei 52,7 % im Sommer durch Außenlärm gestört werden, verglichen mit 42,8 % im Winter. Probleme mit der Konzentration der SuS während des Lüftens schienen in den Sommermonaten geringer zu sein, wobei 20,9 % der Lehrkräfte angaben, dass SuS Konzentrationsschwierigkeiten hatten, verglichen mit 28,0 % im Winter.

Während im Winter die Temperaturen in den Klassenräumen gleichzeitig als zu warm (36,8 %) und zu kalt (38 %) gemeldet wurden, gaben im Sommer fast 60 % der Befragten an, dass die Temperaturen zu warm seien. Mehr LuL betrachteten Lärm im Sommer als Problem (Winter: 46,8 %, Sommer: 59,5 %), jedoch wurden weniger Probleme im Zusammenhang mit Zugluft genannt (Winter: 30,6 %; Sommer: 14,7 %). Die Außenluftverschmutzung wurde weder im Sommer noch im Winter als Hindernis für die Belüftung angesehen (in beiden Fällen sahen etwa 6 % der Lehrkräfte dies als Problem). Bei der Sommerumfrage gaben etwa halb so viele Lehrkräfte an, dass ihre SuS im Sommer (15,6 %) durch die Lüftungspraktiken gestört werden, im Vergleich zum Winter (29 %). Umgekehrt berichteten (während der Winterumfrage) fast doppelt so viele LuL, dass Lüften im Winter (20,4 %) *„ablenkt und unangenehm ist“* im Vergleich zum Sommer (11,7 %).

Es gibt zwischen den beiden Umfragen keinen Unterschied in der Reihenfolge dessen, was LuL helfen könnte, besser zu lüften. Die meisten (etwa ein Drittel) wählten in der Winter- und Sommerumfrage einen CO<sub>2</sub>-Sensor mit einer numerischer Anzeige. Etwa ein Viertel wählte einen CO<sub>2</sub> mit einer numerischer Anzeige und einer Ampelanzeige (d.h. einen RAG-Indikator).

In Bezug auf das, was ihnen helfen würde oder könnte, in Zukunft besser zu lüften, gibt es keinen qualitativen Unterschied zwischen den saisonalen Umfragen. Viele LuL wünschen sich einen Alarm oder eine Zeitangabe, die sie daran erinnert, wann sie lüften müssen. Im Sommer (71,9 %) konnten mehr LuL die empfohlenen CO<sub>2</sub>-Werte einhalten („immer“ oder „oft“) (Frage 15) Im Vergleich zum Winter (50,2 %) (Frage 11). Was die Schwierigkeit des Lüftens mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>-Sensors betrifft (Frage 12 im Winter und Frage 16 im Sommer), fanden weniger Personen es im Winter schwierig zu lüften (13,5 % im Vergleich zu 17,8 % im Sommer). Aber auch weniger Personen fanden es im Winter einfacher zu lüften (63,1 % im Vergleich zu 70,9 % im Sommer).

Dieser scheinbare Widerspruch verdeutlicht das Dilemma, dass es einerseits im Winter aufgrund des temperaturabhängigen Luftdruckunterschieds einfacher ist, niedrigere CO<sub>2</sub>-Werte zu erreichen, aber gleichzeitig herausfordernder ist, den thermischen Komfort aufrechtzuerhalten. Bei den Fragen zur technologischen Anpassung schienen in der zweiten Umfrage weniger Menschen Schwierigkeiten bei der Nutzung des CO<sub>2</sub>-Sensors zu haben (im Winter: 63,5 % und im Sommer: 73,8 % haben keine Schwierigkeiten), was darauf hindeutet, dass die Vertrautheit mit den CO<sub>2</sub>-Sensoren und den Lüftungsanleitungen zugenommen hat. Ebenso schienen weniger LuL Probleme mit dem Sensor zu

haben (im Winter: 51,1 % und im Sommer: 60,2 %), sodass sich mit der Zeit fast 10 % mehr der teilnehmenden Lehrkräfte an den Sensor im Raum gewöhnt hatten.

In Bezug auf den Unterschied bei den zusätzlichen Kommentaren (d.h. offene textbasierte Antworten), berichteten viele Lehrkräfte in der Winterumfrage, dass auf Basis des gesunden Menschenverstands und dem eigenen Gefühl gelüftet wurde (anstatt den Sensor zu verwenden). In der zweiten (Sommer-)Umfrage war der Wunsch nach einem Signal, einem Timer usw. zum Lüften deutlich zu erkennen. Außerdem scheint ein großer Prozentsatz der Klassen seit der ersten Umfrage freiwillig einen CO<sub>2</sub>-Champion ernannt zu haben, der die Klasse ans Lüften erinnert. In der ersten (Winter-)Umfrage wurde mehrfach das Missverständnis erwähnt, dass man sich (durch kalte Luft) erkälten würde. Dass dies in der zweiten Umfrage nicht erwähnt wurde, könnte mit den gestiegenen Außentemperaturen im Sommer oder einem verbesserten Bewusstsein in Bezug auf gesundheits- und luftqualitätsbezogene Themen zusammenhängen. Probleme in Verbindung mit der Bildung und Bewusstsein im Unterricht in Bezug auf (mangelnde) Belüftung und deren Auswirkungen auf die Gesundheit waren Aspekte, die von Lehrkräften im Abschnitt für zusätzliche Kommentare mehrfach genannt wurden.

### 5.3.1 Antwort auf die Forschungsfrage 5

In diesem Abschnitt sollte primär die **Forschungsfrage 5** beantwortet und *weitere qualitative Belege zur Unterstützung von Forschungsfrage 2* vorgelegt werden. In Bezug auf **Forschungsfrage 5** zeigten die Ergebnisse, dass 99 % aller Schulleiter\*innen entweder einen potenziellen oder einen sehr positiven Effekt in der Einführung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und Lüftungsanleitungen in Klassenzimmern sehen. Schulleiter\*innen von Volks- und Mittelschulen waren in Bezug auf die Einführung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und Anweisungen zu deren Verwendung zur Verbesserung der Raumluftqualität in Klassenzimmern am positivsten eingestellt. Als Hauptgründe für das Lüften wurden die Verringerung des Risikos der Übertragung von Viraerosepartikeln und anderen Luftschadstoffen in Klassenzimmern, die Verbesserung der Raumluftqualität und die Leistungssteigerung der SuS genannt. Die überwältigende Mehrheit (96,3 %) aller LuL gab am Ende des Beobachtungszeitraums an, dass sie nun einen CO<sub>2</sub>-Beauftragten in der Klasse ernannt haben, der die CO<sub>2</sub>-Konzentration überwacht und dann die Lehrkraft informiert oder entsprechend lüftet. Das ist eine unglaubliche freiwillige Reaktion auf die ImpAQS-Studie. Die Hälfte aller teilnehmenden LuL ist der Meinung, dass ein CO<sub>2</sub>-Sensor und die Bereitstellung von Lüftungshinweisen eine gute Idee sind, wobei etwa 25 % zustimmen, dass ein CO<sub>2</sub>-Sensor ihnen dabei hilft, ihr Lüftungsverhalten zu verbessern. Nur eine sehr kleine Minderheit (2,1 %) aller Befragten gaben an, dass die Luftqualität in Innenräumen für sie nicht von Interesse sei. Ebenso gaben in den Textantworten nur zwei Befragte negative Kommentare ab (während die Mehrheit sehr positiv war). Diese beiden Personen berichteten, dass sie sich aufgrund praktischer und umweltbezogener Einschränkungen machtlos fühlten, ausreichende CO<sub>2</sub>-Werte aufrechtzuerhalten und die erforderlichen Ziele einzuhalten.

Was die Hindernisse betrifft, so gab etwa die Hälfte der Befragten (50,2 %) an, dass die Schulvorschriften sie daran hinderten, die Fenster zu öffnen, um Energie zu sparen. 18 % gaben an, dass sie physische Probleme hatten, die Fenster zu öffnen, während 73,8 % keine Schwierigkeiten hatten, einen Sensor zu verwenden. Temperatur und Lärm wurden als die größten Hindernisse für eine ausreichende Belüftung im Winter genannt. Auch Wind wurde als Hindernis für die Belüftung genannt. Insbesondere im Hinblick auf den thermischen Komfort (**Forschungsfrage 2**) wurden mehrfach lokale Unterschiede im thermischen Komfort innerhalb der Klassenzimmer erwähnt, wobei

SuS, die näher an den Fenstern saßen, stärker unter der Kälte litten als andere. Auch wurde festgestellt, dass Mädchen mehr unter der Kälte leiden als Jungen.

Lärm war das größte Hindernis für die Belüftung im Sommer (**Forschungsfrage 2**). Darüber hinaus erwähnten LuL häufig Probleme mit dem Bau oder der Wartung des Gebäudes, die sie daran hinderten, die Fenster vollständig zu öffnen. Die Temperatur spielte im Sommer ebenfalls eine Rolle, vor allem jedoch in der Übergangszeit oder in den wärmeren Monaten im Zusammenhang mit Überhitzung. Manche LuL und Schulleiter\*innen sahen in der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren in der Praxis ein Hindernis, insbesondere wenn sie die *Bedeutung der* Belüftung möglicherweise nicht verstanden hatten. Dieses Hindernis kann durch Sensibilisierung und Bereitstellung von Anweisungen und Schulungen für SuS und LuL überwunden werden. Einige LuL leiteten diesen Prozess im Unterricht ein, indem sie das Bewusstsein schärften und die SuS in das Lüftungsverfahren einbanden (über den CO<sub>2</sub>-Champion) oder indem sie Klassenprojekte zum Thema Luftqualität initiiert haben. Es macht jedoch keinen Sinn, Sensoren zu installieren, wenn die Menschen nicht wissen, welche CO<sub>2</sub>-Ziele erforderlich sind oder wie eine gesunde, komfortable und effiziente Belüftung erfolgen kann.

Es wurde der Ausdruck „Lüftung als Kulturtechnik“ erwähnt, was bedeutet, dass sie Teil der Identität der Menschen ist oder werden muss (d.h. kulturell akzeptiert). Dies bedeutet eine völlige Veränderung des Bewusstseins, die durch regelmäßige Informationsveranstaltungen (z. B. einmal im Jahr und/oder für neue Mitarbeitende) eingeleitet werden könnte. Kontinuierliche Schulungen und eine unabhängige Überwachung werden notwendig sein, um eine flächendeckende Einhaltung bestehender und neuer Belüftungsstandards zu gewährleisten. Solche Verfahren werden bereits in Schulen in Frankreich und anderen europäischen Ländern umgesetzt (Abschnitt 2.5.3). Die Schulung von Gebäudemanagern in mechanisch belüfteten Gebäuden sollte Aspekte wie Filterreinigung, Filterspezifikation, geeignete Lüftungsvolumenströme und Kontrollstrategien (auch während Pandemien) beinhalten. Die Schulung von LuL, die in natürlich belüfteten Gebäuden arbeiten, würde Fragen beantworten wie: warum und wie gelüftet werden soll (z.B. Kipp- versus Stoßlüftung), welche CO<sub>2</sub>-Grenzwerte angemessen sind, wie mit Zugluft umgegangen wird sowie u. a. die Vor- und Nachteile der Querlüftung von Fluren behandeln.

## 6 Diskussion

Dieser Abschnitt zielt darauf ab, die wichtigsten Ergebnisse der ImpAQS-Studie zu interpretieren und sie in Bezug auf frühere Studien und bestehende Praktiken und Standards zu kontextualisieren. Diese Synthese dient als Grundlage für umsetzbare Ergebnisse, wenn die Resultate eindeutig sind, und wenn es Unsicherheiten gibt, um Bereiche hervorzuheben, in denen möglicherweise zusätzliche Forschung erforderlich ist. Dieser Abschnitt ist in die folgenden Unterabschnitte unterteilt: Abschnitt 6.1 – Kontextualisierung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf frühere Studien und europäische Normen; Abschnitt 6.2 – Kontextualisierung der Ergebnisse in Bezug auf neu entstehende „gesundheitsbasierte“ Lüftungsrichtlinien; Abschnitt 6.3 – Kosten-Nutzen-Analyse der Verbesserung der Lüftungsstandards in Schulen; Abschnitt 6.4 – Bewertung des Nutzens von CO<sub>2</sub>-Sensoren; Abschnitt 6.4 – Berücksichtigung der Ergebnisse in Bezug auf Schadstoffe im Freien; und Abschnitt 6.5 -Kontextualisierung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf die qualitativen (Umfrage-) Ergebnisse.

### 6.1 Kontextualisierung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf frühere Studien und europäische Normen

Historische Daten zur Belüftung und Luftschadstoffsituation in österreichischen Schulen sind spärlich. In Bezug auf die wenigen Studien, die vor der Jahrtausendwende durchgeführt wurden, stellte Brandl (2001) fest, dass die Frischluft-Belüftungsrate oft mehr als eine Größenordnung unter dem erforderlichen Niveau lag. In jüngerer Zeit berichtete die europäische SINPHONIE-Studie, an der auch Österreich teilnahm, über mittlere und mediane CO<sub>2</sub>-Werte von über 1.000 ppm in den meisten europäischen Volksschulen und Kindergärten, wobei Schulen in Mittel-, Ost- und Südeuropa einen mittleren Wert von über 1.500 ppm aufwiesen (Csobod, 2014). Die Mehrheit (86 %) der Lüftungsraten in Klassenzimmern in der SINPHONIE-Studie lag unter dem (zu diesem Zeitpunkt) empfohlenen Zielwert von 4 l/(s·Person). In einer neueren Studie an 244 bayerischen Klassenzimmern (Schwarzbauer, 2022) wurden deutlich niedrigere medianen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen von 706 bzw. 776 ppm für Räume mit dezentralen bzw. zentralen Lüftungsanlagen ermittelt, während der Medianwert für natürlich belüftete Räume bei 750 ppm lag. Der Zeitpunkt der Studie von Schwarzbauer könnte jedoch die relativ niedrigen gemeldeten medianen CO<sub>2</sub>-Werte beeinflusst haben, da die Studie in der Anfangsphase der COVID-19-Pandemie durchgeführt wurde, zu einer Zeit, in der die Belüftung in Schulen besonders aufmerksam beobachtet wurde.

Die Ergebnisse der ImpAQS-Studie zeigen niedrigere mediane CO<sub>2</sub>-Werte als in der historischen österreichischen Literatur angegeben, mit einer täglichen medianen CO<sub>2</sub>-Konzentration von 1.058 ppm und einem täglichen arithmetischen Mittelwert von 1.145 ppm. Durchschnittswerte wie diese über ein ganzes Jahr können jedoch einen irreführenden Eindruck von der allgemeinen Luftqualität in Klassenzimmern vermitteln. Auf Schulebene halten nur ein Viertel (25 %) der Schulen eine ganzjährig tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 1.000 ppm ein. Im Winter ist die Situation noch viel schlimmer, da weniger als 5 % der natürlich belüfteten Schulen eine tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration unter 1.000 ppm einhalten. Darüber hinaus weisen im Winter fast ein Drittel (32,1 %) der natürlich belüfteten Klassenzimmer eine tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration über 1500 ppm auf.

In Bezug auf die Luftwechselrate ergab die ImpAQS-Studie eine mediane Luftwechselrate von 5,9 l/(s·Person), was mehr als 41 % unter dem Schwellenwert für die Einhaltung der Kategorie I der

EN 16798-1:2019 (CEN, 2019) und 36 % unter der altersbezogenen Luftstromrate (für 11- bis 18-Jährige) liegt, die in der ÖNORM H 6039:2023 (ASI, 2023) (Tab. 2-3) angegeben ist. Vielleicht noch besorgniserregender ist die Tatsache, dass in 25 % der Zeit, in den Klassenzimmern Luftwechselraten von weniger als 4 l/(s·Person) gemessen wurden, was unter der Mindestlüftungsrate (von 4 l/(s·Person) liegt, die von EN 16798-1:2019 (CEN, 2019, S. 52) (Tab.4-9) empfohlen wird. Ähnliche Werte wurden in einer Studie an 322 britischen Schulen im Herbstsemester 2023 ermittelt, bei der festgestellt wurde, dass die durchschnittliche Gesamtlüftungsrate 5,3 l/(s·Person) betrug, die bei wärmerem Wetter auf 6,8 l/(s·Person) anstieg und bei kälterem Wetter auf 3,8 l/(s·Person) fiel (Wood, 2024). Ähnlich wie das Vereinigte Königreich ist Österreich ein Land mit einem hohen Anteil an natürlich belüfteten Schulen und insgesamt unterstreichen diese Ergebnisse die Herausforderungen, die etablierten Lüftungsstandards in natürlich belüfteten Schulen während der kälteren Jahreszeiten erfüllen müssen.

Die Herausforderung, in natürlich belüfteten Schulen für eine angemessene Belüftung zu sorgen, hat noch eine weitere Dimension, und zwar die Belegungsdichte der Klassenzimmer. Im Sommer wird der tägliche mittlere Konformitätsschwellenwert (von 1000 ppm) von Schulen jeder Schulkategorie komfortabel eingehalten (zu 91 % der Zeit oder mehr) (Anhang, Tab. A-9). Diese Situation ändert sich im Herbst merklich, wenn der tägliche mittlere Schwellenwert von der Mehrheit der Schularten mit Ausnahme von Sonderschulen (SS) überschritten wird. Im Winter können die natürlich belüfteten Sonderschulen<sup>32</sup> den Grenzwert von 1000 ppm immer noch in der Mehrzahl der Fälle (82 %) einhalten, während alle anderen natürlich belüfteten Schularten diesen Grenzwert durchweg überschreiten. Ein Grund dafür, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den SS-Schulen niedriger waren, könnte darin liegen, dass ihre durchschnittliche Fläche pro Person (5,26 m<sup>2</sup>/SuS) im Vergleich zu allen anderen Schularten (kombinierter Mittelwert 2,89 m<sup>2</sup>/SuS) deutlich höher ist. Insgesamt liegt die durchschnittliche räumliche Dichte pro SuS in der ImpAQS-Studie 20 % über dem europäischen Durchschnittswert (von 2,44 m<sup>2</sup>/SuS), der im SINPHONIE-Projekt (Csobod et al., 2014) angegeben wurde. Ähnliche Ergebnisse zum Einfluss der Belegungsdichte von Klassenzimmern auf die resultierende CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen und die Luftströmungsraten in natürlich belüfteten Klassenzimmern wurden bereits in anderen Studien berichtet (Laiman, 2014).

Mechanisch belüftete Schulen schnitten insgesamt besser ab als natürlich belüftete Schulen, und dieses Ergebnis stimmt mit anderen ähnlichen Studien überein (Gao et al., 2014; Schwarzbauer, 2021; Buonanno, 2022). Die ganzjährige mediane Belüftungsrate für natürlich belüftete Schulen von 5,6 l/(s·Person) ist 44 % geringer als für mechanisch belüftete Schulen (10,0 l/(s·Person)) (Tab. 4-14). Dieser Unterschied ist im Winter noch ausgeprägter, wenn die mediane Luftstromrate in natürlich belüfteten Schulen (4,4 l/(s·Person)) fast halb so hoch ist wie die mediane Luftstromrate in mechanisch belüfteten Schulen (9,3 l/(s·Person)).

Basierend auf der täglichen arithmetischen mittleren Luftstromrate (10,5 l/(s·Person)) entsprechen die mechanischen Systeme im Durchschnitt der Kategorie 1 der EN 16798-1:2019 (10 l/(s·Person)) (CEN, 2019), und dem gesetzlichen Mindestwert der österreichischen Arbeitsstättenverordnung (AStV) (von 9,7 l/(s·Person)) (RIS, 2024a). Die mittlere Luftstromrate der mechanischen Lüftungen liegt ebenfalls über den Anforderungen der ÖNORM H 6039:2023 (9,2 l/(s·Person)) für 11- bis 18-

---

<sup>32</sup> Man beachte, dass bei der Interpretation dieses Ergebnisses Vorsicht geboten ist, da nur zwei Schulen der Kategorie SS in die Studie einbezogen wurden.



Jährige (ASI, 2023), diese Bewertung bedeutet jedoch nicht, dass der Standard in allen mechanisch belüfteten Schulen durchgängig eingehalten wird.

Auf Schulebene betrachtet halten 82 % der mechanisch belüfteten Schulen das ganze Jahr über eine tägliche mittlere CO<sub>2</sub>-Konzentration von unter 1000 ppm ein, während nur 18 % der natürlich belüfteten Schulen diesen Wert unterschreiten. In Kombination gelingt es nur einem Viertel (25 %) aller Schulen, einen täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Wert ganzjährig unter 1000 ppm einzuhalten. Im Winter ist die Situation noch schlimmer: Weniger als 12 % der Schulen melden einen täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Wert unter 1000 ppm, während mehr als ein Viertel (29 %) aller Schulen einen täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Wert über 1500 ppm aufweisen (Table 4-10 and 4-11).

## 6.2 Berücksichtigung der Ergebnisse im Zusammenhang mit der neuen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsrichtlinie

Die Luft gilt als einer der wichtigsten Übertragungswege, über die SARS-CoV-2 (Jiminez, 2020; Nazaroff, 2022; Greenhalgh et al., 2022) und viele andere weit verbreitete Viren, darunter Influenza (Hanna et al., 2023), Tuberkulose, Masern und Windpocken (Tellier et al., 2019), übertragen werden. Darüber hinaus wird die Wahrscheinlichkeit, dass in den kommenden Jahrzehnten weitere luftübertragene Pandemien auftreten, voraussichtlich zunehmen (Everard et al., 2020; Mishra et al., 2021; Williams et al., 2023), was darauf hindeutet, dass es von klarem Vorteil ist, die prophylaktische Rolle zu berücksichtigen, die die Belüftung bei der Reduzierung der Übertragung von Krankheitserregern durch die Luft in Schulen (Abschnitt 4.5) und anderen öffentlichen Räumen spielen kann. Als Reaktion auf dieses Bewusstsein haben europäische und internationale Organisationen (darunter ASHRAE, REHVA und The Lancet) „gesundheitsbasierte“ Lüftungsmethoden vorgeschlagen, um die Ausbreitung von Krankheiten über die Luft in Innenräumen einzudämmen. Diese Strategien beinhalten in der Regel die Einhaltung von CO<sub>2</sub>-Zielwerten im Bereich von 800 ppm oder weniger (REHVA, 2022) oder Lüftungsraten, die 14 l/(s·Person) (The Lancet COVID-19 Commission, 2022) und bis zu 20 l/(s·Person) (ASHRAE, 2023) für Klassenzimmer entsprechen. Diese Strategien können entweder reaktiv im Rahmen eines Infektionsrisikomanagements (IRMM) (d. h. als Reaktion auf eine Pandemiewelle oder einen Krankheitsausbruch) angewendet werden, wie es ASHRAE Standard 241 befürwortet (ASHRAE, 2023), oder proaktiv (d. h. jederzeit), wie es REHVA (2022) und die Lancet COVID-19 Commission (2022) vorschlagen.

Die in dieser Studie (Abschnitt 4.5) aufgeführten Beispiele für das Infektionsrisiko durch die Luft zeigen, wie wichtig die Belüftung im Hinblick auf die Reduzierung der Übertragung von SARS-Cov-2 über große Entfernungen ist. Dabei entspricht für das angeführte Klassenraum-Beispiel (Abschnitt 4.5.1) eine Luftstromrate von 4 l/(s·Person) der IEQ-Kategorie 3 der EN 16798.1:2019 (CEN, 2019) und würde nach 6 Stunden Exposition zu einem theoretischen Gruppeninfektionsrisiko von etwa 74 % führen. Bei einer Luftstromrate von 7 l/(s·Person), was der IEQ-Kategorie 2 entspricht, wird das Risiko auf 60 % reduziert. Bei 10 l/(s·Person), was der IEQ-Kategorie 1 entspricht, wird das Risiko weiter auf 50 % reduziert. Im Vergleich dazu senkt die Empfehlung der Lancet-Kommission für nicht-infektiöse Luftzufuhrraten (NADR) von 14 l/(s·Person) (The Lancet COVID-19 Commission, 2022) das Gruppeninfektionsrisiko auf 43 %, während die Empfehlung des ASHRAE-Standards 241:2023 zur Kontrolle infektiöser Aerosole von 20 l/(s·Person) (ASHRAE, 2023) das Risiko einer Übertragung über große Entfernungen auf 32 % senkt.

Die in der ImpAQS-Studie ermittelte jährliche mediane Lüftungsrate betrug 5,9 l/(s·Person), was fast 58 % weniger ist als die von der Lancet COVID-19 Commission (2022) empfohlene nicht-infektiöse Luftzufuhrate (NADR) und ist um mehr als zwei Drittel unter dem von ASHRAE Standard 241:2023 (ASHRAE, 2023) empfohlenen Wert zur Eindämmung der Ausbreitung von durch die Luft übertragenen Krankheiten in Klassenzimmern. Im Winter, wenn die Virenlast in der Raumluft in der Regel höher ist, ist die Situation noch schlimmer, mit einer in dieser Studie ermittelten medianen Lüftungsrate von 4,7 l/(s·Person), was etwa einem Drittel der von REHVA (2022) und der Lancet COVID-19 Commission (2022) empfohlenen Luftstromrate und weniger als einem Viertel der von ASHRAE (2023) empfohlenen Rate entspricht. Zu dieser kritischen Jahreszeit wurde in einem Viertel der Kernbetriebszeit in Klassenzimmern eine Belüftungsrate von 3,4 l/(s·Person) oder weniger festgestellt (Tab. 4-13). Dies bedeutet, dass das Risiko einer SARS-CoV-2-Infektion über die Luft fast doppelt so hoch ist wie in einem identischen Klassenzimmer, das gemäß der Empfehlung der Lancet Commission für nichtinfektiöse Luftzufuhraten (NADR) von 14 l/(s·Person) oder den REHVA-Richtlinien (2022) betrieben wird.

In Bezug auf die Einhaltung zeitgemäßer „gesundheitsbasierten“ Zielwerte für die Belüftung würden über 90 % der österreichischen Schulen die entsprechenden Richtlinien nicht einhalten (einschließlich des BMK-Ziels der Klasse A+ (BMK, 2024b) oder des gesundheitsbasierten REHVA-Ziels von 800 ppm (REHVA, 2022) oder die von der Lancet-Kommission empfohlene tägliche Belüftungsrate von 14 l/(s·Person) (The Lancet COVID-19 Commission, 2022) (Tab. 4-10)). Im Winter steigt dieser Wert auf über 96 %, was darauf hindeutet, dass weniger als 4 % der österreichischen Schulen in der Lage sind, die aktuellen „gesundheitsbezogenen“ Lüftungsziele ganzjährig einzuhalten (Tab. 4-11).

Obwohl die Situation in mechanisch belüfteten Klassenzimmern besser ist als in natürlich belüfteten Räumen, erreichten nur 30 % der mechanisch belüfteten Schulen im Winter einen mittleren CO<sub>2</sub>-Wert von unter 800 ppm. Obwohl es derzeit keine gesetzliche Verpflichtung dazu gibt, empfehlen die „gesundheitsbasierten“ Leitlinien von REHVA (2022) und The Lancet Covid-19 Commission (2022), solche Werte als Prophylaxemaßnahme beizubehalten, um die Übertragung von saisonalen Krankheiten und wiederkehrenden Viren wie SARS-CoV-2 einzudämmen. Diese Erkenntnis deutet darauf hin, dass entweder nicht alle Schulen sich der Bedeutung der Einhaltung „gesundheitsbasierter“ Lüftungsziele bewusst sind oder dass andere Gründe (z. B. zu kleine Systeme, interne Richtlinien usw.) sie daran hindern, diese Maßnahmen umzusetzen. Klare betriebliche Leitlinien, die auf nationaler (oder regionaler) Ebene erlassen werden, in Verbindung mit regelmäßigen Inspektionen der mechanischen Systeme würden dazu beitragen, die in einigen mechanisch belüfteten Schulen festgestellten Leistungsunterschiede zu vermeiden.

Ob ein Raum mechanisch belüftet wird oder nicht und nach welchem Standard, spielt eine indirekte Rolle bei der daraus resultierenden Wahrscheinlichkeit einer Infektion durch die Luft. Basierend auf den in dieser Studie beobachteten Belüftungsraten wiesen mechanisch belüftete Klassenzimmer ein um 12 % geringeres durchschnittliches Infektionsrisiko durch die Luft auf als natürlich belüftete Klassenzimmer (Tab. 4-23). Der genaue Nutzen eines mechanischen Belüftungssystems zur Eindämmung der Übertragung von Virus aerosolen hängt jedoch nicht nur von der Einhaltung der jeweiligen Standards für die Luftstromrate ab, sondern auch von der spezifischen Gestaltung des Belüftungssystems in Bezug auf seine Effizienz bei der Entfernung von schwebenden Aerosolen aus der Luft (Pollozhani, 2024; Zabihi, 2024). Zum Beispiel können vertikale Verdrängungslüftungssysteme und/oder Hauben-Absaugsysteme bei einem bestimmten Volumenstrom eine deutlich höhere Effizienz bei der Entfernung von Aerosolen aufweisen. Dies ist ein Bereich, in dem es bei der

Gestaltung von Belüftungssystemen für Klassenzimmer in Schulen noch viel Raum für Verbesserungen gibt und dies sollte eine politische Priorität im Hinblick auf die Verbesserung der öffentlichen Gesundheit und das Management zukünftiger Pandemien sein.

Die Belegungsdichte und Überbelegung spielen bekanntermaßen eine Schlüsselrolle bei der Ausbreitung von Infektionskrankheiten (von Seidlein et al., 2020; Herath et al., 2024). In diesem Zusammenhang ist es bemerkenswert, dass die Sonderschulen (SS) in dieser Studie eine viel geringere Belegungsdichte aufweisen als die anderen Schularten (Abschnitte 4.2.1.7). Daher wiesen diese Schulen, obwohl sie natürlich belüftet wurden, einige der niedrigsten medianen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (Abschnitt 4.2.2) und höchsten medianen Lüftungsraten (Abschnitt 4.2.3) auf, die in der Studie erfasst wurden. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass *die Belegungsdichte eine entscheidende Rolle bei der Aufrechterhaltung der angestrebten Lüftungsraten in natürlich belüfteten Schulen spielt* und damit auch das langfristige Infektionsrisiko durch die Luft (Fernbereich).

Eine höhere Belegungsdichte bedeutet zwangsläufig auch, dass die SuS über längere Zeiträume in geringerem Abstand zueinander sitzen, was sich auch auf die Übertragung von Krankheiten über die Luft auf kurze Distanz (Nahbereich) auswirkt (Public Health Ontario, 2022). Wenn die Raumnutzerinnen keine Gesichtsmasken tragen, zeigen Belege, dass die Aerosolwolke im Nahfeld, die von einer infektiösen Person ausgeht, mehrere Meter weit reichen kann (Bourouiba, 2020) und beim Niesen bis zu 7–8 m (Beggs et al., 2024). Darüber hinaus hat die Forschung zu ausgeatmeten Aerosolströmen gezeigt, dass die Virenkonzentration am Ende eines ausgeatmeten Strahls sowohl eine Funktion der vom infektiösen Individuum ausgeatmeten Virenkonzentration als auch der Virenkonzentration in der umgebenden Raumluft ist (Li et al., 2022). Dies unterstreicht, dass *das Risiko der Kurzstreckenübertragung in Innenräumen direkt von der Viruslast in der Raumluft beeinflusst wird und damit von der Lüftungsrate, was somit eine positive Rückkopplungsschleife bildet* (Beggs, 2024).

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich vorläufig schließen, dass es eine gesundheitsbasierte Grenze für die Belegungsdichte von natürlich belüfteten Klassenzimmern geben könnte, bei deren Überschreitung es zunehmend schwieriger wird, die aktuellen Lüftungsrichtlinien im österreichischen klimatischen Kontext einzuhalten. Daher muss im Zusammenhang mit Maßnahmen, die eine höhere Belegungsdichte in Klassenzimmern befürworten, ernsthaft über die gesundheitsbezogenen Auswirkungen und die Angemessenheit der begleitenden Lüftungsstrategien nachgedacht werden.

### 6.3 Kosten-Nutzen-Analyse der Verbesserung von Lüftungsstandards in Schulen

Bis heute gab es relativ wenige Versuche, die weiterreichenden wirtschaftlichen Kostenfolgen schlechter Lüftung in Klassenräumen zu bewerten. Teilweise könnte dies daran liegen, dass der Schulbesuch in den meisten europäischen Ländern kostenlos ist (am Ort der Nutzung),

während der Zusammenhang zwischen der Luftqualität in Innenräumen und den gesellschaftlichen Nettokosten (durch Krankheit, Leistungsdefizite und Fehlzeiten) wenig untersucht ist und anfällig für verfälschende Faktoren ist.

Bruns (2023) berechnete, dass für US-Schulklassenräume (basierend auf einer Standardbelegung von 30 Personen und einer mittleren Infektionsdauer von 5 Tagen) die jährliche Anzahl der SARS-CoV-2-Infektionen, die durch die Übernahme des ASHRAE-241-Standards (während einer 112-tägigen

Atemwegsvirus-Saison) verhindert werden, auf 3,8 pro Klassenzimmer geschätzt wird. Die gesellschaftlichen Kosten hierfür wurden auf einen wirtschaftlichen Wert von 7.000 US-Dollar geschätzt (in dieser Zahl sind die monetarisierten Werte anderer Vorteile, wie z. B. eine höhere Produktivität und eine Verringerung anderer saisonaler, luftübertragener Virusinfektionen, nicht berücksichtigt). Diesen Vorteilen stehen geschätzte Kosten für die Umsetzung von Präventivmaßnahmen in Höhe von 820 US-Dollar pro Klassenzimmer gegenüber. Für einen Hörsaal (mit einer Belegung von 150 Personen) wird der wirtschaftliche Wert auf 25.000 US-Dollar und die Kosten für Präventivmaßnahmen auf 7.500 US-Dollar geschätzt. Ausgehend von diesen Annahmen scheint die Umsetzung des ASHRAE-Standards 241, während der Zeit der Atemwegsviren und möglicherweise das ganze Jahr über, einen klaren finanziellen und menschlichen Nutzen zu haben.

Eine ähnliche Kosten-Nutzen-Analyse, die vor der COVID-19-Pandemie von Mendell et al. (2013) in einer US-amerikanischen Schule durchgeführt wurde, ergab, dass *“increasing classroom ventilation rates above the Californian state standard would substantially decrease illness absence rates whilst providing substantial economic benefits”* [eine Erhöhung der Belüftungsrate in Klassenzimmern über den kalifornischen Standard hinaus die Abwesenheitsrate aufgrund von Krankheit erheblich senken und gleichzeitig erhebliche wirtschaftliche Vorteile mit sich bringen würde]. Diese Erkenntnis basierte zum Teil auf der Berechtigung kalifornischer Schulen, staatliche Mittel zu erhalten, die an die Anwesenheitszahlen gekoppelt ist, aber auch die gesellschaftlichen Kosten von versäumten Schultagen spielten bei dieser Erkenntnis eine Rolle.

Im mitteleuropäischen Kontext zeigten Pollozhani et al. (2024), dass im heizungsdominierten Klima von Graz (Österreich) die Wahl der Lüftungsstrategie (Kippfenster, Stoßlüftung, Hybride Lüftung- und Lüftung mit Wärmerückgewinnung) die Energieperformance eines Klassenraums sowie die Fernübertragung von Viren stark beeinflussen kann. Die Steuerung des Luftwechselraten – mittels hybrider oder rein mechanischer Mittel – zur Aufrechterhaltung eines angemessenen IAQ-Zielwerts verbesserte die Energieeffizienz (im Vergleich zu natürlichen Lüftungsmethoden). Aufgrund der hohen Luftwechselraten in den Wintermonaten erwies sich eine Dauerlüftung mit dauerhaft gekippten Fenstern oder regelmäßiger Stoßlüftung im Vergleich zu hybrider oder vollmechanischer Lüftung als energetisch ineffizient. Diese Studie liefert Belege für den Einsatz von hybriden und vollmechanischen Lüftungssystemen in einem mitteleuropäischen Klima als Mittel zur Senkung der betrieblichen Energiekosten und zur Reduzierung von Fehlzeiten durch luftgetragene Krankheitsübertragung.

Es ist zu beachten, dass Pandemiewellen (einschließlich SARS-CoV-2) nicht immer mit der Wintersaison für Atemwegserkrankungen zusammenfielen (Abb. 1-1) und dass eine gute Belüftung auch zahlreiche andere Vorteile für Gesundheit, Anwesenheit und Lernerfolg mit sich bringt (Abschnitte 1.2, 2.2–2.4). Daher kann es von erheblichem zusätzlichem Nutzen sein, das ganze Jahr über „gesundheitsbasierte“ Lüftungsziele festzulegen. Nach Kenntnis der Autor\*innen wurde bislang keine vollständige Kosten-Nutzen-Analyse eines solchen Vorschlags in Österreich oder Europa noch durchgeführt.

## 6.4 Bewertung des Nutzens von CO<sub>2</sub>-Sensoren

Es gibt nur relativ wenige Studien, die den Nutzen der Verwendung von sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensoren (oder Ampel-Luftqualitätsmessgeräten) als Mittel zur Verbesserung der Lüftungspraktiken in Schulen direkt untersucht haben. In einer Studie zum Lüftungsverhalten in niederländischen Grundschulen stellten Geelen et al. (2008) fest, dass die Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Warngeräts und eines begleitenden

Informationspakets wirksame Instrumente zur Verbesserung des Lüftungsverhaltens und der Innenraumluftqualität (IAQ) in Klassenräumen zu sein schienen. Umgekehrt wiesen sie darauf hin, dass klassenraumspezifische Lüftungsempfehlungen ohne unterstützende Maßnahmen wirkungslos waren. Die Autor\*innen dieser Studie weisen jedoch darauf hin, dass – obwohl die Lüftung durch Verhaltensänderung und die Nutzung eines CO<sub>2</sub>-Sensors deutlich verbessert wurde – die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Klassenraum dennoch an mehr als 40 % des Schultags 1000 ppm überschritten. Folglich kam die Studie zu dem Schluss, dass ein CO<sub>2</sub>-Warngerät und ein Informationspaket für den Unterricht zwar nützliche Übergangsinstrumente zur Verbesserung des Lüftungsverhaltens und der IAQ in Klassenräumen darstellen, letztlich jedoch die Lüftungseinrichtungen aufgerüstet werden müssen (Geelen, 2008).

Wargocki und Da Silva (2015) führten in Dänemark eine Kurzzeitstudie mit zwei Paaren von aufeinander abgestimmten Klassenräumen durch. Ihre Ergebnisse zeigten, dass die Bereitstellung eines visuellen CO<sub>2</sub>-Feedbacks das Öffnungsverhalten der Fenster durch die Nutzer\*innen beeinflusste und die daraus resultierende CO<sub>2</sub>-Konzentration in den Klassenzimmern reduzierte (im Durchschnitt um etwa 100–200 ppm). Die Ergebnisse zeigten auch, dass im Winter die Fenster häufiger geöffnet wurden, wenn ein visuelles CO<sub>2</sub>-Feedback installiert war, und dass dies zu niedrigeren CO<sub>2</sub>-Werten in diesen Klassenzimmern im Vergleich zu Klassenzimmern ohne visuelles Feedback führte. Im späten Frühjahr/Frühsummer wurde jedoch festgestellt, dass die Häufigkeit des Fensteröffnens unabhängig vom Vorhandensein des visuellen Feedbacks ähnlich war. In Klassenzimmern mit mechanischer Belüftung gab es keine messbaren Unterschiede zwischen den CO<sub>2</sub>-Werten, wenn ein visuelles CO<sub>2</sub>-Feedback vorhanden war oder nicht (Wargocki und Da Silva, 2015).

Im November und Dezember betrug der Medianunterschied zwischen den K- und T-Sensoren 227 bzw. 215 ppm, was einen klaren Vorteil für die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren in den kälteren Monaten darstellt (Tab. 4-20). Im Gegensatz dazu war der Unterschied zwischen den K- und T-Sensoren im Juni und Juli deutlich geringer, wo der Medianunterschied nur 56 bzw. 27 ppm betrug. Über das gesamte Jahr hinweg betrug die mediane Differenz zwischen Räumen mit einem K-Sensor und einem T-Sensor 139 ppm. Diese Ergebnisse spiegeln das von Wargocki und Da Silva (2015) beobachtete saisonale Muster und die Mittelwerte wider.

Während die ImpAQS-Studie die Gesamtergebnisse früherer Kurzzeitstudien zu CO<sub>2</sub>-Sensoren in europäischen Klassenräumen bestätigt, zeigt sie auch, dass der größte Nutzen der Verwendung von sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensoren im oberen Quartil (d. h. den am schlechtesten abschneidenden) der natürlich belüfteten Klassenzimmer liegt. Es ist erkennbar (Tab. 4-20), dass im Dezember und Januar für 25 % der Unterrichtszeit in T Klassenräumen (mit einem sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensor) ungefähr 500 ppm niedrigere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (496 bzw. 506 ppm) gemessen wurden als in den entsprechenden K Klassenräumen (Abschnitt 4.4.1 und 4.4.2). Dieses Ergebnis unterstreicht, wie wichtig es ist, die übereinstimmenden gepaarten Daten auf verschiedenen Ebenen des Interquartilbereichs zu untersuchen, da der Median und die Mittelwerte nicht den vollen potenziellen Nutzen der Verwendung sichtbarer Sensoren aufzeigen. In der Praxis zeigt dieses Ergebnis, dass in natürlich belüfteten Klassenzimmern die Verwendung von sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensoren einen erheblichen Vorteil bietet, insbesondere in den kälteren Monaten und in den am schlechtesten belüfteten Räumen.

Avella et al. (2021) führten eine kurzzeitige (drei Wochen dauernde) Überwachungsstudie in zwei paarweise angeordneten Klassenzimmern in vier Schulen in einem historischen Schulgebäude in

Südtirol durch. Ihr Ziel war es, die Auswirkungen der Verwendung eines visuellen Warnsystems auf CO<sub>2</sub>-Basis zur Verbesserung der Innenraumluftqualität in historischen Schulklassenräumen zu untersuchen. Der Vergleich zwischen den paarweise angeordneten Klassenzimmern zeigt, dass die Wirksamkeit des CO<sub>2</sub>-Geräts in hohem Maße vom Verhalten der Nutzer\*innen abhängt. Die Ergebnisse zeigten, dass in Klassenzimmern, in denen ein visuelles CO<sub>2</sub>-Ampelsystem (RAG) verwendet wurde, die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Vergleich zum Kontrollklassenzimmer (um 28–42 %) niedriger waren. Die Autor\*innen weisen jedoch darauf hin, dass die durch die COVID-19-Pandemie verursachten kurzfristigen Verhaltensänderungen und die kalten Wetterbedingungen zum Zeitpunkt der Studie ihre Ergebnisse beeinflusst haben könnten (Avella, 2021).

Insgesamt deutet die vorhandene Evidenz darauf hin, dass die meisten natürlich belüfteten Klassenzimmer durch den Einsatz eines sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensors (oder RAG Warnsystems) eine spürbare Verringerung der CO<sub>2</sub>-Konzentration erreichen. Darüber hinaus ist der Nutzen von CO<sub>2</sub>-Sensoren in den kälteren Monaten am ausgeprägtesten, wenn die Belüftung im Allgemeinen schlechter ist und die Wahrscheinlichkeit von saisonalen Krankheiten größer ist. Bei der Interpretation der Ergebnisse der ImpAQS-Studie ist zu berücksichtigen, dass die LuL der T- oder K-Klassen keine formelle Schulung in Bezug auf die korrekte Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Sensors oder geeignete Lüftungsstrategien erhalten haben (abgesehen von zwei kleinen, an der Wand montierten Anzeigepostern in den T-Klassen) (Anhang B.6). Dies legt nahe, dass die flächendeckende Einführung von CO<sub>2</sub>-Sensoren in Klassenzimmern noch größere Vorteile bringen könnte, wenn ihre Anwendung von einem unterstützenden Schulungsprozess für LuL und SuS begleitet würde.

## 6.5 Berücksichtigung der Ergebnisse in Bezug auf Schadstoffe im Freien

Die an offiziellen UBA-Messstationen gemessenen Schadstoffe im Freien wurden verwendet, um das Vorhandensein von vier Hauptluftschadstoffen (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) in der Nähe der ImpAQS-Schulen zu bewerten (Abb. 3-12 und Abschnitt 4.3.2). Die Entfernung jeder Messstation zur jeweiligen Schule sowie andere lokale Umweltfaktoren (wie Windrichtung und städtische Schluchteffekte) beeinflussen die genaue Interpretation dieser Ergebnisse. Die Entfernung jeder Schule zur nächstgelegenen UBA-Messstation (für jeden Schadstoff) ist in Tabelle A-3 in Anhang B.9 zu finden.

In Bezug auf Feinstaub mit einem Durchmesser von 2,5 Mikrometern oder weniger (PM<sub>2,5</sub>) überschritt die Mehrheit (98 %) der UBA-Stationen den jährlichen Mittelwert der WHO-Luftqualitätsrichtlinie (AQG) für PM<sub>2,5</sub> von 5 µg/m<sup>3</sup>. In einem Fall wurde der Jahresmittelwert um mehr als das Dreifache des WHO-Grenzwerts für die Luftqualität (AQG) überschritten. In Bezug auf den Tagesgrenzwert zeigen nahezu alle (98 %) UBA-Stationen 3 oder mehr Überschreitungen des WHO-AQG-Grenzwerts für PM<sub>2,5</sub> von 15 µg/m<sup>3</sup> pro Jahr (bei Bewertung am 99. Perzentil) (Abb. 4-38). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass fast jede Schule in der ImpAQS-Studie (mit Ausnahme einer Schule in Niederösterreich) wahrscheinlich beide WHO-Grenzwerte für die PM<sub>2,5</sub>-Exposition überschreitet. Um dieses Ergebnis zu bestätigen, wären weitere Messungen an den einzelnen Schulen erforderlich.

In Bezug auf Feinstaub mit einem Durchmesser von 10 Mikrometern oder weniger (PM<sub>10</sub>) überschreitet fast die Hälfte (49 %) der Stationen den jährlichen AQG-Grenzwert der WHO von 15 µg/m<sup>3</sup>. Der tägliche AQG-Grenzwert der WHO (von 45 µg/m<sup>3</sup>) wird dagegen an mehr als der Hälfte (59 %) der Stationen mehr als dreimal (pro Jahr) überschritten. Obwohl dies weniger Überschreitungen als bei PM<sub>2,5</sub> darstellt, deutet dies darauf hin, dass die Mehrheit der Schulen derzeit

die PM<sub>10</sub>-Expositionsgrenzwerte der WHO überschreitet. Um diese Feststellung zu bestätigen, wären weitere Messungen an den einzelnen Schulen erforderlich.

In Bezug auf Stickstoffdioxid (NO<sub>2</sub>) wird der jährliche AQG-Grenzwert der WHO von 10 µg/m<sup>3</sup> von der Mehrheit (82 %) der UBA-Stationen in der Nähe der Schulen überschritten. Der tägliche AQG-Grenzwert von 25 µg/m<sup>3</sup> wird von 94 % der Stationen am 99. Perzentil (d. h. mehr als dreimal pro Jahr) überschritten. Dies deutet darauf hin, dass fast jede Schule in der Studie (mit Ausnahme von drei Schulen) wahrscheinlich NO<sub>2</sub>-Konzentrationen ausgesetzt ist, die über den Grenzwerten der WHO liegen. Es wurden jedoch keine Bewertungen anhand des AQG-Einstunden-Grenzwerts von 200 µg/m<sup>3</sup> vorgenommen, da Messungen mit dieser Auflösung am genauen Standort der Schule durchgeführt werden müssten, um sicherzustellen, dass stark lokalisierte kurzfristige Einflüsse erfasst werden (Greenpeace, 2018).

In Bezug auf Ozon (O<sub>3</sub>) überschreitet jede (100 %) der UBA-Stationen den 8-Stunden-Mittelwert der WHO-AQG von 100 µg/m<sup>3</sup> beim 99. Perzentil deutlich. Dies deutet darauf hin, dass alle Schulen in der Nähe dieser Stationen wahrscheinlich den täglichen Expositionsgrenzwert der WHO für Ozon nicht einhalten werden. Ein zweiter Grenzwert der WHO gilt in Bezug auf den O<sub>3</sub> Wert für die Hauptsaison, der auf 60 µg/m<sup>3</sup> festgelegt ist (wobei der Wert für die Hauptsaison als Durchschnitt der täglichen maximalen 8-Stunden-Mittelkonzentration in den sechs aufeinanderfolgenden Monaten mit der höchsten Sechsmonats-Durchschnittskonzentration von O<sub>3</sub> definiert ist). Dieser Wert erreichte im Monat September seinen Höchststand und der Spitzenwerttest für O<sub>3</sub> wurde in allen Fällen nicht bestanden.

Zusammengenommen zeichnen diese Ergebnisse ein besorgniserregendes Bild von der Außenluftqualität in der Nähe der ImpAQS-Schulen. Diese Ergebnisse stimmen mit früheren Erkenntnissen aus der europäischen SINPHONIE-Studie überein, die ergab, dass 85 % der Schulkinder Feinstaub PM<sub>2,5</sub> in Konzentrationen von über 10 µg/m<sup>3</sup> ausgesetzt waren (der damalige Jahresmittelwert der WHO-Richtlinie, der inzwischen auf 5 µg/m<sup>3</sup> gesenkt wurde). Auch die Werte verkehrsbedingter Schadstoffe (PM<sub>2,5</sub>, NO<sub>2</sub> und O<sub>3</sub>) waren in der Nähe vieler Schulen erhöht (Csobod, 2014).

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse sollte berücksichtigt werden, dass die gesamte Schadstoffbelastung, der Schüler\*innen über den gesamten Tag (und das ganze Jahr) ausgesetzt ist, bei der Beurteilung der Langzeit-Auswirkungen der Luftverschmutzung auf die Gesundheit berücksichtigt werden muss. Die „Krankheitslast“ wird in der Regel durch verschiedene Mortalitäts- und Morbiditätsindikatoren erfasst und häufig in Form von um Behinderungen bereinigten Lebensjahren (DALYs) quantifiziert, die auf die Umwelt einer Person zurückzuführen sind (Troeger et al., 2017; WHO, 2024). Da der Schulbesuch etwa 15 % der jährlichen Schadstoffbelastung eines Schülers oder einer Schülerin ausmacht (Csobod, 2014), stellt er einen relativ kleinen Teil seiner bzw. ihrer gesamten „Krankheitslast“ dar. Gleichzeitig sind Schulen ihren SuS und Mitarbeitenden gegenüber zur Fürsorge verpflichtet, da alle hier untersuchten Schadstoffe im Freien mit schwerwiegenden kurz- und langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen verbunden sind, sollte darauf geachtet werden, ihre Auswirkungen so weit wie möglich zu mildern. Dies ist besonders wichtig im Hinblick auf die Verringerung gesundheitlicher Ungleichheiten, da nicht alle SuS und Mitarbeitenden an einem Ort mit guter Luftqualität leben und einige Personen aufgrund bereits bestehender Erkrankungen und/oder ihrer individuellen Umstände einem erhöhten Risiko für gesundheitliche Probleme ausgesetzt sind.

Feinstaub, einschließlich PM<sub>2,5</sub> und PM<sub>10</sub>, kann durch eine geeignete Filterung in Verbindung mit mechanischer Belüftung weitgehend aus der Zuluft gefiltert werden (Eurovent, 2018). In natürlich belüfteten Schulen kann die Feinstaubkonzentration in Innenräumen durch den Einsatz tragbarer raumbezogener HEPA-Filter reduziert werden, wenn auch in geringerem Maße. Da die Feinstaubbelastung mit schwerwiegenden kurz- und langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen verbunden ist (Abschnitt 3.7.2), sollte der Installation von Messgeräten und einer angemessenen Feinstaubfilterung in den am stärksten betroffenen Schulen Priorität eingeräumt werden.

Gasförmige Schadstoffe erfordern spezielle Filter, die in der Regel eine chemische Aktivkohle-Mischung verwenden, die auf die in der städtischen Luft üblichen gasförmigen Schadstoffe (wie NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> und VOCs) einwirkt. Inline-Verschmutzungsfilter sind sowohl für den Einsatz mit dezentralen als auch mit zentralen Lüftungsgeräten (AHUs) erhältlich. Tests, die unter typischen Betriebsbedingungen durchgeführt wurden, haben gezeigt, dass die Gasfilter vom Typ 1 NO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf unter die in der EU-Richtlinie festgelegten Grenzwerte von 40 µg/m<sup>3</sup> filtern, wenn sie mit Gaskonzentrationen von bis zu 200 µg/m<sup>3</sup> belastet werden (Airclean, 2024). In den meisten Fällen können Inline-Filter in bestehende Lüftungsanlagen nachgerüstet werden.

Die Wartungs- und Betriebskosten für den Betrieb von Lüftungsanlagen und Filtersystemen können unerschwinglich sein, insbesondere im Zusammenhang mit den begrenzten Schulbudgets. Dies wirft die Frage auf, ob regionale oder staatliche Mittel bereitgestellt werden sollten, um sicherzustellen, dass jeder Schüler und jede Schülerin im österreichischen Bildungssystem das gleiche Recht auf saubere Luft hat. Ohne zusätzliche Unterstützung, sowohl in Form technischer Leitlinien als auch finanzieller Zuschüsse, scheint es unwahrscheinlich, dass solche komplexen Probleme auf Schulebene zufriedenstellend gelöst werden können.

## 6.6 Kontextualisierung der quantitativen Ergebnisse in Bezug auf die qualitativen (Umfrage-) Ergebnisse

In Abschnitt 5.3 werden die Ergebnisse von zwei Umfragen zusammengefasst, die sich an die Schulleiter\*innen der 120 am ImpAQS-Projekt teilnehmenden Schulen richten, sowie zwei zusätzlichen Umfragen, die an die Klassenlehrer\*innen der 10 überwachten Klassenräume in jeder dieser Schulen (mit und ohne Monitor) richteten. Zur Unterstützung der Messdaten liefern die qualitativen Umfrageergebnisse wertvolle Erkenntnisse in die sozialen Implikationen der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Messgeräten sowie die Auswirkungen der Umweltbedingungen und andere Probleme, mit denen die jeweiligen Schulen konfrontiert sind.

Eine Studie von Sanguinetti et al. (2022) betont, dass die Überwachung des CO<sub>2</sub>-Gehalts in Klassenzimmern in Verbindung mit der Ausbildung unerlässlich ist, um Pädagog\*innen in die Lage zu versetzen, ihre Gesundheit und die ihrer SuS zu schützen. Diese Ansicht wird von einem hohen Anteil der im Rahmen des ImpAQS-Projekts befragten LuL geteilt, die sich sicherer fühlen, wenn sie Zugang zu Echtzeitdaten über die Luftqualität haben, sodass sie fundierte Entscheidungen darüber treffen können, wann und wie lange sie die Fenster öffnen. Die Unterschiede zwischen den Klassenräumen mit (T) und ohne Monitore (K) zeigen, dass die meisten LuL die Anwesenheit von CO<sub>2</sub>-Sensoren im Allgemeinen schätzten und dass die von ihnen bereitgestellten Informationen ihre Lüftungsstrategien beeinflussten und die allgemeinen Bedingungen im Klassenzimmer verbesserten. Insgesamt ist die mittlere CO<sub>2</sub>-Rate in den Testräumen niedriger als in den Kontrollräumen (Abschnitt 4.4), was zu verbesserten Lüftungsraten führte.



Darüber hinaus gehen die pädagogischen Vorteile von CO<sub>2</sub>-Sensoren über die unmittelbaren Aspekte der Gesundheit und des Wohlbefindens hinaus. Die Möglichkeit, CO<sub>2</sub>-Werte in Echtzeit zu visualisieren, kann dazu beitragen, ein tieferes Verständnis für umweltwissenschaftliche Konzepte im Unterricht zu vermitteln. Einige Schulen berichteten, dass sie ihre eigenen Sensoren gebaut haben und die SuS dadurch sensibler für CO<sub>2</sub>-Werte in Innenräumen geworden sind. Die Bereitschaft, im Sommer die Fenster vollständig zu öffnen und die Auswirkungen auf die CO<sub>2</sub> Konzentration schätzen zu wissen, ohne dass dies den thermischen Komfort beeinträchtigt, zeigt sich auch in den niedrigeren CO<sub>2</sub>-Werten in der wärmeren Jahreszeit. Das Verhalten beim Öffnen von Fenstern hängt oft von Umweltfaktoren wie Temperatur, Sonneneinstrahlung, Lärm und Wind ab. Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass Innen- und Außentemperaturen das Verhalten beim Öffnen von Fenstern erheblich beeinflussen. So führen beispielsweise höhere Außentemperaturen oft dazu, dass Fenster häufiger geöffnet werden, um Innenräume zu kühlen (Pan et al., 2018). Darüber hinaus zögern LuL in den kälteren Monaten möglicherweise, Fenster zu öffnen, weil sie befürchten, dass die Innentemperaturen zu stark sinken (Jian et al., 2011). Während äußere Faktoren eine entscheidende Rolle bei der Beeinflussung des individuellen Fensteröffnungsverhaltens von LuL spielen, tun dies auch persönliche Faktoren – einschließlich ihres Wissens über die Folgen unzureichender Lüftung. Diese Beobachtungen spiegeln sich sowohl in den ImpAQS-Umfrageergebnissen (Kapitel 5) als auch in den signifikanten Schwankungen der erfassten Klassenzimmer-Messdaten zu vergleichbaren Jahreszeiten wider (Abschnitt 4.3.3).

Im Allgemeinen werden Luftverschmutzung und Außenluftqualität in den Umfrageergebnissen im Zusammenhang mit dem Fensteröffnungsverhalten als weniger problematisch angesehen (Abschnitt 5.3). Obwohl die gemessenen Werte der Außenluftverschmutzung in vielen Gebieten häufig die WHO-Richtwerte zur Luftqualität überschreitet (Abschnitt 4.3.2), wurde sie in den Umfrageergebnissen nicht als Problem identifiziert, und auch die Messdaten zeigen keinen starken Zusammenhang zwischen Lüftungsraten und einer Verschlechterung der Schadstoffbelastung im Freien. Dies könnte zum Teil daran liegen, dass einige Schadstoffe, wie z. B. Ozon, unsichtbar und geruchlos sind, während NO<sub>2</sub> einen stechenden Geruch hat, an den sich die Menschen jedoch gewöhnen können, da sie ihn mit der städtischen Umgebung in Verbindung bringen (Wojnarowska et al., 2020).

Aspekte im Zusammenhang mit dem thermischen Komfort (z. B. zu kalte oder zu warme Temperaturen) und dem akustischen Komfort (Baulärm, Straßenlärm oder sogar der Lärm der eigenen SuS, die draußen spielen) gaben Anlass zu erheblicher Besorgnis in Bezug auf das Öffnen von Fenstern (Kapitel 5). Dies wird auch in der Literatur beobachtet. Torresin et al. (2021) berichten, dass Lärm von außen LuL davon abhalten kann, die Fenster offen zu lassen, insbesondere in städtischen Umgebungen, in denen externe Geräusche den Lernprozess stören können und als hinderlich empfunden werden. Diese Erkenntnis könnte teilweise die verbesserten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Vorstadtschulen im Vergleich zu Schulen in stärker zentralisierten städtischen Lagen erklären (Abb. 4-21) obwohl diese Hypothese nicht ausdrücklich getestet wurde.

Durch eine tiefere statistische Analyse der Umfrageergebnisse der Direktor\*innen wurde festgestellt, dass der Einsatz von CO<sub>2</sub>-Sensoren und an der Wand montierten Anweisungen zur Verbesserung der Raumluftqualität in städtischen Gebieten als hilfreicher empfunden wird als in ländlichen Gebieten. Dies zeigt sich auch in den aufgezeichneten Daten, bei denen es einen deutlichen Unterschied bei den überwachten CO<sub>2</sub>-Werten zwischen ländlichen und städtischen Gebieten gibt (Abb. 4-21).

Insgesamt zeigten die Ergebnisse, dass 99 % aller Direktor\*innen entweder einen potenziellen oder einen sehr positiven Effekt in der Einführung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und Belüftungsanleitungen in Klassenzimmern sehen. Direktor\*innen von Volks- und Mittelschulen waren am empfänglichsten für die Einführung von CO<sub>2</sub>-Sensoren und Anweisungen zu deren Verwendung zur Verbesserung der Raumluftqualität in Klassenzimmern. Volksschulen haben einen grundsätzlichen Vorteil in Bezug auf die Aufrechterhaltung niedrigerer CO<sub>2</sub>-Werte in absoluten Zahlen (aufgrund der niedrigeren CO<sub>2</sub>-Ausstoßraten jüngerer Kinder), aber diese biologische Eigenschaft wird bei der Berechnung der Lüftungsraten nach Alter kompensiert (Abschnitt 3.4.1). Diese Tatsache erklärt, warum die Rangfolge der Schulen basierend auf ihrer durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Konzentration (Abb. 4-25) nicht genau der Rangfolge basierend auf ihrer durchschnittlichen Lüftungsrate entspricht (Abb. 4-26) und warum Volksschulen, die basierend auf der CO<sub>2</sub>-Konzentration hoch eingestuft sind, bei der Lüftung schlecht abschneiden (Abschnitt 4.2.3.4).

Bei den Umfragen konnten auch regionale Unterschiede festgestellt werden. So erkannten beispielsweise Schulleiter\*innen in Wien und Tirol die Bedeutung der Aufrechterhaltung einer optimalen Raumluftqualität in Bildungsumgebungen in Bezug auf Gesundheit, Wohlbefinden und schulische Leistungen in höherem Maße als Schulleiter\*innen in Kärnten und Vorarlberg. In dieser Hinsicht weist Kärnten (Abbildungen 4-23 und 4-24) auch eine der höchsten Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Zielgrenzwerte aller Bundesländer auf.

Während die Daten zeigen, dass mechanisch belüftete Schulen im Allgemeinen besser abschneiden als natürlich belüftete Schulen (da in der Regel kein Eingreifen von SuS und LuL zur Regulierung von CO<sub>2</sub> erforderlich ist), zeigen die Daten auch, dass einige mechanisch belüftete Schulen schlechter abschneiden als viele natürlich belüftete Schulen. Tatsächlich gehören zwei natürlich belüftete Schulen zu den sechs besten Schulen der Studie. Interessanterweise äußerten viele LuL Bedenken hinsichtlich der mechanischen Belüftung. Während einige sie als die „ultimative“ Lösung bezeichneten, sprachen sich andere dagegen aus (Kapitel 5). Untersuchungen zeigen, dass einige das Öffnen von Fenstern als Mittel zur Verbesserung der Belüftung und des Raumklimas befürworten.

Die Kosten (nicht nur die Investitionskosten, sondern insbesondere die Betriebskosten) werden auch weiterhin eine wichtige Rolle dabei spielen, welche Art von Lüftungssystem in Schulen bevorzugt wird. Einige LuL in Klassenzimmern, die mit mechanischen Systemen ausgestattet sind, beklagten sich darüber, dass die Systeme in ihrer Schule nie in Betrieb seien. Nachforschungen ergaben, dass das System in mindestens einer Schule aufgrund der geschätzten jährlichen Betriebskosten von 7000 Euro nicht eingeschaltet war. Folglich wurde diese Schule als natürlich belüftete Schule neu eingestuft, um eine unvoreingenommene Bewertung ihrer Leistung zu ermöglichen. Diese Situation spiegelt sich auch in einigen Ergebnissen von schlecht funktionierenden mechanisch belüfteten Räumen wider, die aufgrund intermittierenden Betriebs oder mangelhafter Wartung zeitweise unterbelüftet sein könnten (Abb. 4-28, Abb. 4-37).

Die Installation eines mechanischen Ventilations- oder Filtersystems garantiert also nicht automatisch eine bessere Raumluftqualität. Dieses Problem wurde auch am Beispiel der Stadt Münster in Deutschland deutlich. Mit Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen installierte die Stadt zu Beginn der COVID-19-Pandemie insgesamt 1.188 mobile Luftfilteranlagen in ihren Schulen, um Kinder, Jugendliche und LuL vor Infektionen zu schützen, was fast zwei Millionen Euro kostete.

Nach offiziellen Angaben wird der regelmäßige Austausch der Filter in allen Geräten ungefähr 700.000 Euro pro Jahr kosten. Infolgedessen wollen viele Schulen in der Region die Geräte nun entsorgen (da

sie diese zusätzlichen Kosten ohne Unterstützung durch die Region oder den Bund tragen müssten) (Olbrisch, 2024). Daher muss bei der Entscheidung, in laufende mechanische Lüftungsanlagen, Luftreiniger oder auch nur CO<sub>2</sub>-Sensoren zu investieren, berücksichtigt werden, dass Kosten für die routinemäßige Wartung anfallen. Die Vor- und Nachteile solcher Entscheidungen, möglicherweise einschließlich einer vollständigen Kosten-Nutzen-Analyse (Abschnitt 6.3), müssen berücksichtigt und die Ergebnisse klar kommuniziert werden, um kurzfristige Entscheidungen zu vermeiden. Obwohl mechanische Systeme höhere Lüftungsvolumenströme bei verbessertem thermischem Komfort im Winter ermöglichen können, sind sie ohne sorgfältige Planung und Berücksichtigung der übergeordneten Aspekte nicht zwangsläufig die Lösung für eine bessere Innenraumluftqualität.



## 7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen des ImpAQS-Projekts (Improving Air Quality in Schools) wurden im Schuljahr 2023/24 die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die Belüftungsraten und die Daten zur Innenraumumgebung in 1200 österreichischen Klassenzimmern in 7 verschiedenen Schultypen in den 9 Bundesländern Österreichs untersucht. Zusätzlich wurden Daten der Luftverschmutzungsmessstationen des Umweltbundesamtes (UBA) in der Nähe der Schulen analysiert, um die Hintergrundluftqualität zu beurteilen. Die meisten teilnehmenden Schulen stellten anonymisierte Daten zu Fehlzeiten zur Verfügung, um Zusammenhänge zwischen der Luftqualität in Innenräumen und der Anwesenheit zu prüfen. Es wurden weitere Analysen unter Einbeziehung des österreichischen SARS-CoV-2-Abwasserüberwachungssystems durchgeführt, um Zusammenhänge zwischen Schulabwesenheiten und den nationalen Abwasser-RNA-Werten zu untersuchen. Insgesamt wurden über 1 Milliarde Datenpunkte gesammelt und analysiert, was diese Studie zu einer der größten Studien über Belüftung und Luftqualität macht, die bisher an österreichischen Schulen durchgeführt wurden.

In diesem Abschnitt werden zunächst die wichtigsten Schlussfolgerungen zusammengefasst, die aus der ImpAQS-Studie gezogen werden können (Abschnitt 7.1). Auf der Grundlage dieser Schlussfolgerungen und der vorherigen Diskussion der Ergebnisse (Abschnitt 6) werden Empfehlungen zur Verbesserung der aktuellen Situation abgegeben (Abschnitt 7.2). Diese Empfehlungen sind in Empfehlungen für die Praxis (Abschnitt 7.2.1) und Empfehlungen für die Politik (Abschnitt 7.2.2) unterteilt. Dieses Kapitel wird mit einer kurzen Beschreibung der wichtigsten Einschränkungen der Studie (Abschnitt 7.3.1) und Empfehlungen für weitere Arbeiten (Abschnitt 7.3.2) abgeschlossen.

### 7.1 Schlussfolgerungen

#### 7.1.1 Einhaltung bestehender europäischer und österreichischer Standards

Die im Rahmen des ImpAQS-Projekts erfassten CO<sub>2</sub>-Daten zeigen, dass die bestehenden europäischen und nationalen Lüftungsrichtlinien in österreichischen Schulen weitgehend nicht eingehalten werden. Nur ein Viertel (25 %) aller Schulen schafft es, einen mittleren täglichen-CO<sub>2</sub>-Wert unter dem Schwellenwert von 1000 ppm zu halten, der in der ÖNORM H 6039 (ASI, 2023), EN 16798-1 Kategorie I (CEN, 2019) und BMK Klasse A (BMK, 2024d) festgelegt ist. Die Mehrheit (89 %) der österreichischen Klassenzimmer wird natürlich belüftet, und während die meisten Schulen in der Lage sind, unabhängig von der Art der Belüftung in den Sommermonaten eine gute Belüftung aufrechtzuerhalten, ändert sich die Situation schnell, wenn die Außentemperaturen sinken. Während 90 % der mechanisch belüfteten Schulen über das ganze Jahr hinweg eine mittlere tägliche CO<sub>2</sub>-Konzentration von unter 1000 ppm aufrechterhalten, schaffen es weniger als 18 % der natürlich belüfteten Schulen, unter diesem Wert zu bleiben. Im Winter ist die Situation noch schlimmer: Weniger als 12 % der Schulen melden einen mittleren täglichen CO<sub>2</sub>-Wert unter 1000 ppm, während mehr als ein Viertel (29 %) aller Schulen einen mittleren täglichen CO<sub>2</sub>-Wert von über 1500 ppm aufweisen (Tabelle 4.10).

Die jährliche mittlere Lüftungsrate über alle Schulen hinweg beträgt 5,9 l/(s·Person), allerdings ist die Verteilung nach rechts verzerrt (aufgrund einer geringen Anzahl von Schulen mit besserer Leistung), was einen höheren mittleren Lüftungsrate von 7,4 l/(s·Person) ergibt. Daher liegt der Median 41 %

und der Mittelwert 26 % unter dem Schwellenwert für die Einhaltung der Kategorie I in EN 16798-1:2019 (CEN, 2019). Der jährliche Median liegt 36 % und der Mittelwert 20 % unter der in der ÖNORM H 6039:2023 (ASI, 2023) festgelegten altersbezogenen Luftwechselrate (für 11- bis 18-Jährige). Darüber hinaus liegt die Lüftungsrate in österreichischen Klassenzimmern ein Viertel des Jahres unter dem von der EN 16798-1:2019 (CEN, 2019, S. 52) empfohlenen Mindestwert von 4 l/(s·Person). Im Durchschnitt liegen 77 % der täglichen mittleren Lüftungsraten in allen 1200 Klassenzimmern unter 10 l/(s·Person) und erfüllen daher weder den Standard der Kategorie 1 der EN 16798-1 (CEN, 2019) noch den in den aktuellen österreichischen Richtlinien „Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter“ (BMK, 2024d) (Abschnitt 4.2.3) beschriebenen Standard der Klasse A (von 1000 ppm). Darüber hinaus unterstreichen die großen Unterschiede bei den gemessenen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Lüftungsraten in einzelnen Klassenzimmern, Schulen und Regionen ein erhebliches potenzielles Risiko für gesundheitliche und leistungsbezogene Ungleichheiten im österreichischen Schulsystem.

### 7.1.2 Einhaltung der „gesundheitsbasierten“ Richtwerte

In Bezug auf „gesundheitsbasierte“ Richtwerte, die darauf abzielen, die Übertragung von Krankheitserregern in der Luft in Schulen zu minimieren, sehen die Ergebnisse noch schlechter aus. Vor mehr als zwei Jahren gab die Föderation der europäischen Verbände für Heizung, Lüftung und Klimatechnik (REHVA, 2022) klare Empfehlungen ab, als Reaktion auf die anhaltende COVID-19-Pandemie einen „gesundheitsbasierten“ CO<sub>2</sub>-Grenzwert von 800 ppm in europäischen Klassenzimmern beizubehalten. Ein entsprechendes Lüftungsziel von 14 l/(s·Person) wurde von der Lancet COVID-19-Kommission (2022) als Reaktion auf die aktuellen wissenschaftlichen und medizinischen Erkenntnisse empfohlen. Der „gesundheitsbasierte“ Zielwert von 800 ppm wird in den aktuellen österreichischen Richtlinien „Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter“ (BMK, 2024d) als Klasse A+ beschrieben. In den Wintermonaten, wenn saisonale Viren ihren Höhepunkt erreichen, erfüllen nur 30 % der mechanisch belüfteten Schulen das Ziel von 800 ppm. Im Gegensatz dazu können weniger als 1 % der natürlich belüfteten Schulen diesen Zielwert in den Wintermonaten einhalten. Da natürlich belüftete Schulen 89 % der Stichprobe ausmachen, bedeutet dies, dass insgesamt nur 3,3 % der Schulen das BMK-Ziel (2024d) der Klasse A+ im Winter einhalten (Abschnitte 2.5.6 und 4.2.2).

### 7.1.3 Vorteile des Einsatzes von CO<sub>2</sub>-Sensoren

Insgesamt ist die Verwendung von CO<sub>2</sub>-Sensoren mit klarem Nutzen verbunden, die Ergebnisse sind jedoch nuanciert und hängen von einer Reihe von Faktoren ab, darunter die Außenlufttemperatur und die Art des verwendeten Belüftungssystems. Im Durchschnitt über das gesamte Schuljahr hinweg wurde in Klassenzimmern mit einem CO<sub>2</sub>-Sensor ein täglicher CO<sub>2</sub>-Mittelwert gemeldet, der 156 ppm niedriger war als in dem entsprechenden Kontrollklassenzimmer. Die Vorteile der Verwendung eines CO<sub>2</sub>-Sensors sind im Winter noch deutlicher. Im Januar steigt die tägliche mittlere Differenz auf 208 ppm, während an einem Viertel der Tage in diesem Monat eine mittlere tägliche Differenz von 495 ppm verzeichnet wurde (Abschnitt 4.4.1).

In den wärmeren Monaten war der Nutzen eines sichtbaren CO<sub>2</sub>-Sensors viel geringer, beispielsweise lag der mittlere Nutzen im Sommer 2023 bei nur 15 ppm, während er im Sommer 2024 leicht auf 33 ppm anstieg. Der Hauptgrund dafür, dass CO<sub>2</sub>-Sensoren in den Sommermonaten nur einen relativ

geringen Nutzen aufweisen, liegt darin, dass die meisten Klassenzimmer zu dieser Zeit gut belüftet sind und die täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werte an Schultagen im Juni, Juli und September überwiegend unter dem Schwellenwert von 800 ppm bleiben (Abschnitt 4.2.2). Da die Ampelanzeige des Sensors für sichtbares CO<sub>2</sub> so eingestellt war, dass sie erst bei Konzentrationen über 800 ppm von Grün auf Gelb umschaltete (Abschnitt 3.5.5), gab es keinen visuellen Anreiz für Räume mit einem Sensor für sichtbares CO<sub>2</sub>, bei diesen Werten für zusätzliche Belüftung zu sorgen.

Aus der Sicht der Endnutzer\*innen berichteten die meisten LuL, dass sie CO<sub>2</sub>-Sensoren bei der Regulierung der Luftqualität in ihren Klassenzimmern als äußerst hilfreich empfanden, auch wenn es manchmal frustrierend war, die Zielgrenzwerte nicht einhalten zu können. CO<sub>2</sub>-Sensoren können zwar nützliche Echtzeitinformationen liefern, bieten aber keine Lösungen für alle Herausforderungen, mit denen LuL konfrontiert sind, wenn sie versuchen, ihre Klassenzimmer das ganze Jahr über angemessen zu belüften.

#### 7.1.4 Luftverschmutzung im Freien

Die Luftverschmutzung im Freien spielt eine entscheidende Rolle bei der Bestimmung, wie gesund die Luft in einem Schulgebäude ist. Zwar gibt es neben CO<sub>2</sub> und menschlichen Bioabwässern (bio-effluent) zahlreiche weitere Quellen für die Luftverschmutzung in Innenräumen, doch ist die Luftqualität in einem Klassenzimmer selten besser als die Außenluft. Dies liegt daran, dass die gesamte Raumluft in einem Klassenzimmer in der Regel etwa 3 bis 6 Mal pro Stunde erneuert wird und während dieses Erneuerungsprozesses (sofern die Luft nicht vorgefiltert wird) Schadstoffe aus der Außenluft in den Raum gelangen. Aus diesem Grund wurde in der Studie die Außenluftqualität in der Nähe der Schulen anhand von Daten der offiziellen UBA-Messstationen für vier Hauptschadstoffe (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>) untersucht. Diese Schadstoffe wurden in Bezug auf die neuesten Grenzwerte der Luftqualitätsrichtlinie (AQG) der Weltgesundheitsorganisation (WHO) (WHO, 2021b) bewertet.

In Bezug auf PM<sub>2,5</sub> zeigen die Ergebnisse, dass fast jede Messstation der ImpAQS-Studie (bis auf eine) die jährlichen und täglichen Expositionsgrenzwerte der WHO überschreitet. In Bezug auf PM<sub>10</sub> überschreitet etwa die Hälfte der Stationen den jährlichen WHO-Grenzwert, während 59 % der Stationen den täglichen Schwellenwert überschreiten. In Bezug auf NO<sub>2</sub> überschreiten 82 % der Stationen den jährlichen Grenzwert der WHO, während 94 % der Stationen den täglichen Grenzwert überschreiten. In Bezug auf O<sub>3</sub> ist die Situation noch schlimmer: 100 % der Stationen in der Nähe der ImpAQS-Schulen halten sowohl den maximalen 8-Stunden-Mittelwert pro Tag als auch den Wert in der Hauptsaison (der auf dem 6-Monats-Mittelwert basiert) nicht ein.

Insgesamt deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass die Außenluftqualität in der Nähe der Schulen in der ImpAQS-Studie wahrscheinlich schädlich für die Gesundheit von SuS und Mitarbeitenden ist. Es sind jedoch detaillierte Messungen vor Ort sowohl innerhalb als auch außerhalb der Schulen erforderlich, um diese Ergebnisse auf der Ebene der einzelnen Schulen zu bestätigen. Aus den Ergebnissen (Abschnitt 4.3.2) geht auch hervor, dass die Außenluftqualität an einigen Schulen viel schlechter ist als an anderen. In einigen wenigen Fällen liegen die täglichen durchschnittlichen Schadstoffkonzentrationen über den Grenzwerten der WHO, die nicht öfter als dreimal pro Jahr überschritten werden sollten (Abb. 4-33, 4-35). In solchen Fällen sollte vorrangig untersucht werden, wie hoch die Schadstoffbelastung an den am stärksten betroffenen Schulstandorten ist. Wenn dies durch Tests vor Ort bestätigt wird – wird die Verwendung geeigneter Luftfilterungstechniken in

Kombination mit mechanischer Lüftung empfohlen, um die Konzentrationen der schädlichsten Schadstoffe zu reduzieren.

### 7.1.5 Übertragung von Krankheitserregern über die Luft

Es ist allgemein bekannt, dass viele schädliche Krankheitserreger, darunter SARS-CoV-2, Influenza, Tuberkulose, Masern und Windpocken, werden über die Luft übertragen. Viren und Bakterien können in Tröpfchen eingeschlossen sein und durch Sprechen, Husten oder Niesen oder Advektion (d. h. über einen Luftstrom) direkt über relativ kurze Entfernungen übertragen werden. Darüber hinaus können kleinere Partikel zu Aerosolen werden, die viele Stunden lang in der Raumluft schweben können. Mithilfe eines analytischen Modells wurde der Einfluss der Lüftungsrate auf das theoretische Risiko einer SARS-CoV-2-Übertragung in den ImpAQS-Klassenzimmern untersucht.

Die Analyse wurde im Vergleich zu einem theoretischen Referenzklassenzimmer durchgeführt, das gemäß der Kategorie 1 der ÖNORM EN 16798-1 (CEN, 2024) (Abschnitt 4.5) mit 10 l/(s·Person) belüftet wurde. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass das Risiko einer Infektion über die Luft mit zunehmender Belegung und Expositionszeit steigt. Auch die Belüftungsrate spielt eine sehr einflussreiche Rolle für das daraus resultierende Risikoniveau. Dabei führt eine Luftstromrate von 4 l/(s·Person) nach 6 Stunden Exposition zu einem Gruppeninfektionsrisiko von etwa 74 %. Im Vergleich dazu würde die Einhaltung der Empfehlung der Lancet-Kommission für nicht-infektiöse Luftzufuhrdaten (NADR) von 14 l/(s·Person) das Gruppeninfektionsrisiko auf 43 % senken (The Lancet COVID-19 Commission, 2022).

Es muss jedoch anerkannt werden, dass Belüftung zwar eine wichtige Rolle bei der Verringerung des Risikos einer Übertragung über große Entfernungen durch die Luft spielen kann, Viren (und andere Krankheitserreger) jedoch auch durch andere Modalitäten übertragen werden. Die Übertragung über kurze Entfernungen wird zwar von der Lüftungsrate beeinflusst (Beggs, 2024), ist jedoch in dicht belegten Räumen wahrscheinlich stärker ausgeprägt. In dieser Hinsicht können andere Prophylaxestrategien (wie das Tragen von Masken) erforderlich sein, um eine gute Belüftung zu ergänzen und die Ausbreitung von Krankheiten einzudämmen.

## 7.2 Empfehlungen

### 7.2.1 Empfehlungen für die Praxis

Die praktischen Empfehlungen sollen Lösungen für die wichtigsten physischen Probleme bieten, die in diesem Bericht hervorgehoben werden. Sie sind wie folgt kategorisiert:

- (i) Kurzfristige Lösungen – dies sind Empfehlungen, die sofort und ohne erhebliche Infrastrukturkosten umgesetzt werden können
- (ii) Langfristige Lösungen – dies sind Empfehlungen, die für die mittel- und langfristige Planung gelten, einschließlich der Planung und des Baus neuer Schulen



#### 7.2.1.1 Kurzfristige Lösungen

Da die meisten Klassenzimmer in Österreich nach den geltenden Normen und Standards deutlich unterlüftet sind, müssen dringend Maßnahmen ergriffen werden, um diese Situation zu verbessern. Die am stärksten betroffenen Schulen sollten zuerst priorisiert werden, jedoch benötigen fast alle Schulen Unterstützung, um ihre derzeitige Situation zu verbessern. Daher sollten allen Schulen „Kernmaßnahmen“ und den am stärksten betroffenen Schulen eine Prioritätenliste mit „zusätzlichen Maßnahmen“ zur Verfügung gestellt werden. Auf diese Weise kann Schulleiter\*innen und Schulbesitzer\*innen ein Paket von Unterstützungsmaßnahmen angeboten werden, das dem Unterstützungsbedarf der einzelnen Schulen entspricht.

#### Kernmaßnahmen:

- (i) **Grundlegende CO<sub>2</sub>-Überwachung und Lüftungstraining für das gesamte Schulpersonal** – dies sollte eine Schulung zur Belüftung mit verschiedenen Lüftungsstrategien beinhalten, die der Jahreszeit entsprechen. Ein solches Training kann online oder persönlich über Schulungsseminare durchgeführt werden.
- (ii) **CO<sub>2</sub>-Messgeräte und Raum-Anzeigetafeln** – die Einführung kalibrierter CO<sub>2</sub>-Sensoren, die sowohl numerische CO<sub>2</sub>- als auch Raumtemperaturanzeigen und sichtbare (RAG)-Warnhinweise enthalten (entsprechend den von der BMK empfohlenen Schwellenwerten bei 800 ppm (gelb) und 1000 ppm (rot)), wird für alle natürlich belüfteten Klassenzimmer empfohlen. An einer Innenwand des Klassenzimmers sollten in der Nähe des Sensors Plakate angebracht werden, die die LuL an die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Schwellenwerte und saisonalen Lüftungsstrategien erinnern.
- (iii) **CO<sub>2</sub>-Beauftragte** im Klassenzimmer – In Klassen mit Altersgruppen ab 10 Jahren (in manchen Fällen auch jünger) sollte ein Schüler oder Schülerin zum CO<sub>2</sub>-Beauftragten des Klassenzimmers ernannt werden. Diese Schüler sind dann dafür verantwortlich, den CO<sub>2</sub>-Monitor im Auge zu behalten und den Lehrkörper zu informieren, wenn die Anzeige auf Rot schaltet und zusätzliche Belüftung erforderlich ist.
- (iv) **Überprüfungen der Raumlüftung** – Die Gebäudeverwaltungen der Schulen sollten damit beauftragt werden, eine jährliche Überprüfung der Lüftung in jedem genutzten Klassenraum durchzuführen. Diese Überprüfung sollte sicherstellen, dass ausreichend viele Fenster geöffnet werden können, um während der Nutzung des Klassenraums eine angemessene Belüftung zu ermöglichen, und dass offene Fenster nicht mit der Sitzanordnung kollidieren. Wo Fenster verschlossen, schwer zu öffnen oder nicht sicher arretierbar sind, sollten Abhilfemaßnahmen ergriffen werden, um die Situation zu beheben. Ähnliche Überprüfungen sollten auch für mechanische Lüftungssysteme durchgeführt werden, unter Berücksichtigung der Empfehlungen von REHVA und/oder anderen Fachorganisationen im Bereich Lüftung (z. B. VDI, CIBSE oder ASHRAE).

**Zusätzliche Maßnahmen:**

- (i) **HEPA-Filter** – könnten als vorübergehende Lösung in den am stärksten betroffenen Schulen in Betracht gezogen werden, um intermittierende Lüftungsstrategien während der kälteren Monate zu ergänzen. Die Entscheidung, HEPA-Filter einzusetzen, muss sorgfältig geplant werden, um sicherzustellen, dass möglichst geräuscharme Systeme installiert werden und dass keines der Luftreinigungsgeräte schädliche Nebenprodukte emittiert. Da für jeden Klassenraum mehrere HEPA-Filter erforderlich sind, um einen nachweisbaren Nutzen zu erzielen, muss die Raumaufteilung sowie die Lage der Stromanschlüsse sorgfältig berücksichtigt werden. Die Implementierung von HEPA-Filtern sollte mit unabhängiger fachlicher Beratung erfolgen, da eine Reihe kritischer Aspekte zu beachten sind, darunter Lärmentwicklung, Platzierung und Reinigungsanforderungen der Filter. Die Kosten für regelmäßige Filterwechsel und Wartung müssen bei dieser Entscheidung mit einkalkuliert werden.
  
- (ii) **Steuerung Mechanischer Lüftungssysteme** – es ist beachtenswert, dass Schulen mit mechanischer Belüftung in den wärmeren Monaten manchmal „überbelüftet“ sind, vermutlich, weil zu dieser Zeit Fenster geöffnet werden, um zusätzliche Frischluft hereinzulassen oder für Kühlung zu sorgen, während die mechanischen Systeme gleichzeitig in Betrieb sind. Dieser Prozess ist energieverschwendend und außerhalb von Pandemiewellen unnötig. In den wärmeren Monaten kann die mechanische Belüftung häufig ausgeschaltet werden (sofern die Außenluft nicht zu stark verschmutzt ist und der Umgebungslärm akzeptabel ist). Allerdings sollten Lüftungssysteme (oder einzelne Zonen) nur dann abgeschaltet werden, wenn ausreichend Fensteröffnungen vorhanden sind, um eine natürliche Lüftung zu ermöglichen (und wenn die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Klassenraum unter 800 ppm gehalten werden kann). Umgekehrt sind in einigen wenigen Fällen mechanische Lüftungssysteme zwar in Betrieb, aber die Klassenräume scheinen unzureichend belüftet zu sein; in solchen Fällen sollten Luftstrommessungen und CO<sub>2</sub>-Messungen in den jeweiligen Räumen durchgeführt werden, um die Ursache des Problems zu identifizieren.

**7.2.1.2 Langfristige Lösungen**

- (i) **Mechanische Belüftung** – bei richtiger Auslegung und Wartung kann mechanische Belüftung in österreichischen Klassenzimmern nachweislich zu einer besseren Raumluftqualität führen als natürliche Lüftung. Eine dezentrale mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung ist wahrscheinlich die energieeffizienteste und kostengünstigste Lösung für die meisten neuen Klassenräume in Österreich. Die Wahl des Lüftungssystems sollte jedoch sorgfältig abgewogen werden, wobei Wartungs- und Lärmüberlegungen im Vordergrund stehen. Aus diesem Grund sind Systeme mit dem höchsten Wirkungsgrad (d. h. mit einem Wirkungsgrad von mehr als 90 %) möglicherweise nicht die beste Wahl für Klassenräume, da sie für den Betrieb einen höheren statischen Druck benötigen und somit der Stromverbrauch und die Lärmbelastung steigen. Außerdem sind hocheffiziente Filter erforderlich, um die Funktion der sehr engen Kanäle in hocheffizienten Wärmetauschern zu gewährleisten. Eine besser geeignete Option für Klassenzimmer könnte die Verwendung von Geräten mit geringerer Effizienz (75–80 %) sein, die mit niedrigeren Drücken arbeiten können und weniger wartungsempfindlich sind. Solche Systeme sollten ausreichend dimensioniert sein, um die in diesem Bericht beschriebenen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsraten bei Nennvolumenstrom des Systems zu erreichen. In manchen Fällen kann dies bedeuten, dass zwei Lüftungsgeräte

pro Klassenraum erforderlich sind. Es ist wichtig, bei der Installation mechanischer Lüftungssysteme die Auswirkungen auf den gesamten Lebenszyklus in Bezug auf Betrieb, Wartung und CO<sub>2</sub>-Bilanz zu berücksichtigen (einschließlich jährlicher Filterwechsel und Wartungskosten).

- (ii) **Bewertung der Außenluftqualität** – Ähnlich wie in der nordamerikanischen Norm ASHRAE 62.1 muss die Außenluftqualität vor der Festlegung eines neuen oder nachgerüsteten Lüftungssystems gründlich untersucht werden. Diese Untersuchung erfordert eine umfassende Messung und Dokumentation der Außenluftqualität sowohl auf regionaler als auch auf lokaler Ebene (d. h. am Standort der Schule). Eine solche Bewertung kann dazu beitragen, die optimale Auslegung und Platzierung von Lüftungssystemen zu bestimmen, einschließlich der Auswahl geeigneter Filter für Partikel- und gasförmige Schadstoffe, sofern erforderlich.
- (iii) **Echtzeit-Datenvisualisierung und Warnmeldungen** – im Vergleich zu eigenständigen Luftqualitätssensoren haben vernetzte Sensor-Messsysteme den Vorteil der kontinuierlichen Datenaufzeichnung und -visualisierung von mehreren Geräten. Weltweit setzen Schulen zunehmend vernetzte Systeme zur Überwachung der Luftqualität in Innenräumen in Echtzeit ein, um die Gesundheit der Lul und SuS sowie die Umweltqualität der Lernumgebung zu verbessern. Diese Systeme verwenden Sensoren zur Messung von Schadstoffen wie CO<sub>2</sub> und Feinstaub sowie von Temperatur und Luftfeuchtigkeit und sind in der Lage, Echtzeitdaten (sowie historische Datentrends) bereitzustellen. Sensoren können auch zur automatischen Regulierung mechanischer Belüftungssysteme eingesetzt werden. Derzeit sind Lüftungssysteme nicht in der Lage, das Vorhandensein von Krankheitserregern in der Raumluft direkt zu erkennen; entsprechende Technologien befinden sich allerdings in der Entwicklung. Die Verfügbarkeit anderer Quellen von Echtzeitdaten über Krankheitserreger (z. B. auf der Grundlage der regionalen Abwasser-RNA-Daten) bietet wertvolle Informationen darüber, wann das Risiko einer luftgetragenen Krankheitsübertragung erhöht ist. Diese Informationen könnten Gebäudeverwaltungen und Schulpersonal leicht zur Verfügung gestellt werden, um in solchen Zeiträumen eine verstärkte Aufmerksamkeit gegenüber Lüftungsmaßnahmen sicherzustellen. Ebenso könnten bei erhöhten Außenluftbelastungen Hinweise zur Nutzung von HEPA-Filtern in Klassenräumen und zur Reduktion der Fensterlüftung helfen, die negativen Effekte abzufedern. Die Beteiligung von SuS an Citizen-Science-Projekten und als Luftqualitäts-Champions in der Klasse könnte auf diese Weise auch mit der Echtzeit-Datenüberwachung verknüpft werden.
- (iv) **UV-C-Desinfektion im oberen Raumluftbereich** – kann eine nützliche Ergänzung zur Belüftung sein, um das Risiko der Übertragung luftgetragener Krankheiten in dicht belegten Räumen zu reduzieren. Obwohl in diesem Bericht nicht direkt angesprochen, ist die Verwendung von UV-C-Beleuchtung zur Sterilisierung von Krankheitserregern in der Luft eine etablierte Methode zur Luftreinigung. Im Gegensatz zu herkömmlichem 254-nm-UVC gilt Fern-UVC bei 222 nm als unschädlich für die menschliche Gesundheit und als sicher in bewohnten Räumen, während es gleichzeitig wirksam zur Desinfektion eingesetzt werden kann (Pereira et al., 2023). Die abgestandene Luft strömt entweder durch natürlichen Auftrieb oder mechanische Belüftung in den oberen Raumluftbereich auf, wo sie mit dem UV-C-Licht in Kontakt kommt und Krankheitserreger schnell deaktiviert werden. Danach sinkt die sterilisierte Luft nach unten und vermischt sich auf natürliche Weise mit der Luft in den unteren Teilen des Raums.

Bei korrekter Auslegung und Installation bieten UV-C-Desinfektionsgeräte im oberen Raumluftbereich eine sichere und energieeffiziente Möglichkeit, um SuS und LuL in Klassenzimmern mit eingeschränkter Belüftung zusätzlich zu schützen. Für die Planung und Spezifikation von Fern-UV-C-Systemen in Klassenzimmern sollte unbedingt fachliche Beratung hinzugezogen werden.

### 7.2.2 Empfehlungen für Richtlinien

Derzeit gibt es zu viele verschiedene Dokumente und Standards für Lüftungsrichtlinien, die oft widersprüchliche und/oder sich überschneidende Empfehlungen in Bezug auf CO<sub>2</sub>-Schwellenwerten und Lüftungskennzahlen enthalten. Diese Leitlinien müssen so harmonisiert werden, dass Schulen klare und einheitliche Ziele aus einer einzigen seriösen Quelle erhalten. Darüber hinaus erfordern die in den jeglichen Leitfäden und Standards festgelegten Schwellenwerte eine routinemäßige Überwachung und Durchsetzung, wenn sie konsequent eingehalten werden sollen. Ohne geeignete Durchsetzungsmaßnahmen werden solche Ziele wahrscheinlich nur angestrebt oder hängen vom Engagement einzelner Schulmitarbeitenden ab. Die derzeit fehlende Regulierung im Bereich der Lüftungspolitik hat zu erheblichen Unterschieden bei der Lüftungsqualität und den Standards der Innenraumluft in einzelnen Klassenzimmern und Schulen geführt, wie in diesem Bericht aufgezeigt wird. Diese Situation trägt unweigerlich zu bestehenden gesundheitlichen und leistungsbezogenen Ungleichheiten unter SuS und Schulpersonal in ganz Österreich bei und verschärft diese zusätzlich.

Die bestehenden europäischen und österreichischen Normen zur Innenraumluftqualität spiegeln weder die von der REHVA (2022), der The Lancet COVID-19 Commission (2022) und der ASHRAE (2023) empfohlenen „gesundheitsbasierten“ Lüftungs- und CO<sub>2</sub>-Ziele noch die Auswirkungen der jüngsten Überarbeitungen der WHO-Richtlinien zur Außenluftqualität (2021b) angemessen wider. Bestehende Richtlinien und Standards müssen überarbeitet und aktualisiert werden, um sicherzustellen, dass bewährte Verfahren im Zusammenhang mit der Luftqualität in Innenräumen und der Belüftung in Schulen umgesetzt werden. Klare Leitlinien müssen mit einer umfassenden Kampagne zur Überwachung der Luftqualität in Schulklassen und von robusten Durchsetzungsmaßnahmen begleitet werden, ohne die sich an der aktuellen Situation nichts ändern wird. Eine detaillierte Kosten-Nutzen-Analyse der Umsetzung höherer Lüftungsraten und/oder zusätzlicher Luftreinigungsmaßnahmen (wie ASHRAE-Norm 241) wurde (nach Kenntnis der Autor\*innen) weder in Österreich noch in Europa durchgeführt, und dies wäre eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung einer wirtschaftlichen Begründung zur Unterstützung einer solchen revisionistischen Politik.

Im Zusammenhang mit der Planung neuer Schulgebäude müssen eine Reihe miteinander verknüpfter Aspekte berücksichtigt werden, die einen erheblichen Einfluss auf die Luftqualität in Innenräumen sowie auf Gesundheit und Wohlbefinden haben können. Dazu gehören:

- (i) Klassenzimmergrößen – Natürlich belüftete Klassenzimmer mit geringerer Belegungsichte schneiden besser ab, wenn es darum geht, eine akzeptable Luftqualität im Innenraum aufrechtzuerhalten und ausreichend Freiraum zwischen Tischen und zu öffnenden Fenstern zu ermöglichen. Es sollten Richtlinien für maximale Belegungsdichten und minimale Fensteröffnungsflächen in Klassenzimmern festgelegt werden, abhängig von der vorgesehenen Belegung.

- (ii) Art und Auslegung des Lüftungssystems – Mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung (sofern richtig ausgelegt) kann eine energieeffiziente und thermisch komfortable Umgebung bieten, die ganzjährig den modernen Lüftungsrichtlinien entspricht. Die Nenn- und Maximalleistung des Systems bzw. der Systeme sowie die Systemkonfiguration (Positionierung von Zu- und Abluftöffnungen) sollten so gestaltet sein, dass eine möglichst hohe Lüftungseffektivität erreicht wird und die aktuellen „gesundheitsbasierten“ Lüftungsstandards eingehalten werden
- (iii) Fensterdesign und -positionierung – Zu öffnende Fenster bleiben ein wichtiger Bestandteil einer guten Lüftungsgestaltung, selbst in mechanisch belüfteten Räumen. Die Position der zu öffnenden Fensterflügel ist entscheidend für ihre Wirksamkeit als Lüftungselement. Fensteröffnungen auf niedriger und hoher Ebene ermöglichen die maximale Nutzung des sogenannten „Kamineffekts“, der die Wirksamkeit einseitiger Lüftung erheblich verbessern kann. Öffnungen auf hoher Ebene sind insbesondere im Winter nützlich, um Zugluft zu reduzieren und verbrauchte Luft abzuführen, sowie im Sommer, um Wärme aus dem Raum zu entfernen. Fensterbeschläge und -ausstattungen (z. B. Griffe, Schlösser etc.) müssen leicht zugänglich sein – insbesondere bei hoch liegenden Fensteröffnungen – auch für Menschen mit eingeschränkter Mobilität. Innen- und außenliegende Verschattungselemente sollten so funktionieren, dass sie den Luftstrom für die Lüftung nicht behindern.

## 7.3 Einschränkungen der Studie und weitere Arbeiten

### 7.3.1 Einschränkungen

Diese Studie wurde in relativ kurzer Zeit umgesetzt, und hat zu einer Zeit begonnen, als die COVID-19-Pandemie den Schulbetrieb noch stark beeinträchtigte, um Informationen für Entscheidungen über die Zukunft der Lüftungspraktiken an österreichischen Schulen zu liefern. Die Vorbereitungs- und Planungszeit war daher angesichts des Umfangs des Projekts vergleichsweise kurz. In weniger als sechs Monaten wurden mehr als 1320 Sensoren, über 120 Gateways und Zusatzgeräte beschafft, kalibriert und in 120 Schulen in den neun Bundesländern Österreichs installiert. Im Nachhinein und mit mehr Zeit hätten einige Aspekte des Forschungsdesigns, der Planung und der Umsetzung verbessert werden können. Zum Beispiel hätten mehr Zeit und Ressourcen eine weitere Verfeinerung der Sensor-Kalibrierungsprozesse und ein besseres Verständnis der Grenzen der Sensoren und der LoRaWAN-Technologie vor der Installationsphase ermöglicht.

Es gibt auch eine Reihe von Lücken in der vorhandenen Wissensbasis, deren Schließung dazu beitragen wird, die mit einigen der Erkenntnisse verbundene Unsicherheit zu verringern. So ist beispielsweise in Bezug auf das allgemeine Infektionsrisiko vieler luftübertragener Viren (einschließlich SARS-CoV-2) in Klassenzimmern das genaue Verhältnis von Kurzstreckenübertragung (Tröpfchen- und Aerosolübertragung) zu Langstreckenübertragung (Diffusion) nach wie vor ungewiss. Es werden auch bessere Informationen benötigt, um die genauen prophylaktischen Vorteile der Belüftung (sowohl in Bezug auf die Belüftungsraten als auch auf Lüftungseffektivität und Systemauslegung) in realen Kontexten zu verstehen. Trotz einer Fülle theoretischer Belege und Modellierungsstudien mangelt es in dieser Hinsicht an hochwertigen empirischer Feldstudien.

Im Rahmen dieser Studie wurden neue Erkenntnisse über die Rolle von CO<sub>2</sub> als direkter Kausalfaktor für die Verlängerung der Aerosolstabilität von luftgetragenen Viren (Haddrell, 2024) gewonnen. Dieses Wissen wurde noch nicht in die Infektionsrisikomodelle und „gesundheitsbasierten“ Schwellenwerte integriert, die zur Bewertung des Risikos der Übertragung von Krankheiten durch die Luft in Klassenzimmern verwendet werden. Mit der Zeit könnte dieses neue Wissen der Bedeutung der Aufrechterhaltung niedriger CO<sub>2</sub>-Werte in Klassenzimmern zusätzliches Gewicht verleihen.

Ebenso haben die Vorteile der Belüftung in Bezug auf die schulische Leistung und Fehlzeiten manchmal zu uneinheitlichen Ergebnissen geführt. Während der allgemeine Zusammenhang zwischen schlechter Raumluftqualität und verminderter schulischer Leistung (Shendell, 2004; Petersen, 2016) und vermehrten krankheitsbedingten Fehlzeiten (Mendell, 2013; Csobod, 2014) gut dokumentiert ist (Fisk, 2017; Wargocki, 2020), sind weitere Arbeiten erforderlich, um die genaue Art der Zusammenhänge zu ermitteln. Dies ist wichtig für die Entwicklung gezielter Lösungen, da die Zusammenhänge zwischen verbesserter Belüftungsraten, akademische Leistungen und Fehlzeiten über eine dritte Variable, wie z. B. die Konzentration flüchtiger organischer Verbindungen (VOC), vermittelt (oder teilweise vermittelt) werden könnten.

In Bezug auf die Ableitung von Belüftungsluftmengen auf der Grundlage der Massenbilanzumrechnung von stationären CO<sub>2</sub>-Konzentrationen weist ASTM D6245 darauf hin, dass Massenbilanzberechnungen manchmal mit wenig oder keiner Diskussion über ihre Grenzen oder die Annahmen, auf denen sie basieren, präsentiert werden. Daher behauptet die ASTM (2018), dass die Massenbilanztechnik zur Ableitung von Luftströmen in der Vergangenheit oft inkorrekt angewendet

wurde und daher die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Innenräumen möglicherweise falsch interpretiert wurden (ASTM, 2018). Dies bedeutet, dass die fehlerhafte Anwendung dieser Methode in früheren Studien die Zuverlässigkeit der daraus abgeleiteten Lüftungsdaten beeinträchtigen könnte, wodurch direkte Vergleiche mit dieser Studie in einigen Fällen unzuverlässig werden. Es ist jedoch zu beachten, dass die ASTM-Norm D6245 selbst in dieser Hinsicht Potenzial für Fehlinterpretationen bietet, da sie besagt, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration in Innenräumen in einem Gebäude überwacht werden kann, nachdem die Bewohner\*innen das Gebäude verlassen haben, um die Außenluftwechselrate des Gebäudes zu bestimmen. Während ein solcher Ansatz zur Abschätzung der Hintergrundluftwechselrate in bestimmten Kontexten geeignet sein mag, gibt es deutliche Einschränkungen dieses Ansatzes im Zusammenhang mit typischen Schulgebäuden, in denen große Volumina abgestandener Luft (mit deutlich über der Außenluft liegenden CO<sub>2</sub>-Konzentrationen) in angrenzenden Fluren und verbundenen Räumen oft über längere Zeiträume eingeschlossen bleiben.

Schließlich besteht eine wesentliche Einschränkung dieser Studie darin, dass LuL oder SuS nicht in der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten oder in der richtigen Belüftung eines Klassenzimmers je nach Jahreszeit und Außentemperatur geschult wurden. Dies bedeutet, dass der volle Nutzen der Verwendung von CO<sub>2</sub>-Überwachungsgeräten in Klassenzimmern im Rahmen eines vollständig unterstützten Lüftungstrainingsprogramms weitgehend unbekannt ist. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Ergebnisse bei entsprechender Schulung wahrscheinlich noch besser ausfallen würden als die in dieser Studie festgehaltenen.

### 7.3.2 Empfehlungen für weitere Arbeiten

Es können eine Reihe von Empfehlungen für die weitere Arbeit zur Konsolidierung der Ergebnisse dieser Studie in Bezug auf die Verbesserung der Belüftung und Luftqualität in Schulen ausgesprochen werden. Dazu gehören (in keiner bestimmten Reihenfolge):

- Eine detaillierte Prüfung der Lüftungseigenschaften aller Schulen (wie kürzlich in Deutschland durchgeführt). Erstellung einer detaillierteren Bau- und Lüftungsdatenbank aller Schulen, einschließlich ihrer Energieausweise und Lüftungssysteme (natürlich oder mechanisch) und Systemmerkmale (Volumenströme, Lüftungseffektivität, Lärm usw.).
- Detaillierte Leistungsstudie und Feedback der Endnutzer\*innen (einschließlich Betriebs- und Kostenfragen) im Zusammenhang mit dem Einsatz mechanischer Lüftungssysteme in Schulen.
- Überwachung der Luftqualität und Belüftung in Schulbussen und anderen öffentlichen Verkehrsmitteln
- Umfassende Überwachung von Schadstoffen im Freien und in Innenräumen (einschließlich Partikel, Gase und luftgetragene Krankheitserreger) innerhalb und außerhalb von Schulgebäuden, wobei Schulen mit hohem Risiko im Mittelpunkt stehen
- Experimentelle- und praxisbezogene Studien zur Untersuchung der Wirksamkeit von HEPA-Filtern in natürlich belüfteten Klassenzimmern als Mittel zur Reduzierung von Krankheitserregern und Luftschadstoffen in der Luft.
- Interventionelle, doppelblinde Cross-Over-Studien zur Bewertung Belüftung und/oder HEPA-Filter sowie von UV-C-Systemen in oberen Raumzonen in Bezug auf die Gesundheit der Raumnutzenden und die Reduktion von Fehlzeiten.





## 8 Danksagung

Wir möchten uns ganz besonders bei den Schuldirektor\*innen der 120 Schulen bedanken, die am ImpAQS-Projekt teilgenommen haben, dass sie uns Zugang zu ihren Schulen gewährt und sich die Zeit genommen haben, an unseren Umfragen teilzunehmen. Wir sind auch sehr dankbar für die Unterstützung durch die Schulwart\*innen während der Installationsphase und der laufenden Überwachung unserer Sensoren. Abschließend möchten wir uns bei allen teilnehmenden Klassenlehrer\*innen dafür bedanken, dass sie unsere Umfragen mit vollem Einsatz beantwortet haben und sich täglich für die Aufrechterhaltung der Luftqualität in den Klassenzimmern einsetzen, während sie die jüngere Generation unterrichten.

Eine große Anzahl von Forscher\*innen, Organisationen und Einzelpersonen hat ihre Zeit und Mühe in die Unterstützung dieses Projekts investiert. Wir sind dankbar für die Ratschläge, Diskussionen, Informationen, Zeit und praktische Unterstützung, die sie mit uns geteilt haben und die zur Stärkung der Qualität und der Ergebnisse dieser Studie beigetragen haben. Unter den Dutzenden von Personen, die auf die eine oder andere Weise einen Beitrag geleistet haben, möchten wir den folgenden Personen unseren besonderen Dank für die Unterstützung aussprechen, die sie dem Projekt zukommen haben lassen.

Ao. Univ.-Prof. Dr. Martin Polaschek, ehemaliger Bundesminister, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung

Mag. MBA Martin Netzer, Generalsekretär, Bundesministerium für Bildung

Dr.<sup>in</sup> Hemma Bauer, RL<sup>in</sup>, Bundesministerium für Bildung

Mag. Markus Pasterk, Gastprof. MinR, Bundesministerium für Bildung

Frau Isabell Duscher, ADir<sup>in</sup>, Bundesministerium für Bildung

Mag. Dr. Robert Klinglmair, Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen

Herr Michael Bruneforth, MA, Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen

Dr. Roman Freunberger, Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen

Herr Moritz Friedrich, MSc, Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen

Dr.techn. Dr.h.c.mult.Univ.-Prof. Dr. Harald Kainz, ehemaliger Rektor TU Graz

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Horst Bischof, Rektor TU Graz

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Monsberger, Vizerektor TU Graz

Assoc. Prof. Dipl.-Chem. Dr.rer.nat. Torsten Mayr, TU Graz

Dominik Rabl, MA, TU Graz

Mag.iur. Mag.rer.soc.oec. Roman Moser, TU Graz, sowie das gesamte Team der Personalabteilung

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andrea Berghold, MedUni Graz

Prof. Priv.-Doz. Mag. Dr. Alexander Avian, MedUni Graz

Prof. Dr. Ulrich Pöschl, Max-Planck-Institut für Chemie  
Dr. Thomas Klimach, Max-Planck-Institut für Chemie  
Dr. Frank Helleis, Max-Planck-Institut für Chemie  
Dipl.-Ing. Clara Pogner, Austrian Institute of Technology  
Dr. Ivan Lunati, EMPA  
Dr. Gorji Hossein, EMPA  
Herr Roger Vonbank, EMPA  
Mag. Dipl.-Ing. Wolfgang Spangl, UBA  
Dr. Bradley Matthews, MSc, UBA/BOKU  
Ph.D. M.Sc. Kathiravan Mohamed Meeran, BOKU  
Priv.-Doz. Mag.rer.nat. Dr.rer.nat. Andrea Watzinger, BOKU  
Prof. Dr. Christian Schwarzbauer, Hochschule München  
Mag.rer.soc.oec. Thomas Trink, MSc, F&T Haus, TU Graz  
Mag. (FH) Susanne Filzwieser, Medienservice TU Graz  
Herr Andreas Gössler, Amtsdirektor, Einkaufsservice TU Graz  
Hofrat Mag.iur. Robert Schröcker, TU Graz  
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Radl, TU Graz  
Prof. Mag. Dipl.-Ing. MA Hannes Grunbichler, HTL Weiz  
Herr Reinhard Novak, CEO LineMetrics GmbH  
Herr Michael Tempelmayr, LineMetrics GmbH  
Herr Rainer Resel, LineMetrics GmbH  
Herr Alexander Gruber, LineMetrics GmbH

Ein weiterer besonderer Dank gilt den Techniker\*innen und Hilfskräften des ImpAQS-Projekts, ohne die die Installationsphase der Geräte nicht rechtzeitig hätte abgeschlossen werden können (in alphabetischer Reihenfolge):

Ines Abram, Dr. Jayaprithika Anandan, Maria Illinca-Badulescu, Dipl.-Ing Nina Bruckner, Dipl.-Ing Lukas Edl, Georg Eidenhammer, Gregor Fries, Lisa Hierzenberger, Johannes Huboi, Max Jost, Lena Maier, Andreas Miklau, Verena Neuhold, Dipl.-Ing. Mario Oboril, Dr Sofia Pastori, Christoph Paulegger, Dipl.-Ing. Muhammad Sanli, Michael Schmidberger, Jakob Traxler, Elizabeth Würzinger.

## Quellenangaben

Afshari, A., Aganovic, A., Cao, G., Ekberg, L., et al. (2023). *Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases*. Available at: <http://www.scanvac.eu> [Accessed: 18 September 2024].

Airclean (2024). Indoor Air Quality Filtration System - Nitrogen Dioxide, PM10, PM2.5, NOx Filter for MVHR. Available at: <https://www.airclean.co.uk/indoor-air-quality-filtration/indoor-air-quality-filter-system/> [Accessed: 24 October 2024].

Allen, J.G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., et al. (2016). 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. *Environmental Health Perspectives* 124(6), pp. 805–812. doi: 10.1289/EHP.1510037.

Allen, J.G. (2024). Recommitting to Ventilation Standards for Healthy Indoor Air Quality. *American journal of public health* 114(10), pp. 991–993. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/39231402> [Accessed: 25 September 2024].

Altrichter, H. and Helm, C. (2022). Austrians schools in the COVID-19 pandemic era. *Tertium Comparationis Journal für International und Interkulturell Vergleichende Erziehungswissenschaft* 28(3), pp. 300–331.

Andamon, M.M., Rajagopalan, P. and Woo, J. (2023). Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO2 concentration measurements. *Building and Environment* 237, p. 110313. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2023.110313.

Antoniou, F., Alghamdi, M.H. and Kawai, K. (2024). The effect of school size and class size on school preparedness. *Frontiers in Psychology* 15, p. 1354072. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11002959/> [Accessed: 18 October 2024].

Arbeitsinspektion (2020). Occupational safety and health provisions. Available at: [https://www.arbeitsinspektion.gv.at/Information\\_in\\_English/OSH\\_provisions/Occupational\\_safety\\_and\\_health\\_provisions.html](https://www.arbeitsinspektion.gv.at/Information_in_English/OSH_provisions/Occupational_safety_and_health_provisions.html) [Accessed: 30 August 2024].

ASHRAE (2022). *ANSI/ASHRAE Standard 62.1 - 2022, Ventilation and Acceptable Indoor Air Quality*. Available at: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standards-62-1-62-2> [Accessed: 24 September 2024].

ASHRAE (2023). *ASHRAE Standard 241-2023, Control of Infectious Aerosols*. Available at: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/ashrae-standard-241-control-of-infectious-aerosols> [Accessed: 27 July 2023].

ASI (2023). *ÖNORM H 6039:2023 - Lüftungstechnische Anlagen - Kontrollierte mechanische Be- und Entlüftung von Schul-, Unterrichts- oder Gruppenräumen sowie Räumen mit ähnlicher Zweckbestimmung - Anforderungen, Dimensionierung, Ausführung, Betrieb und Wartung*. Available at: <https://www.austrian-standards.at/de/shop/onorm-h-6039-2023-02-01~p2880050> [Accessed: 18 September 2024].

ASTM (2018). *ASTM D6245-18 Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation*. Available at: <https://www.astm.org/d6245-18.html> [Accessed: 23 September 2024].

ASTM (2024). *ASTM D6245-24. Standard Guide on the Relationship of Indoor Carbon Dioxide*

*Concentrations to Indoor Air Quality and Ventilation*. Available at: <https://www.astm.org/d6245-24.html> [Accessed: 11 October 2024].

Avella, F., Gupta, A., Peretti, C., Fulici, G., et al. (2021). Low-Invasive CO<sub>2</sub>-Based Visual Alerting Systems to Manage Natural Ventilation and Improve IAQ in Historic School Buildings. *Heritage 2021, Vol. 4, Pages 3442-3468* 4(4), pp. 3442–3468. Available at: <https://www.mdpi.com/2571-9408/4/4/191/htm> [Accessed: 20 August 2024].

Barcellini, L., Forlanini, F., Sangiorgio, A., Gambacorta, G., et al. (2021). Does school reopening affect SARS-CoV-2 seroprevalence among school-age children in Milan? *PLOS ONE* 16(9): e0257046. Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0257046> [Accessed: 8 August 2024].

Batterman, S. (2017). Review and Extension of CO<sub>2</sub>-Based Methods to Determine Ventilation Rates with Application to School Classrooms. *International journal of environmental research and public health* 14(2). Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28165398/> [Accessed: 18 October 2024].

Baukulturpolitik (2024). Städte und Dörfer. Available at: <https://www.baukulturpolitik.at/staedte-und-doerfer.html> [Accessed: 18 October 2024].

Beinfait, D., Fitzner, K., Lindvall, T., Seppanen, O., et al. (1992). *Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings. Report No.11. European Collaborative Action (ECA) – Indoor air quality and its impact on man*.

Belgian statutes *Belgium Clean Air Law: A Law to Improve Indoor Air Quality in Enclosed Spaces Open to the Public*. Available at: [https://whn.global/app/uploads/2023/05/06112022\\_-\\_loi\\_qai\\_wet\\_blk.pdf](https://whn.global/app/uploads/2023/05/06112022_-_loi_qai_wet_blk.pdf) [Accessed: 23 September 2024].

Berg-Munch, B., Clausen, G. and Fanger, P.O. (1986). Ventilation requirements for the control of body odor in spaces occupied by women. *Environment International* 12(1–4), pp. 195–199. doi: 10.1016/0160-4120(86)90030-9.

Bergeron, O. and Strachan, I.B. (2011). CO<sub>2</sub> sources and sinks in urban and suburban areas of a northern mid-latitude city. *Atmospheric Environment* 45(8), pp. 1564–1573. doi: 10.1016/J.ATMOENV.2010.12.043.

Blocken, B., van Druenen, T., Ricci, A., Kang, L., et al. (2021). Ventilation and air cleaning to limit aerosol particle concentrations in a gym during the COVID-19 pandemic. *Building and Environment* 193, p. 107659. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2021.107659.

BMBWF (2021). 4-Punkte-Plan für einen sicheren Schulstart im Herbst. Available at: <https://www.bmbwf.gv.at/Ministerium/Presse/20210804.html> [Accessed: 19 August 2024].

BMJ (2024). 11. Correlation and regression. Available at: <https://www.bmj.com/about-bmj/resources-readers/publications/statistics-square-one/11-correlation-and-regression> [Accessed: 12 October 2024].

BMK (2021). Positionspapier zur Bewertung von Innenräumen in Hinblick auf das Infektionsrisiko durch SARS-CoV-2. Available at: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html) [Accessed: 30 August 2024].

BMK (2022). Positionspapier zu Lüftungsunterstützenden Maßnahmen zur Infektionsprophylaxe – Einsatz von Luftreinigern und Einbringung von Wirkstoffen in die Innenraumluft Positionspapier des Arbeitskreises Innenraumluft. Available at: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html) [Accessed: 30

August 2024].

BMK (2024a). Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L). Available at: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/luft/recht/ig\\_l.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/recht/ig_l.html) [Accessed: 30 August 2024].

BMK (2024b). Positionspapier zu Lüftungs- erfordernissen in Bildungseinrichtungen. Wien. Available at: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html) [Accessed: 19 August 2024].

BMK (2024c). Positionspapiere des Arbeitskreises Innenraumluft. Available at: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/arbeitskreis.html) [Accessed: 19 August 2024].

BMK (2024d). Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft – Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter. Wien. Available at: [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/luft/innenraum/rl\\_luftqualitaet.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/innenraum/rl_luftqualitaet.html) [Accessed: 18 September 2024].

Bordass, B., Leaman, A. and Ruyssevelt, P. (2001). Assessing building performance in use 5: conclusions and implications. *Building Research & Information* 29(2). Available at: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rabri20> [Accessed: 16 October 2024].

Boslaugh, S.E. (2023). sick building syndrome. *Encyclopedia Britannica* . Available at: <https://www.britannica.com/science/sick-building-syndrome>.

Brandl, A., Tappler, P., Twrdik, F. and Damberger, B. (2001). Untersuchungen raumluft- hygienischer Parameter in oberösterreichischen Schulen. In: *AGÖF Tagungsband des 6. Fachkongresses 2001 – Umwelt, Gebäude und Gesundheit*. Nürnberg, pp. 355-366. Available at: <https://www.innenraumanalytik.at/Newsletter/brandl.pdf>.

Bruns, R. (2023). *Cost-Benefit Analysis of ASHRAE Standard 241*. ASHRAE Journal. Available at: <https://shorturl.at/4cnZ> [Accessed: 18 September 2024].

BSGPK (2024). Abwassermonitoring Österreich. Available at: <https://abwassermonitoring.at/dashboard/> [Accessed: 23 August 2024].

Buonanno, G., Ricolfi, L., Morawska, L. and Stabile, L. (2022). Increasing ventilation reduces SARS-CoV-2 airborne transmission in schools: A retrospective cohort study in Italy's Marche region. *Frontiers in public health* 10. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36568748/> [Accessed: 8 August 2024].

Burge, S., Moore, V., Huntley, C., Robertson, A., et al. (2021). Occupational asthma in school teachers. *European Respiratory Journal* 58(suppl 65), p. PA1899. Available at: [https://erj.ersjournals.com/content/58/suppl\\_65/PA1899](https://erj.ersjournals.com/content/58/suppl_65/PA1899) [Accessed: 6 September 2024].

Burridge, H.C., Bontitsopoulos, S., Brown, C., Carter, H., et al. (2023). Variations in classroom ventilation during the COVID-19 pandemic: Insights from monitoring 36 naturally ventilated classrooms in the UK during 2021. *Journal of Building Engineering* 63, p. 105459. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105459> [Accessed: 21 August 2024].

BUWAL (1997). Luftqualität in Innenräumen. *Luft* 287

California Energy Commission (2013). *Building Energy Efficiency Standards For Residential and Nonresidential Buildings*. California Energy Commission. Available at: <https://www.buildingincalifornia.com/wp-content/uploads/2014/02/2013-energy-standards.pdf>

Canha, N., Mandin, C., Ramalho, O., Wyart, G., et al. (2016). Assessment of ventilation and indoor air pollutants in nursery and elementary schools in France. *Indoor Air* 26(3), pp. 350–365. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12222> [Accessed: 9 September 2024].

Carrer, P., de Oliveira Fernandes, E., Santos, H., Hänninen, O., et al. (2018). On the development of health-based ventilation guidelines: Principles and framework. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 15(7). Available at: [/pmc/articles/PMC6068630/?report=abstract](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31811111/) [Accessed: 17 September 2020].

CDC (2024). Estimated US Flu Disease Burden . Available at: <https://www.cdc.gov/flu-burden/php/data-vis/index.html> [Accessed: 25 September 2024].

CEN (2019). *EN 16798-1:2019 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*. Available at: <https://shorturl.at/DMNQ0>.

CEN (2019a). *CEN/TR 16798-2:2019 - Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Brussels*. Available at: <https://shorturl.at/R9JcL> [Accessed: 13 September 2024].

CEN (2022). *EN 16798-3:2022 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 3: For non-residential buildings*. Available at: <https://www.austrian-standards.at/de/shop/onorm-en-16798-3-2022-12-15~p2644384> [Accessed: 11 September 2024].

CEN (2024). *ÖNORM EN 16798-1:2024 03 01 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1*. Available at: [https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/-norm-en-16798-1-2024-03-01-1167997\\_saig\\_on\\_on\\_3377479/](https://www.intertekinform.com/en-gb/standards/-norm-en-16798-1-2024-03-01-1167997_saig_on_on_3377479/) [Accessed: 12 September 2024].

Chen, Z.Y., Petetin, H., Méndez Turrubiates, R.F., Achebak, H., et al. (2024). Population exposure to multiple air pollutants and its compound episodes in Europe. *Nature Communications* 2024 15:1 15(1), pp. 1–11. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-46103-3> [Accessed: 29 September 2024].

Csobod, E., Annesi-Maesano, I., Barrero-Moreno, J., Beregszászi, T., et al. (2014). *SINPHONIE : Schools Indoor Pollution & Health Observatory Network in Europe : final report*. Publications Office of the European Union. Available at: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC91160> [Accessed: 8 August 2024].

Daniels, R. (2016). Making School Spaces: BB101 – Ventilation in School Building. Available at: <https://thespaces.org.uk/wp-content/uploads/2016/07/BB101-Ventilation-Richard-Daniels-.pdf> [Accessed: 18 October 2024].

Dorer, V. and Breer, D. (1998). Residential mechanical ventilation systems: performance criteria and evaluations. *Energy and Buildings* 27(3), pp. 247–255. doi: 10.1016/S0378-7788(97)00049-2.

ECDC (2023). Factsheet for health professionals on COVID-19. Available at: <https://www.ecdc.europa.eu/en/infectious-disease-topics/z-disease-list/covid-19/factsheet-covid-19> [Accessed: 17 September 2024].

ECDC (2024). Questions and answers on COVID-19: Children aged 1 – 18 years and the role of school settings. Available at: <https://www.ecdc.europa.eu/en/covid-19/questions-answers/questions-answers-school-transmission> [Accessed: 8 August 2024].

Education and Skills Funding Agency (2018). *BB 101: Guidelines on ventilation, thermal comfort and indoor air quality in schools*. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/building-bulletin-101-ventilation-for-school-buildings#history> [Accessed: 11 September 2020].

EEA (2024). *Europe's air quality status 2024*. Available at: <https://www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2024> [Accessed: 29 September 2024].

EMPA (2021). More infections in poorly ventilated classrooms. Available at: <https://www.empa.ch/web/s604/covid-and-co2> [Accessed: 22 March 2022].

EPA (2009). Risk Assessment Guidance for Superfund. Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment). *US Environmental Protection Agency*. Available at: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/140530.pdf> [Accessed: 26 August 2024].

EPA (2024). Health Effects of Ozone Pollution. Available at: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution> [Accessed: 29 September 2024].

European Commission (2019). Fitness Check of the Ambient Air Quality Directives concludes that they have been partially effective in improving air quality and achieving air quality standards - European Commission. Available at: [https://commission.europa.eu/news/fitness-check-ambient-air-quality-directives-concludes-they-have-been-partially-effective-improving-2019-11-29\\_en](https://commission.europa.eu/news/fitness-check-ambient-air-quality-directives-concludes-they-have-been-partially-effective-improving-2019-11-29_en) [Accessed: 16 October 2024].

European Commission (2024). EU air quality standards. Available at: [https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards\\_en](https://environment.ec.europa.eu/topics/air/air-quality/eu-air-quality-standards_en) [Accessed: 30 September 2024].

European Parliament (2023). *REPORT on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on ambient air quality and cleaner air for Europe (recast)*. A9-0233/2023. Available at: [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0233\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-9-2023-0233_EN.html) [Accessed: 29 September 2024].

European Union *Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004*. European Union. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32004L0107> [Accessed: 16 October 2024].

European Union *Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council*. European Union. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32008L0050> [Accessed: 16 October 2024].

Eurovent (2018). *Eurovent 4/23 - selection of EN ISO 16890 rated air filter classes for general filtration applications*. Brussels. Available at: [www.eurovent.eu](http://www.eurovent.eu). [Accessed: 30 September 2024].

Evans, J.R. and Mathur, A. (2005). The value of online surveys. *Internet Research* 15(2), pp. 195–219. Available at: <https://doi.org/10.1108/10662240510590360> [Accessed: 16 October 2024].

Everard, M., Johnston, P., Santillo, D. and Staddon, C. (2020). The role of ecosystems in mitigation and management of Covid-19 and other zoonoses. *Environmental Science and Policy* 111, pp. 7–17. Available at: [/pmc/articles/PMC7247996/](https://pmc/articles/PMC7247996/) [Accessed: 22 June 2021].

Fanger, P.. and Berg-Munch, B. (1983). Ventilation and body odor. AIVC. Available at: <https://www.aivc.org/resource/ventilation-and-body-odor> [Accessed: 17 September 2024].

Fears, A.C., Klimstra, W.B., Duprex, P., Hartman, A., et al. (2020). Persistence of Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 in Aerosol Suspensions. *Emerging infectious diseases* 26(9). doi: 10.3201/eid2609.201806.

Fisk, W.J., Black, D. and Brunner, G. (2011). Benefits and costs of improved IEQ in U.S. offices. *Indoor Air* 21(5), pp. 357–367. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0668.2011.00719.x> [Accessed: 25 September 2024].

- Fisk, W.J. (2017). The ventilation problem in schools: literature review. *Indoor Air* 27(6), pp. 1039–1051. Available at: <http://doi.wiley.com/10.1111/ina.12403> [Accessed: 20 January 2021].
- Gao, J., Wargocki, P. and Wang, Y. (2014). Ventilation system type, classroom environmental quality and pupils' perceptions and symptoms. *Building and Environment* 75, pp. 46–57. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2014.01.015.
- Gao, Y.Q., Seah, J.J., Wang, M.L., Tang, Q. ping, et al. (2024). An unusually high prevalence of allergic rhinitis at high altitudes in 6–7 year old children – An epidemiological study. *The World Allergy Organization Journal* 17(5), p. 100887. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11089395/> [Accessed: 18 October 2024].
- Di Gilio, A., Palmisani, J., Pulimeno, M., Cerino, F., et al. (2021). CO2 concentration monitoring inside educational buildings as a strategic tool to reduce the risk of Sars-CoV-2 airborne transmission. *Environmental research* 202. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34224708/> [Accessed: 20 August 2024].
- Greenhalgh, T., Jimenez, J.L., Prather, K.A., Tufeki, Z., et al. (2022). Transmission of SARS-CoV-2: still up in the air – Authors' reply. *The Lancet* 399(10324), pp. 519–520. Available at: <http://www.thelancet.com/article/S0140673621027951/fulltext> [Accessed: 24 October 2024].
- Greenpeace (2018). *Mon air, mon école - Greenpeace Belgique*. Brussels. Available at: <https://www.greenpeace.org/belgium/fr/rapport/998/mon-air-mon-ecole/> [Accessed: 23 September 2024].
- Greer, N., Bart, B., Billington, C.J., Diem, S.J., et al. (2022). Original research: COVID-19 postacute care major organ damage: a systematic review. *BMJ Open* 12(8), p. e061245. Available at: </pmc/articles/PMC9412042/> [Accessed: 17 September 2024].
- Gunnarsen, L. and Ole Fanger, P. (1992). Adaptation to indoor air pollution. *Environment International* 18(1), pp. 43–54. doi: 10.1016/0160-4120(92)90209-M.
- Haddrell, A., Oswin, H., Otero-Fernandez, M., Robinson, J.F., et al. (2024). Ambient carbon dioxide concentration correlates with SARS-CoV-2 aerostability and infection risk. *Nature Communications* 2024 15:1 15(1), pp. 1–11. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-024-47777-5> [Accessed: 3 May 2024].
- Hanna, F., Alameddine, I., Zaraket, H., Alkalamouni, H., et al. (2023). Airborne influenza virus shedding by patients in health care units: Removal mechanisms affecting virus transmission. *PLOS ONE* 18(10), p. e0290124. Available at: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10599543/> [Accessed: 24 October 2024].
- Hastie, C.E., Lowe, D.J., McAuley, A., Mills, N.L., et al. (2023). True prevalence of long-COVID in a nationwide, population cohort study. *Nature Communications* 2023 14:1 14(1), pp. 1–6. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41467-023-43661-w> [Accessed: 17 September 2024].
- Haverinen-Shaughnessy, U., Moschandreas, D.J. and Shaughnessy, R.J. (2011). Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air* 21(2), pp. 121–131. doi: 10.1111/j.1600-0668.2010.00686.x.
- Hawila, A.A.W., Diallo, T.M.O. and Collignan, B. (2023). Occupants' window opening behavior in office buildings: A review of influencing factors, modeling approaches and model verification. *Building and Environment* 242, p. 110525. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2023.110525.
- Heidemann, C., Sarganas, G., Du, Y., Gaertner, B., et al. (2023). Long-term health consequences among individuals with SARS-CoV-2 infection compared to individuals without infection: results of the



population-based cohort study CoMoLo Follow-up. *BMC Public Health* 23(1), p. 1587. Available at: </pmc/articles/PMC10440884/> [Accessed: 17 September 2024].

Helleis, F., Klimach, T. and Pöschl, U. (2023). Wirksamkeit, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz in Innenräumen: Fensterlüften, Abluftventilatoren, Raumlufthechnik und Luftreiniger. Available at: <https://zenodo.org/record/7586167> [Accessed: 4 August 2023].

Herath, S., Mansour, A. and Bentley, R. (2024). Urban density, household overcrowding and the spread of COVID-19 in Australian cities. *Health & Place* 89, p. 103298. doi: 10.1016/J.HEALTHPLACE.2024.103298.

HFCSE (2024). Legal framework regarding indoor air quality. Available at: <https://www.health.belgium.be/en/closer-legal-framework-indoor-air-quality#principles> [Accessed: 23 September 2024].

Hohenblum, P. (2008). *LUKI: Air and children - Influence of indoor air on the health of children in all-day schools - BML DaFNE*. Vienna. Available at: <https://dafne.at/projekte/luki> [Accessed: 24 September 2024].

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barr, J., et al. (2019). The CAMS reanalysis of atmospheric composition. *Atmospheric Chemistry and Physics* 19(6), pp. 3515–3556. doi: 10.5194/ACP-19-3515-2019.

ISO (2012). *ISO 16000-26:2012 - Indoor air – Part 26: Sampling strategy for carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)*. Available at: <https://bit.ly/3uyiJXF> [Accessed: 28 March 2022].

ISO (2017). *ISO 17772-1:2017. Energy performance of buildings — Indoor environmental quality — Part 1: Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings*. Available at: <https://www.iso.org/standard/60498.html> [Accessed: 4 April 2022].

ISO (2023). *ISO 16000-41:2023 - Indoor air — Part 41: Assessment and classification*. Available at: <https://www.iso.org/standard/76519.html> [Accessed: 24 September 2024].

Jiminez, J. (2020). COVID-19 Is Transmitted Through Aerosols. We Have Enough Evidence, Now It Is Time to Act. Available at: <https://time.com/5883081/covid-19-transmitted-aerosols/> [Accessed: 14 September 2020].

Johnson, K.E., Lachmann, M., Stoddard, M., Pasco, R., et al. (2021). Detecting in-school transmission of SARS-CoV-2 from case ratios and documented clusters. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8095228> [Accessed: 8 August 2024].

Katafygiotou, M.C. and Serghides, D.K. (2014). Indoor comfort and energy performance of buildings in relation to occupants' satisfaction: investigation in secondary schools of Cyprus. *Advances in Building Energy Research* 8(2), pp. 216–240. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17512549.2013.865554> [Accessed: 26 August 2024].

Klimach, T., Helleis, F., McLeod, R.S., Hopfe, C.J., et al. (2021). The Max Planck Institute for Chemistry mechanical extract ventilation (MPIC-MEV) system against aerosol transmission of COVID-19. Available at: <https://zenodo.org/record/5802049> [Accessed: 13 May 2022].

Konstantopoulos, S. and Shen, T. (2023). Class size and teacher effects on non-cognitive outcomes in grades K-3: a fixed effects analysis of ECLS-K:2011 data. *Large-Scale Assessments in Education* 11(1), pp. 1–24. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40536-023-00182-8> [Accessed: 18 October 2024].

Kurnitski, J., Kiil, M., Mikola, A., Vösa, K.V., et al. (2023). Post-COVID ventilation design: Infection risk-

based target ventilation rates and point source ventilation effectiveness. *Energy and Buildings* 296, p. 113386. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2023.113386.

Kurnitski, J. (2024). Personal email correspondence 14.09.24.

Kvalsvig, A., Tuari-Toma, B., Timu-Parata, C., Bennett, J., et al. (2023). Protecting school communities from COVID-19 and other infectious disease outbreaks: the urgent need for healthy schools in Aotearoa New Zealand. Available at: <https://journal.nzma.org.nz/> [Accessed: 8 August 2024].

Laiman, R., He, C., Mazaheri, M., Clifford, S., et al. (2014). Characteristics of ultrafine particle sources and deposition rates in primary school classrooms. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.013> [Accessed: 10 September 2024].

Li, X., Qi, X., Ma, J., Pan, Y., et al. (2022). SARS-CoV-2 Remained Airborne for a Prolonged Time in a Lockdown Confined Space. *Aerosol and Air Quality Research* 22(2), p. 210131. Available at: <https://aaqr.org/articles/aaqr-21-06-0a-0131> [Accessed: 30 August 2024].

Li, Y., Gao, S., Fang, T., Gao, Y., et al. (2024). A method for estimating occupant carbon dioxide generation rates. *Energy and Buildings* 312, p. 114163. doi: 10.1016/J.ENBUILD.2024.114163.

Lowe, R., Chiu, L.F. and Oreszczyn, T. (2018). Socio-technical case study method in building performance evaluation. *Building Research & Information* 46(5). Available at: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rbri20> [Accessed: 16 October 2024].

Ludewig, E. and Senoner, W. (Eds.) (2024). *Sonnblick Observatorium - Scientific Activities*. Available at: [https://www.sonnblick.net/ic-orig/4JvRVGqHJ/InhalteBroschueren/SBO\\_Broschuere-Brochure\\_2024\\_FINAL\\_www.pdf](https://www.sonnblick.net/ic-orig/4JvRVGqHJ/InhalteBroschueren/SBO_Broschuere-Brochure_2024_FINAL_www.pdf)

De Marco, A., Garcia-Gomez, H., Collalti, A., Khaniabadi, Y.O., et al. (2022). Ozone modelling and mapping for risk assessment: An overview of different approaches for human and ecosystems health. *Environmental Research* 211, p. 113048. doi: 10.1016/J.ENVRES.2022.113048.

Matthews, B., Luther, A., Fasano, E., Tang, H., et al. (2024). *Investigating Vienna's methane budget with local observations of turbulent fluxes and total column mole fractions*. Vienna: Copernicus Meetings. Available at: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU24/EGU24-12294.html> [Accessed: 16 October 2024].

McLeod, R. and Swainson, M. (2017). Chronic overheating in low carbon urban developments in a temperate climate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305925>.

McLeod, Robert S., Hopfe, C.J., Bodenschatz, E., Moriske, H.J., et al. (2022). A multi-layered strategy for COVID-19 infection prophylaxis in schools: A review of the evidence for masks, distancing, and ventilation. *Indoor Air* 32(10), p. e13142. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.13142> [Accessed: 15 December 2022].

McLeod, R. S., Mathew, M., Salman, D. and Thomas, C.L.P. (2022). An Investigation of Indoor Air Quality in a Recently Refurbished Educational Building. *Frontiers in Built Environment* 7, p. 769761. doi: 10.3389/FBUIL.2021.769761/BIBTEX.

Mendell, M.J., Eliseeva, E.A., Davies, M.M., Spears, M., et al. (2013). Association of classroom ventilation with reduced illness absence: A prospective study in California elementary schools. *Indoor Air* 23(6), pp. 515–528. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12042> [Accessed: 12 October 2020].

Mendell, M.J., Chen, W., Ranasinghe, D.R., Castorina, R., et al. (2024). Carbon dioxide guidelines for

indoor air quality: a review. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology* 2024 34:4 34(4), pp. 555–569. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41370-024-00694-7> [Accessed: 18 September 2024].

Mendell, M.J. and Heath, G.A. (2005). Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air* 15(1), pp. 27–52. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1600-0668.2004.00320.x> [Accessed: 9 September 2024].

Mishra, J., Mishra, P. and Arora, N.K. (2021). Linkages between environmental issues and zoonotic diseases: with reference to COVID-19 pandemic. *Environmental Sustainability* 1, p. 3. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42398-021-00165-x> [Accessed: 22 June 2021].

Morawska, L., Marks, G.B. and Monty, J. (2022). Healthy indoor air is our fundamental need: the time to act is now. *Medical Journal of Australia* 217(11), pp. 578–581. doi: 10.5694/MJA2.51768.

Morawska, L., Li, Y. and Salthammer, T. (2024). Lessons from the COVID-19 pandemic for ventilation and indoor air quality. *Science* 385(6707), pp. 396–401. Available at: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adp2241> [Accessed: 18 September 2024].

Morawska, L., Allen, J., Bahnfleth, W., Bennett, B., et al. (2024). Mandating indoor air quality for public buildings If some countries lead by example, standards may increasingly become normalized. *Science* 383(6690), pp. 1418–1420. Available at: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.adl0677> [Accessed: 18 September 2024].

Müller, D., Burgholz, T.M., Rewitz, K., Bardey, J., et al. (2020). *Abschätzung des Infektionsrisikos durch aerosolgebundene Viren in belüfteten Räumen*. RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate (EBC). doi: 10.18154/RWTH-2020-11340.

Myatt, T.A., Staudenmayer, J., Adams, K., Walters, M., et al. (2002). A study of indoor carbon dioxide levels and sick leave among office workers. *Environmental Health* 2002 1:1 1(1), pp. 1–10. Available at: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-069X-1-3> [Accessed: 25 September 2024].

Nazaroff, W.W. (2022). Indoor aerosol science aspects of SARS-CoV-2 transmission. *Indoor Air* 32(1), p. e12970. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12970> [Accessed: 13 June 2022].

Ng, L. and Mills, D. (2024). The Impact of Outdoor Air Ventilation in School Corridors. *ASHRAE Journal* . Available at: ASHRAE.org [Accessed: 24 September 2024].

Nous aérons (2023). French regulations relating to direct-reading measurement of the CO2 level in daycare and schools indoor air | Version 2 UK of the 03.01.202. Available at: [https://nousaerons.fr/regulations/french\\_regulations\\_direct-reading\\_measurement\\_co2\\_v2.pdf](https://nousaerons.fr/regulations/french_regulations_direct-reading_measurement_co2_v2.pdf) [Accessed: 23 September 2024].

OECD (2024). Student-teacher ratio and average class size. Available at: <https://shorturl.at/IH3zb> [Accessed: 18 October 2024].

Olesen, B. (2015). Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of buildings. *REHVA Journal*

Parinduri, R.A. (2014). Do children spend too much time in schools? Evidence from a longer school year in Indonesia. *Economics of Education Review* 41, pp. 89–104. doi: 10.1016/J.ECONEDUREV.2014.05.001.

Pereira, A.R., Braga, D.F.O., Vassal, M., Gomes, I.B., et al. (2023). Ultraviolet C irradiation: A promising approach for the disinfection of public spaces? *Science of The Total Environment* 879, p. 163007. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.163007.

Persily, A. (2015). Challenges in developing ventilation and indoor air quality standards: The story of ASHRAE Standard 62. *Building and Environment* 91, pp. 61–69. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.02.026.

Persily, A. (2021). *Evaluating Ventilation Performance*. Zhang, Y. et al. eds. Springer, Singapore. Available at: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-981-10-5155-5\\_20-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-981-10-5155-5_20-1) [Accessed: 25 September 2024].

Persily, A. (2022). Development and application of an indoor carbon dioxide metric. *Indoor Air* 32(7), p. e13059. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.13059> [Accessed: 17 October 2024].

Persily, A. and de Jonge, L. (2017). Carbon dioxide generation rates for building occupants. *Indoor Air* 27(5), pp. 868–879. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12383> [Accessed: 23 September 2024].

Persily, A.K. (2016). Field measurement of ventilation rates. *Indoor air* 26(1), pp. 97–111. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25689218/> [Accessed: 18 October 2024].

Petersen, S., Jensen, K.L., Pedersen, A.L.S. and Rasmussen, H.S. (2016). The effect of increased classroom ventilation rate indicated by reduced CO<sub>2</sub> concentration on the performance of schoolwork by children. *Indoor Air* 26(3), pp. 366–379. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12210> [Accessed: 25 September 2024].

Pollozhani, F., McLeod, R.S., Schwarzbauer, C. and Hopfe, C.J. (2024). Assessing school ventilation strategies from the perspective of health, environment, and energy. *Applied Energy* 353, p. 121961. doi: 10.1016/J.APENERGY.2023.121961.

Pope, C.A. and Dockery, D.W. (2012). Acute Health Effects of PM<sub>10</sub> Pollution on Symptomatic and Asymptomatic Children. <https://doi.org/10.1164/ajrccm/145.5.1123> 145(5), pp. 1123–1128. doi: 10.1164/AJRCCM/145.5.1123.

Public Health Ontario (2022). COVID-19 Transmission through Short and Long-Range Respiratory Particles.

Raab, D. (2024). Telephone conversation with DI Raab of the ÖISS (8 October 2024).

REHVA (2021). REHVA COVID-19 guidance document version 4.1.

REHVA (2022). *Health-based target ventilation rates and design method for reducing exposure to airborne respiratory infectious diseases*. Available at: [https://www.rehva.eu/fileadmin/user\\_upload/2022/Health\\_based\\_target\\_ventilation\\_09012023.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/2022/Health_based_target_ventilation_09012023.pdf) [Accessed: 13 September 2024].

Republik Österreich *BGBI. II Nr. 368/1998 (Arbeitsstättenverordnung – AStV)*. Republik Österreich.

Republik Österreich *Immissionsschutzgesetz – Luft, IG-L*. Wien. Available at: <https://shorturl.at/Q2mMi> [Accessed: 30 August 2024].

République Française *Arrêté du 27 décembre 2022 fixant les conditions de réalisation de la mesure à lecture directe de la concentration en dioxyde de carbone dans l'air intérieur au titre de l'évaluation annuelle des moyens d'aération*. Légifrance. Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046830005> [Accessed: 23 September 2024].

République Française *Decree No. 2022-1690 of 27 December 2022 amending Decree No. 2012-14 of 5*

January 2012 on the assessment of ventilation means and measurement of pollutants carried out under the indoor air quality monitoring of certain establishments receiving the public - Legifrance. Légifrance . Available at: <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000046829352> [Accessed: 23 September 2024].

Rhodes, S., Wilkinson, J., Pearce, N., Mueller, W., et al. (2022). Occupational differences in SARS-CoV-2 infection: analysis of the UK ONS COVID-19 infection survey. *Journal of Epidemiology and Community Health* 76(10), p. 841. Available at: [/pmc/articles/PMC9484374/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39484374/) [Accessed: 8 August 2024].

Riley, R. (1980). Prevention and control of airborne infection in the community. *Annals of the New York Academy of Sciences* 353(1), pp. 331–339. Available at: <https://nyaspubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1749-6632.1980.tb18936.x> [Accessed: 1 October 2024].

RIS (2024). Schulzeitgesetz 1985 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 30.08.2024. Available at: <https://shorturl.at/PvNSi> [Accessed: 15 October 2024].

RIS *Arbeitsstättenverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 03.10.2024*. Rechtsinformationssystem des Bundes. Available at: <https://ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009098> [Accessed: 3 October 2024].

RIS *Bundesrecht konsolidiert: Gesamte Rechtsvorschrift für Arbeitsstättenverordnung, Fassung vom 03.10.2024*. Rechtsinformationssystem des Bundes. Available at: <https://ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10009098> [Accessed: 3 October 2024].

RIS *Ozongesetz Art. 1 § 4 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 01.01.2024*. Rechtsinformationssystem des Bundes. Available at: <https://shorturl.at/QovZE> [Accessed: 16 October 2024].

Rowe, B.R., Canosa, A., Meslem, A. and Rowe, F. (2022). Increased airborne transmission of COVID-19 with new variants, implications for health policies. *Building and Environment* 219, p. 109132. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109132.

Rudnick, S.N. and Milton, D.K. (2003). Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air* 13(3), pp. 237–245. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1034/j.1600-0668.2003.00189.x> [Accessed: 25 September 2024].

Sadick, A.M. and Issa, M.H. (2018). Differences in teachers' satisfaction with indoor environmental quality and their well-being in new, renovated and non-renovated schools. *Indoor and Built Environment* 27(9), pp. 1272–1286. doi: 10.1177/1420326X17717074.

Sadrizadeh, S., Yao, R., Yuan, F., Awbi, H., et al. (2022). Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering* 57, p. 104908. doi: 10.1016/J.JOBE.2022.104908.

Sanguinetti, A., Outcault, S., Pistochini, T. and Hoffacker, M. (2022). Understanding teachers' experiences of ventilation in California K-12 classrooms and implications for supporting safe operation of schools in the wake of the COVID-19 pandemic. *Indoor Air* 32(2), p. e12998. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.12998> [Accessed: 13 June 2022].

Schwarzbauer, C. (2021). Studie zu Luftqualität und Ansteckungsrisiken in deutschen Klassenzimmern: Lüften, Luftreiniger und Lüftungsanlagen im Vergleich - Aktuelles - News.

Schwarzbauer, C. (2022). *Forschungsprojekt 'Sicheres Klassenzimmer': Wirkung verschiedener Lüftungsmethoden hinsichtlich Luftqualität und Infektionsschutz im realen Schulunterricht*. Munich. Available at: <https://zenodo.org/records/7496827> [Accessed: 21 August 2024].

von Seidlein, L., Alabaster, G., Deen, J. and Knudsen, J. (2020). Crowding has consequences: Prevention and management of COVID-19 in informal urban settlements. *Building and Environment* 188, p. 107472. Available at: [/pmc/articles/PMC7680649/?report=abstract](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7680649/?report=abstract) [Accessed: 21 January 2021].

Seppänen, O., Fisk, W.J. and Lei, Q.H. (2006). Ventilation and performance in office work. *Indoor Air* 16(1), pp. 28–36. doi: 10.1111/J.1600-0668.2005.00394.X.

Seppänen, O., Brelih, N., Goeders, G. and Brussels, A.L. (2012). *HealthVent Health-Based Ventilation Guidelines for Europe: WP5 final report*. Available at: [https://www.rehva.eu/fileadmin/EU\\_projects/HealthVent/HealthVent\\_WP5\\_-\\_Final\\_Report.pdf](https://www.rehva.eu/fileadmin/EU_projects/HealthVent/HealthVent_WP5_-_Final_Report.pdf) [Accessed: 21 January 2021].

Shendell, D.G., Prill, R., Fisk, W.J., Apte, M.G., et al. (2004). Associations between classroom CO2 concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 14(5), pp. 333–341. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15330793/> [Accessed: 12 October 2020].

Stabile, L., Dell'Isola, M., Russi, A., Massimo, A., et al. (2017). The effect of natural ventilation strategy on indoor air quality in schools. *The Science of the total environment* 595, pp. 894–902. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28432989/> [Accessed: 20 August 2024].

Der Standard (2016). Österreich: Hoher Anteil an berufsbildenden Schülern. *DerStandard OECD-Bericht* 16 September. Available at: <https://www.derstandard.at/story/2000044473947/oesterreich-hoher-anteil-an-berufsbildenden-schuelern> [Accessed: 18 October 2024].

Statista (2019). Average number of students per primary level class in selected European countries. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1078190/students-per-class-in-europe/> [Accessed: 18 October 2024].

Statistik Austria (2024). Bildung in Zahlen . Available at: <https://www.statistik.at/statistiken/bevoelkerung-und-soziales/bildung/bildung-in-zahlen> [Accessed: 18 October 2024].

Szendi, D. and Sárosi-Blága, Á. (2022). Impact of the COVID-19 pandemic on smart city performance in Europe. *Észak-magyarországi Stratégiai Füzetek* 19(4), pp. 48–60. doi: 10.32976/STRATFUZ.2022.43.

Tak, S., Groenewold, M., Alterman, T., Park, R.M., et al. (2011). Excess Risk of Head and Chest Colds Among Teachers and Other School Workers. *The Journal of School Health* 81(9), p. 560. Available at: [/pmc/articles/PMC7185491/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7185491/) [Accessed: 6 September 2024].

Tans, P. and Thoning, K. (2020). How we measure background CO2 levels on Mauna Loa . Available at: [https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2\\_measurements.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2_measurements.html) [Accessed: 29 September 2024].

Tellier, R., Li, Y., Cowling, B.J. and Tang, J.W. (2019). Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary. *BMC Infectious Diseases* 19(1), p. 101. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6357359/> [Accessed: 24 October 2024].

Thangavel, P., Park, D. and Lee, Y.C. (2022). Recent Insights into Particulate Matter (PM2.5)-Mediated Toxicity in Humans: An Overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(12). Available at: [/pmc/articles/PMC9223652/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9223652/) [Accessed: 29 September 2024].

The Lancet COVID-19 Commission (2021). *Designing infectious disease resilience into school buildings through improvements to ventilation and air cleaning*. Available at: <https://covid->

19.forhealth.org/lancet-covid-19-commission-task-force-on-safe-work-safe-school-and-safe-travel/ [Accessed: 24 September 2024].

The Lancet COVID-19 Commission (2022). *Proposed Non-infectious Air Delivery Rates (NADR) for Reducing Exposure to Airborne Respiratory Infectious Diseases*. Available at: <https://www.aph.gov.au/DocumentStore.ashx?id=07b78224-5e39-4ca4-8ed3-109f69e218a6&subId=726021>.

Troeger, C., Forouzanfar, M., Rao, P.C., Khalil, I., et al. (2017). Estimates of the global, regional, and national morbidity, mortality, and aetiologies of lower respiratory tract infections in 195 countries: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet Infectious Diseases* 17(11), pp. 1133–1161. doi: 10.1016/S1473-3099(17)30396-1.

Uhde, E., Salthammer, T., Wientzek, S., Springorum, A., et al. (2022). Effectiveness of air-purifying devices and measures to reduce the exposure to bioaerosols in school classrooms. *Indoor Air* 32(8), p. e13087. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ina.13087> [Accessed: 29 September 2022].

Untis GmbH (2024). WebUntis - Smarter und schneller Planen – mit Untis, der führenden Stundenplansoftware. Available at: <https://www.untis.at/> [Accessed: 10 October 2024].

USEPA (1991). *Indoor Air Facts No. 4 Sick Building Syndrome*. Available at: [https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/sick\\_building\\_factsheet.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-08/documents/sick_building_factsheet.pdf)

Wargocki, P. (2004). Sensory pollution sources in buildings. *Indoor air* 14 Suppl 7(SUPPL. 7), pp. 82–91. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15330776/> [Accessed: 17 September 2024].

Wargocki, P., Porras-Salazar, J.A., Contreras-Espinoza, S. and Bahnfleth, W. (2020). The relationships between classroom air quality and children’s performance in school. *Building and Environment* 173, p. 106749. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2020.106749.

Wargocki, P. and Kostyrko, K. (2022). Measurements of Perceived Indoor Air Quality. *Handbook of Indoor Air Quality*, pp. 1–35. Available at: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-981-10-5155-5\\_81-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-981-10-5155-5_81-1) [Accessed: 17 September 2024].

Wargocki, P. and Da Silva, N.A.. (2015). Use of visual CO2 feedback as a retrofit solution for improving classroom air quality. *Indoor air* 25(1), pp. 105–114. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24735406/> [Accessed: 20 August 2024].

Wargocki, P. and Wyon, D.P. (2013). Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment* 59, pp. 581–589. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2012.10.007.

Wargocki, P. and Wyon, D.P. (2017). Ten questions concerning thermal and indoor air quality effects on the performance of office work and schoolwork. *Building and Environment* 112, pp. 359–366. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2016.11.020.

White, L.F., Murray, E.J. and Chakravarty, A. (2022). The role of schools in driving SARS-CoV-2 transmission: Not just an open-and-shut case. *Cell Reports Medicine* 3(3). Available at: </pmc/articles/PMC8858687/> [Accessed: 8 August 2024].

WHO (2021a). *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*. Geneva. Available at: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280> [Accessed: 19 April 2022].

WHO (2021b). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone,*

*nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Available at: <https://iris.who.int/handle/10665/345329> [Accessed: 24 September 2024].

WHO (2024). Disability-adjusted life years (DALYs) attributable to the environment (%). Available at: <https://www.who.int/data/gho/indicator-metadata-registry/imr-details/4657> [Accessed: 26 October 2024].

Williams, B.A., Jones, C.H., Welch, V. and True, J.M. (2023). Outlook of pandemic preparedness in a post-COVID-19 world. *npj Vaccines* 2023 8:1 8(1), pp. 1–12. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41541-023-00773-0> [Accessed: 24 October 2024].

Wood, S.G.A., Handy, A.E.E., Roberts, K. and Burridge, H.C. (2024). Assessing classroom ventilation rates using CO2 data from a nationwide study of UK schools and identifying school-wide correlation factors. *Developments in the Built Environment* 19, p. 100520. doi: 10.1016/J.DIBE.2024.100520.

Wouters, P., Delmotte, C., Faÿsse, J.C., Barles, P., et al. (2000). *Towards improved performances of mechanical ventilation systems*. Available at: <https://shorturl.at/6BWfK> [Accessed: 12 October 2024].

Wrona, M. and Skrypnik, D. (2022). New-Onset Diabetes Mellitus, Hypertension, Dyslipidaemia as Sequelae of COVID-19 Infection—Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(20). Available at: [/pmc/articles/PMC9602450/](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/354602450/) [Accessed: 17 September 2024].

Wu, Y., Li, Y., Gao, S., Liu, S., et al. (2023). Carbon dioxide generation rates for children and adolescents. *Building and Environment* 237, p. 110310. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2023.110310.

Xing, Z.Z., Yang, T., Shi, S., Meng, X., et al. (2023). Ambient particulate matter associates with asthma in high altitude region: A population-based study. *World Allergy Organization Journal* 16(5), p. 100774. doi: 10.1016/J.WAOJOU.2023.100774.

Zabihi, M., Li, R. and Brinkerhoff, J. (2024). Influence of indoor airflow on airborne disease transmission in a classroom. *Building Simulation* 17(3), pp. 355–370. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12273-023-1097-y> [Accessed: 14 August 2024].

Zhang, D., Ding, E. and Bluysen, P.M. (2022). Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO2 monitoring. *Indoor and Built Environment* 31(4), pp. 1107–1126. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1420326X211058743> [Accessed: 22 August 2024].

Zhang, X., Zhao, C., Zhang, T., Xie, J., et al. (2023). Association of indoor temperature and air quality in classrooms based on field and intervention measurements. *Building and Environment* 229, p. 109925. doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109925.

Zoho Corporation Pvt. Ltd. (2024). Zoho Cloud Software Suite for Businesses. Available at: <https://www.zoho.com/> [Accessed: 11 October 2024].



## Inhaltsverzeichnis - Appendix

Anhänge .....	267
A. Projektzeitplan und Arbeitspakete .....	267
A.1. ImpAQS Project Zeitplan.....	267
B. Methoden .....	268
B.1. Brief an die teilnehmenden Schulen.....	268
B.2. Datenbereinigung für die Matched-Pair-Analyse .....	269
B.3. Algorithmus zur Höhenkompensation .....	270
B.4. Installationsanleitung .....	270
B.5. Hierarchie der Raumauswahl.....	273
B.6. Raum-Anzeigeposter .....	274
B.7. Qualitätssicherung – Bias-Test.....	277
B.8. Datenerfassung in Schulen .....	279
B.9. Liste der Außenluftschadstoffe und UBA- Luftgütemessstellen.....	281
B.10. Infektionsrisikomodell .....	286
B.11. Infection risk calculation reference scenario .....	288
C. Ergebnisse .....	289
C.1. Ergänzende Datenanalyse .....	289
C.1.1. Analyse der ZOHO-Daten (physikalische Merkmale von Schulen und Klassenzimmern) .....	289
C.1.1.1. Charakteristiken der Schulen.....	289
C.1.1.2. Tatsächliche und maximale Klassenzimmerbelegung nach Schultyp und Region 299	
C.1.1.3. Fußbodenfläche der Klassenräume nach Schultyp und Region .....	301
C.1.1.4. Klassenzimmer-Belegungsdichte [m <sup>2</sup> /Person] nach Schulregion.....	302
C.1.1.5. Classroom volume by school type and region .....	304
C.1.1.6. C Klassenzimmer-Raumvolumen pro Person [m <sup>3</sup> /Person] nach Schultyp und Region 305	
C.1.1.7. Außenfassade verglaste Gesamtfläche in m <sup>2</sup> .....	307
C.1.1.8. Maximale offenbare Fensterfläche pro Klassenzimmer [m <sup>2</sup> ].....	308
C.1.1.9. Fenster- und Beschattungsinformationen .....	308
C.1.1.10. Beispiele für verschiedene Fensteröffnungen .....	308
C.1.1.11. Beispiele für verschiedene mechanische Belüftungsarten .....	310
C.1.2. Analyse der CO <sub>2</sub> -Konzentration in österreichischen Klassenzimmern .....	311

C.1.2.1.	CO <sub>2</sub> Konzentrationen in 120 Schulen.....	311
C.1.2.2.	Variation der CO <sub>2</sub> -Konzentrationen in Klassenzimmern nach Jahreszeit.....	313
C.1.2.3.	CO <sub>2</sub> -Konzentration nach Sensortyp .....	313
C.1.2.4.	CO <sub>2</sub> -Konzentration nach Lüftungssystemtyp .....	315
C.1.2.5.	CO <sub>2</sub> Konzentration nach Schultyp.....	316
C.1.2.6.	CO <sub>2</sub> Konzentration nach städtischer oder ländlicher Lage.....	319
C.1.2.7.	CO <sub>2</sub> Konzentration nach Region.....	320
C.1.3.	Außenluftschadstoffe.....	325
C.1.4.	Analyse der gepaarten Stichprobe (C vs T) .....	325
C.2.	Umfrageergebnisse .....	327
C.2.1.	Ergebnisse der Umfrage unter Schuldirektor:innen.....	327
C.2.1.1.	Ergebnisse der ersten Umfrage .....	327
C.2.1.2.	Ergebnisse der zweiten Umfrage.....	335
C.2.2.	Ergebnis der Umfrage unter den Lehrer:innen .....	342
C.2.2.1.	Ergebnisse der ersten Umfrage .....	342
C.2.2.2.	Ergebnisse der zweiten Umfrage.....	353

## Anhänge

### A. Projektzeitplan und Arbeitspakete

#### A.1. ImpAQS Project Zeitplan

Der in diesem Bericht behandelte Arbeitsumfang umfasst die Arbeitspakete AP3 – AP6, wie in Abbildung A-1 dargestellt und im ImpAQS-Projektvorschlag beschrieben.

Arbeitspaket	2023												2024											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>AP1 Vorbereitungsphase</b>																								
Rekrutierung von Personal																								
Kauf von Sensoren und Geräten																								
Kontaktaufnahme mit Schule																								
<b>AP2 Installation</b>																								
Sensorausrüstung installieren																								
Schulpersonal einweisen																								
<b>AP3 Umfrage</b>																								
Erste Umfrage: Schuldirektor:innen																								
Umfrage für Lehrer:innen - Wintermonate																								
Umfrage für Lehrer:innen - Sommermonate																								
Letzte Umfrage: Schuldirektor:innen																								
<b>AP3 Abwesenheitsdaten</b>																								
WebUntis Exportanfrage - Wintermonate																								
WebUntis Exportanfrage - Sommermonate																								
<b>AP4 Messen kalte Jahreszeit</b>																								
Überwachung unter Herbstbedingungen																								
Überwachung unter Winterbedingungen																								
<b>AP5 Messen warme Jahreszeit</b>																								
Überwachung unter Frühjahrsbedingungen																								
Überwachung unter Sommerbedingungen																								
<b>AP6 Abschlußphase</b>																								
Nachbesprechung der Schulteilnehmer:innen																								
Erstellung des Abschlussbericht																								
Erstellung des individuellen Schulbericht																								
<b>Meilensteine</b>																								
Installation abgeschlossen																								
Zwischenbericht fertig																								
Umfrage abgeschlossen																								
Messphasen abgeschlossen																								
Messung abgeschlossen																								
Abschlussbericht fertig																								
Erstellung des individuellen Schulbericht																								

Abbildung A-1 ImpAQS Projekt Gantt Chart

## B. Methoden

### B.1. Brief an die teilnehmenden Schulen

Das folgende Schreiben wurde als Erstkontakt an die ausgewählten Schulen gesandt:

**ibpsc** Institut für Bauphysik, Gebäudetechnik und Hochbau  
Fakultät für Bauingenieurwissenschaften  
Technische Universität Graz

**TU Graz**  
Graz University of Technology

Tel. [REDACTED]  
Mail [REDACTED]  
Tel. [REDACTED]  
Mail [REDACTED]  
Tel. [REDACTED]  
Mail [REDACTED]  
Adresse [REDACTED]  
Web [REDACTED]

DVR: 008 1833 UID: ATU/5/4 77 929

Graz, am 12. Juni 2023

Betreff: Teilnahme am ImpAQS-Projekt der TU Graz

Sehr geehrte(r) [REDACTED]

Wir schreiben Ihnen im Zusammenhang mit einem neuen nationalen Forschungsprojekt mit dem Titel "ImpAQS" (Improving Air Quality in Schools), das von der Technischen Universität Graz (TU Graz) in Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Forschung (BMBWF) in diesem Jahr ins Leben gerufen wurde. 120 Schulen in ganz Österreich wurden vom Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen (IQS) für die Teilnahme an diesem Projekt ausgewählt (mittels einer statistischen Zufallsstichprobe). Wir freuen uns, Ihnen mitteilen zu können, dass Ihre Schule eine der ausgewählten Schulen ist, die an dieser spannenden Studie teilnimmt. Als Teilnehmender an diesem Projekt werden 10 Ihrer Klassenzimmer mit CO<sub>2</sub>-Sensoren ausgestattet, die Sie am Ende des Projekts behalten können. Sie haben auch die Möglichkeit, von den Ergebnissen und Empfehlungen zu profitieren, die aus unserer Forschung hervorgehen werden (siehe [www.impags.tugraz.at](http://www.impags.tugraz.at) für weitere Details).

Dieses Schreiben enthält im folgenden Einzelheiten bzgl.

- Projekt ImpAQS
- Erforderliche Informationen
- Ihre Vorteile
- Datenspeicherung und DSGVO

Wir bitten Sie, uns die folgenden **Informationen zur Verfügung stellen** (weiter unten finden Sie genauere Angaben, warum diese Daten benötigt werden und wie sie behandelt werden):

**ibpsc** **TU Graz**  
Graz University of Technology

- Grundrisse Ihrer Schule
- Eine Liste der Klassenräume und die Anzahl der Schüler und Schülerinnen pro Klasse
- Angaben zu allen mechanischen Belüftungs- oder Filtersystemen und evtl. CO<sub>2</sub> Sensoren, die in den Räumlichkeiten verwendet werden
- Kontaktperson für die Installation der Sensoren
- Anwesenheitsdaten für teilnehmende zehn Klassen (wenn möglich)


Im Laufe des Projekts stellen wir Ihnen zwei Online-Umfragen zur Verfügung, die von den jeweiligen Klassenlehrer/innen ausgefüllt werden müssen. Diese Formulare sind sehr kurz gehalten, um den Zeitaufwand für Ihr Personal möglichst gering zu halten.

Die Installationen der kabellosen Sensoren finden im Juni (oder in Ausnahmefällen im Juli) statt. Hierfür sind wir auf einen Besuch in Ihrer Schule angewiesen. Unser Team besteht aus erfahrenen Mitarbeitenden der Technischen Universität Graz, die die Installation durchführen werden. Es ist wichtig, dass wir den Namen und die Kontaktdaten (E-Mail-Adresse und Mobiltelefonnummer) einer verantwortlichen Person in Ihrer Schule haben (z.B. den Schulleiter), welche direkt erreichbar sein sollte und mit der wir den Zeitpunkt der Installation und die Positionierung der Sensoren optimal koordinieren können.

Wir bitten Sie, die erforderlichen Informationen (die in den oben genannten Punkten aufgeführt sind) bis zum **23.06.2023** an die folgende E-Mail-Adresse senden könnten: [REDACTED]

Ihre Daten sind für unsere Forschung von großem Wert und werden mit äußerster Vertraulichkeit behandelt. Wir sind Ihnen sehr dankbar für Ihre Unterstützung und Teilnahme an diesem Projekt. Sollten Sie Bedenken haben oder mehr über einen Aspekt der Studie wissen wollen, können Sie uns gerne unter [REDACTED] kontaktieren.

Mit freundlichen Grüßen,

  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christina J. Hopfe

**TU Graz**  
Graz University of Technology

Bundesministerium  
Bildung, Wissenschaft  
und Forschung

Institut des Bundes  
für Qualitätssicherung im  
österreichischen Schulwesen

Abbildung A-2 Beispiel eines Einladungsschreibens an teilnehmende Schulen

## B.2. Datenbereinigung für die Matched-Pair-Analyse

Die folgende Tabelle zeigt die dynamischen Schwellenwerte, die zur Bereinigung der Matched-Pair-Daten verwendet wurden.

**Tabelle A-1 Beispiele für dynamische Schwellenwerte.**

Datum und Uhrzeit	Schwellenwert [ppm]
2023-09-18 08:00:00	547,125
2023-09-18 09:00:00	535,6125
2023-09-18 10:00:00	523,375
2023-09-18 11:00:00	510,18125
2023-09-18 12:00:00	508,825
2023-09-18 13:00:00	502,5
2023-09-18 14:00:00	499,85
2023-09-18 15:00:00	494,73125
2023-09-18 16:00:00	478,4
2023-09-19 08:00:00	544,033333333333
2023-09-19 09:00:00	537,5
2023-09-19 10:00:00	525,4
2023-09-19 11:00:00	513,6625
...	...
Datum und Uhrzeit	Schwellenwert [ppm]
...	...
2024-07-04 13:00:00	499,1
2024-07-04 14:00:00	494,1
2024-07-04 15:00:00	511
2024-07-04 16:00:00	494,4
2024-07-05 08:00:00	539,05
2024-07-05 09:00:00	580,1
2024-07-05 10:00:00	539,9
2024-07-05 11:00:00	528,9
2024-07-05 12:00:00	520,25
2024-07-05 13:00:00	511,2
2024-07-05 14:00:00	511,525
2024-07-05 15:00:00	543,65
2024-07-05 16:00:00	534,7

### B.3. Algorithmus zur Höhenkompensation

Abbildung A-3 zeigt eine grafische Darstellung des Höhenkompensationsprozesses, wie in Abschnitt 3.5.3.3 beschrieben. Auf der primären y-Achse ist die Höhe über dem Meeresspiegel dargestellt, während die x-Achse den Faktor für Höhenkompensation zeigt, der mit zunehmender Höhe linear ansteigt. Die sekundäre y-Achse zeigt die kompensierte CO<sub>2</sub>-Konzentration, also den angepassten CO<sub>2</sub>-Wert, den der Sensor in der Außenluft nach Anwendung des Herstelleralgorithmus zur Höhenkompensation messen würde.

Die roten und orangefarbenen gestrichelten Linien markieren die Höhen wichtiger Standorte: Wien als niedrigste Höhe im ImpAQS-Projekt, Graz als Standort der Kalibrierung und Semmering als höchste Lage. Wie das Diagramm zeigt, benötigen Sensoren, die in höheren Lagen wie Semmering installiert sind, einen größeren Faktor für Höhenkompensation, um den reduzierten atmosphärischen Druck auszugleichen. Dadurch wird sichergestellt, dass die CO<sub>2</sub>-Messungen unabhängig von der Höhe konsistent bleiben.

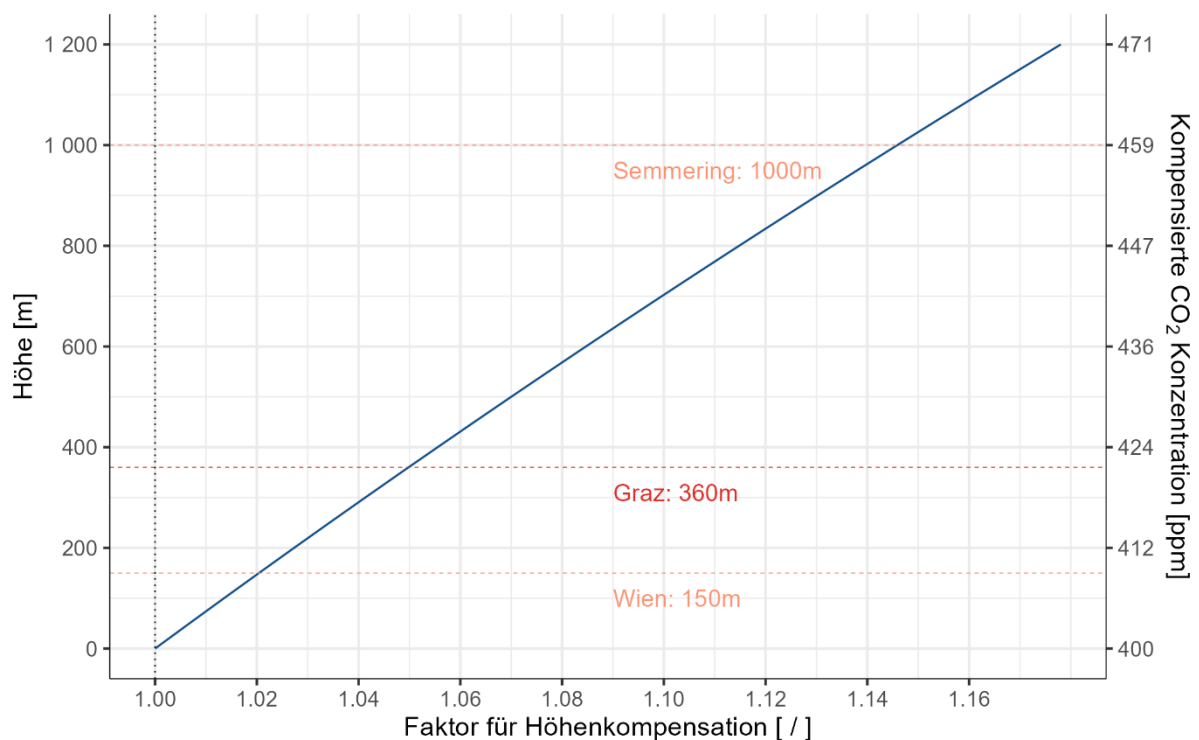


Abbildung A-3 Algorithmus zur Höhenkompensation

### B.4. Installationsanleitung

Zu Beginn des Installationsprozesses absolvierten die Techniker eine praktische Schulung an der TU Graz und erhielten eine Installationsanleitung, wie in Abbildung A-4 dargestellt. Die Anleitung enthielt detaillierte Anweisungen zur Installation des Gateways sowie zur Positionierung und Montage der Innen- und Außensensoren. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass die Geräte optimale Signale empfangen und die Daten erfolgreich in die Cloud senden können.

### 3. Aufstellung des Gateways

#### 1. Aufstellung des Gateways

Das Gateway muss das ganze Jahr über an einem sicheren Ort aufbewahrt werden, um Diebstahl, Ausstapfen und den damit verbundenen Datenverlust zu vermeiden. Mögliche geeignete Orte sind das Sekretariat oder das Büro des Schulleiters. Platzieren Sie das Gateway so zentral und hoch wie möglich. Achten Sie darauf, dass das Gateway möglichst freistehend platziert wird. Montieren Sie das Kabelmodem möglichst in einem Abstand von mindestens 20 cm zu Wand und Decke. Vermeiden Sie auf jeden Fall die Montage in Schaltschränken oder ähnlichen Schränken.

#### 2. Ersteinrichtung des Gateways

Das Gateway enthält eine LTE/4G-Simkarte. Eine WLAN/LAN-Verbindung ist daher nicht erforderlich. Das Gateway muss lediglich an eine 220V-Steckdose angeschlossen werden, die Verbindung zur Cloud wird dann automatisch hergestellt.

#### 3. Überprüfung der Funktionsfähigkeit

Um den Status eines Gateways zu überprüfen, haben Sie zwei Möglichkeiten. Scannen Sie den QR-Code auf dem Gateway mit Ihrem Smartphone, um zu den Geräteinformationen zu gelangen (ohne Login-Daten möglich) oder prüfen Sie das jeweilige Gateway in der LineMetrics Cloud unter „Geräte & Hardware“ mit Hilfe der Projektkoordination.



Abbildung 2: Rückseite des Sensors sowie die Verbindungen mit den Antennen (links) und die richtige Positionierung des Gateways für maximale Reichweite (rechts) [3].

4

### 4. Aufstellung der Innessensoren

#### 1. Überprüfung der Signalkonität der Sensoren

Es ist wichtig zu prüfen, ob die Sensoren eine angemessene Signalstärke vom Gateway erhalten, um einen schnellen Batterieverlust zu vermeiden. Dazu nimmt man einige T-Sensoren und bringt sie in die Klassenzimmer, die am weitesten vom Gateway entfernt sind, und prüft die Signalstärke durch Scannen des QR-Codes.

Ein Indikator für eine gute/akzeptable Signalkonität wird in der nachstehenden Tabelle erläutert:

RSSI	> -110 dbm
SNR	> 0 dB
dR	5

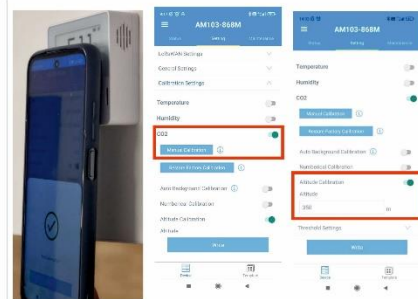


Abbildung 3: Zugriff auf den Sensor über NFC (links) und Einstellen der Meereshöhe (rechts)

#### 2. Platzierung der Sensoren

Montieren Sie den CO<sub>2</sub>-Sensor nicht direkt neben offenen Fenstern, Türen oder Zuluftöffnungen, da dies zu nicht repräsentativen Messwerten führt. Der Sensor sollte auf Atemhöhe im Sitzen (ca. 1,2 m über dem Boden), weit entfernt von der Frischluftzufuhr, nicht direkt im Atemluftstrom von Personen (z. B. auf einem Schreib- oder Arbeitstisch), in ausreichendem Abstand zu seinen Nutzern (ca. 1 m Abstand) oder mittig an einer Innenwand gegenüber den Fenstern angebracht werden (siehe Figur 4).

5

Versuchen Sie, elektrische Leitungen (wie in Figur 6 dargestellt), Wasserleitungen und zentrale Schächte zu vermeiden.

Beachten Sie die nachstehenden Hinweise:

- Kabel werden in der Regel senkrecht und waagrecht verlegt
- Kabel haben in der Regel einen Abstand von 15 - 30 cm von der Wandkante und dem Boden
- Versuchen Sie, in ausreichendem Abstand zu Lichtschaltern, Steckdosen, Wasserleitungen und Waschbecken zu bohren
- Verwenden Sie immer einen isolierten Schraubendreher

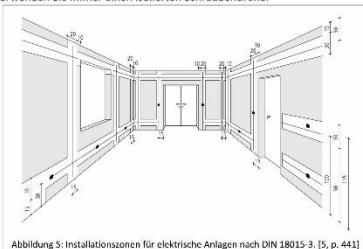


Abbildung 5: Installationszonen für elektrische Anlagen nach DIN 18015-3. [5, p. 441]

#### 4. Funktions- und Signalprüfung

Um den Status eines Sensors zu überprüfen, haben Sie zwei Möglichkeiten. Scannen Sie den QR-Code auf dem Sensor mit Ihrem Smartphone, um zu den Geräteinformationen zu gelangen (ohne Login-Daten möglich), oder überprüfen Sie den betreffenden Sensor in der LineMetrics Cloud unter „Geräte & Hardware“ mit Hilfe des Projektkoordinationsteams.

Wenn Sie den QR-Code scannen, können Sie den Signalstatus wie unten abgebildet sehen:

7

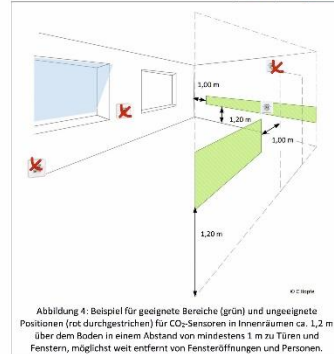


Abbildung 4: Beispiel für geeignete Bereiche (grün) und ungeeignete Positionen (rot durchgestrichen) für CO<sub>2</sub>-Sensoren in Innenräumen ca. 1,2 m über dem Boden in einem Abstand von mindestens 1 m zu Türen und Fenstern, möglichst weit entfernt von Fensteröffnungen und Personen.

#### 3. Montage des Sensors

Die Milesight AM 103 CO<sub>2</sub>-Sensoren [4] werden mit den mitgelieferten Sicherheits-Torx-Schrauben montiert. Dazu muss jedoch zunächst die Rückseite des Sensors geöffnet werden. Diese Sicherheits-Torx-Schrauben sind wichtig, um den Diebstahlschutz während der Messzeit zu gewährleisten.



Abbildung 5: Installation des Milesight AM 103 unter Verwendung der mitgelieferten Sicherheits-Torx-Schrauben. Hinweis: Die hintere Abdeckung des Sensors muss zu diesem Zweck geöffnet werden. [4]

6

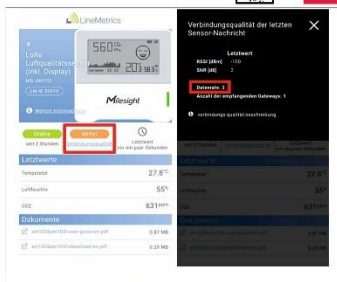


Abbildung 7: Signalstatus der LineMetrics Cloud. [5, p. 441]

Bewerten Sie das Signal anhand des Spreizungsfaktors und der RSSI-Werte (Received Signal Strength Indicator). Der Spreizfaktor reicht von SF7 bis SF12, wobei niedrigere Werte auf einen geringeren Energieverbrauch bei der Übertragung und eine bessere Signalqualität hinweisen. Um eine sehr gute Konnektivität zu gewährleisten, sollten Sie die folgenden Grenzwerte einhalten:

- RSSI:  $\geq -105$ dbm
- SNR:  $\geq 0$  dB
- dR:  $\geq 0$

Ein weiterer Hinweis: Der implementierte Health Score hängt nur von RSSI- und SNR-Werten ab, nicht aber von dR-Werten. Ein höherer dR-Wert entspricht einer längeren Sendezeit und damit einem höheren Energieverbrauch. Wenn ein niedriger dR-Wert einen höheren Energieverbrauch zur Folge hat, könnte eine solche Zustandsanzeige irreführend sein.

5. Weitere Sensoreinstellungen (falls nötig)

Sie können den Bildschirm und die LED-Anzeigelampen einfach über die App „Milesight Toolbox“ ein- und ausschalten, wie in Abbildung 7 (links) zu sehen ist.

Die Schwellenwerteneinstellung kann ebenfalls geändert werden, wie in Abbildung 7 (rechts) dargestellt.

Hinweis: Die Schwellenwerte sollten bereits auf 800 und 1000 ppm, 1 Minute Meldeintervall und 360 Grad Höhe voreingestellt sein.

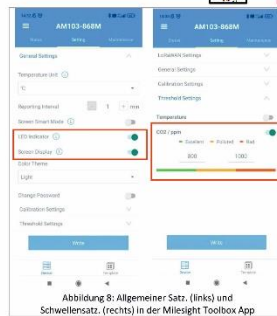


Abbildung 8: Allgemeiner Satz (links) und Schwellensatz (rechts) in der Milesight Toolbox App

5. Aufstellung des Außensensors

1. Einrichten des Sensors

Gehen Sie folgendermaßen vor, um die ML-EM300-Sensoren zu aktivieren:

- Schrauben Sie die vier Schrauben ab, um die hintere Abdeckung zu öffnen.
- Prüfen Sie, ob eine Batterie eingelegt ist.
- Drücken Sie die Taste und halten Sie sie etwa 3 Sekunden lang gedrückt, bis die LED-Leuchte aufleuchtet.



Abbildung 9: Bild mit geöffnetem Außensensor, die beiden roten Rechtecke zeigen den Ein/Aus-Schalter und die LED-Leuchte

Sobald diese Schritte abgeschlossen sind, wird der Sensor aktiviert und verbindet sich mit der Linemetrics-Cloud. Wenn der Sensor bereits aktiviert ist, leuchtet die LED sofort auf, wenn Sie die Taste drücken. Wenn Sie die Taste gedrückt halten, bis die LED erlischt, deaktivieren Sie den Sensor wieder.

Abbildung A-4 Installationsanleitungen für Techniker zur Installation der Sensoren in den ausgewählten Schulen



## B.5. Hierarchie der Raumauswahl

Die Klassenzimmer werden nach einer vordefinierten Hierarchie gepaart:

Tabelle A-2 Hierarchie für die Paarung von Räumen

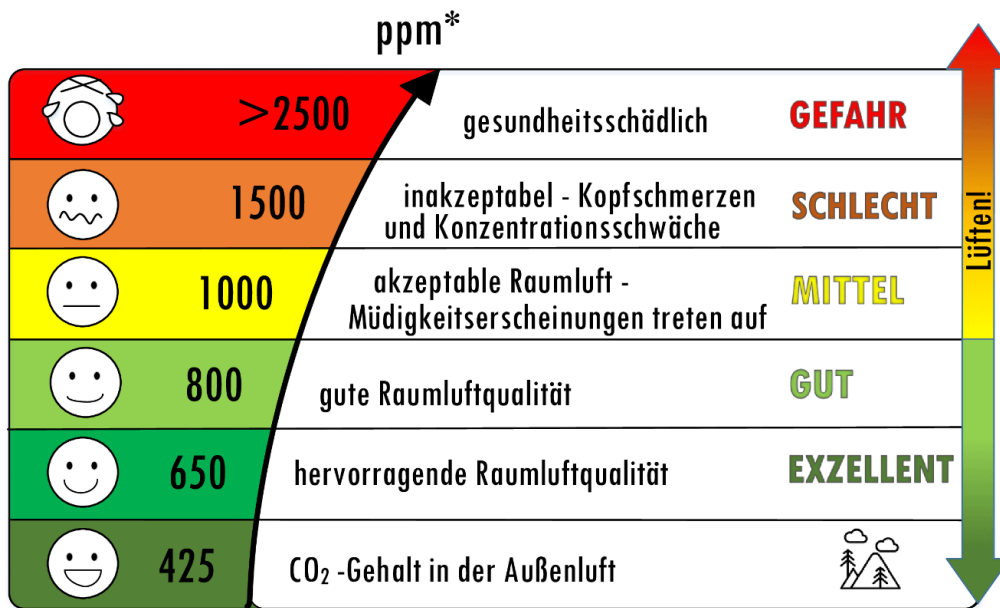
Hierarchie	Kriterien
1	Gleiche Lüftungssysteme (ähnliche Fenster oder mechanische Lüftungssysteme)
2	Gleiches Stockwerk
3	Gleiche Ausrichtung (d. h. gleiche Seite des Gebäudes/gleiche Richtung)
4	Ähnliche Bodenfläche und Deckenhöhe
5	Dieselbe Jahrgangsstufe, dasselbe Alter und dieselbe Klassengröße (vorzugsweise, aber das ist nicht immer möglich)

Sobald die Raumpaare ausgewählt wurden, wurden die Raumbezeichnungen „T“ und „K“ mit Hilfe des Excel-Tools nach dem Zufallsprinzip zugewiesen.

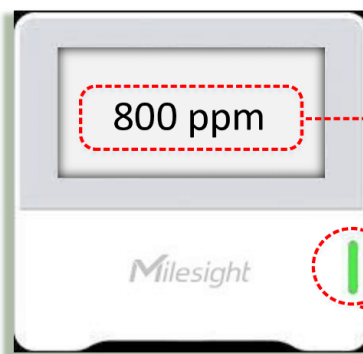
## B.6. Raum-Anzeigeposter

Zwei an der Wand angebrachte Anzeigeposter wurden erstellt, um den Schülern und dem Personal in den Test (T)-Räumen eine klare Orientierung zu bieten:

# Was sagt uns der CO<sub>2</sub>-Sensor ?



\* englisch parts per million, „Anteile pro Million“ (425 ppm entspricht 0,0425 %)



Vergleichen Sie den Wert auf dem Display mit den oben genannten Werten und entscheiden Sie, ob gelüftet werden muss oder nicht. Aus der Ferne kann das grüne oder rote Licht anzeigen, ob es Zeit ist, die Fenster zu öffnen oder einzugliedern.

Bei Rot ist der CO<sub>2</sub>-Wert viel zu hoch! Überprüfen Sie die Farbe dieses Lichts und vergleichen Sie sie mit der obigen Skala. Wenn sie nicht mehr grün oder gelb ist, handeln Sie!



Für weitere Informationen scannen Sie den QR-Code!!

Email: [impaqs@tugraz.at](mailto:impaqs@tugraz.at)



Mit Unterstützung von:

Bundesministerium Bildung, Wissenschaft und Forschung

Institut des Bundes für Qualitätssicherung im österreichischen Schulwesen

Dieser Aushang darf nicht vor dem 1.10.2024 entfernt werden!

Abbildung A-5 "Was sagt uns der CO<sub>2</sub> Sensor?"

# Wie lüftet man richtig?

## Warum ist Belüftung wichtig?

- Leistung und Gesundheit werden durch schlechte Luftqualität beeinträchtigt
- Viren und Bakterien sammeln sich in verbrauchter Luft (Influenza, SARS-CoV-2, Masernvirus,...)



### An warmen Tagen

1 Kontrolliert den CO<sub>2</sub>-Wert!

2 Öffnet die Fenster vollständig, um für mehr Frischluft zu sorgen!

### An kalten Tagen

1 Kontrolliert den CO<sub>2</sub>-Wert!

2 Wenn es zu kalt ist, kippt die Fenster dauerhaft **oder** macht Gebrauch von Stoßlüftung (ca. 3-5 Minuten alle 20 Minuten)!

### Bei zentralen Lüftungsanlagen, Klimaanlage oder tragbaren Luftreinigern

1 Kontrolliert den CO<sub>2</sub>-Wert!

2 Bei einer zentralen Anlage... ist Fensteröffnen nicht erforderlich!

3 Bei einer Klimaanlage... muss dennoch gelüftet werden!

4 Bei einem Luftreiniger... muss dennoch gelüftet werden!



Für weitere Informationen  
scannt den QR-Code!!

E-Mail: [impags@tugraz.at](mailto:impags@tugraz.at)

Dieser Aushang darf nicht vor dem 1.10.2024 entfernt werden!



Mit Unterstützung von:

Bundesministerium  
Bildung, Wissenschaft  
und Forschung

Institut des Bundes  
für Qualitätssicherung im  
österreichischen Schulwesen

Abbildung A-6. "Wie lüftet man richtig?"

Jedes der Raum-Anzeigeposter enthielt einen QR-Code, der auf eine spezielle Webseite im [www.impags.tugraz.at](http://www.impags.tugraz.at) Projekt Portal verlinkt. Diese zusätzlichen Informationen sind auf den folgenden Webseiten verfügbar:

- (i) <https://www.tugraz.at/institute/ibpsc/forschung/forschungsprojekte/laufende-projekte/impags/co2>
- (ii) <https://www.tugraz.at/institute/ibpsc/forschung/forschungsprojekte/laufende-projekte/impags/lueftung>

Auf diesen Webseiten werden die auf den wandmontierten Postern zusammengefassten Informationen ausführlicher erklärt. Dadurch konnten die Schüler in einem Test-Klassenzimmer die QR-Codes scannen und weiterführende Informationen abrufen. Zusätzlich wurden die Kontaktdaten des Projektteams bereitgestellt, falls weitere Fragen bestanden.

## B.7. Qualitätssicherung – Bias-Test

Um die Zuverlässigkeit der In-situ Sensormessungen über die Dauer der Studie sicherzustellen, wurde eine vergleichende Analyse mit einem hochwertigen, vorab kalibrierten CO<sub>2</sub>-Sensor des Herstellers LI-COR (LI 850, LI-COR Environmental, USA) und den ImpAQS CO<sub>2</sub>-Sensoren durchgeführt. Durch diesen Vergleich mit dem hochwertigen Referenzsensor konnte der Bias oder die Messgenauigkeit der ImpAQS-Sensoren bewertet werden. Über einen Zeitraum von 20 Minuten wurden Messungen beider Sensoren unter kontrollierten Bedingungen nebeneinander durchgeführt und die paarweisen Differenzen verglichen. Da der LI-COR-Sensor jede Sekunde eine Messung durchführte, während der ImpAQS-Sensor nur alle zwei Minuten Daten aufzeichnete, wurden die LI-COR-Werte in 2-Minuten-Intervallen aggregiert, um eine direkte Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Zusätzlich wurde ein Zeitstempel-Versatz von einer Minute auf die LI-COR-Daten angewendet, um die Verzögerung zwischen der ImpAQS-Sensormessung und deren Cloud-Datenerfassung zu berücksichtigen. Vor Beginn der Tests wurde der Raum gründlich belüftet, um die CO<sub>2</sub>-Werte zu stabilisieren. Während der Tests blieben die Fenster geschlossen und es waren keine Personen anwesend, um gleichbleibende Umweltbedingungen zu gewährleisten.

Zur Beurteilung, ob die Unterschiede zwischen den Sensormessungen im Vergleich zur natürlichen Variabilität erheblich waren, wurde eine Cohen's *d*-Analyse verwendet. Cohen's *d* wird typischerweise als Differenz zwischen den beiden arithmetischen Mittelwerten ( $\mu_{ImpAQS}$  und  $\mu_{LI-COR}$ ) geteilt durch ihre gepoolte Standardabweichung berechnet. Eine erste Untersuchung an 10 Sensoren, die in einer einzelnen ImpAQS-Schule installiert wurden, ergab gepoolte Standardabweichungen zwischen 3,3 ppm und 16,8 ppm. Die vom Hersteller deklarierte Genauigkeit der AM103 CO<sub>2</sub>-Sensoren liegt jedoch bei 42,6 ppm bei einer Konzentration von 420 ppm. Der große Unterschied zwischen der gepoolten Standardabweichung und der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit ergibt sich daraus, dass die gepoolte Standardabweichung lediglich die Variabilität innerhalb einzelner Sensoren berücksichtigt und andere Variationsquellen wie Kalibrierung, Höhe und Auflösung ignoriert. Da die gepoolte Standardabweichung die gesamte Variabilität aller installierten Sensoren unterschätzt, ist sie für diese Studie nicht geeignet. Um eine repräsentativere Messung der Variabilität zu erhalten, die sowohl innerhalb als auch zwischen den Sensoren auftritt, wurde die Standardabweichung der CO<sub>2</sub>-Messungen von 1200 installierten Sensoren herangezogen, die in einem Zeitraum durchgeführt wurden, als die Klassenzimmer mehrere Tage lang nicht genutzt wurden (z. B. Silvester 2024). Die Standardabweichung aller in diesem Verfahren erfassten ImpAQS-Sensoren ( $s_{installed}$ ) betrug 61,85 ppm. Der resultierende Cohen's *d*-Wert

$$d = \frac{\mu_{ImpAQS} - \mu_{LI-COR}}{s_{installed}}$$

liefert ein standardisiertes, dimensionsloses Maß für die Effektstärke, das besser mit der vom Hersteller angegebenen Genauigkeit und der erwarteten Gesamtleistung des Sensorsystems übereinstimmt. Ein Schwellenwert von Cohen's *d*  $\geq 0,8$  wurde festgelegt, um Unterschiede als signifikant einzustufen. Geräte, die diesen Schwellenwert überschritten – oder eine Mittelwertdifferenz von mindestens 49,48 ppm (also 61,85 ppm  $\times 0,8$ ) aufwiesen –, wurden als unzuverlässig eingestuft und im Feld neu kalibriert. Sensoren mit geringeren Abweichungen (Cohen's *d*  $< 0,8$ ) wurden im Zuge der finalen Datenverarbeitung individuell korrigiert.

Um zu validieren, ob die Ergebnisse der Stichprobenmessungen auf eine größere Sensorgruppe extrapoliert werden konnten, wurde Yamane's Methode verwendet. Diese Methode liefert eine vereinfachte Formel zur Ermittlung der benötigten Stichprobengröße einer bestimmten Population, um

statistische Repräsentativität sicherzustellen (siehe Gleichung 3-1 in Abschnitt 3.3.1 des Hauptberichts). Für eine Kalibrierungscharge von 500 Sensoren (alle gleichzeitig kalibriert) und einem akzeptierten Fehlerbereich von 0,10 wurde eine erforderliche Stichprobengröße von 84 Sensoren ermittelt. Diese Teilmenge wurde anschließend einem Bias-Test unterzogen, der einen mittleren Bias von -27,31 ppm ergab. Unter der Annahme, dass dieser Bias repräsentativ für die gesamte Charge war, wurde bei der abschließenden Datenverarbeitung eine gruppierte Korrektur von +27,31 ppm vorgenommen, um den systematischen Offset auszugleichen.

Abbildung A-7 veranschaulicht diesen Prozess grafisch. Die Zeitreihendaten eines ImpAQS-Außensensors sind orange dargestellt, während die LI-COR-Sensordaten blau dargestellt sind. Die gestrichelten Linien stellen die jeweiligen Mittelwerte während des 20-minütigen Vergleichszeitraums dar. In diesem Beispiel betrug der Mittelwert der paarweisen Differenzen (MPD) 67 ppm, was einem Cohen's d-Wert von 1,09 entspricht. Folglich wurde der Sensor als unzuverlässig eingestuft und neu kalibriert.

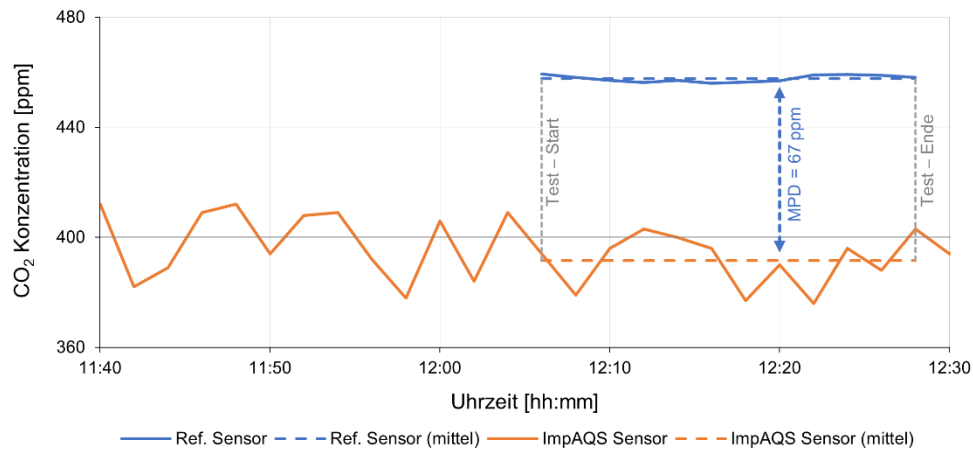


Abbildung A-7 Mittelwert-Bias-Test eines fehlerhaften Außensensors

## B.8. Datenerfassung in Schulen

Die Daten zu den Schulen (Abbildung A-7) und Klassenzimmern (Abbildung A-8) wurden mithilfe eines Zoho-Formular-Tools erfasst. Dadurch konnten die wichtigsten physischen Merkmale der ausgewählten Schulen und Klassenzimmer dokumentiert werden.

The image shows a screenshot of a Zoho form titled "School Survey". The form is organized into several sections with various input fields:

- Editor email:** A text input field.
- School ID \*:** A dropdown menu.
- Region:** A dropdown menu.
- Type of school:** A dropdown menu.
- Size of school:** A horizontal slider ranging from 0 to 2000.
- School Name:** A text input field.
- Address:** A section containing four text input fields for "Street", "Number", "Postal / Zip Code", and "Town".
- Altitude:** A text input field with a unit indicator "m".
- Type of LoRa network:** Radio buttons for "1 Gateway", "2 Gateways", and "Other", followed by a text input field.
- LoRa network strength - RSSI:** A dropdown menu.
- ID Gateway 1:** A text input field.
- ID Gateway 2 (if avail.):** A text input field.
- Outdoor Sensor ID:** A text input field.
- Construction type:** A dropdown menu.
- U-Value ext. wall [W/m²K]:** A dropdown menu.
- Observations:** A large text area for notes.
- Contact information:** A section with three contact entries:
  - Director Contact:** Includes a dropdown for "Title" and text fields for "First Name" and "Last Name".
  - Director email:** A text input field.
  - Facilities manager Contact:** Includes a dropdown for "Title" and text fields for "First Name" and "Last Name".
  - Facilities manager email:** A text input field.
  - Schools Project Contact:** Includes a dropdown for "Title" and text fields for "First Name" and "Last Name".
  - Schools Project email:** A text input field.

At the bottom of the form, there are three buttons: "Review" (black), "Save" (black), and "Submit" (green).

Abbildung A-8 Zoho-Formular zur Erfassung der Merkmale der Schule – Beispiel

### Classroom Survey

Editor Email

---

Room ID, location, size and occupancy inputs

School ID

Classroom ID

Matching class ID (comparison classroom)

Classroom Pair

LM-ID

Room number (acc. to plan or alt. door sign)

Control or Test

Network strength

Room type

Grade Level

Open-plan class

Classroom floor level

Total floors AGL

Room width

Room length

Room height

Actual occupancy

Max occupancy

Table layout

Plants in class

Ventilation Type

Vent. type

Mech/hydr vent system

Portable filter

Glazing

Window aspects

Glazing Sides

Orientation glaz	Fixed window	Ext. facade total glazed area	Max operable area	Operable window type 1	Restriction window type 1	Operable window type 2	Restriction window type 2
<input type="checkbox"/> North	<input type="checkbox"/>			Blank	Blank	Blank	Blank

Building services and controls

CO2 sensor already present

Heating system

Cooling system

Noise inputs

Background noise

Time, date and conditions and observations

Date & Time of survey

Weather conditions

CO2 sensor position installed

Sensor height

Observations

Repeated entry due to error

Rep. entry

Repetition No.

Review

Test

Submit

Abbildung A-9 Zoho-Formular zur Erfassung der Merkmale des Klassenzimmers – Beispiel



## B.9. Liste der Außenluftschadstoffe und UBA- Luftgütemessstellen

Die folgende Tabelle verknüpft den vierstelligen Referenzcode der Umweltbundesamt (UBA) Luftgütemessstellen für jeden einzelnen Schadstoff mit der entsprechenden Schul-ID-Nummer.

Tabelle A-3 Liste der UBA- Luftgütemessstellen

## Schul-IDs 1-30

Schul-ID	PM <sub>2.5</sub> -Code	PM <sub>2.5</sub> -Entfernung (km)	PM <sub>10</sub> -Code	PM <sub>10</sub> -Entfernung (km)	NO <sub>2</sub> -Code	NO <sub>2</sub> -Entfernung (km)	O <sub>3</sub> -Code	O <sub>3</sub> -Entfernung (km)
1	GAUD	1,7	GAUD	1,7	GAUD	1,7	STEF	2,0
2	OAKC	4,6	OAKC	4,6	OAKC	4,6	STEF	2,5
3	OAKC	2,4	OAKC	2,4	OAKC	2,4	STEF	2,0
4	BELG	3,7	BELG	3,7	BELG	3,7	STEF	4,8
5	BELG	1,2	BELG	1,2	BELG	1,2	STEF	4,7
6	STAD	3,4	STAD	3,4	STAD	3,4	LOB	7,0
7	KEND	2,6	KEND	2,6	KEND	2,6	STEF	7,3
8	GAUD	1,0	GAUD	1,0	GAUD	1,0	STEF	3,3
9	GAUD	1,3	GAUD	1,3	GAUD	1,3	STEF	3,0
10	KEND	1,9	KEND	1,9	KEND	1,9	STEF	3,0
11	SCHA	3,6	SCHA	3,6	SCHA	1,9	OZA	1,9
12	OAKC	1,4	OAKC	1,4	OAKC	1,4	STEF	2,0
13	GAUD	5,9	GAUD	5,9	GAUD	5,9	STEF	3,2
14	STAD	5,1	STAD	5,1	STAD	5,1	LOB	13,6
15	STAD	5,1	STAD	5,1	STAD	5,1	LOB	13,6
16	STAD	4,7	STAD	4,7	STAD	4,7	LOB	5,5
17	LIES	1,7	LIES	1,7	LIES	1,7	LIES	1,7
18	OAKC	2,1	OAKC	2,1	OAKC	2,1	STEF	1,1
19	OFLO	1,0	OFLO	1,0	OFLO	1,0	LOB	13,5
20	BELG	3,3	BELG	3,3	BELG	3,3	STEF	2,6
21	OFLO	1,2	OFLO	1,2	OMBA	12,0	OLOB	15,0
22	0001	1,9	0001	1,9	0001	1,9	0001	1,9
23	0001	30,7	0001	30,7	0001	30,7	0001	30,7
24	0179	14,6	0178	40,8	0179	14,6	0179	14,6
25	0001	0,9	0001	0,9	0001	0,9	0001	0,9
26	0198	18,6	0178	55,3	0198	18,6	0198	18,6
27	2401	1,2	0201	16,4	2401	1,2	2401	1,2
28	2401	1,8	0201	15,2	2401	1,8	2401	1,8
29	0401	1,0	0301	28,0	0401	1,0	0401	1,0
30	1301	17,0	1901	31,3	0401	34,8	0401	34,8

## Schul-IDs 31-60

Schul-ID	PM <sub>2,5</sub> -Code	PM <sub>2,5</sub> -Entfernung (km)	PM <sub>10</sub> -Code	PM <sub>10</sub> -Entfernung (km)	NO <sub>2</sub> -Code	NO <sub>2</sub> -Entfernung (km)	O <sub>3</sub> -Code	O <sub>3</sub> -Entfernung (km)
31	0902	12,2	1901	20,3	0902	12,2	1901	20,3
32	2604	18,6	0104	35,7	2604	18,6	2604	18,6
33	2604	27,4	0104	41,8	1204	9,9	1204	9,9
34	2401	19,7	0201	29,7	2401	19,7	2401	19,7
35	2604	8,7	0104	20,1	2604	8,7	2604	8,7
36	1901	0,4	1901	0,4	1901	0,4	1901	0,4
37	ZOE2	105,9	ZOE2	105,9	1502	4,5	1502	4,5
38	2604	34,3	0104	41,5	2604	34,3	2604	34,3
39	1301	37,5	1901	25,7	0401	54,8	0401	54,8
40	2301	1,1	2301	1,1	2301	1,1	2301	1,1
41	0301	18,6	0301	18,6	0301	18,6	0301	18,6
42	1401	4,9	1401	4,9	1401	4,9	1401	4,9
43	2401	0,4	2401	0,4	2401	0,4	2401	0,4
44	0101	0,2	0101	0,2	0101	0,2	0101	0,2
45	2701	1,4	2701	1,4	2701	1,4	2701	1,4
46	1401	2,8	1401	2,8	1401	2,8	1401	2,8
47	0172	2,6	0138	5,4	0172	2,6	0170	2,6
48	0172	1,6	0138	2,2	0172	1,6	0170	4,6
49	0139	0,6	0138	2,5	0139	0,6	0138	2,5
50	0172	1,7	0138	4,4	0172	1,7	0170	3,1
51	0172	1,5	0138	3,5	0172	1,5	0170	3,8
52	0172	0,6	0138	3,6	0172	0,6	0170	2,7
53	0172	1,3	0138	2,2	0172	1,3	0170	4,3
54	0172	1,3	0138	4,1	0172	1,3	0170	2,8
55	0138	0,9	0138	0,9	0138	0,9	0138	0,9
56	0172	1,4	0138	1,7	0172	1,4	0170	4,3
57	0139	3,1	0138	5,9	0139	3,1	0138	5,9
58	KLH1	35,5	0178	28,8	KLH1	35,5	0185	35,5
59	0172	0,5	0138	2,6	0172	0,5	0170	3,5
60	0107	11,4	0107	11,4	0107	11,4	0107	11,4

## Schul-IDs 61-90

Schul-ID	PM <sub>2,5</sub> -Code	PM <sub>2,5</sub> -Entfernung (km)	PM <sub>10</sub> -Code	PM <sub>10</sub> -Entfernung (km)	NO <sub>2</sub> -Code	NO <sub>2</sub> -Entfernung (km)	O <sub>3</sub> -Code	O <sub>3</sub> -Entfernung (km)
61	0178	1,0	0178	1,0	0178	1,0	0178	1,0
62	KLH1	15,2	0178	41,1	KLH1	15,2	0185	15,2
63	0172	1,9	0138	1,8	0172	1,9	0170	4,4
64	0172	0,8	0170	2,5	0172	0,8	0170	2,5
65	KA21	0,5	KA21	0,5	KA21	0,5	KA71	1,3
66	KA71	1,5	KA71	1,5	KA71	1,5	KA71	1,5
67	VI12	0,5	KA71	34,6	VI12	0,5	M121	12,4
68	SP18	35,0	KA71	31,7	SP18	35,0	SP18	35,0
69	0114	41,5	KA71	30,4	0114	41,5	KA71	30,4
70	KA71	1,9	KA71	1,9	KA71	1,9	KA71	1,9
71	VI12	1,2	KA71	34,9	VI12	1,2	M121	11,8
72	S184	0,2	S184	0,2	S184	0,2	S184	0,2
73	S416	2,3	S416	2,3	S416	2,3	S416	2,3
74	S184	1,3	S184	1,3	S184	1,3	S184	1,3
75	S184	3,8	S184	3,8	S184	3,8	S184	3,8
76	S409	3,3	S409	3,3	S409	3,3	S409	3,3
77	S406	1,3	S406	1,3	S406	1,3	S406	1,3
78	S184	1,0	S184	1,0	S184	1,0	S184	1,0
79	S156	33,2	S156	33,2	S156	33,2	S156	33,2
80	S404	18,8	S404	18,8	S404	18,8	S404	18,8
81	S407	25,1	S407	25,1	S407	25,1	S407	25,1
82	ENK1	28,5	ENK1	28,5	ENK1	28,5	ENK1	28,5
83	S416	2,3	S416	2,3	S416	2,3	S416	2,3
84	S409	2,7	S409	2,7	S409	2,7	S409	2,7
85	S407	0,6	S407	0,6	S407	0,6	S407	0,6
86	S184	4,5	S184	4,5	S184	4,5	S184	4,5
87	S184	0,8	S184	0,8	S184	0,8	S184	0,8
88	S409	28,7	S409	28,7	S409	28,7	S409	28,7
89	S416	2,3	S416	2,3	S416	2,3	S416	2,3
90	S184	1,4	S184	1,4	S184	1,4	S184	1,4

## Schul-IDs 91-120

Schul-ID	PM <sub>2.5</sub> -Code	PM <sub>2.5</sub> -Entfernung (km)	PM <sub>10</sub> -Code	PM <sub>10</sub> -Entfernung (km)	NO <sub>2</sub> -Code	NO <sub>2</sub> -Entfernung (km)	O <sub>3</sub> -Code	O <sub>3</sub> -Entfernung (km)
91	S184	3,6	S184	3,6	S184	3,6	S184	3,6
92	S125	1,8	S125	1,8	S125	1,8	S125	1,8
93	S407	84,3	S407	84,3	S407	84,3	S108	5,4
94	S406	1,5	S406	1,5	S406	1,5	S406	1,5
95	S415	2,2	S415	2,2	S415	2,2	S184	1,0
96	1200	2,4	1200	2,4	1200	2,4	1200	2,4
97	1200	0,4	1200	0,4	1200	0,4	1200	0,4
98	1200	2,7	1200	2,7	1200	2,7	1200	2,7
99	1200	15,5	1200	15,5	1200	15,5	1200	15,5
100	1200	1,5	1200	1,5	1200	1,5	1200	1,5
101	1200	2,8	1200	2,8	1200	2,8	1200	2,8
102	1200	15,9	1200	15,9	2100	1,6	2100	1,6
103	2106	0,8	2110	1,3	2106	0,8	2106	0,8
104	2106	0,6	2110	2,7	2106	0,6	2106	0,6
105	2227	20,6	2110	11,5	2227	20,6	2106	13,4
106	2710	43,1	2710	43,1	2710	43,1	2710	43,1
107	SP18	55,1	KA71	118,7	SP18	55,1	SP18	55,1
108	SP18	56,0	KA71	119,5	SP18	56,0	SP18	56,0
109	2552	0,1	2110	68,4	2552	0,1	2547	0,2
110	2106	1,3	2110	2,1	2106	1,3	2106	1,3
111	2106	3,3	2110	1,2	2106	3,3	2106	3,3
112	2106	1,3	2110	1,5	2106	1,3	2106	1,3
113	0807	2,3	0807	2,3	0807	2,3	0706	8,0
114	0807	20,2	0807	20,2	0807	20,2	0706	17,9
115	0807	1,1	0807	1,1	0807	1,1	0706	5,7
116	0807	10,7	0807	10,7	0807	10,7	0706	12,9
117	0807	1,6	0807	1,6	0807	1,6	0706	5,2
118	0201	5,5	0201	5,5	0201	5,5	0201	5,5
119	OAKC	1,8	OAKC	1,8	OAKC	1,8	STEF	3,9
120	0138	3,1	0138	3,1	0138	3,1	0138	3,1

## B.10. Infektionsrisikomodell

Das Infektionsrisiko für die fernübertragene Aerosolübertragung des SARS-CoV-2-Virus wurde mit einer analytischen Methode geschätzt, die von Forschern des Max-Planck-Instituts für Chemie (MPIC), Deutschland, und des Cyprus Institute, Zypern, entwickelt wurde (Lelieveld et al., 2020). Tabelle A-4 zeigt die für die Berechnungen in dieser Studie verwendeten Parameter. Die Gleichungen A.2.1 bis A.2.7 stellen die zur Analyse verwendeten Formeln dar.

Diese Methode berechnet die zeitabhängige Konzentration von luftgetragenen Viren sowie die akkumulierte Anzahl eingeatmeter Viruspartikel. Dabei werden die Aerosolemissionen des Menschen sowie die Virenentfernungsrate berücksichtigt, die sich aus der Luftwechselrate und der Lebensdauer des Virus in Aerosolen ergibt.

Tabelle A-4 Parameter nach der Methode von Lelieveld et al. (Lelieveld, 2020; MPIC 2024)

Parameter	value	unit	notes
<b>Virus</b>			
Überlebenszeit in Luft- $t_{\text{virus}}$	1.7	h	Lebensdauer (e-folding time) in Aerosolen
RNA Konzentration in Flüssigkeit- $c_v$	9.00E+08	cop/ml	Für die ursprüngliche Omikron-Variante
RNA Dosis für 50% Infektionsrate- $D_{50}$	154	RNA Kopien	Für die ursprüngliche Omikron-Variante
Inf. Risiko pro Viruspartikel. - $P_{\text{RNA}}$	0.00449	1/RNA Kopien	$P_{\text{RNA}} = 1 - e^{-\ln(0,5)/D_{50}}$
<b>Aerosole</b>			
Effektiver Volumendurchmesser- $d_a$	5	$\mu\text{m}$	
Partikelaustritt beim Atmen - $p_{e,b}$	0.06	Anz./ $\text{cm}^3$	
Partikelaustritt sprechen - $p_{e,s}$	0.6	Anz./ $\text{cm}^3$	
Redeanteil	10	%	
Resultierende Partikelemission - $p_{e,t}$	0.11	Anz./ $\text{cm}^3$	$p_{e,t} = p_{e,s} \cdot 0,1 + (1-0,1) \cdot p_{e,b}$
<b>Infizierte Person</b>			
Masken-Effizienz (Exhalation) - $f_{\text{mask},e}$	0.2	[-]	Bei Filtereffizienz von 80% (1=no mask)
Masken-Effizienz (Inhalation) - $f_{\text{mask},in}$	0.3	[-]	Bei Filtereffizienz von 70% (1=no mask)
Abscheideeffizienz Lunge - $f_{\text{lung}}$	0.5	[-]	
Atemfrequenz - $q_{b,e}$	10	l/min	
Effektive Atemfrequenz $q_{b,eff}$	5	l/min	$q_{b,eff} = q_{b,e} \cdot f_{\text{mask},in} \cdot f_{\text{lung}}$
RNA-Konz. in ausgeatmeter Luft - $CR_{\text{NA},b}$	6.72	RNA/l	$CR_{\text{NA},b} = \pi/6 \cdot d_a^3 \cdot c_v \cdot 10^{-12} \cdot p_{e,t} \cdot 10^3$
Emissionsfaktor - E	4029	Anz./h	$E = CR_{\text{NA},b} \cdot q_{b,e} \cdot f_{\text{mask},e}$

Für die ursprüngliche Omikron-Variante des SARS-CoV-2-Virus wurde angenommen, dass 154 eingeatmete RNA-Kopien einer infektiösen Dosis ( $D_{50}$ ) entsprechen, also der mittleren Dosis, die bei 50% der empfänglichen Personen eine Infektion verursacht (Lelieveld, 2020).

Das individuelle Infektionsrisiko für  $R_i(t)$  (für jede empfängliche Person) sowie das Gruppeninfektionsrisiko  $R(t)$  (für eine Gruppe empfänglicher Personen) werden anhand der folgenden Gleichungen (A.2.1 und A.2.2), die von der Anzahl der eingeatmeten Viruspartikel  $n_v(t)$  und der Wahrscheinlichkeit  $P_{RNA}$  abhängen, dass ein einzelnes Viruspartikel eine Infektion verursacht:

$$R_i(t) = [1 - (1 - P_{RNA})^{n_v(t)}] * 100 \quad (A.2.1)$$

$$R(t) = [1 - (1 - P_{RNA})^{(n_v(t)*n)}] * 100 \quad (A.2.2)$$

Dabei gilt:

$R_i(t)$  entspricht dem individuellen Infektionsrisiko für jede Person [%].

$R(t)$  gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass mindestens eine Person in einer Gruppe empfänglicher Personen infiziert wird [%].

$n$  beschreibt die Anzahl der empfänglichen (nicht infizierten) Personen im Raum [Anzahl].

$n_v(t)$  steht für die Anzahl der pro Person eingeatmeten Viruspartikel [Anzahl].

$P_{RNA}$  gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein einzelnes Viruspartikel eine Infektion verursacht [%].

Die zeitabhängige Konzentration luftgetragener Viren  $c_v(t)$ , die sich in einem Raum aufbaut, sowie die resultierende Anzahl eingeatmeter Viruspartikel pro Person  $n_v(t)$  können mit den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$c_v(t) = \frac{E}{V * \lambda} * (1 - e^{-\lambda * t}) + c_{v0} * e^{-\lambda * t} \quad (A.2.3)$$

$$c_v(t) = \frac{E}{V * \lambda} * (1 - e^{-\lambda * t}); \quad \text{when } c_{v0} = 0 \quad (A.2.4)$$

$$n_v(t) = n_{v0} + q_{b,eff} * \frac{E}{V * \lambda} * t * \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda * t}}{\lambda * t}\right) + c_{v0} * q_{b,eff} * \frac{(1 - e^{-\lambda * t})}{\lambda} \quad (A.2.5)$$

$$n_v(t) = q_{b,eff} * \frac{E}{V * \lambda} * t * \left(1 - \frac{1 - e^{-\lambda * t}}{\lambda * t}\right); \quad \text{when } c_{v0} \text{ and } n_{v0} = 0 \quad (A.2.6)$$

Dabei gilt:

$c_v(t)$  entspricht der Anzahl der Viruspartikel, die sich in der Raumluft ansammeln [Anzahl/m<sup>3</sup>].

$n_{v0}$  ist die Anzahl der Viruspartikel, die bereits von einer Person eingeatmet wurden [Anzahl].

$c_{v0}$  steht für die bereits vorhandene Viruskonzentration in der Raumluft [Anzahl/m<sup>3</sup>].

$q_{b,eff}$  ist die effektive Atemfrequenz (siehe Tabelle A.4).

$E$  entspricht dem Emissionsfaktor [Anzahl/h] (siehe Tabelle A.4).

$V$  ist das Innenraumluftvolumen des Raums [m<sup>3</sup>].

$\lambda$  ist der Verlustkoeffizient [h<sup>-1</sup>] (bestimmt nach Gleichung A.4.7).

$t$  ist die Dauer der Exposition [h].

$e$  entspricht der Euler'schen Zahl.

Der Verlustkoeffizient  $\lambda$  wird durch die Summe der Luftwechselrate  $n$  [ $h^{-1}$ ] und des Kehrwerts der mittleren Virus-Überlebenszeit in der Luft  $t_{virus}$  von 1,7 Stunden berechnet:

$$\lambda = n + \frac{1}{t_{virus}} \quad (A.2.7)$$

Dabei gilt:

$n$  ist die gesamte Luftwechselrate [ $h^{-1}$ ] (einschließlich Infiltration und aktiver Belüftung).

$t_{virus}$  ist die Virus-Überlebenszeit in der Luft [h] (siehe Tabelle A.4).

### B.11. Infection risk calculation reference scenario

Die Berechnung des täglichen durchschnittlichen Gruppeninfektionsrisikos wurde auch mit einem Referenzszenario verglichen. Dieses Referenzszenario wurde ähnlich definiert wie das im Positionspapier zur Bewertung von Innenräumen in Hinblick auf das Infektionsrisiko durch SARS-CoV-2 des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK, 2021) dargestellte Szenario. Die festgelegten Parameter sind:

- Luftwechselrate von 10 l/(s·Person)
- Eine infektiöse Person
- 24 empfängliche Personen
- Infektiöse Person mit einem Sprechanteil von 10 %
- Keine Schutzmasken getragen
- Raumvolumen von 210 m<sup>3</sup>
- Expositionsdauer von 8:00 bis 14:00 Uhr (also 6 Stunden)

Die Luftwechselrate des Referenzszenarios wurde auf 10 l/(s·Person) festgelegt, da dies der IEQ1-Kategorie für Nutzer mit besonderen Anforderungen (z. B. Kinder) gemäß EN 16798-1 (CEN, 2024) entspricht.

Zusätzlich würde eine Luftwechselrate von 10 l/(s·Person) in Kombination mit einer standardisierten CO<sub>2</sub>-Emission von 20 l/(h·Person) zu einer stationären CO<sub>2</sub>-Konzentration von etwa 1000 ppm führen. Dies entspricht den Standardwerten der ISO 16000-41 für Qualitätsklasse A bei kontinuierlichem Aufenthalt und geistigen Tätigkeiten (ISO, 2023) sowie der ÖNORM H 6039 (ASI, 2023).



## C. Ergebnisse

### C.1. Ergänzende Datenanalyse

#### C.1.1. Analyse der ZOHO-Daten (physikalische Merkmale von Schulen und Klassenzimmern)

##### C.1.1.1. Charakteristiken der Schulen

Tabelle A-5 Charakteristiken der Schulen im ImpAQs Projekt

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der untersuch-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
1	WIE	Groß-städte	Zentral	KMS	180	7	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
2	WIE	Groß-städte	Zentral	ABHS	170	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
3	WIE	Groß-städte	Zentral	ABHS	200	5	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
4	WIE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	170	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
5	WIE	Groß-städte	Vorstadt	TGS	240	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Leichte Bauweise
6	WIE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	170	4	10	Heizkörper - hydronisch	Termische Bauteil-aktivierung	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise
7	WIE	Groß-städte	Vorstadt	VS	210	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
8	WIE	Groß-städte	Zentral	VS	200	5	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
9	WIE	Groß-städte	Zentral	ABHS	190	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
10	WIE	Groß-städte	Zentral	VS	210	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der unter-such-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
11	WIE	Groß-städte	Vorstadt	WS	230	3	10	Nicht bekkant	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
12	WIE	Groß-städte	Zentral	ABHS	160	5	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
13	WIE	Groß-städte	Vorstadt	TGS	170	17	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
14	WIE	Groß-städte	Vorstadt	VS	160	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
15	WIE	Groß-städte	Vorstadt	VS	160	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
16	WIE	Groß-städte	Vorstadt	VS	150	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
17	WIE	Groß-städte	Vorstadt	MS	200	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
18	WIE	Groß-städte	Zentral	ABHS	180	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
19	WIE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	160	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
20	WIE	Groß-städte	Zentral	TGS	180	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
21	WIE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	160	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
22	BUR	Klein-städte	Vorstadt	ABHS	260	4	10	Fußboden heizung	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
23	BUR	Ortschaft	-	VS	190	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere & Leichte Bauweise
24	BUR	Ortschaft	-	TGS	390	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der unter-such-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
25	BUR	Klein-städte	Zentral	KMS	160	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise
26	BUR	Ortschaft	-	ABHS	210	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Beide Lüftungs-varianten	Dezentral e Lüftungs-anlagen in mehreren Klassenräu-me	Keine	Schwere Bauweise
27	NIE	Mittel-städte	Zentral	ABHS	270	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
28	NIE	Mittel-städte	Zentral	TGS	270	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
29	NIE	Klein-städte	Zentral	KMS	170	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
30	NIE	Ortschaft	-	MS	310	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
31	NIE	Klein-städte	Zentral	VS	170	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
32	NIE	Ortschaft	-	MS	250	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
33	NIE	Ortschaft	-	TGS	230	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
34	NIE	Klein-städte	Zentral	ABHS	410	2	10	Heizkörper - hydronisch	Kühlbalken	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der untersuch-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
35	NIE	Ortschaft	-	ABHS	350	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
36	NIE	Klein-städte	Vorstadt	ABHS	180	3	10	Nicht bekkant	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
37	NIE	Ortschaft	-	WS	1020	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
38	NIE	Ortschaft	-	WS	490	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
39	NIE	Klein-städte	Vorstadt	TGS	230	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
40	NIE	Mittel-städte	Zentral	TGS	280	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
41	NIE	Ortschaft	-	KMS	160	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
42	NIE	Klein-städte	Vorstadt	VS	290	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
43	NIE	Mittel-städte	Zentral	KMS	270	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Beide Lüftungs-varianten	Zentrale Lüftungs-anlagen in mehrere Klassenräu-me	Keine	Schwere Bauweise
44	NIE	Klein-städte	Vorstadt	KMS	270	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
45	NIE	Klein-städte	Vorstadt	MS	160	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
46	NIE	Ortschaft	-	ABHS	280	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der unter-such-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
47	STE	Groß-städte	Zentral	MS	360	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
48	STE	Groß-städte	Zentral	ABHS	360	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
49	STE	Groß-städte	Vorstadt	VS	370	1	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
50	STE	Groß-städte	Zentral	ABHS	360	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere & Leichte Bauweise
51	STE	Groß-städte	Zentral	ABHS	360	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
52	STE	Groß-städte	Zentral	ABHS	350	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
53	STE	Groß-städte	Zentral	VS	350	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
54	STE	Groß-städte	Zentral	VS	350	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
55	STE	Groß-städte	Vorstadt	TGS	370	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
56	STE	Groß-städte	Vorstadt	WS	360	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
57	STE	Groß-städte	Vorstadt	VS	360	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
58	STE	Ortschaft	-	MS	350	1	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
59	STE	Groß-städte	Zentral	ABHS	350	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
60	STE	Ortschaft	-	MS	400	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der unter-such-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
61	STE	Klein-städte	Vorstadt	TGS	480	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
62	STE	Ortschaft	-	VS	290	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
63	STE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	370	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
64	STE	Groß-städte	Zentral	KMS	405	4	12	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
65	KÄR	Groß-städte	Zentral	ABHS	450	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
66	KÄR	Groß-städte	Vorstadt	VS	450	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
67	KÄR	Mittel-städte	Zentral	ABHS	510	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
68	KÄR	Mittel-städte	Vorstadt	VS	505	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
69	KÄR	Ortschaft	-	KMS	625	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
70	KÄR	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	450	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
71	KÄR	Mittel-städte	Vorstadt	TGS	505	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
72	OBE	Groß-städte	Zentral	ABHS	305	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
73	OBE	Groß-städte	Zentral	ABHS	270	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
74	OBE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	270	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der unter-such-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
75	OBE	Groß-städte	Vorstadt	MS	290	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
76	OBE	Klein-städte	Vorstadt	VS	315	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
77	OBE	Mittel-städte	Vorstadt	ABHS	320	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
78	OBE	Groß-städte	Zentral	TGS	270	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
79	OBE	Klein-städte	Vorstadt	MS	445	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
80	OBE	Ortschaft	-	VS	345	2	10	Fußboden heizung	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
81	OBE	Ortschaft	-	VS	355	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
82	OBE	Ortschaft	-	MS	340	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
83	OBE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	290	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
84	OBE	Klein-städte	Vorstadt	WS	325	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
85	OBE	Klein-städte	Vorstadt	KMS	440	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
86	OBE	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	285	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
87	OBE	Groß-städte	Zentral	KMS	270	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
88	OBE	Ortschaft	-	ABHS	455	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der untersuch-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
89	OBE	Groß-städte	Vorstadt	WS	285	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
90	OBE	Groß-städte	Zentral	WS	270	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
91	OBE	Groß-städte	Vorstadt	KMS	265	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
92	OBE	Klein-städte	Vorstadt	WS	485	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
93	OBE	Ortschaft	-	WS	565	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
94	OBE	Mittel-städte	Vorstadt	WS	325	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
95	OBE	Groß-städte	Vorstadt	TGS	260	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
96	SAL	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	450	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Beide Lüftungs-varianten	Dezentrale Lüftungs-anlagen in mehrere Klassenräu-me	Keine	Schwere Bauweise
97	SAL	Groß-städte	Zentral	MS	425	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
98	SAL	Groß-städte	Zentral	ABHS	425	5	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
99	SAL	Klein-städte	Zentral	TGS	455	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise



Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der untersuch-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
100	SAL	Groß-städte	Vorstadt	SS	430	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
101	SAL	Groß-städte	Vorstadt	VS	450	3	10	Fußboden heizung	Nicht bekkant	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise
102	SAL	Klein-städte	Vorstadt	ABHS	475	2	10	Heizkörper - hydronisch	Nicht bekkant	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der untersuch-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
103	TIR	Groß-städte	Zentral	VS	585	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
104	TIR	Groß-städte	Vorstadt	MS	580	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
105	TIR	Ortschaft	-	MS	610	2	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
106	TIR	Ortschaft	-	MS	880	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Dezentral e Lüftungs-anlagen, nicht in Betrieb	Keine	Schwere Bauweise
107	TIR	Klein-städte	Vorstadt	ABHS	685	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
108	TIR	Klein-städte	Vorstadt	KMS	685	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise

Schul-Nr.	Bundes-land	Stadt-größe	Standort	Schul-art	Meer-es-höhe	Anzahl der Stock-werke	Anzahl der untersuch-ten Klassen-zimmer	Heizung	Kühlung	Lüftung	Details der Lüftung	Tragbare Luftfilter	Bauart
109	TIR	Klein-städte	Zentral	ABHS	495	4	10	Klimaanlage	Klima-anlage	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise
110	TIR	Groß-städte	Vorstadt	ABHS	580	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
111	TIR	Groß-städte	Vorstadt	TGS	580	5	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
112	TIR	Groß-städte	Vorstadt	KMS	580	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
113	VOR	Mittelstä-dte	Vorstadt	VS	445	2	10	Heizkörper - electrisch	Termische Bauteil-aktivierung	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise
114	VOR	Mittel-städte	Vorstadt	ABHS	460	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
115	VOR	Mittel-städte	Zentral	ABHS	435	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Schwere Bauweise
116	VOR	Klein-städte	Zentral	TGS	410	5	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
117	VOR	Mittel-städte	Vorstadt	TGS	435	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
118	NIE	Ortschaft	-	VS	240	3	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Einzelraum-HEPA-Filter	Schwere Bauweise
119	WIE	Groß-städte	Zentral	SS	210	4	10	Heizkörper - hydronisch	Keine	Natürliche Lüftung	Keine	Keine	Schwere Bauweise
120	STE	Groß-städte	Vorstadt	VS	415	3	8	Heizkörper - hydronisch	Keine	Mechanisch e Lüftung	Zentrale Lüftungs-anlagen	Keine	Leichte Bauweise

### C.1.1.2. Tatsächliche und maximale Klassenzimmerbelegung nach Schultyp und Region

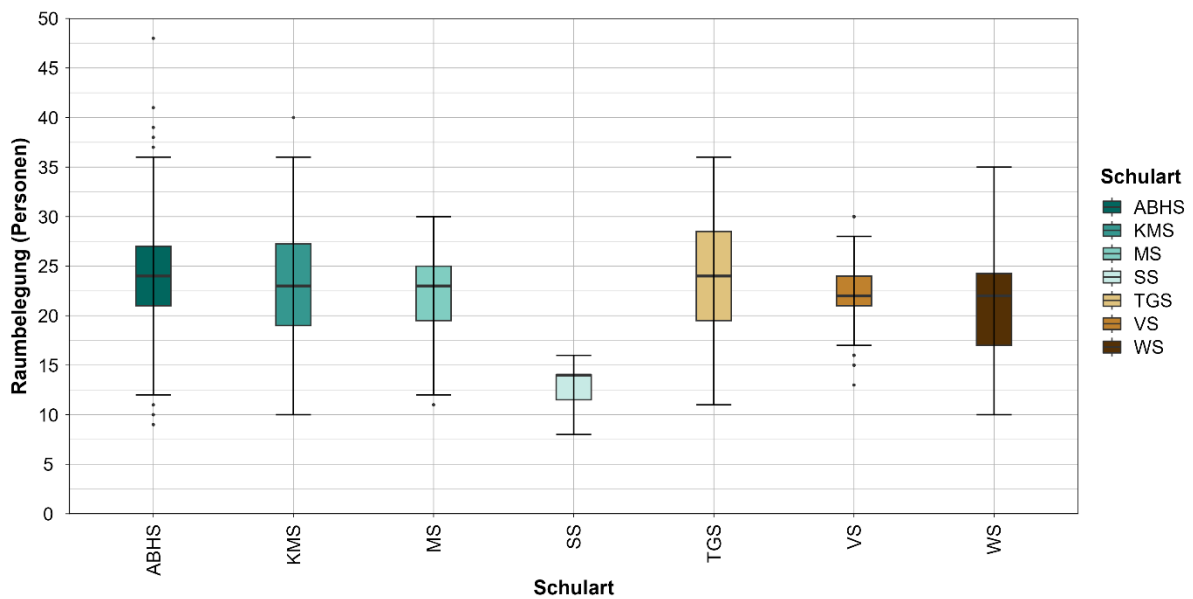


Abbildung A-10 Tatsächliche Belegung, d. h. Anzahl der Schüler in Klassenzimmern nach Schultyp sortiert.

Die tatsächliche Belegung der Klassenräume (Anzahl der SuS) schwankt zwischen 6 und 47 Personen, wobei Sonderschulen (SS) eine deutlich geringere Belegungsichte aufweisen<sup>1</sup>.

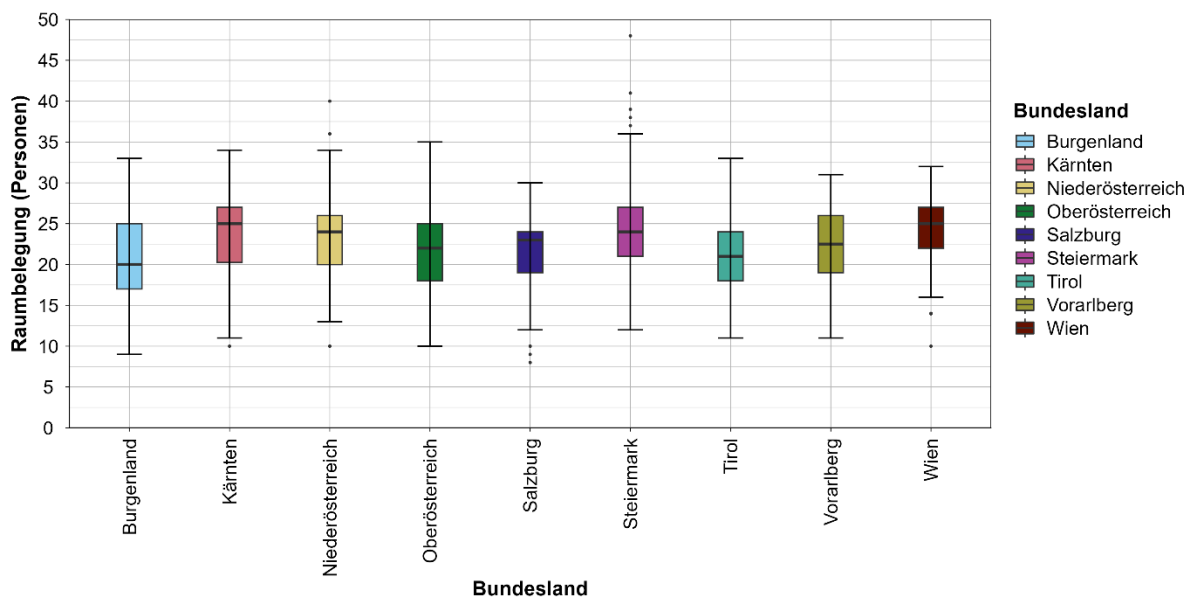


Abbildung A-11 Tatsächliche Belegung, d. h. Anzahl der Schüler in Klassenzimmern nach Region sortiert.

<sup>1</sup> Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist Vorsicht geboten, da nur zwei SS-Schulen in die Studie einbezogen wurden.

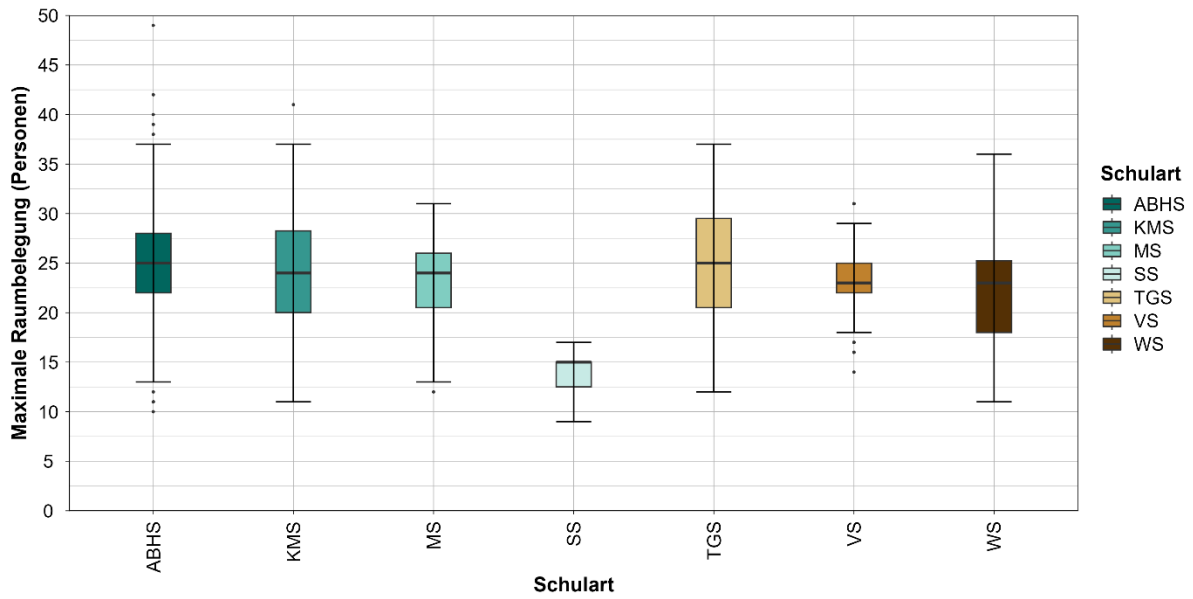


Abbildung A-12 Maximale Klassenraumbellegung (einschließlich Lehrkraft), d. h. Anzahl der Personen in Klassenzimmern nach Schultyp sortiert.

Die maximale Belegung der Klassenräume (SuS plus Lehrer) variiert zwischen 7 und 48 Personen.

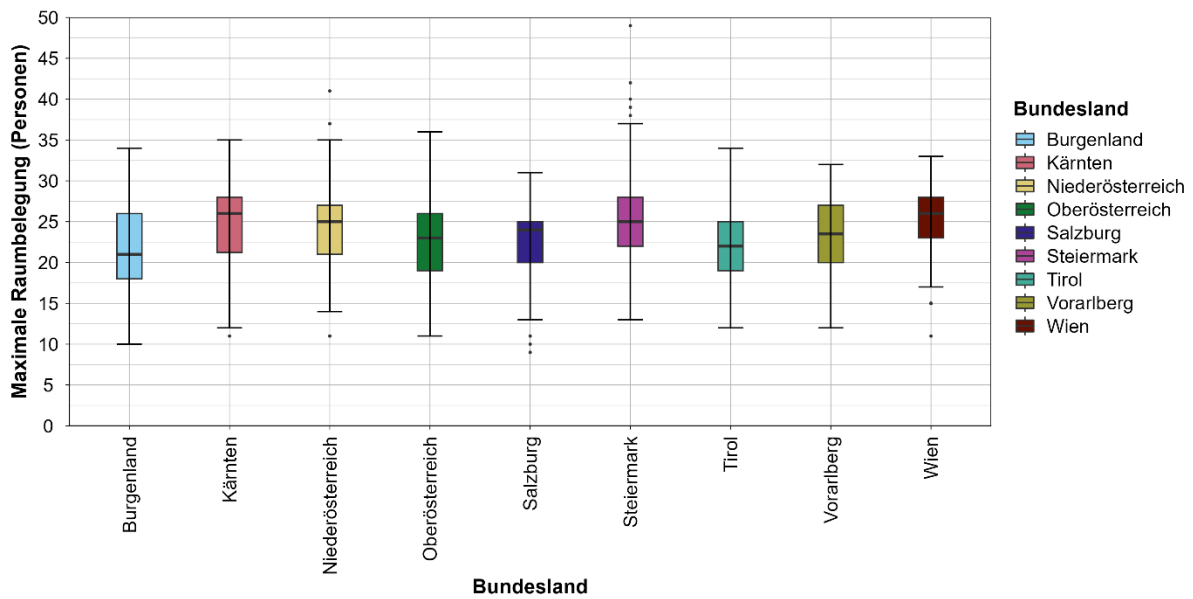


Abbildung A-13 Maximale Belegung (einschließlich Lehrkraft), d. h. Anzahl der Personen in Klassenzimmern nach Region sortiert.

### C.1.1.3. Fußbodenfläche der Klassenräume nach Schultyp und Region

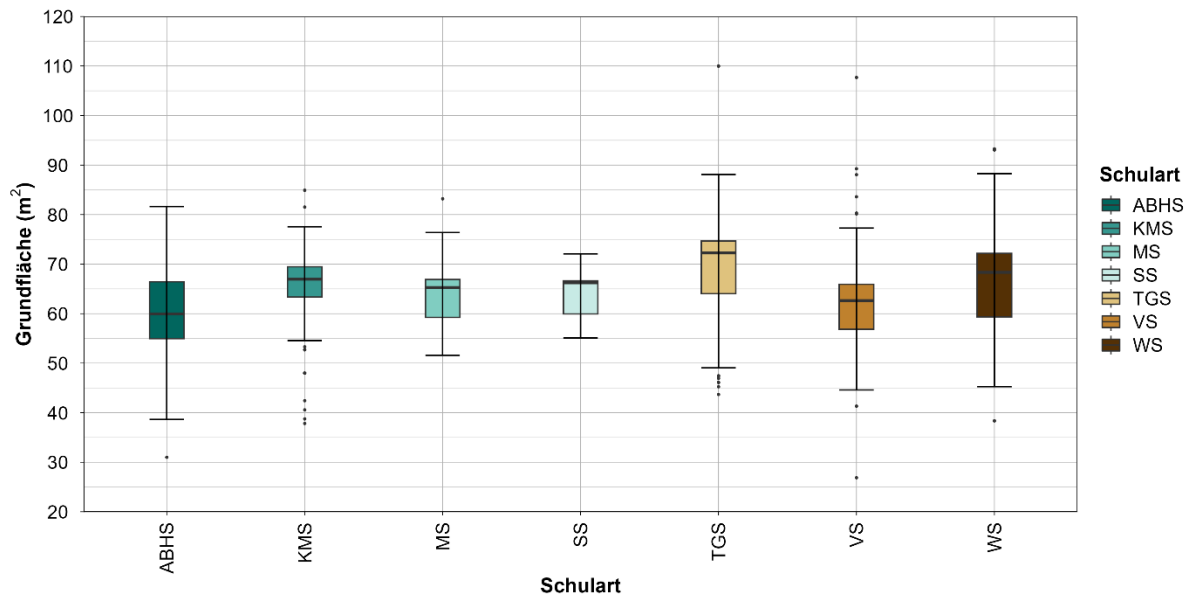


Abbildung A-14 Fußbodenfläche aller Klassenzimmer in m<sup>2</sup>, sortiert nach Schultyp.

Abbildung A-14 zeigt, dass die Schulen TGS und WS in absoluten Zahlen die größten Klassenräume haben, während die ABHS die kleinsten Klassenräume hat.

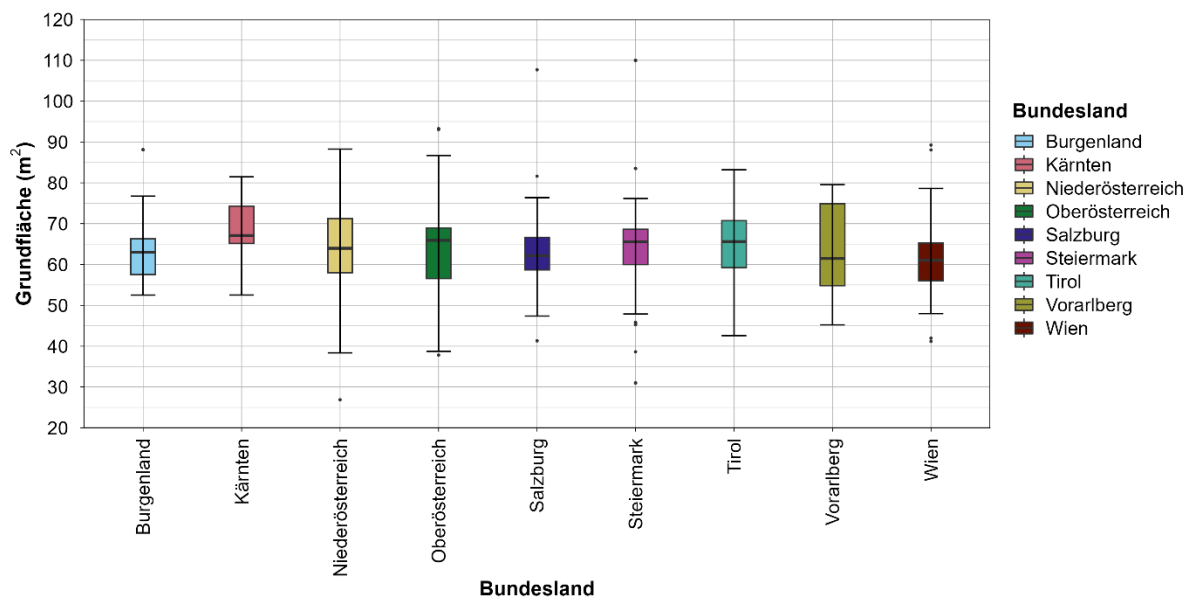


Abbildung A-15 Fußbodenfläche aller Klassenzimmer in m<sup>2</sup>, sortiert nach Region.

Abbildung A-15 zeigt, dass Kärnten den größten Median an Klassenraumgrößen aufweist, während Nieder- und Oberösterreich die größte Bandbreite an Klassenraumgrößen aufweisen

C.1.1.4. Klassenzimmer-Belegungsdichte [m<sup>2</sup>/Person] nach Schulregion

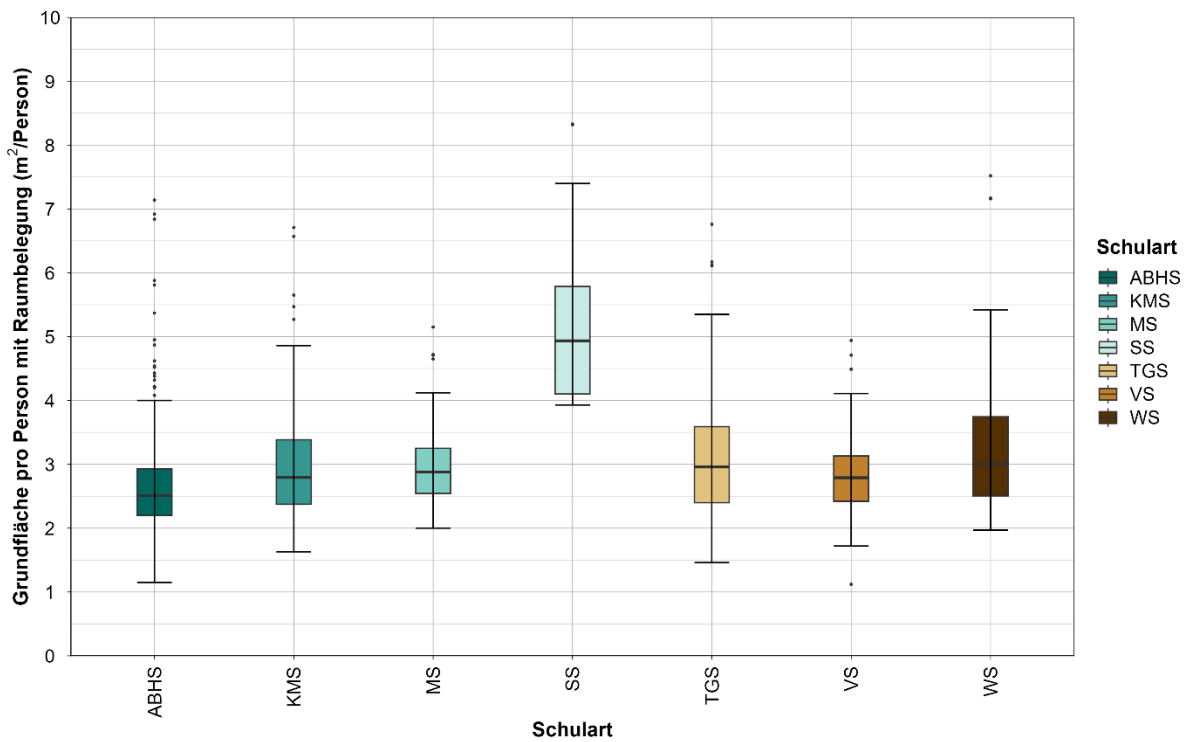


Abbildung A-16 Fußbodenfläche pro Person basierend auf der tatsächlichen Belegung, klassifiziert nach Schultyp.

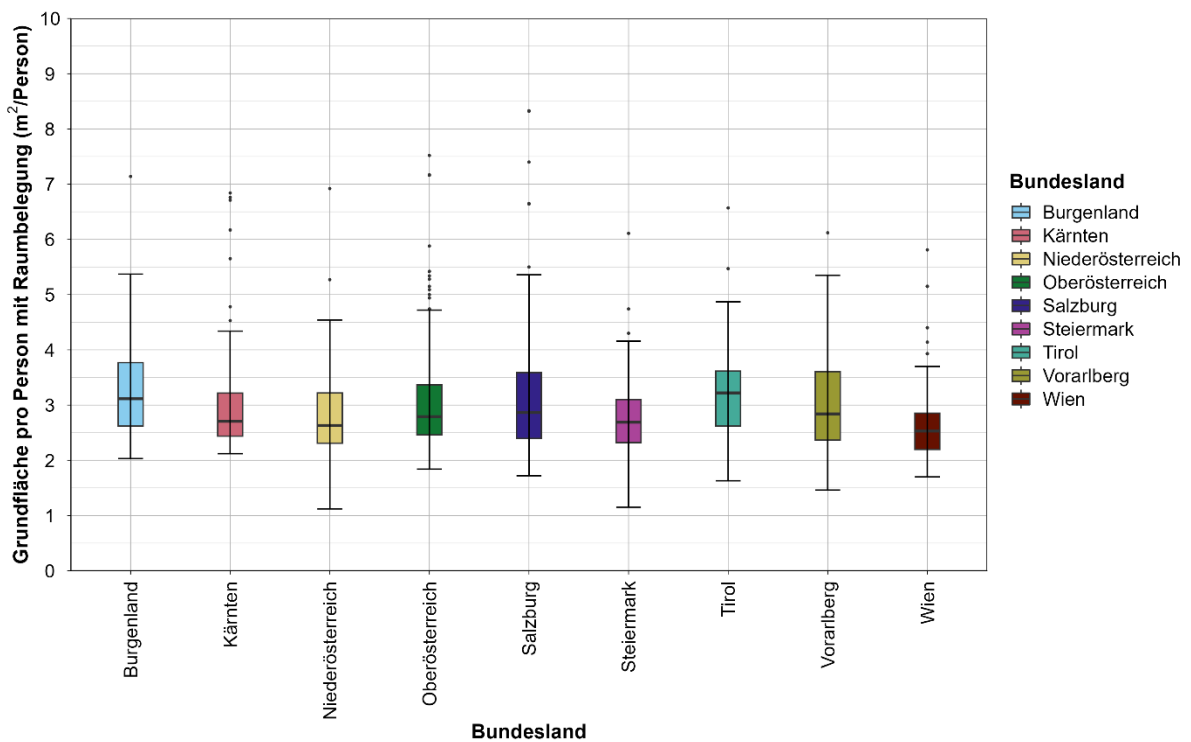


Abbildung A-17 Fußbodenfläche pro Person basierend auf der tatsächlichen Belegung, klassifiziert nach Region.

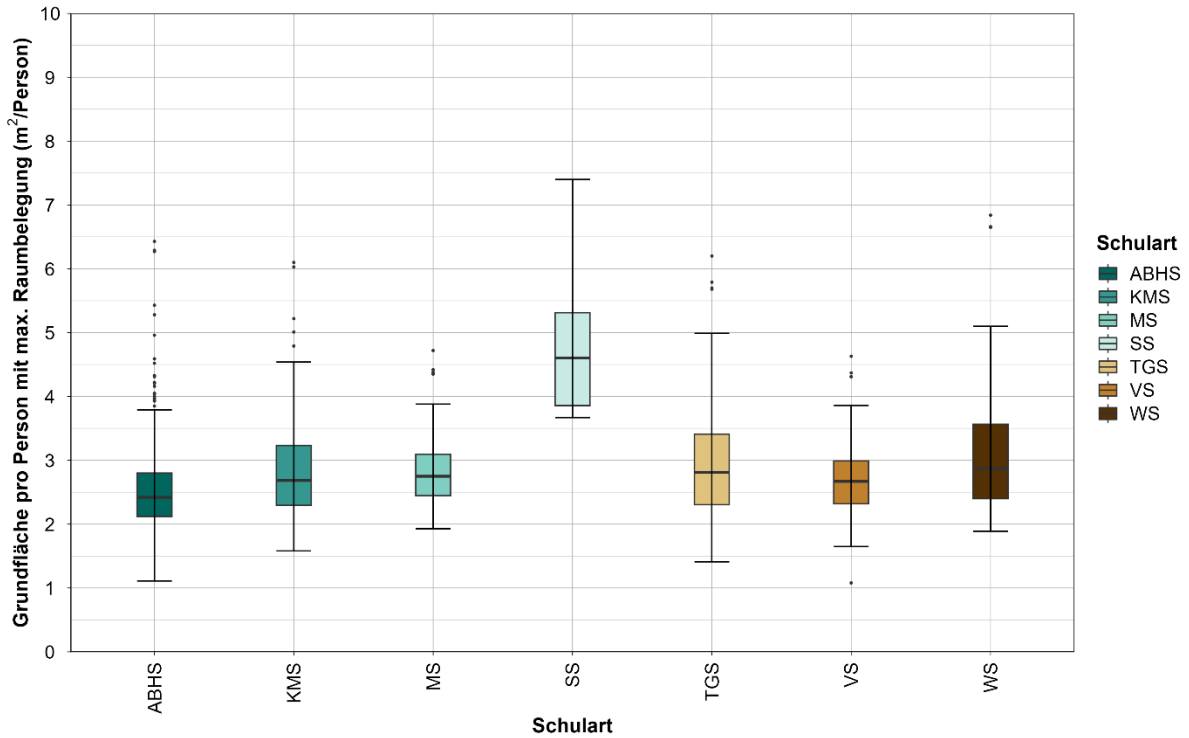


Abbildung A-18 Fußbodenfläche pro Person bei maximaler Belegung (einschließlich Lehrkraft), sortiert nach Schultyp, einschließlich Sonderschulen (SS)

Abbildung A-18 zeigt, dass Sonderschulen (SS) einen deutlich höheren Platzbedarf pro Person haben<sup>2</sup>.

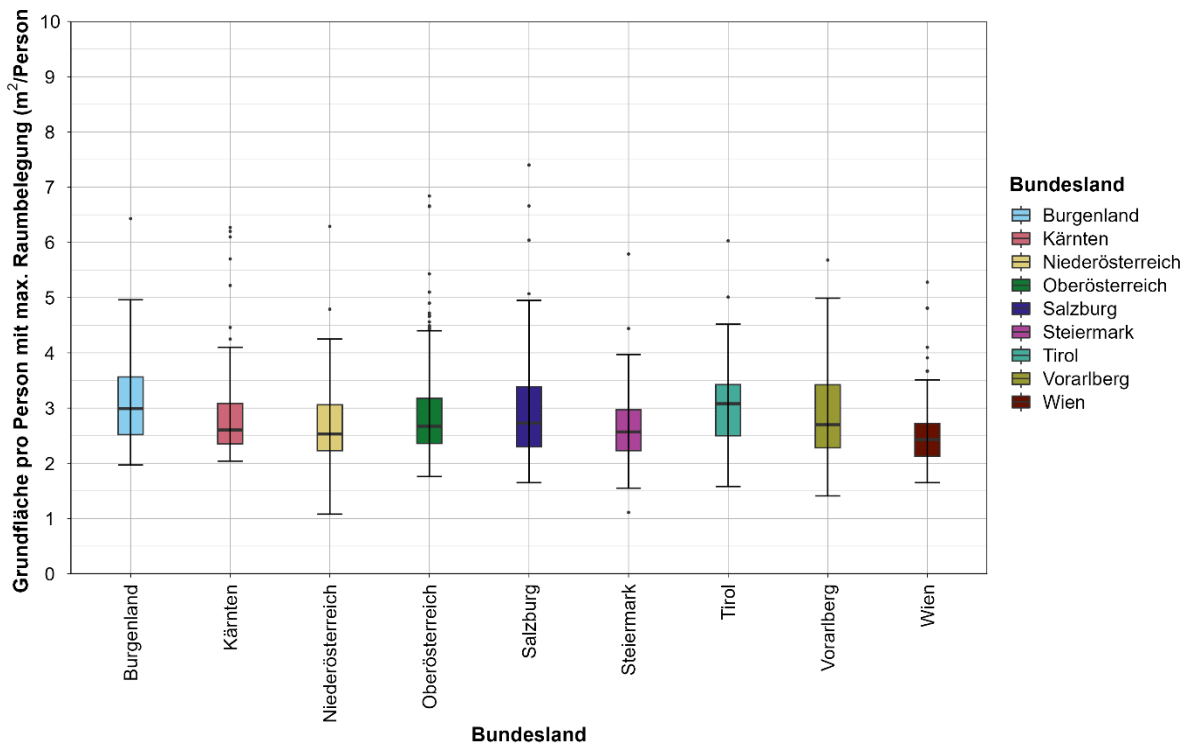


Abbildung A-19 Belegungsdichte basierend auf der tatsächlichen Belegung, sortiert nach Region

<sup>2</sup> Bei der Interpretation dieses Ergebnisses ist Vorsicht geboten, da nur zwei SS-Schulen in die Studie einbezogen wurden..

### C.1.1.5. Classroom volume by school type and region

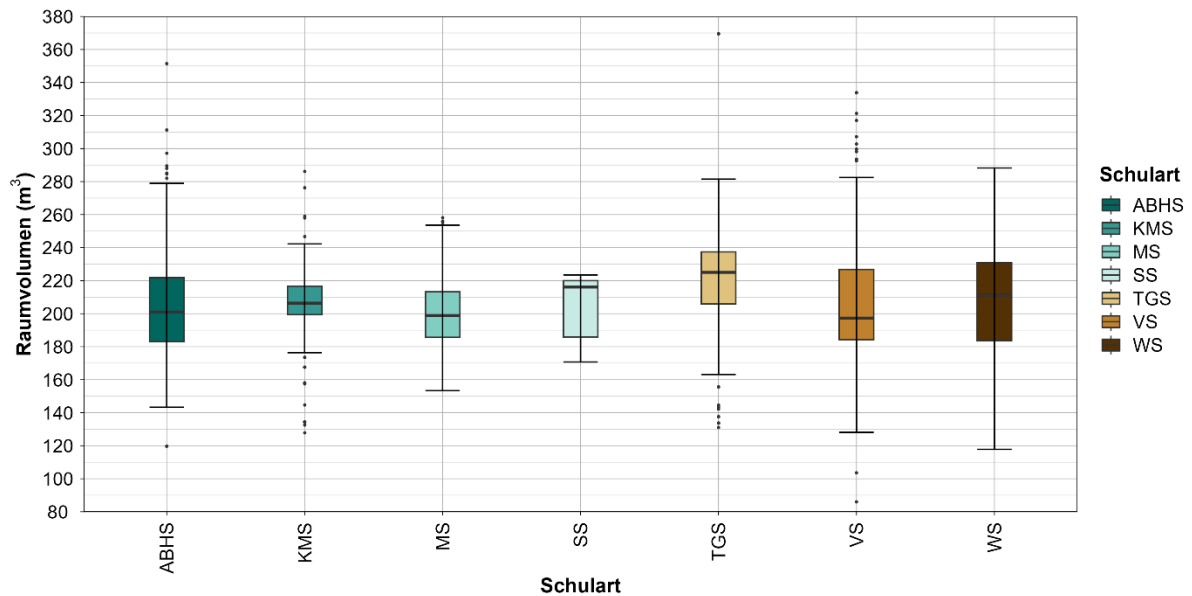


Abbildung A-20 Raumvolumen der Klassenzimmer, sortiert nach Schultyp.

Abbildung A-20 veranschaulicht die Bandbreite der Raumvolumina (90 m<sup>3</sup> bis 360 m<sup>3</sup>). Während ABHS-Schulen die kleinste Grundfläche haben (Abb. A-14), deutet ihr vergleichsweise größeres Volumen auf hohe Decken hin.

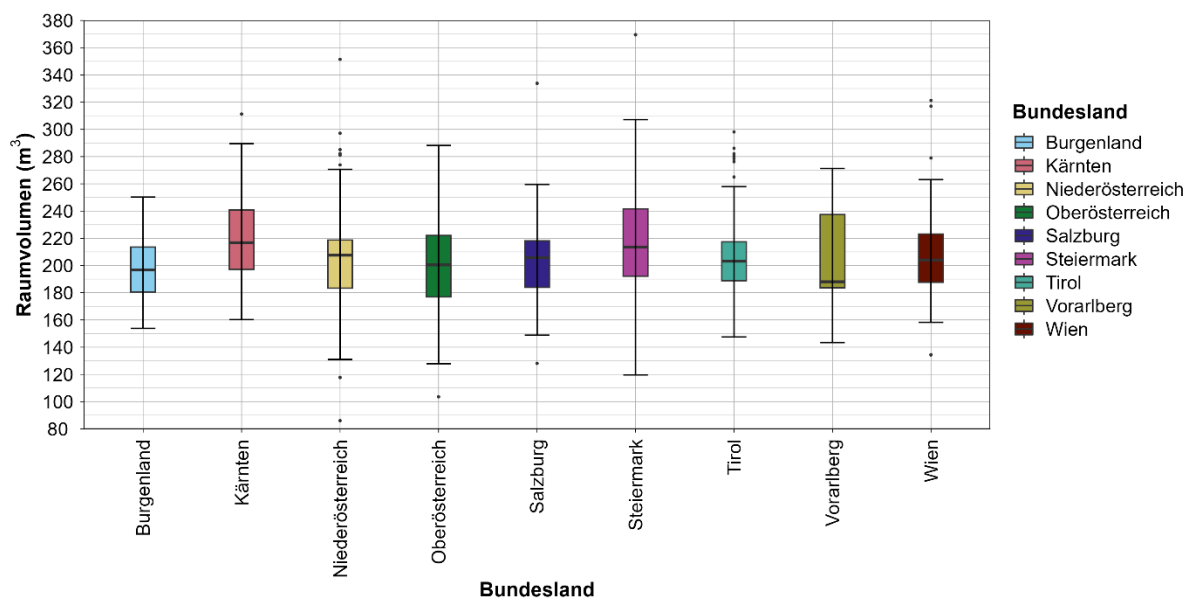


Abbildung A-21 Raumvolumen der Klassenzimmer, sortiert nach Region.

Die Werte liegen zwischen 90 m<sup>3</sup> und 360 m<sup>3</sup>, wobei die Klassenzimmer in der Steiermark die größte Variabilität aufweisen.



C.1.1.6. C Klassenzimmer-Raumvolumen pro Person [ $\text{m}^3/\text{Person}$ ] nach Schultyp und Region

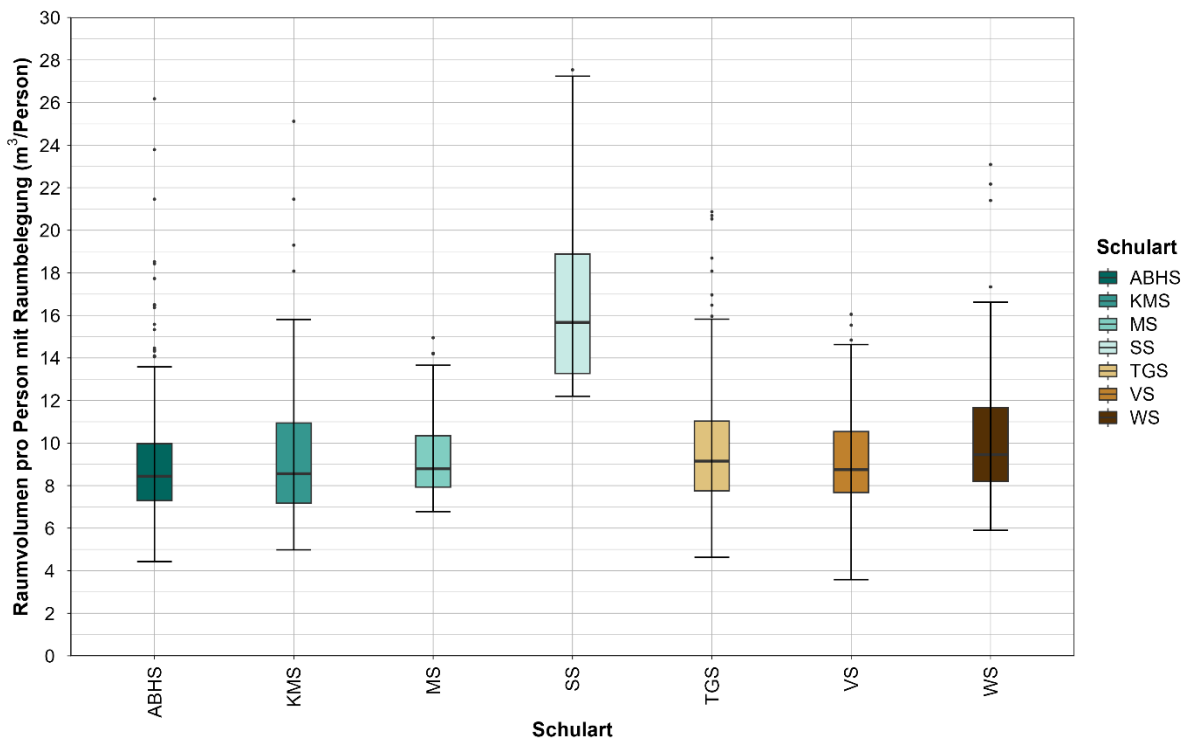


Abbildung A-22 Raumvolumen pro Person basierend auf der tatsächlichen Belegung, sortiert nach Schultyp.

Sonderschulen (SS) bieten deutlich mehr Raumvolumen pro Person.

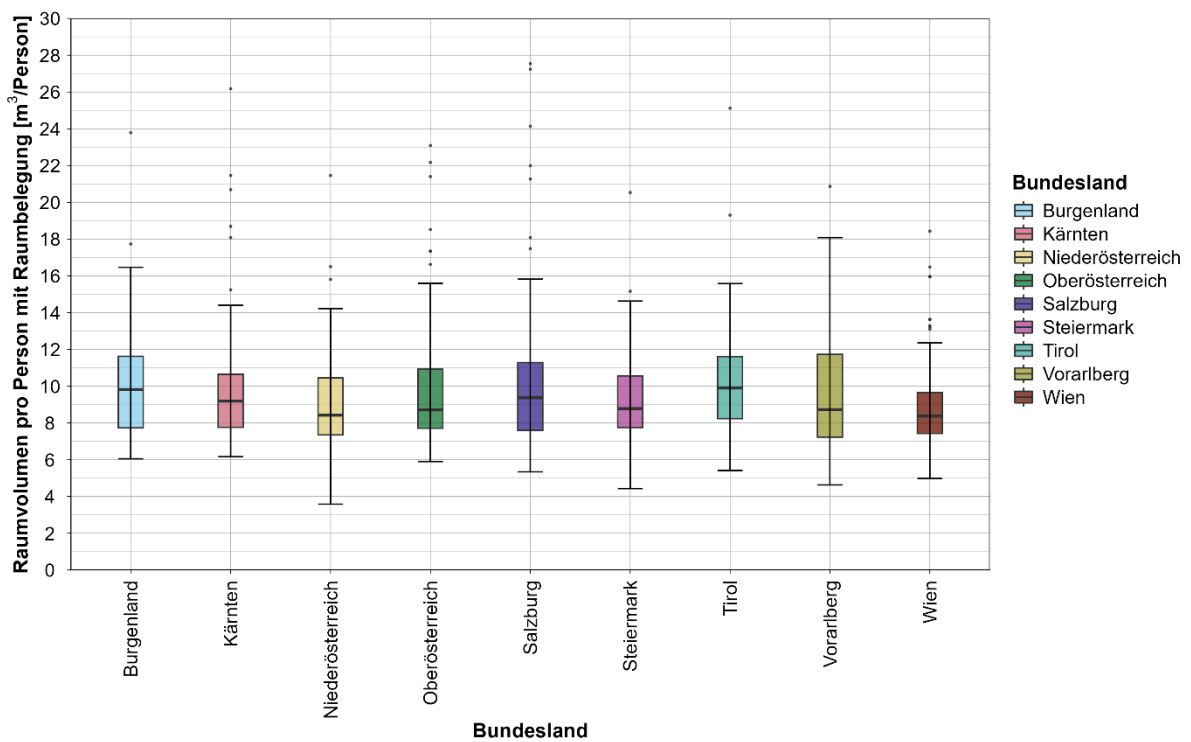


Abbildung A-23 Raumvolumen pro Person basierend auf der tatsächlichen Belegung, sortiert nach Region.

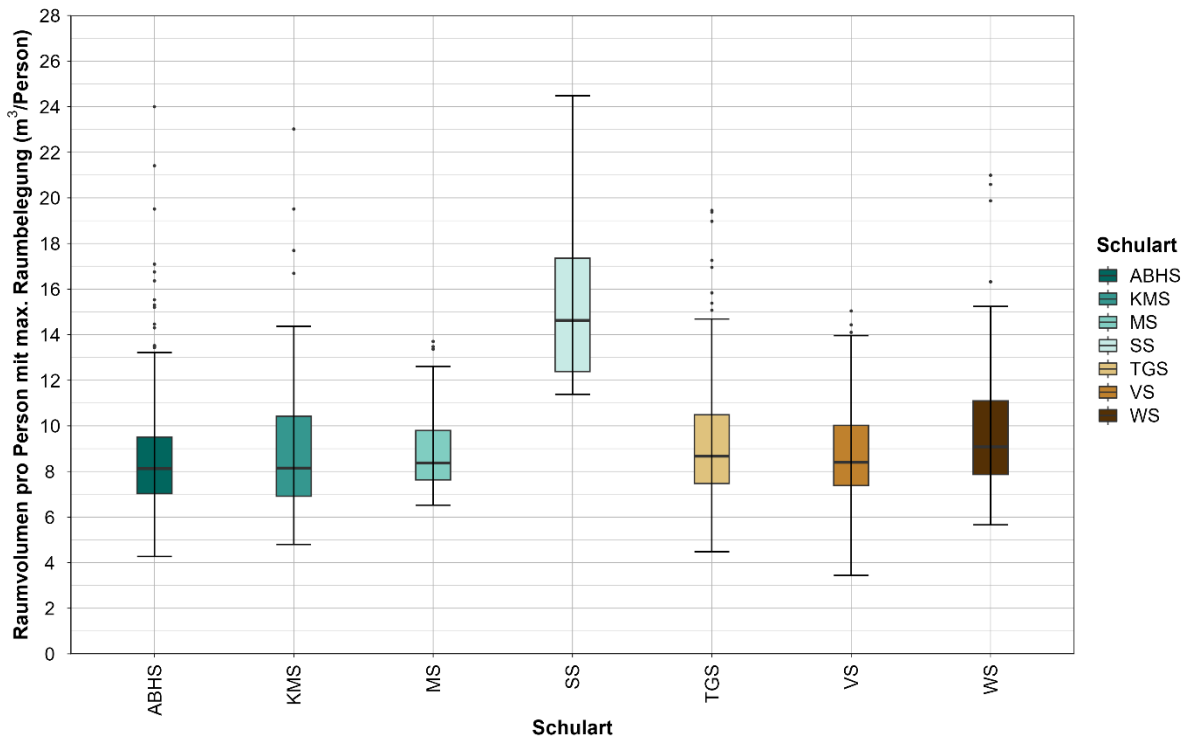


Abbildung A-24 Raumvolumen pro Person bei maximaler Belegung (einschließlich Lehrkraft), klassifiziert nach Schultyp.

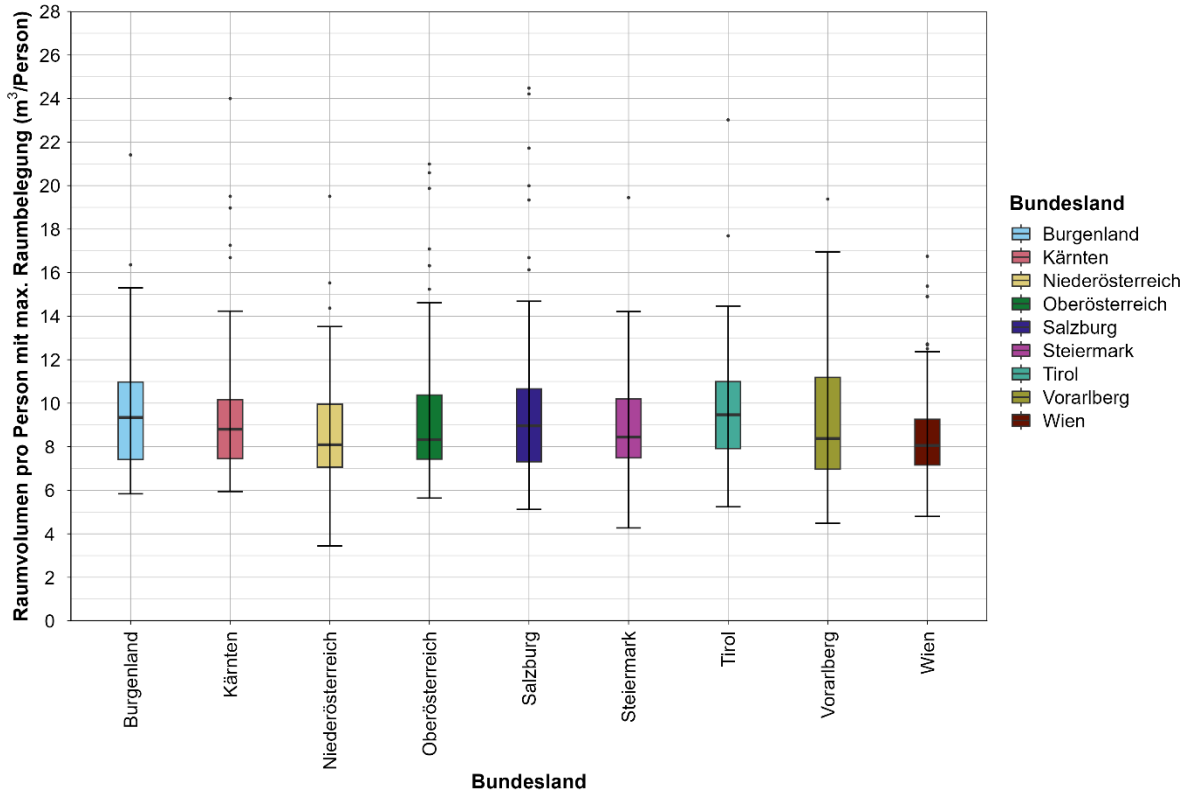


Abbildung A-25 Raumvolumen pro Person bei maximaler Belegung (einschließlich Lehrkraft), sortiert nach Region.

### C.1.1.7. Außenfassade verglaste Gesamtfläche in m<sup>2</sup>

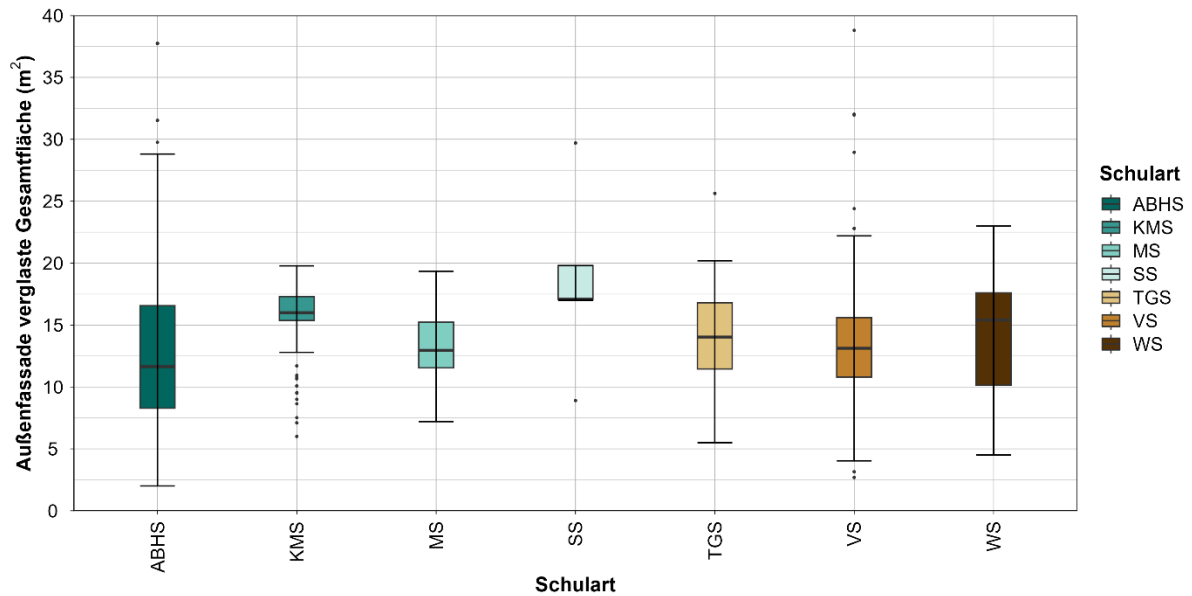


Abbildung A-26 Verglaste Gesamtfläche der Außenfassade der Klassenzimmer in m<sup>2</sup>, sortiert nach Schultyp.

Die ABHS-Schulen zeigen die größte Variabilität, mit Werten zwischen 2 m<sup>2</sup> und 36 m<sup>2</sup>, wobei der höchste Wert 39 m<sup>2</sup> beträgt.

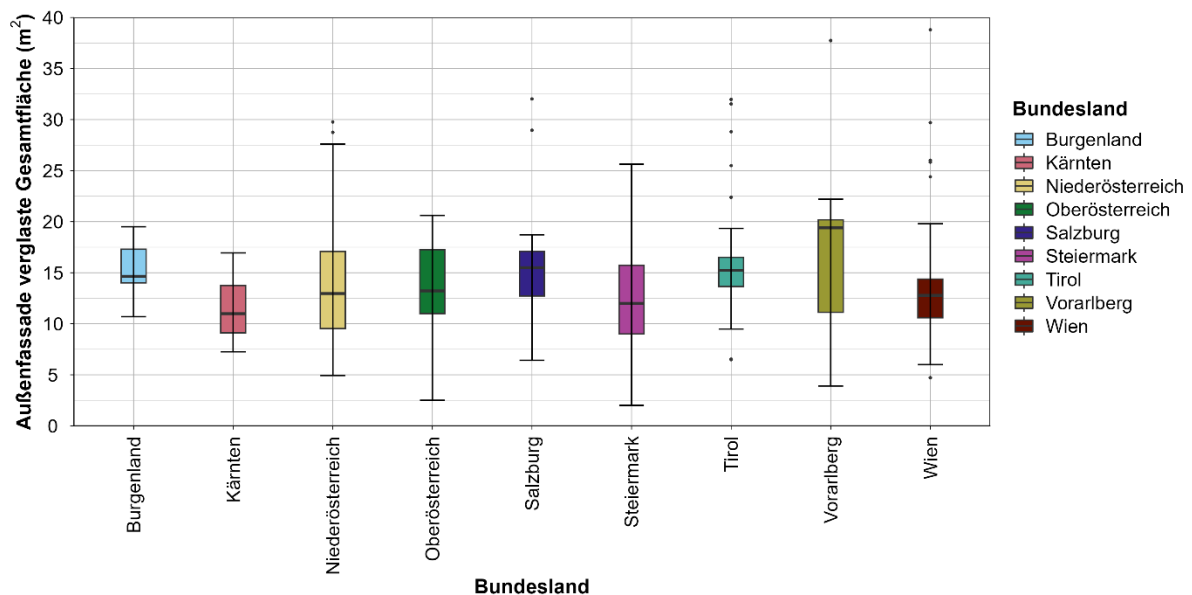


Abbildung A-27 Verglaste Gesamtfläche der Außenfassade der Klassenzimmer in m<sup>2</sup>, sortiert nach Region.

Die größte Variabilität zeigt sich in Schulen der Steiermark und Niederösterreich, mit Werten zwischen 2 m<sup>2</sup> und 29 m<sup>2</sup>, wobei der höchste Wert 39 m<sup>2</sup> beträgt.

### C.1.1.8. Maximale öffnende Fensterfläche pro Klassenzimmer [m<sup>2</sup>]

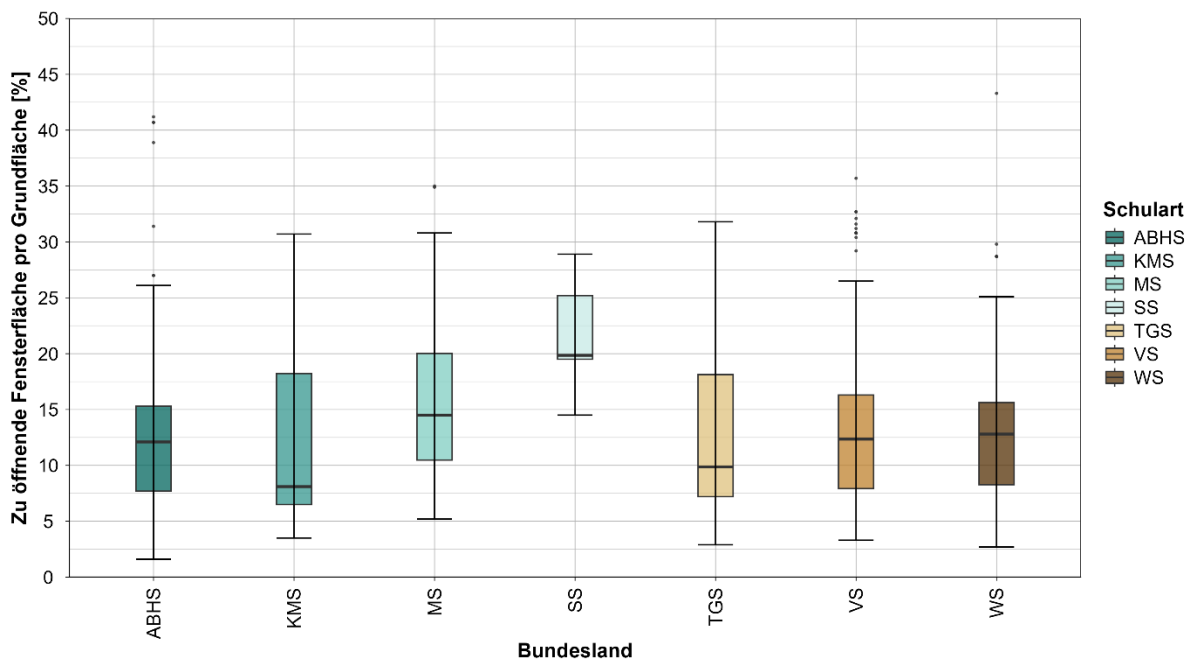
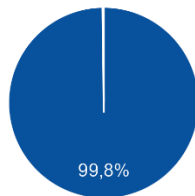


Abbildung A-28 Zu öffnende Fensterfläche in m<sup>2</sup>, sortiert nach Schultyp.

Die öffnende Fläche variiert zwischen 1 m<sup>2</sup> und fast 26 m<sup>2</sup>.

### C.1.1.9. Fenster- und Beschattungsinformationen

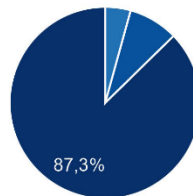
#### Dachleuchte



#### Legende

- Ja 0,2%
- Nein 99,8%

#### Beschattung



#### Legende

- Natürlich 87,3%
- Mechanisch 8,4%
- Unbekannt 4,3%

Abbildung A-29 Zusätzliche Informationen zu Fenstern und Beschattung.

### C.1.1.10. Beispiele für verschiedene Fensteröffnungen

Abbildung A-29 unten veranschaulicht die verschiedenen Arten von Fensteröffnungen in den ausgewählten Schulen:

- 1. Reihe: 1, Fenster durch Poster blockiert; 2, Beschattungselemente beeinträchtigen die Öffnung; 3, Fenstergriffe entfernt.
- 2. Reihe: 1, Dachfenster; 2, Dachfenster mit elektrischem Öffnungsmechanismus; 3, großes Fenster mit drei Öffnungsmöglichkeiten, obere Fläche begrenzt öffnbar.
- 3. Reihe: 1, große verglaste Fassade, nur die Tür nach außen ist öffnbar; 2, große verglaste Fläche, obere Fenster nicht öffnbar; 3, großes älteres Fenster mit innenliegendem Beschattungssystem.
- 4. Reihe: 1, große verglaste Fläche, nur einige Fenster öffnbar, aber durch Tische blockiert; 2, große Fensterflächen, vollständig öffnbar; 3, Fensteröffnung wird durch Tische behindert.

- 5. Reihe: 1, Dachfenster; 2, zwei Reihen mit zu öffnenden Fenster; 3, große verglaste Fläche, obere Fenster können gekippt werden, Fenster in der unteren Reihe ohne Griffe.

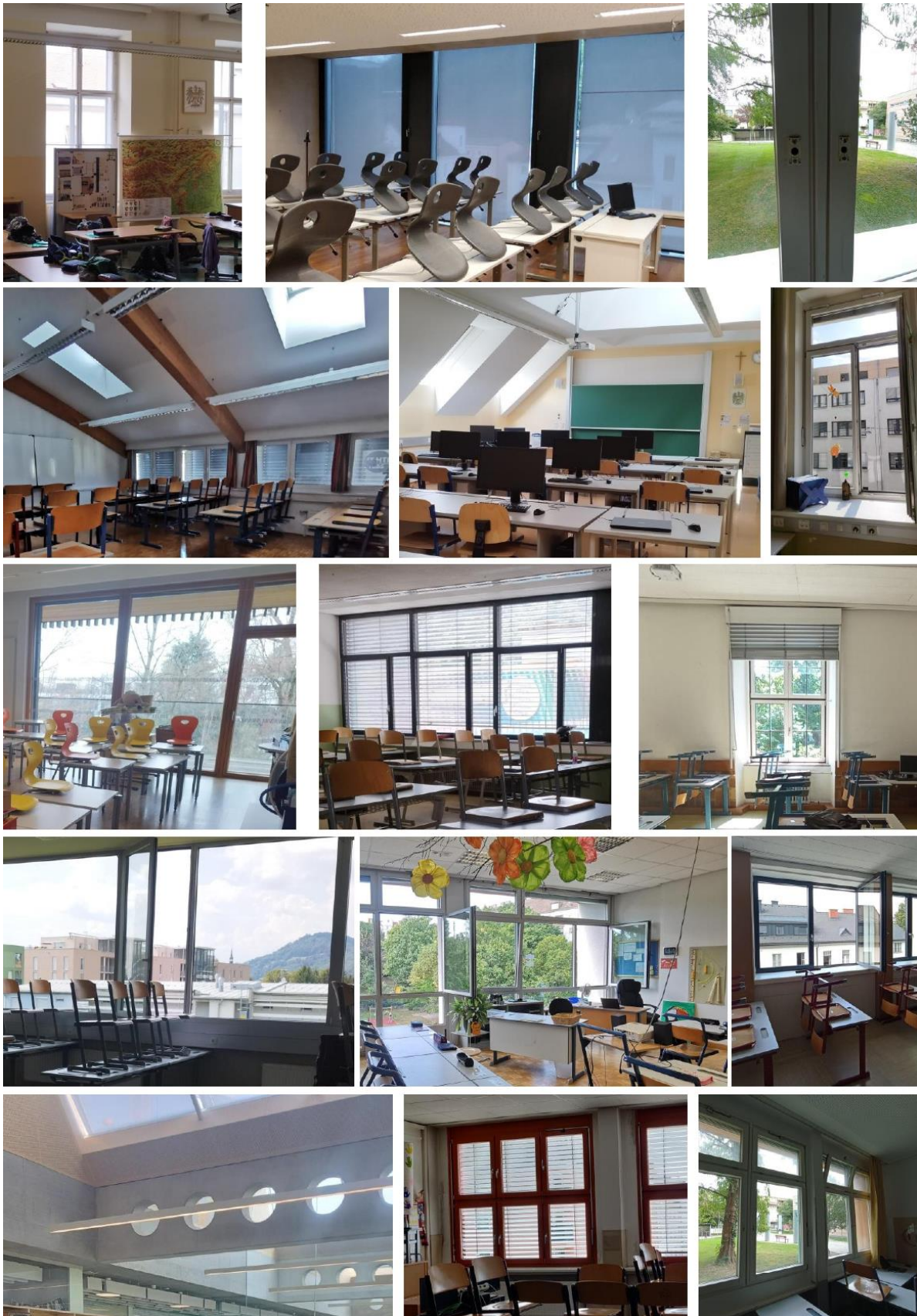


Abbildung A-30 Examples of different types of window openings.

C.1.1.11. Beispiele für verschiedene mechanische Belüftungsarten

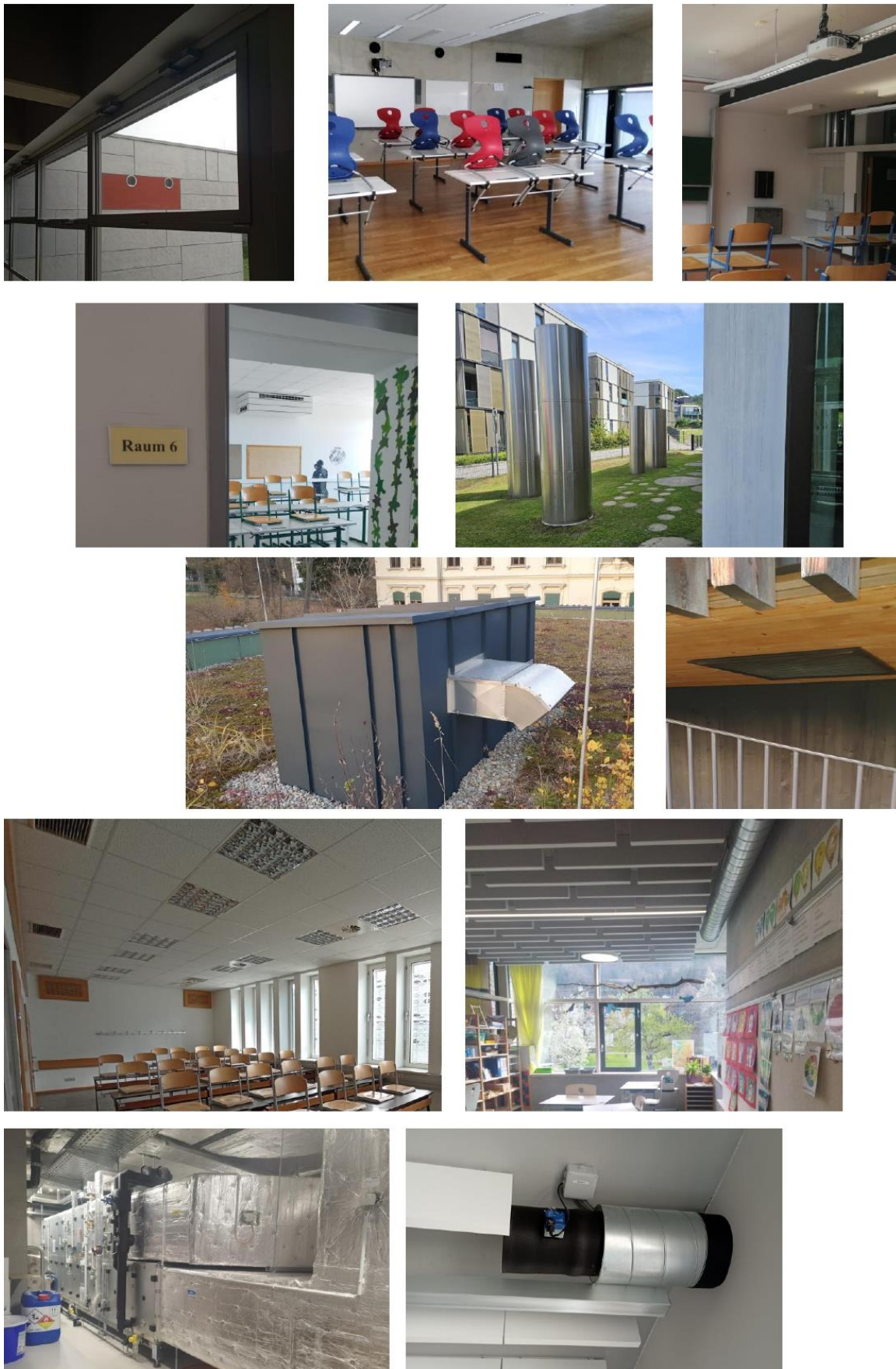
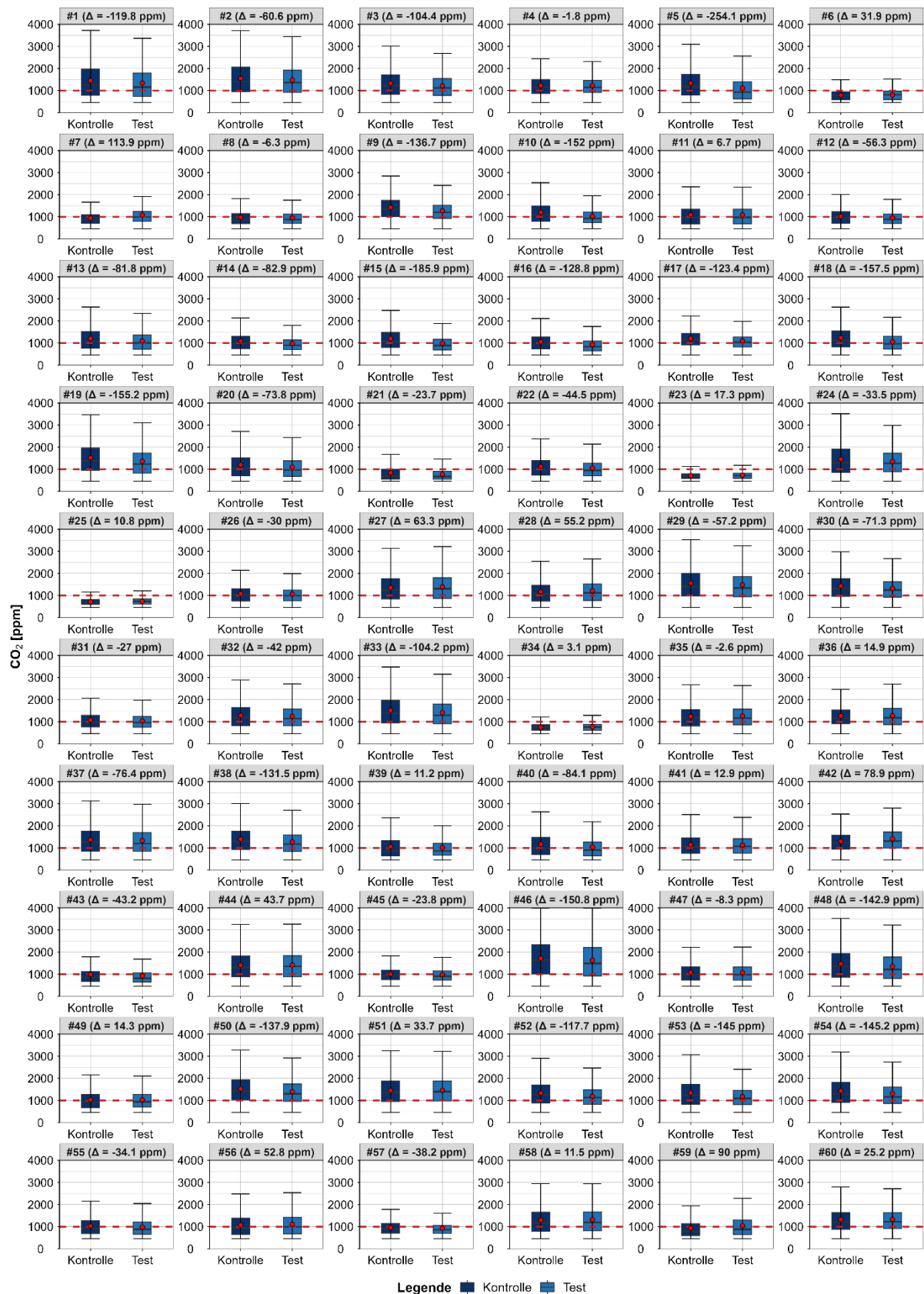


Abbildung A 31 Bilder von verschiedenen Lüftungsarten in Schulen

## C.1.2. Analyse der CO<sub>2</sub>-Konzentration in österreichischen Klassenzimmern

### C.1.2.1. CO<sub>2</sub> Konzentrationen in 120 Schulen



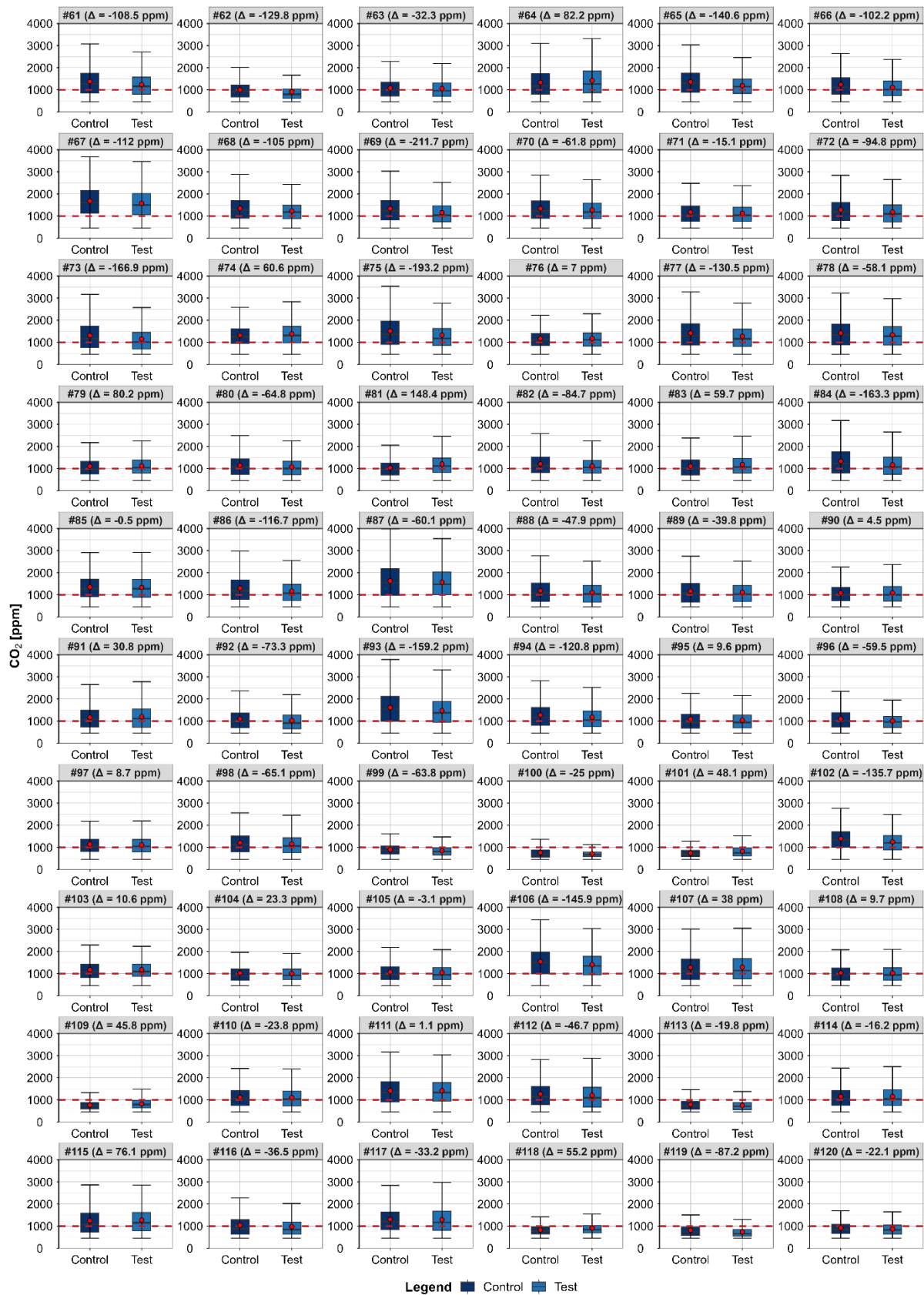


Abbildung A-32 Boxplots des jährlichen CO<sub>2</sub>-Interquartilsbereichs (IQR) in jeder der 120 Schulen



### C.1.2.2. Variation der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern nach Jahreszeit

Abbildung A-32 und Tabelle A-6 zeigen die Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, kategorisiert nach Jahreszeit. Die Ergebnisse zeigen, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen im Herbst und Winter erhöht sind, wobei 65 % bzw. 75 % der Messwerte den Grenzwert von 1000 ppm überschreiten.

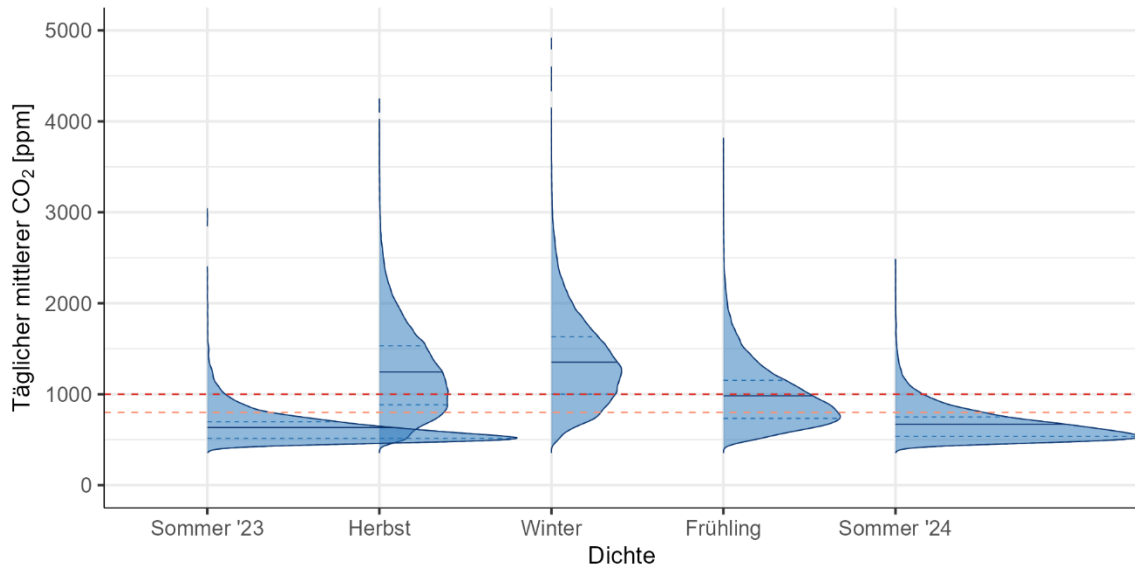


Abbildung A-33 Saisonale Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Der Plot zeigt die Verteilung der CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, gemessen mit Kontroll- und Testsensoren, nach Jahreszeit. Die rote und hellrote gestrichelte Linie markieren die CO<sub>2</sub>-Grenzwerte für Innenräume. Die blaue durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die hellblauen gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile anzeigen.

Tabelle A-6 Saisonale statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, einschließlich der Häufigkeit von Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Vergleich zu 1000 ppm und 800 ppm. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.

Jahreszeit	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
			25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Sommer '23	460	2947	516	586	698	182	634	4 %	12 %
Herbst	460	4184	884	1178	1532	648	1245	65 %	82 %
Winter	461	4856	1001	1294	1630	630	1353	75 %	89 %
Frühling	460	3759	734	910	1153	418	983	39 %	65 %
Sommer '24	460	2401	537	624	750	213	671	6 %	19 %

### C.1.2.3. CO<sub>2</sub>-Konzentration nach Sensortyp

Abbildung A-33 und Tabelle A-7 zeigen die Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, kategorisiert nach Monat. Der monatliche Trend ist deutlich erkennbar, mit höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in den kälteren Monaten. Zudem wird in diesen Monaten auch der Unterschied in der Leistung zwischen Kontroll- und Testsensoren besonders sichtbar.

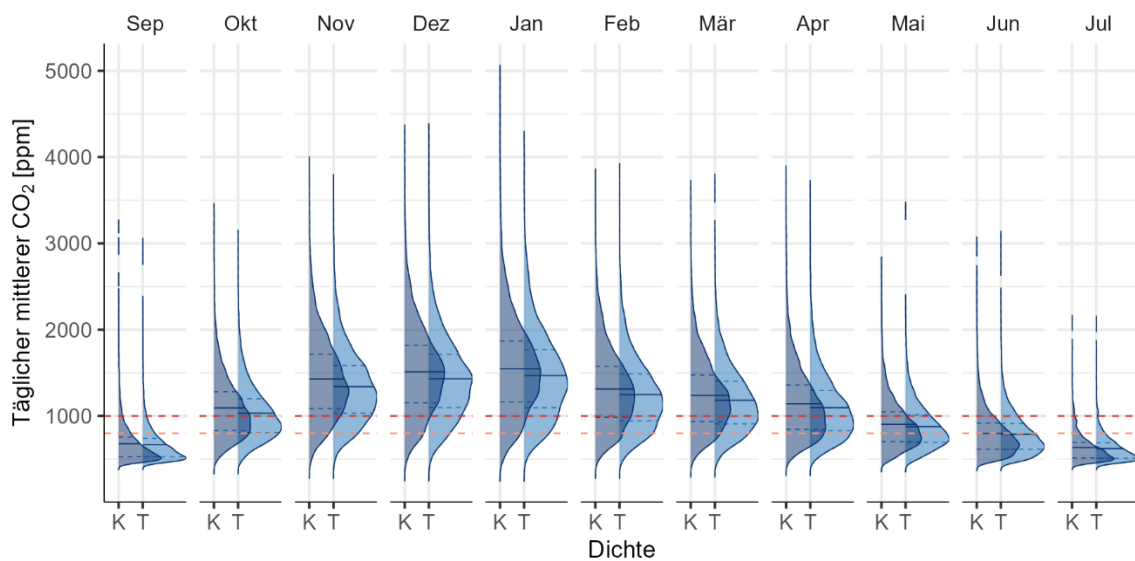


Abbildung A-34 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Raumtyp (K = Kontrolle, T = Test), einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte grüne Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Tabelle A-7 Monatliche statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Raumtyp (K = Kontrolle, T = Test). Die Tabelle enthält die Häufigkeit der Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Vergleich zu den 1000 ppm und 800 ppm Schwellenwerten. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.

Monat	SensorTyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Sep	K	460	3197	527	614	756	229	679	8 %	20 %
	T	460	2984	527	613	740	213	667	6 %	18 %
Okt	K	464	3326	833	1032	1281	448	1094	54 %	79 %
	T	462	3029	810	978	1200	390	1033	47 %	76 %
Nov	K	462	3833	1086	1374	1716	630	1428	82 %	93 %
	T	465	3625	1033	1289	1586	552	1340	78 %	92 %
Dez	K	460	4165	1153	1479	1820	667	1513	84 %	93 %
	T	462	4184	1098	1397	1715	617	1432	82 %	93 %
Jan	K	463	4856	1164	1504	1868	704	1547	84 %	93 %
	T	464	4084	1097	1420	1769	672	1469	81 %	93 %
Feb	K	461	3683	985	1267	1576	591	1313	74 %	88 %
	T	465	3748	944	1201	1487	542	1248	70 %	87 %
Mär	K	461	3569	936	1184	1476	540	1238	69 %	87 %
	T	463	3641	908	1133	1403	495	1182	65 %	85 %
Apr	K	462	3759	846	1074	1360	514	1142	58 %	80 %
	T	461	3589	829	1036	1296	467	1097	54 %	78 %
Mai	K	460	2740	704	854	1048	344	904	30 %	59 %
	T	460	3379	694	829	1013	319	877	26 %	55 %
Jun	K	460	2984	618	744	918	300	798	17 %	41 %
	T	460	3055	615	740	912	297	789	17 %	40 %
Jul	K	460	2084	514	589	694	180	634	4 %	13 %
	T	460	2069	511	582	689	178	623	3 %	10 %

#### C.1.2.4. CO<sub>2</sub>-Konzentration nach Lüftungssystemtyp

Der monatliche Verlauf und die statistischen Zusammenfassungen der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen (Abbildung A-34, Tabelle A-6) zeigen eine deutliche Unterscheidung zwischen mechanischer Lüftung (MV) und natürlicher Lüftung (NV). Mechanische Lüftungssysteme erreichen durchgehend bessere Werte als natürliche Lüftungssysteme während des gesamten Schuljahres.

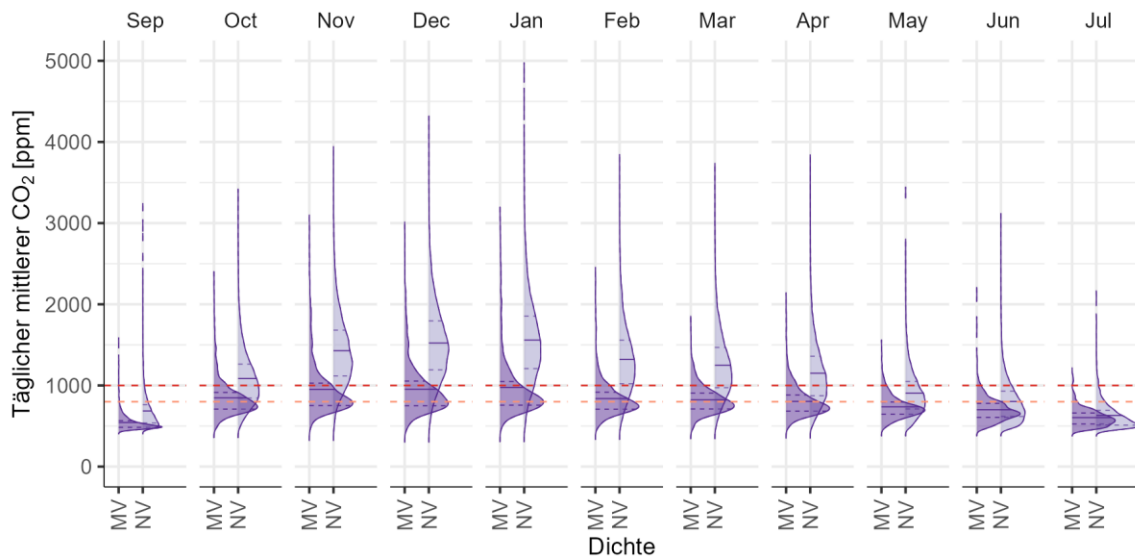


Abbildung A-35 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Lüftungssystemtyp, einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte rosa Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Tabelle A-8 Monatliche statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Lüftungssystemtyp. Die Tabelle enthält die Häufigkeit der Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Vergleich zu den 1000 ppm und 800 ppm Schwellenwerten. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.

Monat	SensorTyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>1000 ppm
Sep	MV	460	1526	484	510	565	82	543	1 %	2 %
	NV	460	3197	538	627	763	225	686	8 %	21 %
Okt	MV	464	2294	709	797	914	205	847	16 %	49 %
	NV	462	3326	844	1032	1263	419	1085	54 %	81 %
Nov	MV	471	2950	752	860	1028	276	952	29 %	64 %
	NV	462	3833	1118	1372	1681	564	1428	85 %	96 %
Dez	MV	460	2845	750	877	1054	304	954	31 %	65 %
	NV	461	4184	1193	1477	1796	604	1523	88 %	96 %
Jan	MV	478	3036	757	864	1049	292	976	30 %	64 %
	NV	463	4856	1208	1510	1853	645	1560	88 %	96 %
Feb	MV	463	2316	707	790	916	209	839	16 %	47 %
	NV	461	3748	1021	1272	1559	538	1321	77 %	91 %
Mär	MV	468	1725	710	793	907	196	823	13 %	48 %
	NV	461	3641	972	1199	1468	496	1248	72 %	90 %
Apr	MV	471	2028	683	761	883	200	804	13 %	40 %
	NV	461	3759	873	1091	1360	487	1150	60 %	83 %
Mai	MV	460	1470	646	711	796	150	736	5 %	24 %

	NV	460	3379	711	861	1050	339	906	30 %	60 %
Jun	MV	461	2121	607	677	779	172	701	3 %	20 %
	NV	460	3055	618	753	931	313	803	18 %	42 %
Jul	MV	460	1112	525	584	660	136	604	1 %	5 %
	NV	460	2084	512	587	694	182	631	4 %	12 %

#### C.1.2.5. CO<sub>2</sub> Konzentration nach Schultyp

Tabelle A-9 fasst die saisonalen CO<sub>2</sub>-Werte zusammen und quantifiziert die Überschreitungen der Schwellenwerte, wie im Hauptbericht beschrieben.

**Tabelle A-9 Saisonale Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konz. in Klassenzimmern, kategorisiert nach Schultyp. Die Tabelle enthält die Häufigkeit der Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Vergleich zu den 1000 ppm und 800 ppm Schwellenwerten. Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.**

Jahreszeit	Schulart	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]				Mittelw [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.	IQR		> 1000 ppm	>800 ppm
Sommer '23	ABHS	460	1953	515	589	707	191	640	4 %	14 %
	KMS	461	2947	512	589	717	206	648	5 %	14 %
	MS	461	1240	525	597	709	184	631	2 %	12 %
	SS	461	1056	508	562	650	142	615	2 %	13 %
	TGS	460	1620	523	594	689	166	635	4 %	12 %
	VS	460	2308	503	561	648	145	605	3 %	7 %
	WS	462	1951	542	615	736	193	665	6 %	17 %
Herbst	ABHS	460	4184	913	1230	1582	669	1282	68 %	84 %
	KMS	461	4165	917	1287	1677	760	1346	70 %	83 %
	MS	462	3831	952	1202	1520	568	1268	70 %	87 %
	SS	473	1711	635	755	890	255	786	14 %	41 %
	TGS	461	3684	908	1215	1574	666	1273	68 %	84 %
	VS	460	3907	807	1020	1307	501	1094	52 %	76 %
	WS	463	3378	981	1267	1592	611	1314	74 %	87 %
Winter	ABHS	461	4484	1065	1358	1689	625	1409	80 %	91 %
	KMS	462	4856	1094	1407	1767	673	1464	80 %	90 %
	MS	461	3954	1060	1312	1631	571	1384	80 %	94 %
	SS	492	1686	664	770	920	256	827	18 %	43 %
	TGS	465	3943	1044	1343	1679	636	1396	79 %	92 %
	VS	461	3532	875	1099	1384	509	1169	61 %	83 %
	WS	461	3688	1077	1364	1672	594	1409	82 %	94 %
Frühling	ABHS	460	3759	769	958	1200	431	1024	45 %	71 %
	KMS	460	3650	722	909	1193	471	1001	41 %	63 %
	MS	460	3569	794	953	1175	381	1019	44 %	74 %
	SS	463	1774	546	617	736	190	664	5 %	16 %
	TGS	461	3097	700	871	1112	412	942	35 %	60 %
	VS	460	3394	717	860	1066	349	935	31 %	60 %
	WS	461	3431	713	916	1176	462	988	40 %	64 %
Sommer '24	ABHS	460	2401	540	641	784	244	690	8 %	23 %
	KMS	460	2258	512	586	711	199	638	4 %	14 %
	MS	461	2084	584	686	820	235	724	9 %	29 %
	SS	464	1133	503	554	654	151	599	1 %	12 %
	TGS	460	1632	508	570	682	174	617	3 %	10 %
	VS	461	2191	572	640	747	174	687	6 %	18 %
	WS	460	1336	500	558	668	168	602	2 %	10 %
Jahr	ABHS	460	4484	819	1111	1475	656	1187	59 %	77 %
	KMS	460	4856	782	1133	1539	757	1216	59 %	73 %
	MS	460	3954	848	1097	1418	570	1173	59 %	80 %
	SS	461	1774	585	698	840	254	743	11 %	31 %
	TGS	460	3943	779	1070	1449	671	1155	56 %	73 %
	VS	460	3907	744	946	1231	487	1028	44 %	68 %
	WS	460	3688	811	1119	1478	667	1184	60 %	76 %

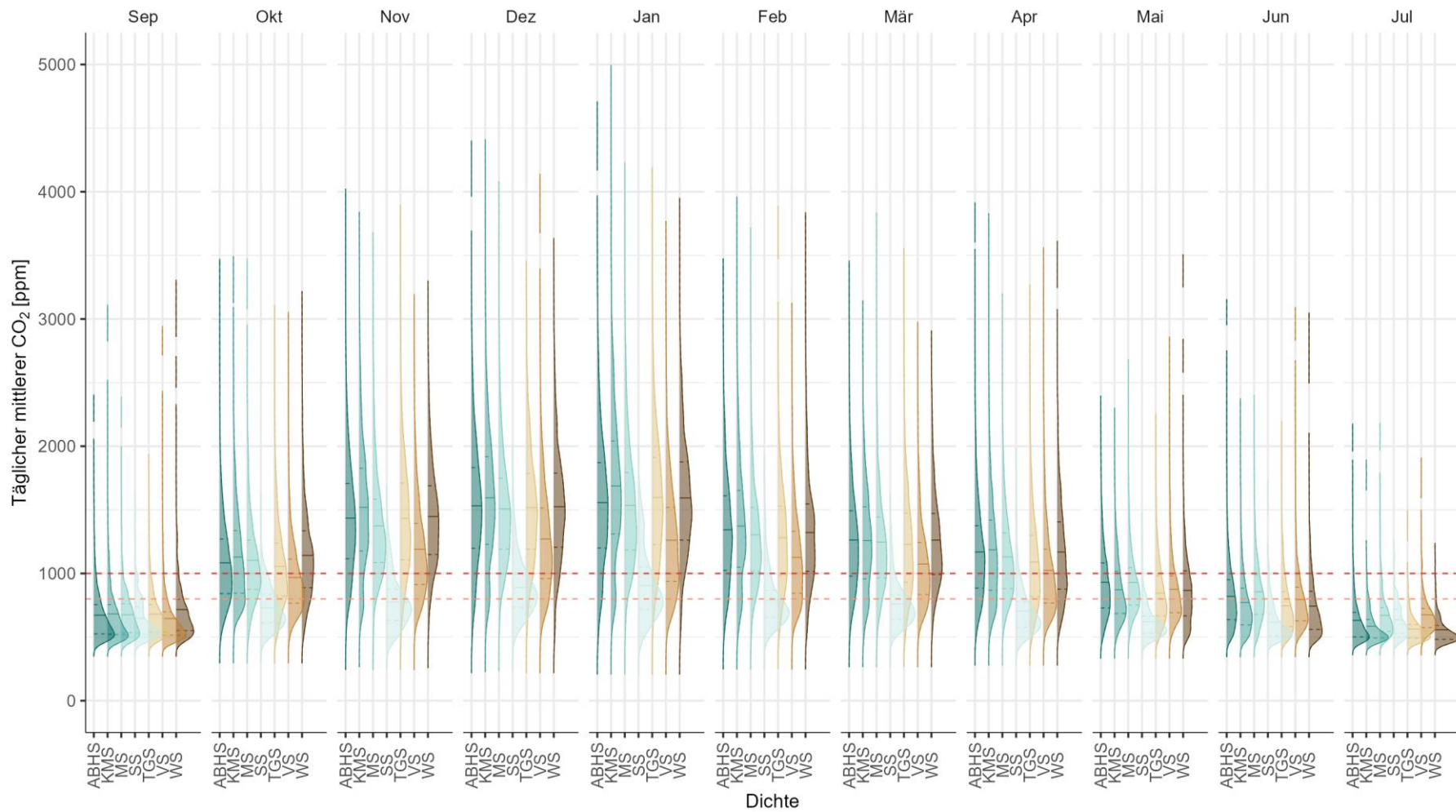


Abbildung A-36 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Schultyp, einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte pinkle Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Tabelle A-10 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Schultyp, einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte pinke Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Monat	Schultyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Sep	ABHS	460	2299	525	612	755	230	672	7 %	20 %
	KMS	461	2992	520	614	756	236	682	9 %	20 %
	MS	461	2268	536	632	762	226	676	6 %	20 %
	SS	461	1501	526	586	737	210	647	3 %	18 %
	TGS	460	1819	541	628	756	215	680	7 %	20 %
	VS	460	2831	515	583	699	184	645	6 %	14 %
	WS	462	3197	551	649	797	245	717	10 %	25 %
Okt	ABHS	462	3326	842	1032	1269	428	1083	54 %	80 %
	KMS	468	3311	845	1060	1337	491	1129	57 %	81 %
	MS	463	3308	874	1042	1263	388	1103	56 %	84 %
	SS	473	1432	612	690	835	224	730	6 %	31 %
	TGS	465	2944	822	1003	1238	416	1056	50 %	78 %
	VS	468	2898	766	909	1112	346	968	37 %	69 %
	WS	464	3044	888	1096	1336	448	1142	62 %	84 %
Nov	ABHS	462	3833	1116	1399	1707	591	1435	83 %	94 %
	KMS	514	3625	1176	1474	1827	651	1519	85 %	92 %
	MS	465	3446	1086	1300	1583	498	1374	84 %	97 %
	SS	487	1415	632	738	876	244	775	16 %	35 %
	TGS	466	3684	1108	1379	1711	603	1433	84 %	94 %
	VS	471	2991	913	1126	1393	480	1190	65 %	87 %
	WS	502	3076	1149	1408	1690	541	1448	89 %	96 %
Dez	ABHS	462	4184	1198	1504	1832	634	1532	86 %	94 %
	KMS	490	4165	1229	1564	1918	689	1595	86 %	94 %
	MS	488	3831	1190	1458	1748	559	1509	90 %	98 %
	SS	532	1711	735	842	996	261	890	25 %	63 %
	TGS	492	3202	1190	1483	1784	595	1518	88 %	96 %
	VS	460	3907	960	1208	1514	555	1271	71 %	88 %
	WS	461	3378	1206	1497	1788	581	1525	88 %	96 %
Jan	ABHS	464	4484	1200	1526	1871	671	1557	86 %	94 %
	KMS	478	4856	1310	1642	2041	730	1688	87 %	94 %
	MS	463	3954	1185	1466	1793	609	1534	89 %	97 %
	SS	492	1686	718	838	1052	334	906	28 %	57 %
	TGS	466	3943	1228	1552	1911	682	1598	89 %	97 %
	VS	491	3532	938	1205	1520	582	1261	68 %	88 %
	WS	480	3688	1263	1547	1876	614	1594	91 %	96 %
Feb	ABHS	461	3289	1024	1302	1611	586	1344	77 %	90 %
	KMS	468	3748	1049	1329	1652	603	1372	78 %	88 %
	MS	461	3509	1015	1245	1519	503	1304	77 %	93 %
	SS	504	1673	655	730	868	213	792	14 %	35 %
	TGS	465	3683	985	1241	1530	545	1280	73 %	90 %
	VS	463	2918	845	1066	1332	487	1127	58 %	80 %
	WS	464	3621	1016	1273	1546	530	1322	77 %	92 %
Mär	ABHS	462	3284	979	1221	1493	514	1263	73 %	90 %
	KMS	462	2948	957	1233	1523	567	1258	72 %	86 %
	MS	464	3641	965	1183	1443	478	1246	71 %	90 %
	SS	523	1385	640	722	830	190	760	9 %	31 %
	TGS	470	3364	931	1175	1474	543	1229	68 %	87 %
	VS	461	2782	834	1017	1243	409	1074	52 %	79 %
	WS	493	2702	991	1208	1472	480	1263	74 %	92 %

Continue on the next page

Monat	Schultyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Apr	ABHS	462	3759	885	1116	1376	490	1169	63 %	84 %
	KMS	462	3650	869	1122	1420	551	1186	62 %	82 %
	MS	461	3015	882	1072	1318	436	1130	60 %	86 %
	SS	474	1774	576	649	779	203	705	7 %	23 %
	TGS	462	3097	820	1031	1299	480	1090	54 %	77 %
	VS	472	3394	768	944	1190	422	1024	43 %	70 %
	WS	464	3431	877	1107	1405	528	1169	60 %	83 %
Mai	ABHS	460	2280	729	886	1083	354	931	35 %	63 %
	KMS	460	2178	686	813	1016	330	872	27 %	52 %
	MS	470	2554	752	880	1046	294	929	30 %	66 %
	SS	463	1332	529	580	664	135	621	2 %	11 %
	TGS	461	2132	666	795	983	317	845	23 %	50 %
	VS	460	2740	692	816	981	289	875	23 %	53 %
	WS	461	3379	666	831	1020	354	867	27 %	55 %
Jun	ABHS	460	3055	637	776	951	314	820	20 %	46 %
	KMS	460	2258	596	712	885	289	771	15 %	35 %
	MS	460	2289	678	810	989	311	856	24 %	52 %
	SS	464	1604	512	567	681	169	617	3 %	12 %
	TGS	460	2087	584	696	858	274	746	12 %	32 %
	VS	462	2984	628	739	892	264	794	15 %	38 %
	WS	460	2932	561	677	860	299	744	14 %	31 %
Jul	ABHS	460	2069	501	574	694	192	631	5 %	14 %
	KMS	460	1773	492	533	638	146	585	1 %	8 %
	MS	463	2084	545	625	732	187	670	5 %	17 %
	SS	465	1133	529	608	721	192	635	2 %	14 %
	TGS	460	1377	490	529	599	108	563	0 %	3 %
	VS	461	1797	575	637	725	150	675	4 %	14 %
	WS	460	1116	482	518	591	109	558	1 %	5 %

### C.1.2.6. CO<sub>2</sub> Konzentration nach städtischer oder ländlicher Lage

Die monatliche Verteilung und die statistischen Zusammenfassungen sind in Abbildung A-36 und Tabelle A-11 dargestellt. Die Tabelle enthält zudem die Prozentwerte der Schwellenwertüberschreitungen.

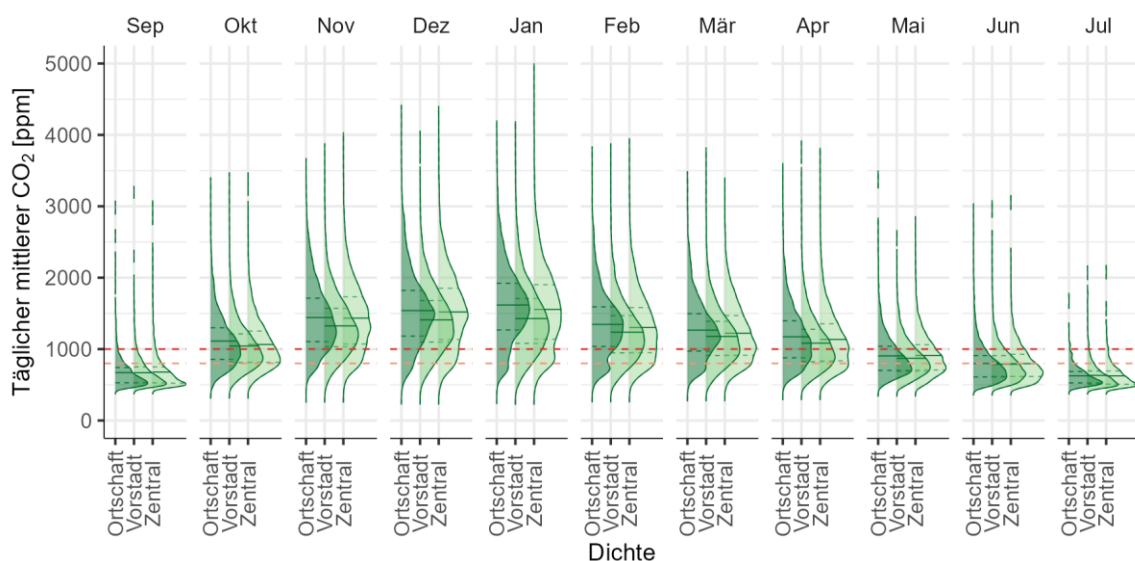


Abbildung A-37 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Gebietstyp (ländlich: Dorf, städtisch: Zentrum, Stadtrand), einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte pinke Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Tabelle A-11 Monatliche statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Gebietstyp. Die Tabelle enthält die Häufigkeit der Überschreitungen der CO<sub>2</sub>-Grenzwerte im Vergleich zu den 1000 ppm und 800 ppm Schwellenwerten. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.

Monat	Gebietstyp	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Sep	Ortschaft	461	2984	528	610	742	214	671	7	18
	Vorstadt	460	3197	529	615	751	221	669	6	19
	Zentral	460	2992	523	614	751	228	679	8	20
Okt	Ortschaft	462	3245	855	1050	1299	444	1112	57	81
	Vorstadt	464	3326	812	988	1213	400	1042	49	77
	Zentral	463	3311	815	1001	1253	437	1064	50	77
Nov	Ortschaft	469	3446	1105	1375	1713	608	1442	83	94
	Vorstadt	462	3684	1033	1278	1570	537	1325	78	92
	Zentral	478	3833	1072	1388	1732	660	1433	80	92
Dez	Ortschaft	463	4184	1183	1495	1821	638	1539	86	94
	Vorstadt	460	3831	1099	1372	1679	580	1408	83	93
	Zentral	464	4165	1133	1488	1852	719	1521	82	93
Jan	Ortschaft	516	3954	1269	1583	1923	654	1618	87	94
	Vorstadt	464	3954	1080	1376	1709	629	1428	81	93
	Zentral	463	4856	1138	1513	1902	765	1556	82	93
Feb	Ortschaft	461	3621	1038	1313	1591	554	1346	78	88
	Vorstadt	461	3683	947	1191	1468	521	1237	70	88
	Zentral	462	3748	950	1246	1582	632	1302	71	87
Mär	Ortschaft	461	3284	972	1218	1496	524	1266	73	87
	Vorstadt	462	3641	909	1132	1389	480	1177	64	86
	Zentral	468	3215	914	1155	1469	555	1221	66	86
Apr	Ortschaft	474	3431	878	1110	1398	520	1173	62	83
	Vorstadt	461	3759	823	1022	1278	454	1084	53	78
	Zentral	465	3650	835	1067	1354	519	1135	57	79
Mai	Ortschaft	460	3379	702	842	1040	338	904	29	58
	Vorstadt	460	2556	691	826	1003	313	871	25	55
	Zentral	460	2740	708	864	1061	353	910	31	59
Jun	Ortschaft	460	2932	610	737	908	299	798	17	39
	Vorstadt	460	2984	617	743	908	290	789	16	40
	Zentral	460	3055	617	746	928	311	797	18	41
Jul	Ortschaft	461	1676	526	591	686	160	626	2	11
	Vorstadt	460	2069	511	586	693	182	632	4	12
	Zentral	460	2084	507	585	693	185	626	4	12

#### C.1.2.7. CO<sub>2</sub> Konzentration nach Region

Die statistischen Werte und Schwellenwertüberschreitungen der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind saisonal in Tabelle A-12 und monatlich in Tabelle A-13 dargestellt. Die dazugehörige monatliche Verteilung ist in Abbildung A-37 zu sehen.

Tabelle A-12 Saisonale statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Region und Jahreszeit, einschließlich der Häufigkeit der CO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen im Vergleich zu den 1000 ppm und 800 ppm Schwellenwerten. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.



Jahreszeit	Bundesland	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw [ppm]	Grenzwertüberschreitungen	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Sommer '23	BUR	461	1483	486	541	624	138	578	1 %	5 %
	KÄR	463	1862	561	638	761	200	693	7 %	21 %
	NIE	460	2947	515	583	696	181	631	4 %	11 %
	OBE	461	1317	527	599	702	175	640	4 %	13 %
	SAL	461	1504	506	564	691	184	629	4 %	14 %
	STE	461	2308	506	579	692	186	632	4 %	12 %
	TIR	461	1734	506	567	685	179	619	3 %	10 %
	VOR	460	1310	499	554	656	157	611	3 %	12 %
WIE	460	1953	520	592	702	182	638	4 %	13 %	
Herbst	BUR	461	3326	728	931	1276	548	1052	44 %	63 %
	KÄR	464	3303	1028	1334	1697	670	1385	77 %	89 %
	NIE	462	4184	887	1221	1596	709	1292	66 %	83 %
	OBE	460	3831	986	1266	1584	597	1313	74 %	87 %
	SAL	460	2680	778	990	1279	500	1057	49 %	72 %
	STE	461	3907	906	1188	1562	656	1270	66 %	84 %
	TIR	462	3400	911	1188	1499	587	1236	67 %	85 %
	VOR	464	2950	785	1093	1496	711	1168	57 %	74 %
WIE	460	3833	854	1111	1434	580	1186	61 %	80 %	
Winter	BUR	463	3667	725	934	1371	646	1098	46 %	61 %
	KÄR	462	3505	1164	1417	1712	548	1467	88 %	97 %
	NIE	461	4543	1025	1358	1709	684	1412	77 %	89 %
	OBE	464	3954	1157	1408	1714	557	1467	88 %	96 %
	SAL	463	2757	831	1065	1365	534	1123	57 %	78 %
	STE	461	3954	1022	1315	1668	645	1382	77 %	92 %
	TIR	462	3683	1002	1251	1580	578	1321	75 %	91 %
	VOR	468	3943	916	1239	1616	700	1306	69 %	84 %
WIE	461	4856	923	1176	1506	583	1259	67 %	87 %	
Frühling	BUR	460	2754	663	766	992	329	865	24 %	44 %
	KÄR	460	3259	859	1050	1307	448	1122	57 %	82 %
	NIE	462	3431	728	902	1181	453	995	40 %	64 %
	OBE	460	3569	756	945	1181	425	1006	43 %	69 %
	SAL	460	3055	690	831	1040	350	892	29 %	55 %
	STE	460	3394	758	929	1169	410	997	41 %	69 %
	TIR	461	3759	764	941	1176	412	1014	43 %	70 %
	VOR	468	2334	705	854	1046	342	905	30 %	58 %
WIE	461	3650	708	876	1104	396	944	35 %	61 %	
Sommer '24	BUR	462	1305	537	604	685	148	637	4 %	11 %
	KÄR	463	2069	592	710	859	267	762	13 %	34 %
	NIE	460	2401	517	584	697	181	639	4 %	13 %
	OBE	460	1533	523	605	719	196	641	3 %	14 %
	SAL	460	2084	555	654	799	244	694	7 %	25 %
	STE	460	2191	549	634	766	217	687	8 %	20 %
	TIR	460	1913	561	662	812	251	712	8 %	27 %
	VOR	464	1377	552	631	741	189	662	3 %	16 %
WIE	460	1864	523	593	700	176	638	3 %	14 %	
Jahr	BUR	460	3667	685	825	1171	486	975	36 %	53 %
	KÄR	460	3505	903	1200	1562	658	1264	67 %	83 %
	NIE	460	4543	790	1096	1496	706	1191	57 %	74 %
	OBE	460	3954	834	1144	1485	650	1200	62 %	78 %
	SAL	460	3055	714	913	1193	479	988	41 %	64 %
	STE	460	3954	805	1066	1435	631	1161	56 %	75 %
	TIR	460	3759	812	1063	1389	577	1139	56 %	76 %
	VOR	460	3943	728	957	1330	603	1072	46 %	66 %
WIE	460	4856	769	1006	1327	558	1096	51 %	72 %	

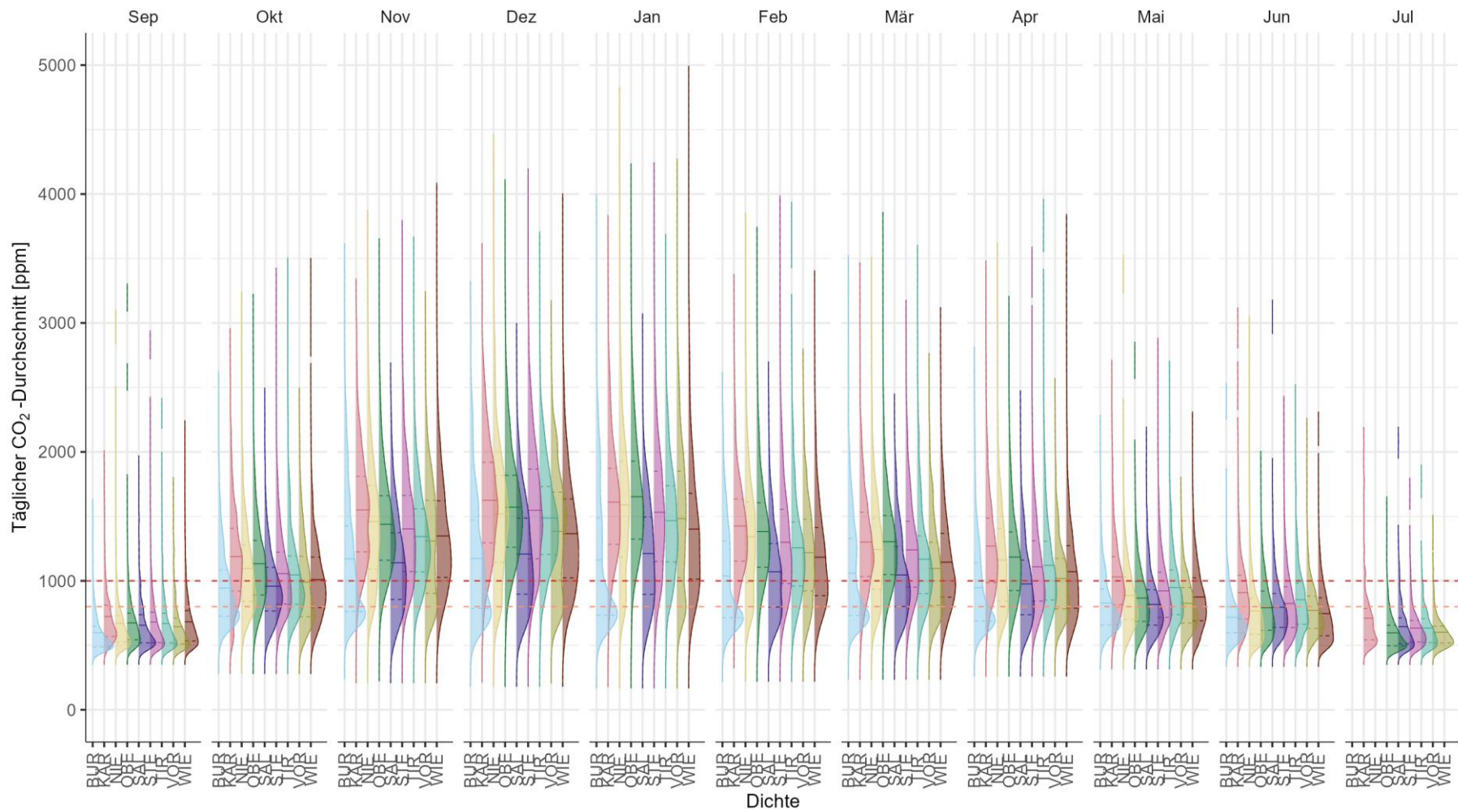


Abbildung A-38 Monatliche Verteilung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentration in Klassenzimmern, kategorisiert nach Region, einschließlich des CO<sub>2</sub>-Grenzwerts für Innenräume (1000 ppm, gestrichelte rote Linie) und des Zielwerts (800 ppm, gestrichelte pinke Linie). Die durchgezogene Linie innerhalb jeder Verteilung stellt den Mittelwert dar, während die gestrichelten Linien die 25. und 75. Perzentile markieren.

Tabelle A-13 Monatliche statistische Zusammenfassung der täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen in Klassenzimmern, kategorisiert nach Region und Jahreszeit, einschließlich der Häufigkeit der CO<sub>2</sub>-Grenzwertüberschreitungen im Vergleich zu den 1000 ppm und 800 ppm Schwellenwerten. Die Häufigkeiten in den letzten beiden Spalten beziehen sich auf die täglichen Mittelwert-Überschreitungen.

Monat	Bundes-land	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
				25.	50.	75.			>1000 ppm	>800 ppm
Sep	BUR	461	1512	487	545	648	161	597	3 %	10 %
	KÄR	463	1886	570	660	811	241	723	9 %	27 %
	NIE	460	2992	524	607	732	208	670	7 %	17 %
	OBE	460	3197	543	629	749	206	674	6 %	19 %
	SAL	461	1850	518	588	737	219	655	6 %	18 %
	STE	461	2831	521	608	757	236	681	8 %	21 %
	TIR	461	2299	518	599	749	230	669	8 %	19 %
	VOR	460	1680	510	586	711	201	644	5 %	15 %
	WIE	460	2132	534	625	769	235	683	8 %	21 %
Okt	BUR	468	2420	726	868	1084	358	944	35 %	59 %
	KÄR	475	2755	921	1149	1408	488	1188	67 %	87 %
	NIE	462	3061	840	1032	1280	440	1095	54 %	80 %
	OBE	464	3044	890	1082	1314	423	1133	61 %	85 %
	SAL	479	2299	766	912	1104	337	959	37 %	70 %
	STE	463	3245	820	997	1222	402	1056	50 %	78 %
	TIR	468	3326	818	970	1193	375	1046	46 %	77 %
	VOR	470	2294	722	922	1191	469	989	43 %	65 %
	WIE	464	3311	792	962	1183	392	1009	45 %	74 %
Nov	BUR	537	3326	763	1043	1426	663	1170	54 %	70 %
	KÄR	484	3056	1225	1513	1811	586	1550	93 %	99 %
	NIE	469	3625	1091	1413	1741	650	1459	81 %	93 %
	OBE	502	3404	1160	1381	1660	501	1438	89 %	98 %
	SAL	487	2385	856	1089	1374	517	1140	60 %	80 %
	STE	479	3541	1073	1346	1663	590	1402	81 %	95 %
	TIR	478	3397	1070	1288	1559	489	1343	82 %	96 %
	VOR	471	2950	904	1295	1624	721	1309	70 %	85 %
	WIE	462	3833	1027	1278	1620	593	1349	77 %	92 %
Dez	BUR	490	2996	786	1068	1472	686	1174	55 %	72 %
	KÄR	546	3303	1295	1595	1919	624	1625	93 %	98 %
	NIE	463	4184	1144	1485	1819	676	1520	83 %	93 %
	OBE	466	3831	1261	1523	1819	558	1571	93 %	98 %
	SAL	460	2680	897	1156	1487	590	1208	65 %	83 %
	STE	487	3907	1170	1496	1867	696	1548	86 %	96 %
	TIR	464	3400	1204	1449	1732	527	1487	90 %	98 %
	VOR	554	2845	1005	1408	1688	682	1384	75 %	88 %
	WIE	461	3721	1023	1305	1635	611	1366	77 %	92 %
Jan	BUR	510	3667	733	924	1487	754	1163	46 %	63 %
	KÄR	527	3505	1283	1571	1872	589	1610	93 %	98 %
	NIE	466	4543	1182	1555	1929	747	1589	83 %	93 %
	OBE	480	3954	1323	1589	1928	605	1653	95 %	99 %
	SAL	472	2757	895	1181	1494	600	1212	65 %	83 %
	STE	463	3954	1151	1488	1850	699	1532	85 %	95 %
	TIR	464	3375	1147	1417	1737	590	1467	86 %	97 %
	VOR	492	3943	1025	1459	1851	826	1483	76 %	88 %
	WIE	469	4856	1013	1318	1679	666	1401	76 %	92 %

Continue in next page

Monat	Bundes- land	Min [ppm]	Max [ppm]	Perzentile [ppm]			IQR [ppm]	Mittelw. [ppm]	Grenzwertüberschreitung	
Feb	BUR	463	2338	715	929	1309	594	1038	45 %	58 %
	KÄR	597	3104	1152	1373	1635	482	1425	90 %	98 %
	NIE	461	3621	987	1305	1614	627	1343	74 %	88 %
	OBE	464	3509	1105	1336	1606	501	1382	84 %	95 %
	SAL	463	2422	797	1033	1288	491	1070	53 %	75 %
	STE	462	3748	980	1225	1555	575	1298	72 %	90 %
	TIR	474	3683	960	1190	1457	497	1256	72 %	89 %
	VOR	481	2523	922	1182	1478	556	1218	67 %	84 %
WIE	461	3168	885	1112	1413	528	1183	62 %	84 %	
Mär	BUR	471	3266	732	941	1329	597	1060	47 %	62 %
	KÄR	462	3215	1033	1248	1533	500	1301	77 %	92 %
	NIE	471	3284	936	1201	1484	548	1243	70 %	86 %
	OBE	468	3641	1049	1255	1507	458	1304	80 %	95 %
	SAL	474	2204	801	986	1266	465	1046	48 %	75 %
	STE	461	2948	951	1183	1461	511	1240	69 %	89 %
	TIR	462	3364	901	1094	1349	448	1168	63 %	85 %
	VOR	468	2509	810	1031	1298	488	1096	54 %	77 %
WIE	470	2896	873	1068	1368	494	1145	59 %	83 %	
Apr	BUR	489	2595	689	826	1139	451	948	35 %	53 %
	KÄR	462	3259	986	1202	1486	500	1270	74 %	93 %
	NIE	462	3431	842	1102	1405	563	1162	59 %	79 %
	OBE	464	3015	925	1134	1379	454	1184	66 %	88 %
	SAL	471	2256	737	921	1161	423	976	41 %	66 %
	STE	469	3394	844	1039	1310	466	1109	54 %	81 %
	TIR	478	3759	851	1038	1306	455	1121	56 %	81 %
	VOR	472	2334	783	971	1174	392	1018	46 %	73 %
WIE	461	3650	788	998	1273	485	1071	50 %	73 %	
Mai	BUR	460	2123	656	755	937	281	828	20 %	42 %
	KÄR	460	2556	815	975	1188	372	1031	46 %	77 %
	NIE	462	3379	701	836	1031	330	887	28 %	57 %
	OBE	460	2712	686	826	996	310	866	25 %	55 %
	SAL	460	2033	656	772	931	275	817	18 %	44 %
	STE	462	2740	717	864	1067	350	922	32 %	61 %
	TIR	461	2554	738	884	1084	347	948	35 %	64 %
	VOR	468	1640	673	787	947	275	825	19 %	48 %
WIE	461	2172	690	833	1023	333	875	27 %	56 %	
Jun	BUR	462	2394	596	674	798	202	718	8 %	24 %
	KÄR	467	2984	705	851	1043	339	909	30 %	59 %
	NIE	460	2932	585	710	863	278	766	14 %	33 %
	OBE	460	1883	617	746	921	304	791	17 %	42 %
	SAL	464	3055	639	753	902	263	796	15 %	40 %
	STE	460	2314	638	772	953	315	824	20 %	45 %
	TIR	461	2394	662	801	984	321	854	23 %	50 %
	VOR	465	2121	631	732	882	251	771	12 %	36 %
WIE	460	2185	574	699	869	295	746	13 %	34 %	
Jul	BUR	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KÄR	463	2069	543	651	785	242	711	10 %	21 %
	NIE	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	OBE	460	1533	496	559	655	159	596	1 %	8 %
	SAL	460	2084	512	590	713	200	644	6 %	16 %
	STE	460	1676	526	592	693	167	633	4 %	12 %
	TIR	460	1773	521	597	708	187	634	3 %	12 %
	VOR	464	1377	518	568	648	131	602	1 %	7 %
WIE	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

### C.1.3. Außenluftschadstoffe

Tabelle A-14 Analyse der Ozon-Spitzenwerte (6-monatiger gleitender Mittelwert nach Monat)

Monat	Min [µg/m³]	Max [µg/m³]	Perzentile [µg/m³]			IQR [µg/m³]	Mittelw. [µg/m³]	Prozentsatz der UBA-Stationen über dem WHO-Grenzwert für O <sub>3</sub> - Spitzenbelastung von 60 µg/m³
			25.	50.	75.			
Sep	85.1	103.2	92.9	96.4	99.5	6.6	95.7	100.0%
Okt	77.1	99.2	88.6	92.3	96.6	8.0	91.9	100.0%
Nov	68.0	93.6	81.4	86.3	90.8	9.4	85.3	100.0%
Dec	52.2	86.6	69.5	75.5	80.9	11.5	74.1	90.7%
Jan	43.6	83.0	61.6	66.5	73.1	11.5	66.6	81.4%
Feb	39.3	77.8	55.6	60.9	67.2	11.6	61.0	55.8%
Mar	37.8	74.1	52.2	57.4	63.5	11.3	58.4	46.5%
Apr	46.2	80.0	58.6	62.3	67.8	9.3	63.3	67.4%
Mai	56.2	90.0	67.4	71.3	75.2	7.8	71.2	95.2%
Jun	68.4	91.4	76.7	79.4	83.5	6.8	80.0	100.0%
Jul	77.3	94.9	84.0	87.5	91.7	7.7	87.6	100.0%

### C.1.4. Analyse der gepaarten Stichprobe (C vs T)

Um zu bestimmen, ob die *CTD*- und *CTO* -Werte einem parametrischen gepaarten t-Test unterzogen werden können, muss zunächst die Normalverteilung der Daten überprüft werden. Zu diesem Zweck wird der Shapiro-Wilk-Test auf die *CTD*- und *CTO* auf monatlicher, saisonaler und jährlicher Ebene angewendet. Der Shapiro-Wilk-Test vergleicht die Studiendaten mit einer perfekt normalverteilten Stichprobe und liefert als Testergebnis den p-Wert. Ein p-Wert kleiner als 0,001 weist darauf hin, dass die Daten nicht normalverteilt sind. Wie in Tabelle A-15 dargestellt, gibt es genügend statistische Evidenz, dass die *CTD*- und *CTO* -Werte, die aus den täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen abgeleitet wurden, von der Normalverteilung abweichen. Dieselbe Schlussfolgerung gilt für die *CTD*- und *CTO* -Werte, die aus den stündlichen mittleren CO<sub>2</sub>-Werten berechnet wurden, da alle Shapiro-Wilk-Test p-Werte kleiner als 0,001 sind. Tabelle A-15 Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests zur Prüfung der *CTD*- und *CTO*-Werte, basierend auf den täglichen mittleren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen.

Tabelle A-15 Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests

Zeitraum	p-Wert	
	<i>CTD</i> Metrik	<i>CTO</i> Metrik
Sep	< 0.001	< 0.001
Okt	< 0.001	< 0.001
Nov	< 0.001	< 0.001
Dez	< 0.001	< 0.001
Jan	< 0.001	< 0.001
Feb	< 0.001	< 0.001
Mär	< 0.001	< 0.001
Apr	< 0.001	< 0.001
Mai	< 0.001	< 0.001
Jun	< 0.001	< 0.001
Jul	< 0.001	< 0.001
Sommer '23	< 0.001	< 0.001
Herbst	< 0.001	< 0.001
Winter	< 0.001	< 0.001
Frühling	< 0.001	< 0.001
Sommer '24	< 0.001	< 0.001

---

Jahr	< 0.001	< 0.001
------	---------	---------

---

## C.2. Umfrageergebnisse

### C.2.1. Ergebnisse der Umfrage unter Schuldirektor:innen

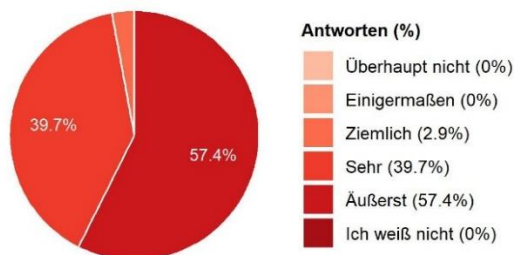
#### C.2.1.1. Ergebnisse der ersten Umfrage

**[Q01] Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten?**

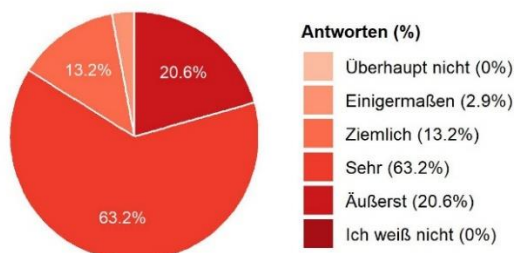


Abbildung A-39 Q1 Ergebnisse der Frage 1 in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

**[Q02 - A] Wie wichtig erachten Sie die Belüftung im Klassenzimmer?**



**[Q02 - B] Inwieweit glauben Sie, dass die Innenraumluftqualität die schulische Leistung der Schüler beeinflusst?**



**[Q02 - C] Wie wichtig erachten Sie die Innenraumluftqualität in Bezug auf Gesundheit und die Übertragung luftgetragener?**

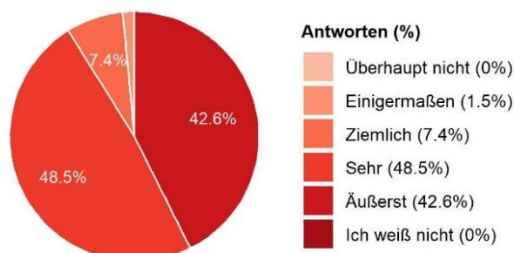
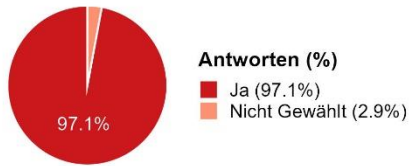


Abbildung A-40 Ergebnisse der Fragen 2, 2A, 2B, 2C aus der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

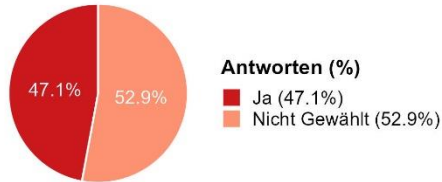
**[Q03 - A] Aufrechterhaltung von frischer Luft mit einem guten Sauerstoffgehalt**



**[Q03 - B] Entfernung von Kohlendioxid und verbrauchter Luft**



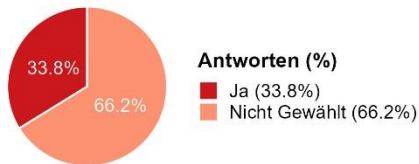
**[Q03 - C] Kontrolle von Feuchtigkeit und Kondensation**



**[Q03 - D] Verringerung des Risikos von Überhitzung und übermäßig hohen Temperaturen**



**[Q03 - E] Reduzierung und Verteilung von Verunreinigungen wie Rauch, Staub und Gasen**



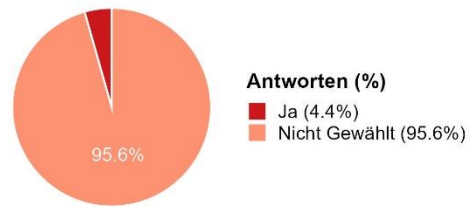
**[Q03 - F] Reduzierung und Entfernung von luftübertragenen Bakterien und Viren**



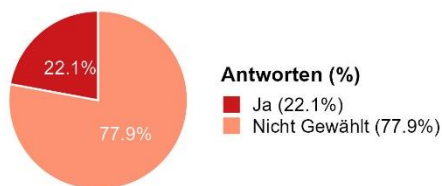
**[Q03 - G] Entfernung von Körpergerüchen und/oder Bereitstellung von Frische**



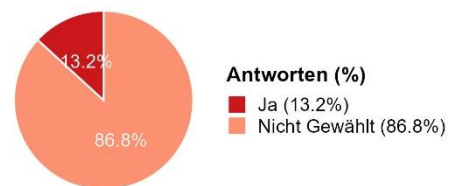
**[Q03 - H] Verbesserte Verdauung**



**[Q03 - I] Steigerung der Nachhaltigkeit unseres Gebäudes**



**[Q03 - J] Veränderungen der Melatoninwerte ...**



**[Q03 - K] Entfernung von giftigen Chemikalien und Ausgasungen aus Materialien**

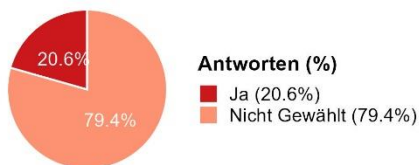
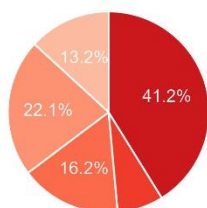


Abbildung A-41 Ergebnisse der Frage 3 in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.



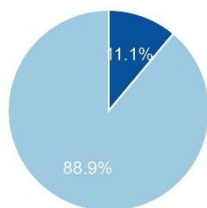
**[Q04] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten?**



**Antworten (%)**

- Gelegentlich lüften (mindestens einmal täglich, aber nicht jede Stunde) (13.2%)
- Jede Stunde lüften (vor/nach dem Unterricht) (22.1%)
- Kontinuierlich lüften (entweder durch mechanische oder natürliche Lüftung) (16.2%)
- Sonstiges (7.4%)
- Unregelmäßig während jeder Unterrichtsstunde lüften (d.h. Stoßlüftung: wenige Minuten während jeder Stunde) (41.2%)

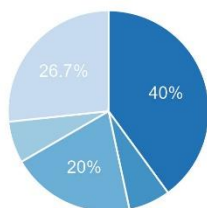
**[Q04 - A] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten, d.h. 'Gelegentlich (mindestens einmal täglich, aber nicht jede Stunde)'?**



**Antworten (%)**

- Je nach Bedarf (88.9%)
- Sonstiges (11.1%)

**[Q04 - B] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten, d.h. 'Jede Stunde (vor/nach dem Unterricht)'?**



**Antworten (%)**

- Am Anfang jeder Unterrichtsstunde (26.7%)
- Am Ende jeder Unterrichtsstunde (6.7%)
- Ich verwende einen CO2-Sensor oder eine Messung des Luftqualitätsindex, um mir mitzuteilen, wann ich lüften soll. (20%)
- Sonstiges (6.7%)
- Sowohl am Anfang als auch am Ende jeder Unterrichtsstunde (40%)

Abbildung A-42 Ergebnisse der Fragen 4, 4A und 4B in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.



Abbildung A-43 Ergebnisse der Frage 5 in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

**[Q06] CO2 wird oft als Indikator für gute Luftqualität verwendet. Was denken Sie, sollte der maximale CO2-Wert sein, wenn Sie eine gesunde Arbeitsumgebung in einem Klassenzimmer sicherstellen möchten?**

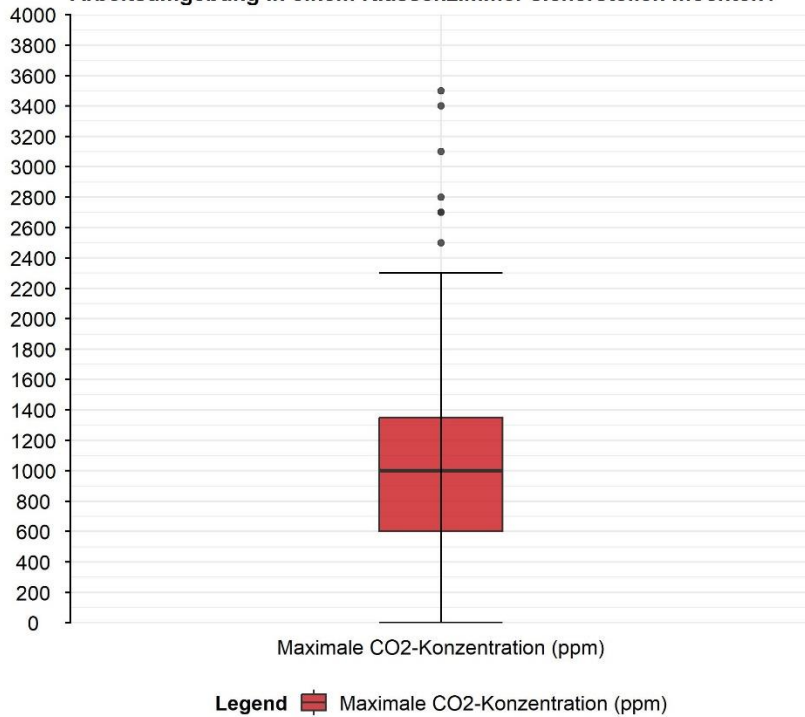
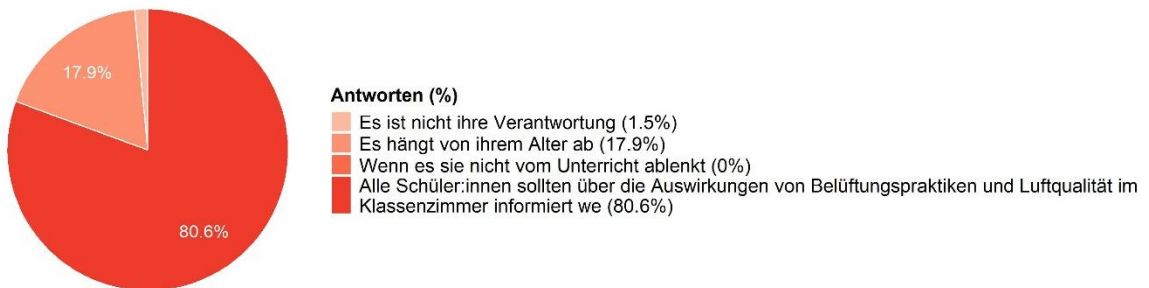


Abbildung A-44 Ergebnisse der Frage 6 in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

**[Q08] Glauben Sie, dass Schüler:innen über die Auswirkungen von Belüftungspraktiken und Luftqualität im Klassenzimmer informiert werden sollten?**



**[Q08 - A] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Es hängt von ihrem Alter ab')**

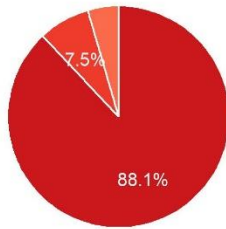


Abbildung A-45 Ergebnisse der Fragen 8 und 8A in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.



Abbildung A-46 Zusammenfassung der Antworten auf Frage 7 in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

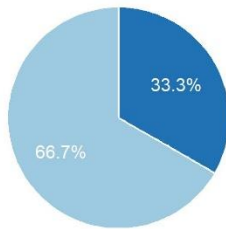
**[Q09] Glauben Sie, dass Schüler:innen eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Belüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten?**



**Antworten (%)**

- Nein (4.5%)
- Vielleicht (7.5%)
- Ja (88.1%)

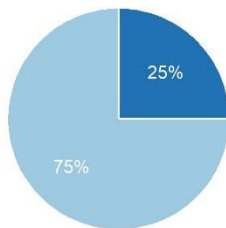
**[Q09 - A] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Nein')**



**Antworten (%)**

- Es ist die Verantwortung der Schule (66.7%)
- Es ist die Verantwortung der Lehrkörper (33.3%)

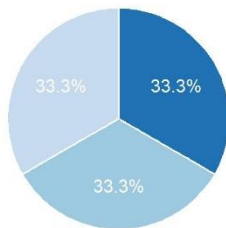
**[Q09 - B] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Vielleicht')**



**Antworten (%)**

- Es hängt von ihrem Alter ab (75%)
- Wenn es sie nicht vom Unterricht ablenkt (25%)

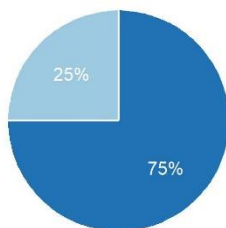
**[Q09 - B - 1] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Vielleicht, es hängt von ihrem Alter ab')?**



**Antworten (%)**

- 5 Jahre alt und älter (d. h.  $\geq 5$ ) (33.3%)
- 8 Jahre alt und älter (d. h.  $\geq 8$ ) (33.3%)
- 10 Jahre alt und älter (d. h.  $\geq 10$ ) (0%)
- 12 Jahre alt und älter (d. h.  $\geq 12$ ) (0%)
- 15 Jahre alt und älter (d. h.  $\geq 15$ ) (33.3%)

**[Q09 - C] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Ja')**

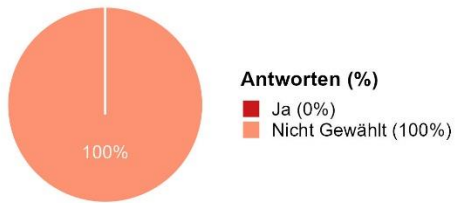


**Antworten (%)**

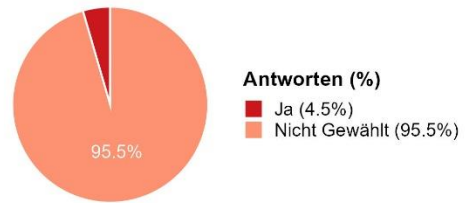
- Sonstiges (25%)
- Wir sollten eine/n Schüler:in benennen, der/die dafür verantwortlich ist, die CO2-Konzentration zu überwachen und das KI (75%)

Abbildung A-47 Ergebnisse der Fragen 9, 9A, 9B und 9C in der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

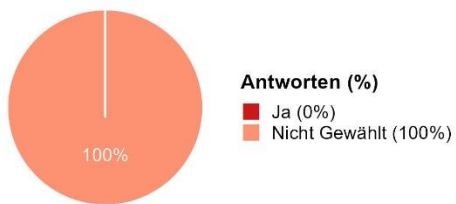
**[Q10 - A] Nein, weil ich kein Interesse an Luftqualität habe**



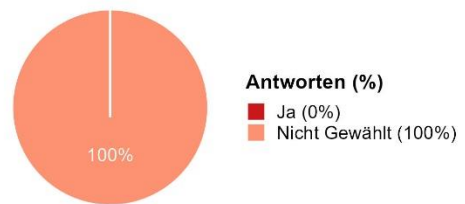
**[Q10 - B] Nein, weil mein Raum mechanisch belüftet ist, und ich keine Kontrolle darüber habe**



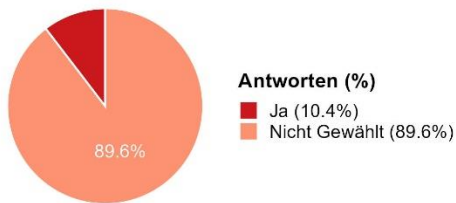
**[Q10 - C] Nein, weil ich die Fenster in meinem Klassenzimmer nicht einfach öffnen kann**



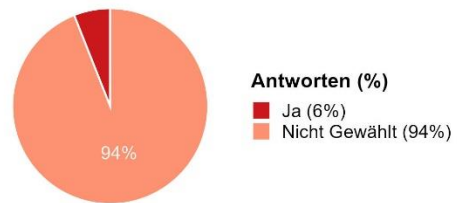
**[Q10 - D] Nein, weil meine Schule mich davon abhält, die Fenster zu öffnen**



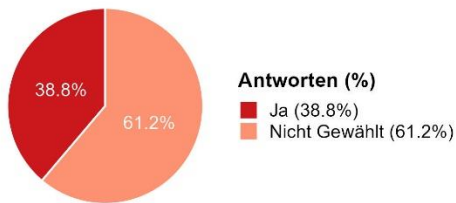
**[Q10 - E] Vielleicht, es hängt davon ab, wie kompliziert das ist**



**[Q10 - F] Vielleicht, wenn es mich nicht vom Unterrichten ablenkt**



**[Q10 - G] Ja, wenn ein/e Schüler:in benannt wird, der/die dafür verantwortlich ist, die CO2-Konzentration zu überwachen und das Klassenzimmer zu lüften**



**[Q10 - H] Ja, es wäre sehr hilfreich**

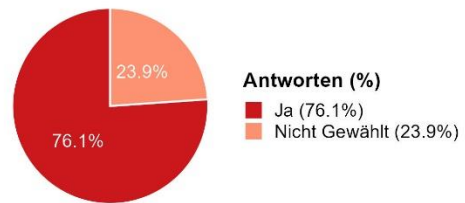
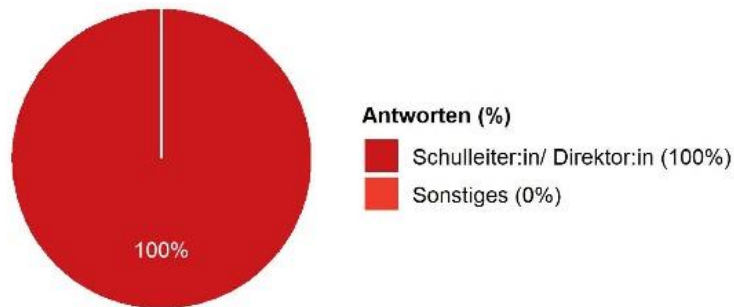


Abbildung A-48 Erkenntnisse aus Frage 10 der ersten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

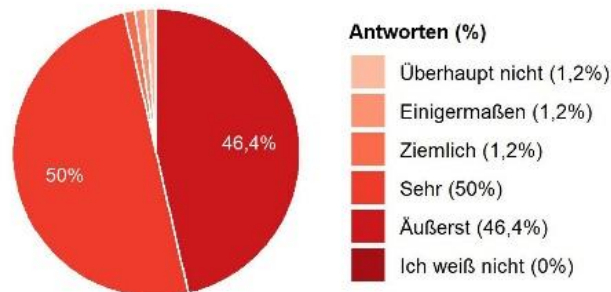
### C.2.1.2. Ergebnisse der zweiten Umfrage

Die vollständigen Ergebnisse der Umfrage sind in Abbildung A-48 bis Abbildung A-54 dargestellt.

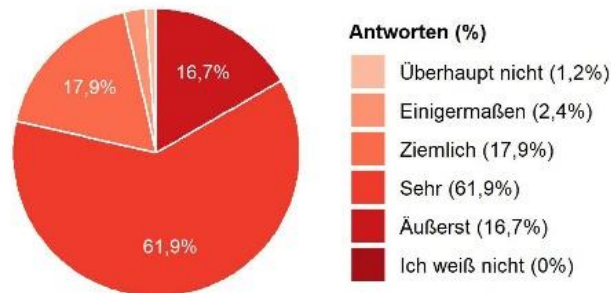
#### [Q01] Welche Option beschreibt Ihre Rolle an der Schule am besten?



#### [Q02 - A] Wie wichtig erachten Sie die Belüftung im Klassenzimmer?



#### [Q02 - B] Inwieweit glauben Sie, dass die Innenraumluftqualität die schulische Leistung der Schüler beeinflusst?

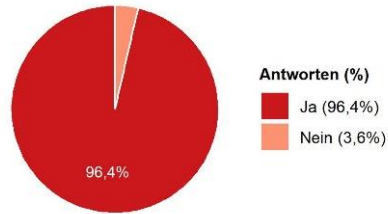


#### [Q02 - C] Wie wichtig erachten Sie die Innenraumluftqualität in Bezug auf Gesundheit und die Übertragung luftgetragener Krankheiten (z. B. Influenza, Masern, SARS-CoV-2, COVID-19 usw.)?

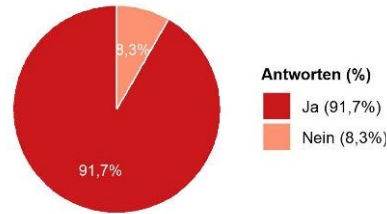


Abbildung A-49 Zusammenfassung der Antworten auf die Fragen 1, 2, 2A, 2B und 2C in der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

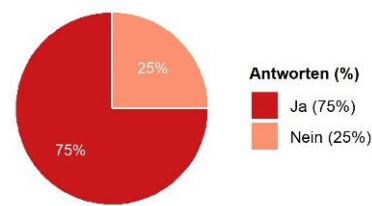
**[Q03 - A] Aufrechterhaltung von frischer Luft mit einem guten Sauerstoffgehalt**



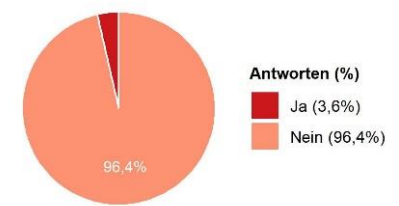
**[Q03 - B] Entfernung von Kohlendioxid und verbrauchter Luft**



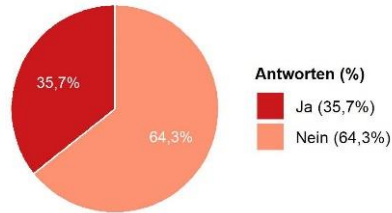
**[Q03 - F] Entfernung von Körpergerüchen und/oder Bereitstellung von Frische**



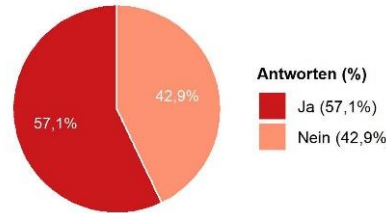
**[Q03 - G] Verbesserte Verdauung**



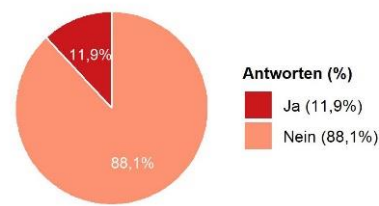
**[Q03 - C] Kontrolle von Feuchtigkeit und Kondensation**



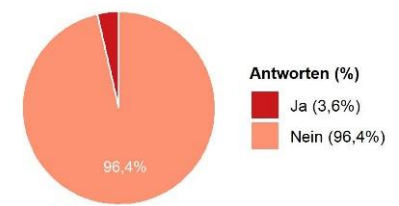
**[Q03 - D] Verringerung des Risikos von Überhitzung und übermäßig hohen Temperaturen**



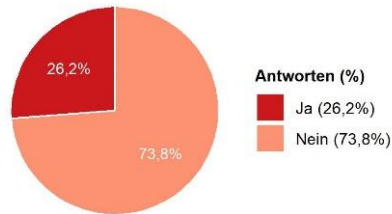
**[Q03 - H] Steigerung der Nachhaltigkeit unseres Gebäudes**



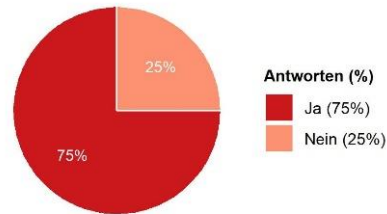
**[Q03 - I] Veränderungen der Melatoninwerte (ein Hormon, das bei der Regulierung des circadianen Rhythmus und des Schlafs hilft)**



**[Q03 - E] Reduzierung und Verteilung von Verunreinigungen wie Rauch, Staub und Gasen**



**[Q03 - F] Reduzierung und Entfernung von luftübertragenen Bakterien und Viren**



**[Q03 - J] Entfernung von giftigen Chemikalien und Ausgasungen aus Materialien**

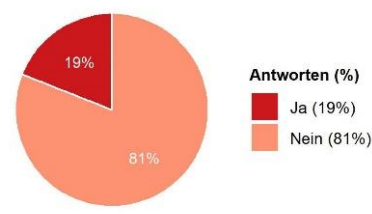
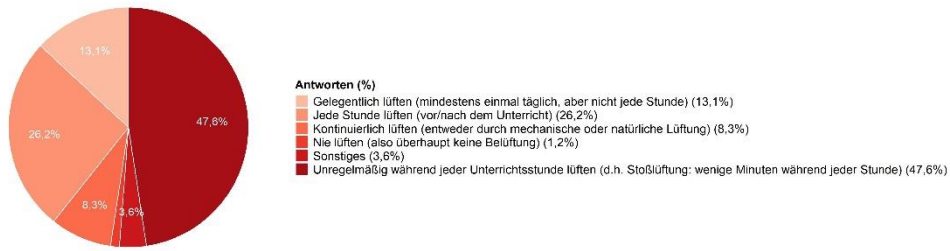


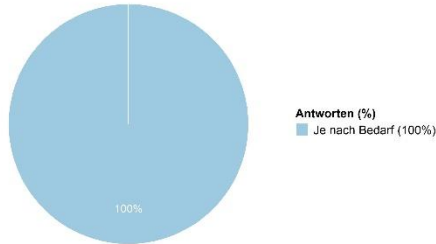
Abbildung A-50 Ergebnisse der Frage 1 in der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen.



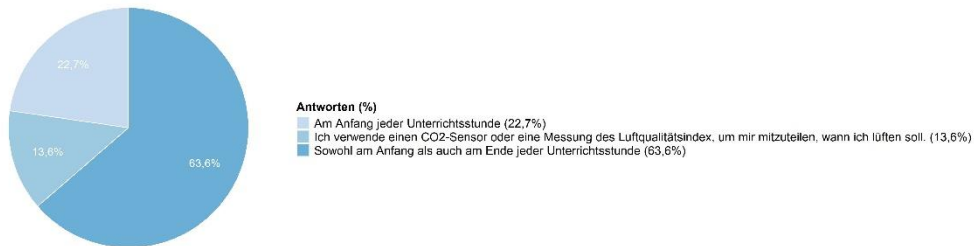
**[Q04] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten?**



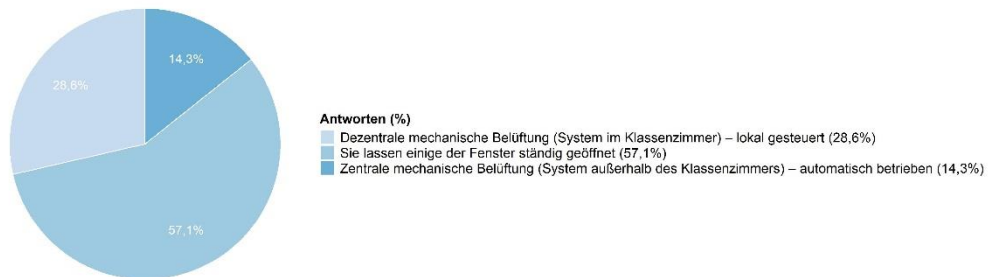
**[Q04 - A] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten, d.h. 'Gelegentlich (mindestens einmal täglich, aber nicht jede Stunde)'?**



**[Q04 - B] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten, d.h. 'Jede Stunde (vor/nach dem Unterricht)'?**



**[Q04 - C] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten, d.h. 'Kontinuierlich (entweder durch mechanische oder natürliche Mittel)'?**

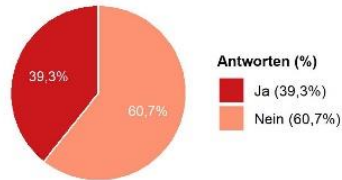


**[Q04 - D] Wenn Sie an Ihre eigenen Klassenzimmer denken, welche der folgenden Aussagen beschreibt Ihren Umgang mit dem Thema Belüftung am besten, 'Andere Methode (z.B. tragbarer Filter oder Hybridmethode)'?**

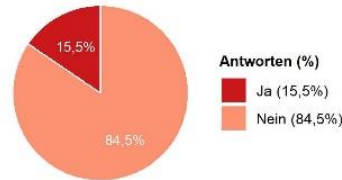


Abbildung A-51 Erkenntnisse aus den Fragen 4, 4A, 4B, 4C und 4D in der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen..

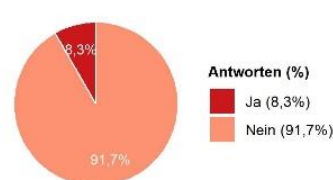
[Q05 - A] Ich verwende einen CO2-Sensor oder eine Messung des Luftqualitätsindex, um mir mitzuteilen, wann ich lüften soll



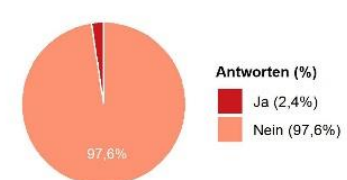
[Q05 - B] Ich öffne ungern Fenster, weil es draußen laut ist



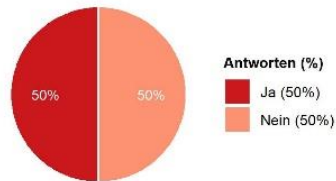
[Q05 - G] Manchmal bin ich mir unsicher, ob ich lüften sollte



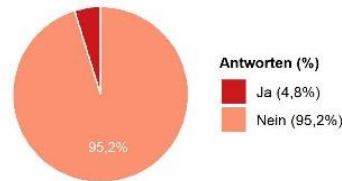
[Q05 - H] Es fällt mir schwer, Fenster zu öffnen



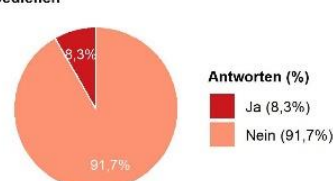
[Q05 - C] Mir gefällt der Lärm von Lüftungsgeräten drinnen nicht



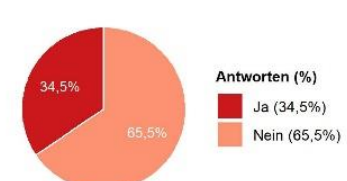
[Q05 - D] Es wird mir zu heiß oder zu kalt, wenn ich lüfte



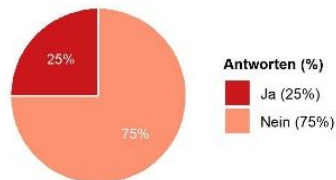
[Q05 - I] Es fällt mir schwer, ein mechanisches Belüftungssystem, ein Hybrid-System oder einen Luftreiniger zu bedienen



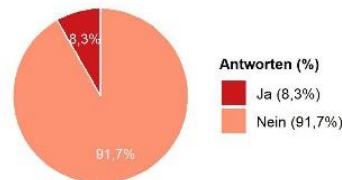
[Q05 - J] Unser Schulhalter hat uns angewiesen, keine Energie zu verschwenden



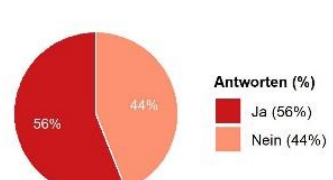
[Q05 - E] Wenn ich lüfte, verspüre ich Zugluft



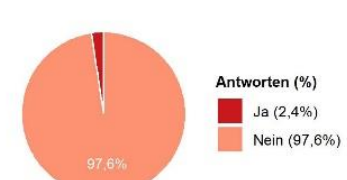
[Q05 - F] Die Außenluft ist verschmutzt und hindert mich daran, Fenster zu öffnen



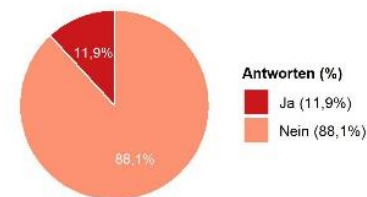
[Q05 - K] Es ist meine persönliche Entscheidung, keine Energie zu verschwenden



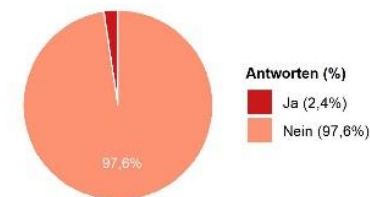
[Q05 - L] Ich empfinde Belüftung als störend und unpraktisch



[Q05 - M] Meine Klasse ist ruhiger, wenn ich nicht lüfte



[Q05 - N] Ich schaue immer darauf, was die anderen tun



[Q05 - O] Ich würde lüften, selbst wenn die anderen denken, dass Belüftung sinnlos sei

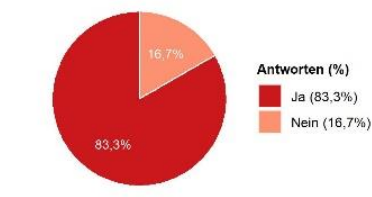
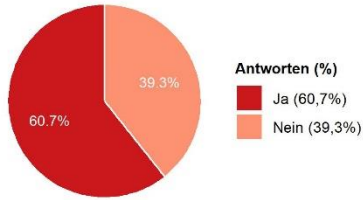
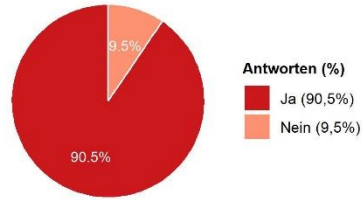


Abbildung A-52 Antworten auf die Frage 5 in der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

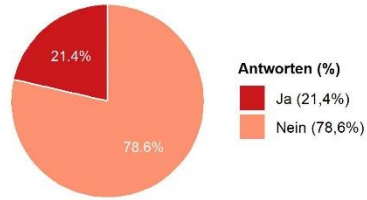
[Q07 - G] Qualität der Außenluft



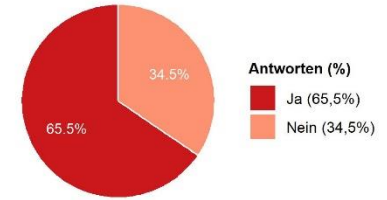
[Q07 - H] Anzahl der Personen im Raum



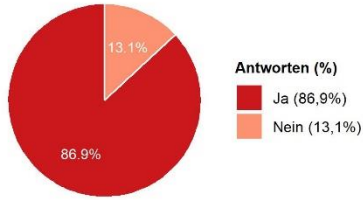
[Q07 - A] Ich bin mir nicht sicher



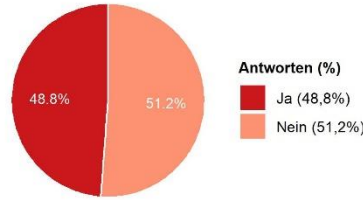
[Q07 - B] Volumen der Luft im Raum



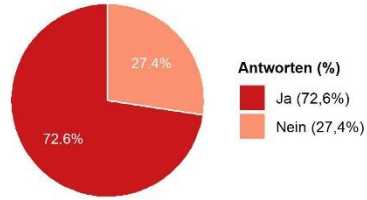
[Q07 - I] Art der Aktivität im Raum



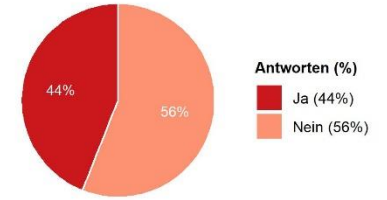
[Q07 - J] Die für den Raum verwendeten Baumaterialien



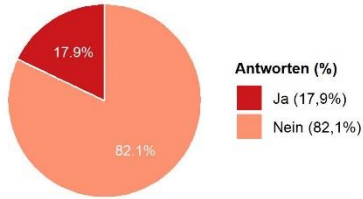
[Q07 - C] Anzahl und Größe der geöffneten Fenster



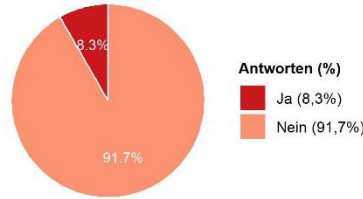
[Q07 - D] Temperatur der Luft drinnen und draußen



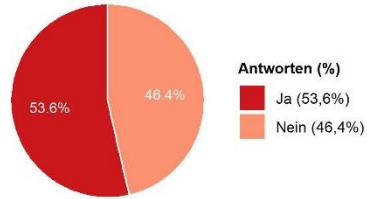
[Q07 - K] Die für Unterrichtsaktivitäten verwendeten Materialien



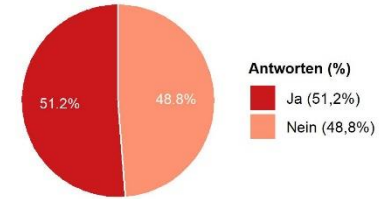
[Q07 - L] Künstliche Beleuchtungsstärke



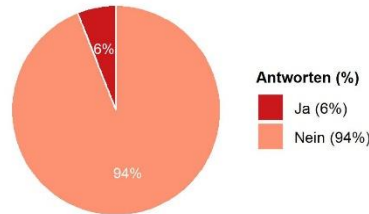
[Q07 - E] Durchflussrate des mechanischen Lüfters



[Q07 - F] Luftfeuchtigkeit



[Q07 - M] Lärmpegel von außen



[Q07 - N] Lärmpegel im Innenraum

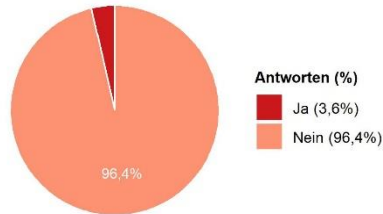
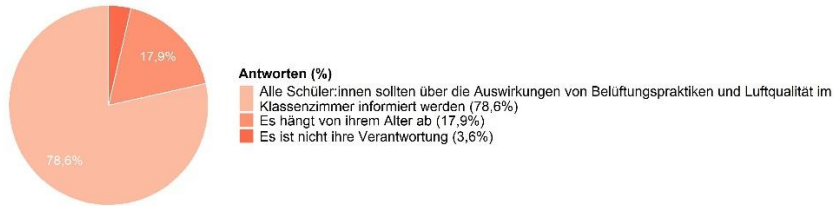
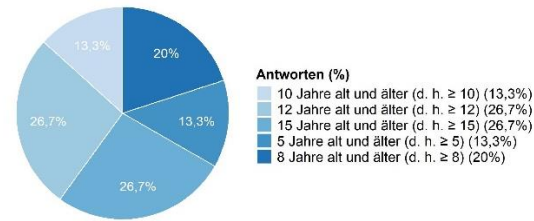


Abbildung A-53 Antworten auf die Frage 7 aus der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

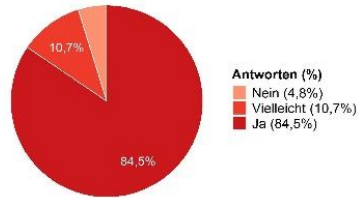
**[Q08] Glauben Sie, dass Schüler:innen über die Auswirkungen von Belüftungspraktiken und Luftqualität im Klassenzimmer informiert werden sollten?**



**[Q08 - A] Bitte geben sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Es hängt von ihrem Alter ab')**



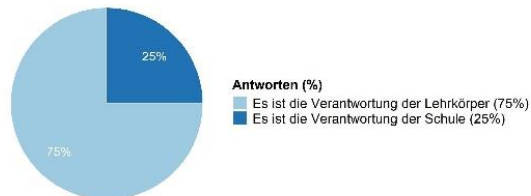
**[Q09] Glauben Sie, dass Schüler:innen eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Belüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten?**



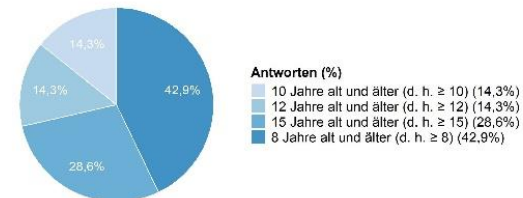
**[Q09 - B] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ,Vielleicht')**



**[Q09 - A] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Nein')**



**[Q09 - B - 1] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ,Vielleicht, es hängt von ihrem Alter ab')**



**[Q09 - C] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ,Ja')**

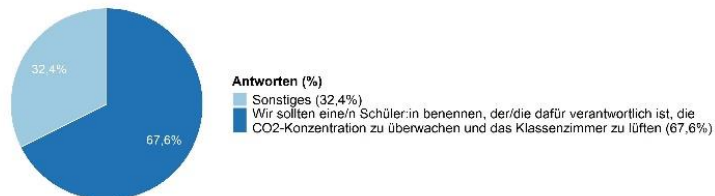
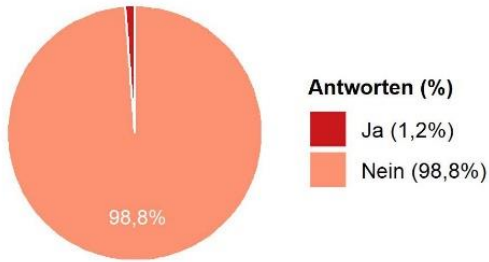
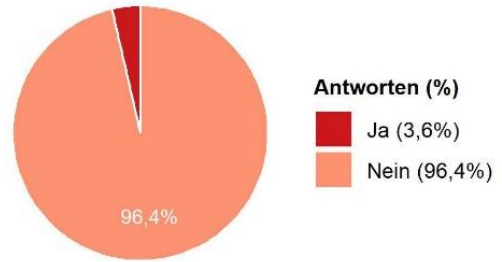


Abbildung A-54 Ergebnisse der Fragen 8, 8A, 9, 9A, 9B und 9C in der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

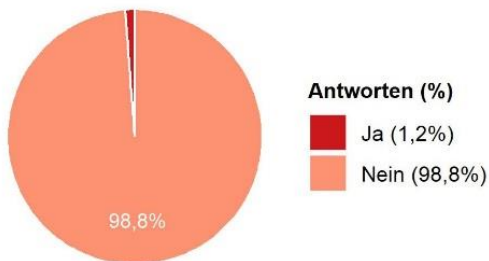
**[Q10 - A] Nein, weil ich kein Interesse an Luftqualität habe**



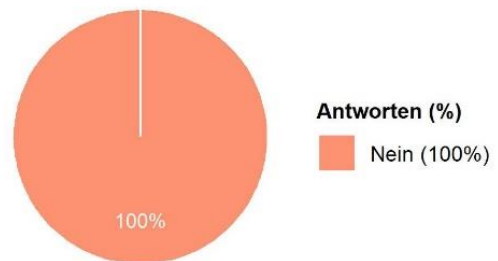
**[Q10 - B] Nein, weil mein Raum mechanisch belüftet ist, und ich keine Kontrolle darüber habe**



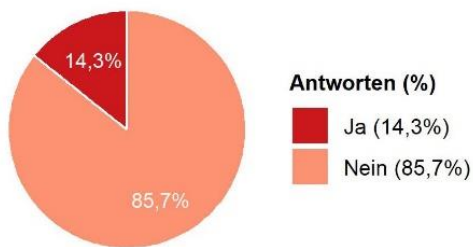
**[Q10 - C] Nein, weil ich die Fenster in meinem Klassenzimmer nicht einfach öffnen kann**



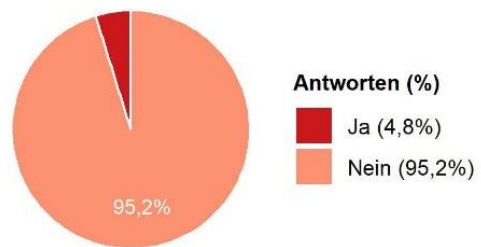
**[Q10 - D] Nein, weil meine Schule mich davon abhält, die Fenster zu öffnen**



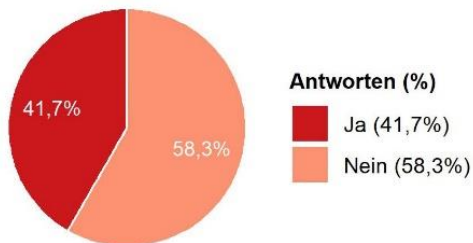
**[Q10 - E] Vielleicht, es hängt davon ab, wie kompliziert das ist**



**[Q10 - F] Vielleicht, wenn es mich nicht vom Unterrichten ablenkt**



**[Q10 - G] Ja, wenn ein/e Schüler:in benannt wird, der/die dafür verantwortlich ist, die CO2-Konzentration zu überwachen und das Klassenzimmer zu lüften**



**[Q10 - H] Ja, es wäre sehr hilfreich**

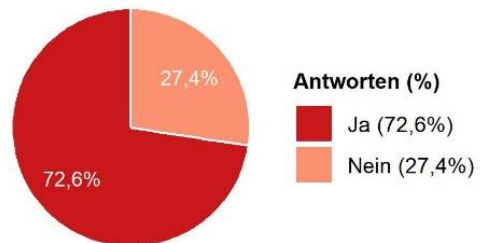


Abbildung A-55 Ergebnisse der Frage 10 in der zweiten Umfrage unter Schuldirektor:innen.

## C.2.2. Ergebnis der Umfrage unter den Lehrer:innen

### C.2.2.1. Ergebnisse der ersten Umfrage

[Q01] Welche der folgenden Situationen beschreibt Ihr Klassenzimmer?

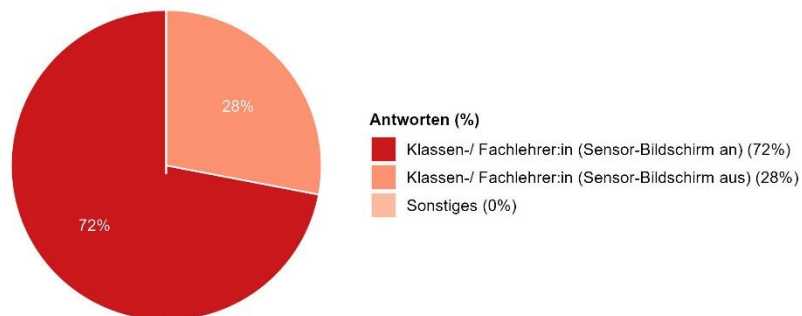
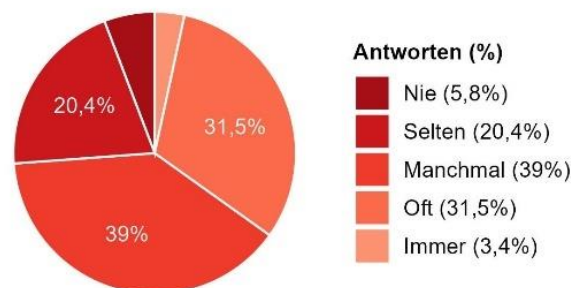
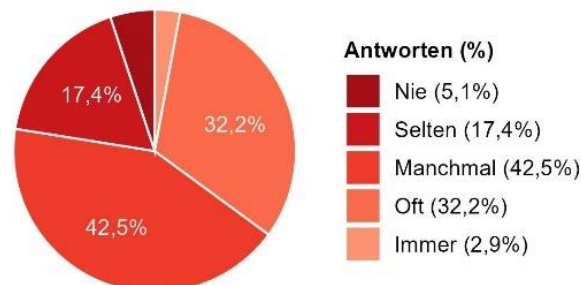


Abbildung A-56 Befragte aus der ersten Umfrage unter den Lehrer:innen (Winterperiode).

[Q02 - A] Wie oft haben Sie die durchschnittliche Raumtemperatur beim Lüften im letzten Schuljahr als zu warm/zu kalt empfunden?



[Q02 - B] Wie oft hätten Sie es lieber, wenn die Temperatur kühler/wärmer wäre?



[Q03] Wie empfinden Sie die Luftbewegung (Zugluft) beim Lüften?

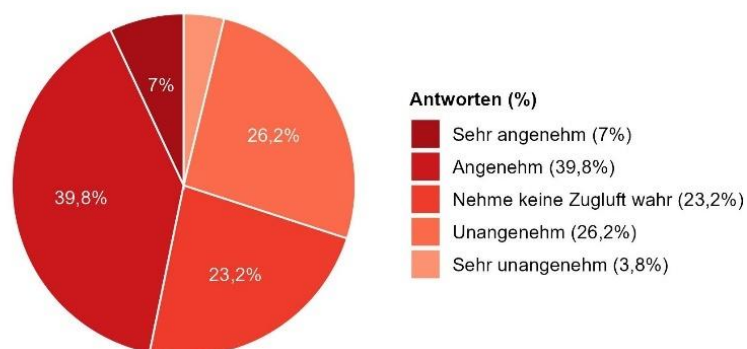
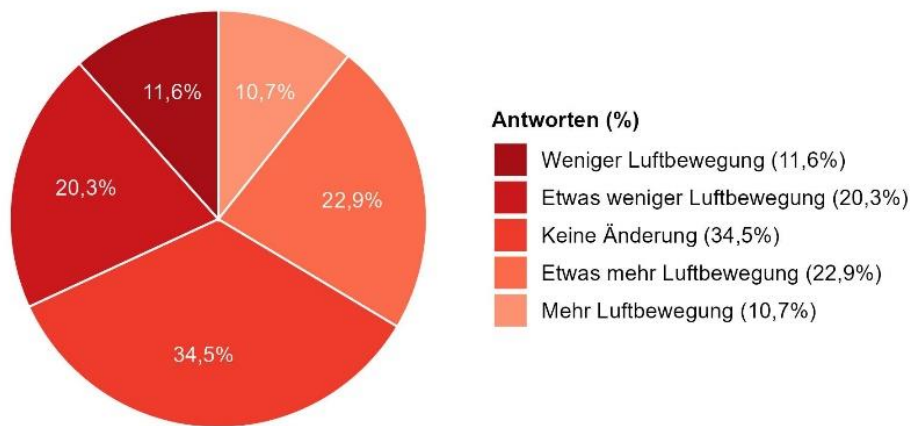
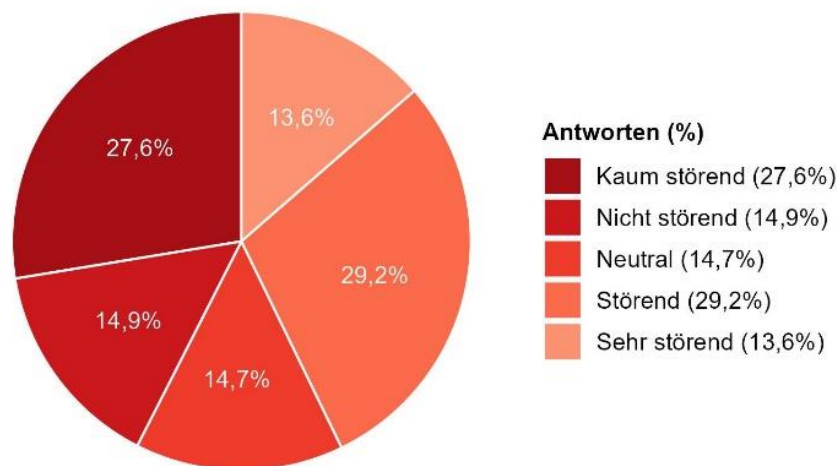


Abbildung A-57 Zusammenfassung der Ergebnisse der Fragen 2 und 3 aus der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.

**[Q04] Wie würden Sie die Luftbewegung bevorzugen?**



**[Q05] Wie empfinden Sie den (Außen-)Lärm beim Lüften?**



**[Q06] Haben Sie das Gefühl, dass sich die Schüler:innen während des Lüftens besser oder schlechter konzentrieren können?**

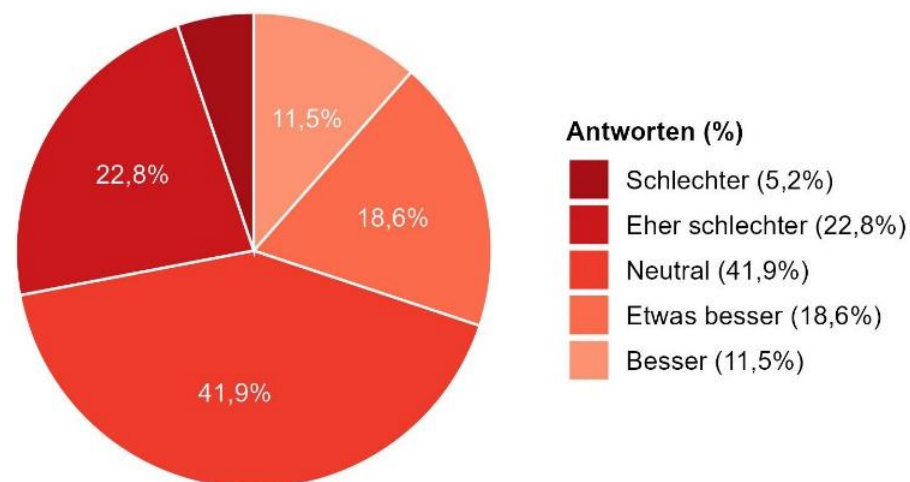
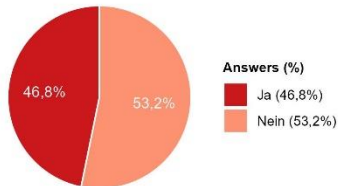
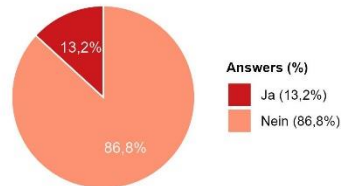


Abbildung A-58 Rückmeldungen zu den Fragen 4, 5 und 6 aus der ersten Umfrage unter Lehrer:innen in der Winterperiode.

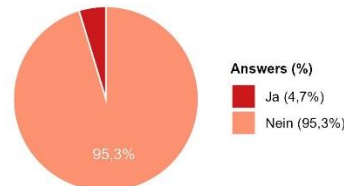
[Q07 - A] In den letzten 6 Monaten war der Lärm von außen beim Lüften ein Problem



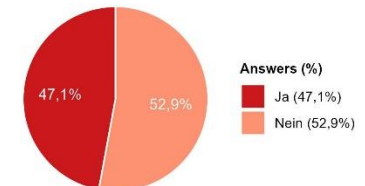
[Q07 - B] In den letzten 6 Monaten wurden die Schüler:innen durch den Lärm der Lüftungsgeräte abgelenkt



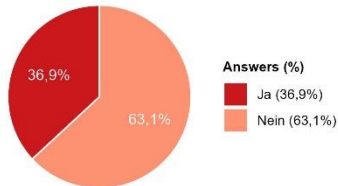
[Q07 - I] Wir hatten Probleme, die durch ein mechanisches Lüftungssystem verursacht wurden



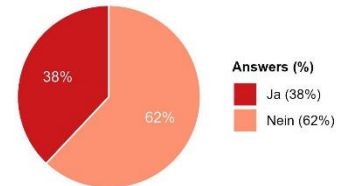
[Q07 - J] Die Schulrichtlinien informierten uns darüber, dass wir keine Energie verschwenden sollten



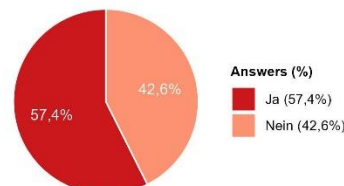
[Q07 - C] Während der letzten 6 Monate waren die Raumtemperaturen zu warm



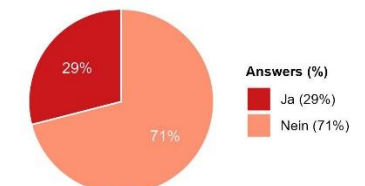
[Q07 - D] Während der letzten 6 Monate waren die Raumtemperaturen zu kalt



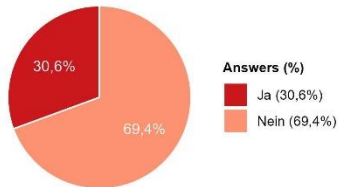
[Q07 - K] Es war meine persönliche Entscheidung, keine Energie zu verschwenden



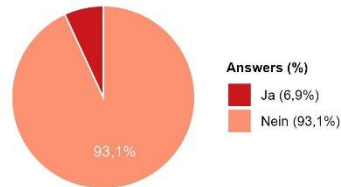
[Q07 - L] Meine Klasse ist unruhig, wenn ich lüfte



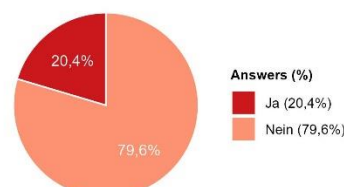
[Q07 - E] Während der letzten 6 Monate gab es unangenehme Zugluft



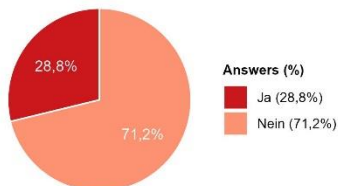
[Q07 - F] Während der letzten 6 Monate war die Luftverschmutzung (schlechte Außenluftqualität) unerträglich



[Q07 - M] Belüftung lenkt ab und ist unangenehm



[Q07 - G] Manchmal war ich mir nicht sicher, ob ich lüften soll oder nicht



[Q07 - H] Wir hatten Probleme, die Fenster zu öffnen (Hindernisse, verschlossene Fenster usw.)

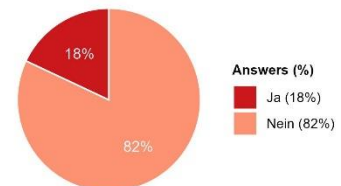
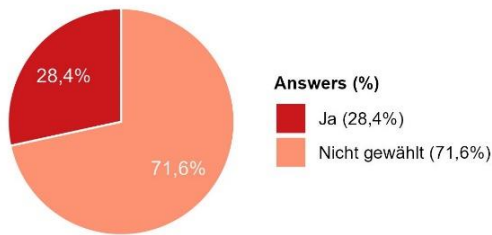


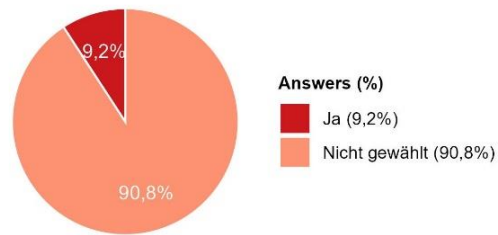
Abbildung A-59 Daten aus der Frage 7 der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.



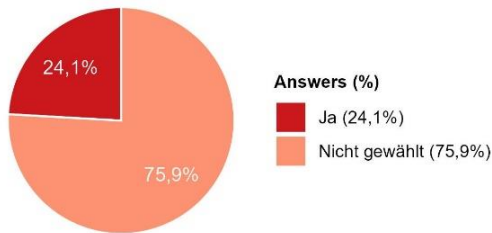
[Q09 - A] CO<sub>2</sub>-Sensor, mit numerischer Anzeige



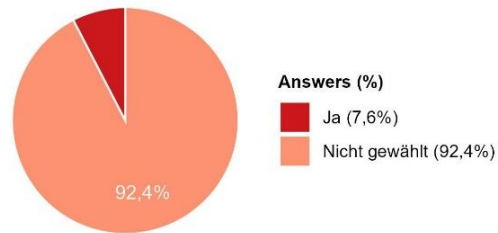
[Q09 - B] CO<sub>2</sub>-Sensor, mit Ampel



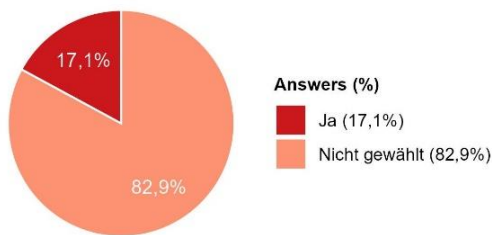
[Q09 - C] CO<sub>2</sub>-Sensor, mit numerischer Anzeige & Ampel



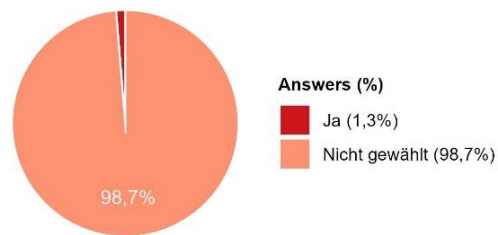
[Q09 - D] Lüftungsanleitung



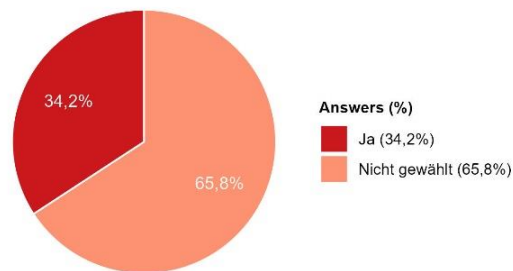
[Q09 - E] CO<sub>2</sub>-Grenzwert-Anleitung



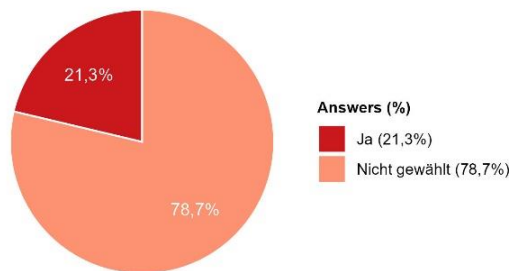
[Q09 - F] Projekt-Webseite mit klaren Informationen zum richtigen Lüften



[Q09 - G] Keine der oben genannten Möglichkeiten



[Q09 - H] Ich würde eine vollautomatische mechanische Lüftung bevorzugen



[Q09 - I] Sonstiges

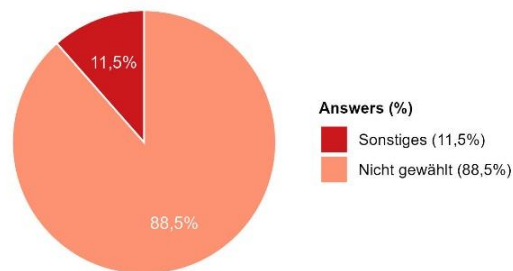
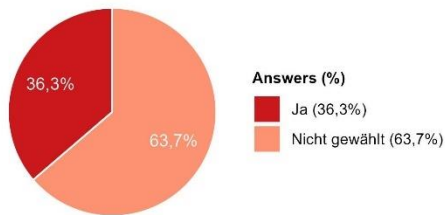
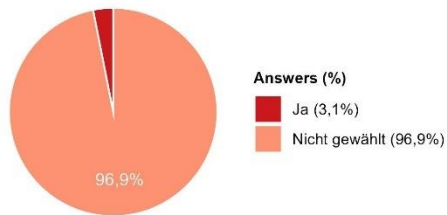


Abbildung A-60 Ergebnisse der Frage 9 in der ersten Umfrage unter Lehrer:innen (Winterperiode).

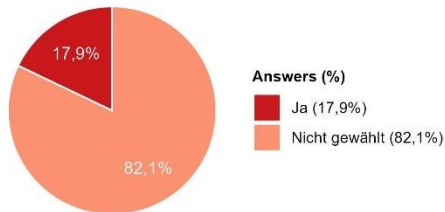
[Q10 - A] Stoppuhr oder Timer (um die Dauer der Fensteröffnung zu messen)



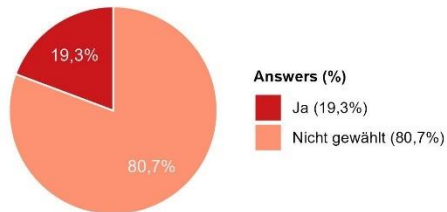
[Q10 - B] Ein Videoseminar, bei dem ich Expert:innen Fragen zum Thema Lüftung stellen kann



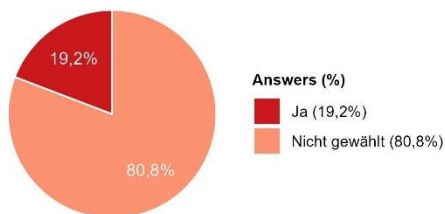
[Q10 - C] Spezifische Ratschläge zur Vermeidung von Zugluft bei der Verwendung von Fenstern zum Lüften



[Q10 - D] Spezifische Ratschläge zu den Energie- und CO<sub>2</sub>-Kosten für die Belüftung meines Klassenzimmers



[Q10 - E] Persönlicher Besuch durch Lüftungsexpert:innen



[Q10 - F] Sonstiges

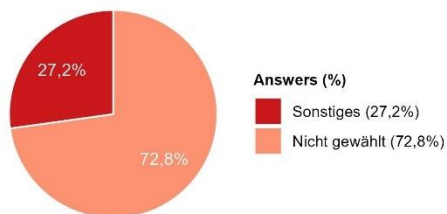


Abbildung A 61 Ergebnisse der Frage 10 in der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.

[Q11] Wie oft gelingt es Ihnen, den empfohlenen CO<sub>2</sub>-Bereich einzuhalten?



[Q12] Wie schwierig ist es, mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>-Sensors richtig zu lüften?

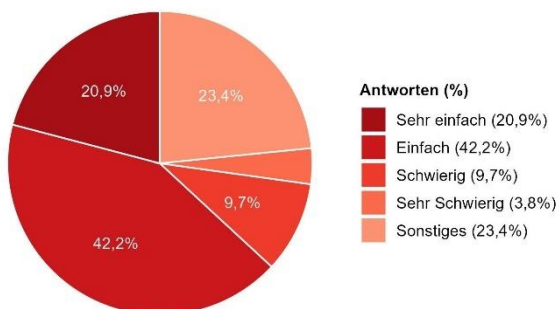
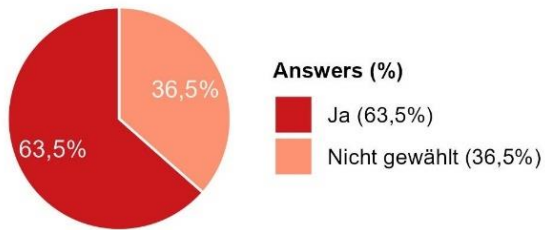
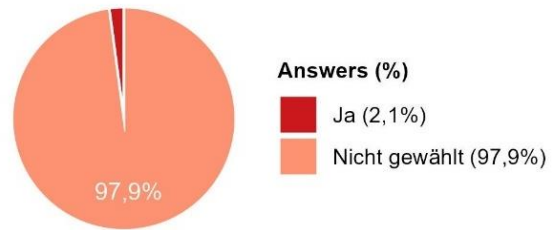


Abbildung A-62 Zusammenfassung der Ergebnisse der Fragen 11 und 12 aus der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.

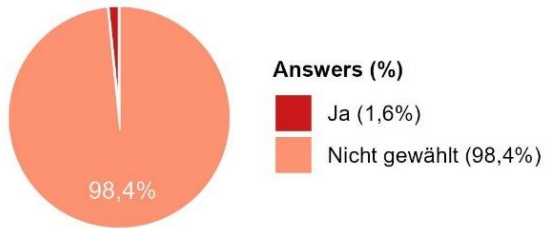
[Q13 - A] Ich habe keine Schwierigkeiten



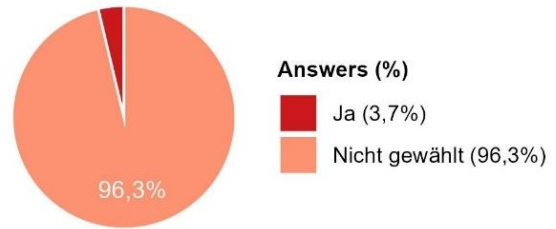
[Q13 - B] Ich finde die Sensoranleitung nicht verständlich



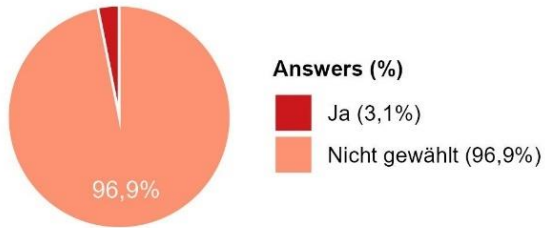
[Q13 - C] Ich finde die Lüftungsanleitung nicht verständlich



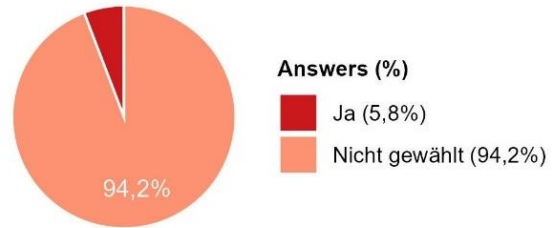
[Q13 - D] Ich finde die Sensoranzeige verwirrend



[Q13 - E] Ich muss mir immer die Anleitung ansehen, wenn ich den Sensor benutze



[Q13 - F] Der Sensor verhält sich oft auf unerwartete Weise



[Q13 - G] Sonstiges

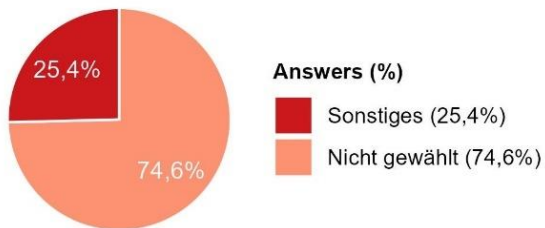
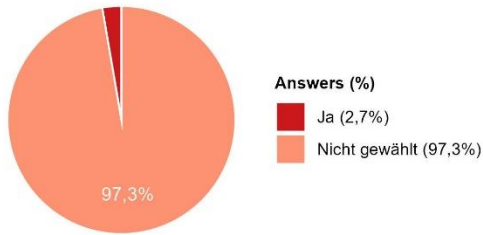
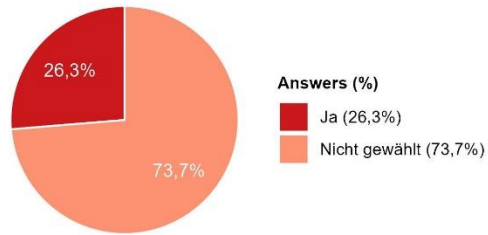


Abbildung A-63 Rückmeldungen zur Frage 13 aus der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.

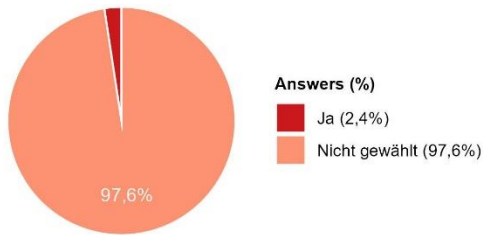
[Q14 - A] Der CO<sub>2</sub>-Sensor stört mich



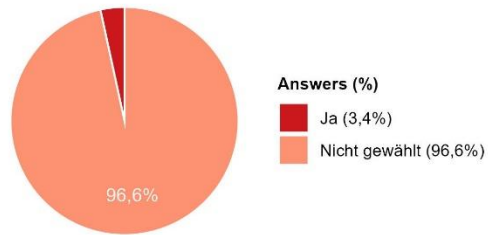
[Q14 - B] Ich ignoriere den CO<sub>2</sub>-Sensor meistens



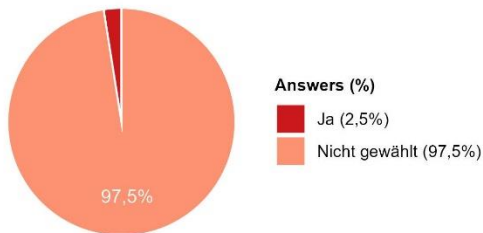
[Q14 - C] Ich bin oft verwirrt, wenn ich mir die Sensor-/Lüftungsanleitung ansehe



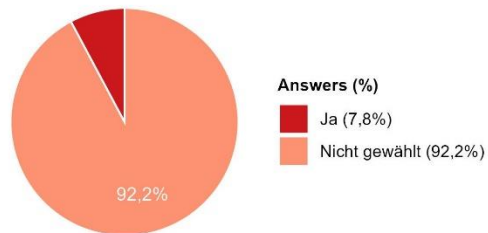
[Q14 - D] Die Umsetzung der Belüftungsanleitung ist frustrierend



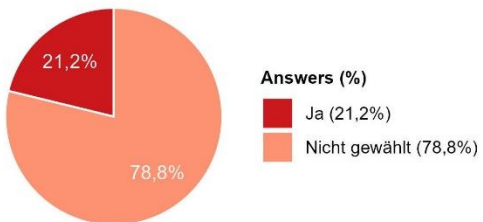
[Q14 - E] Ich muss mir immer die Anleitung ansehen, wenn ich den Sensor benutze



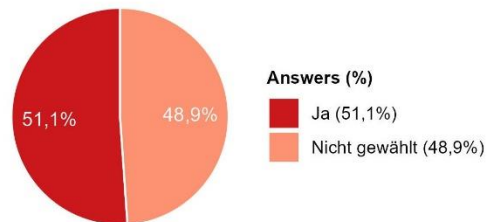
[Q14 - F] Ich bin immer noch dabei zu lernen, wie der CO<sub>2</sub>-Sensor funktioniert.



[Q14 - G] Mit der neuen Einrichtung (CO<sub>2</sub>-Sensor und Anleitung zur Belüftung) ist es einfacher, die CO<sub>2</sub>-Werte in einem guten Bereich zu halten



[Q14 - H] Ich habe kein Problem mit dem CO<sub>2</sub>-Sensor



[Q14 - I] Sonstiges

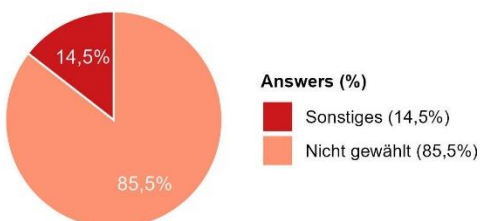
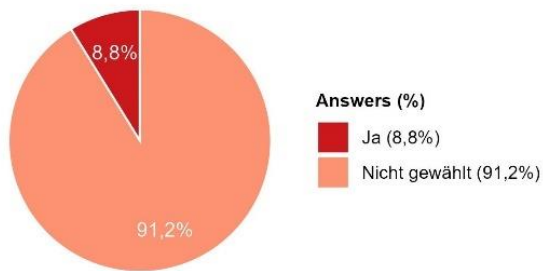
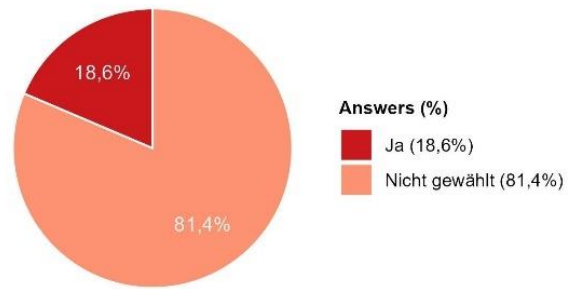


Abbildung A-64 Ergebnisse der Frage 14 aus der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.

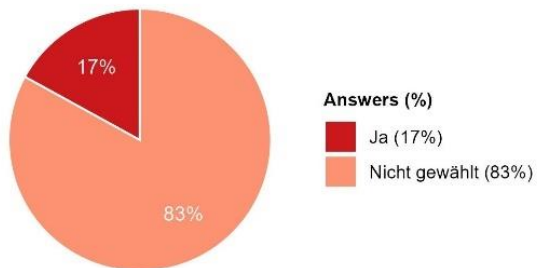
**[Q15 - A] Ich übe noch den Sensor zu verstehen**



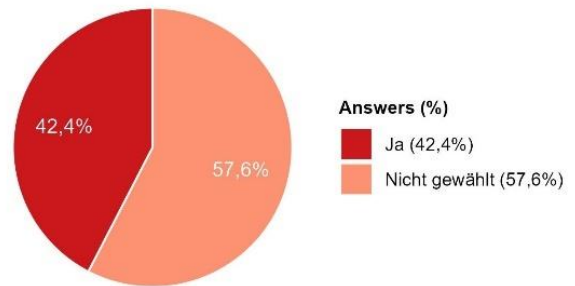
**[Q15 - B] Ich übe noch richtig zu lüften**



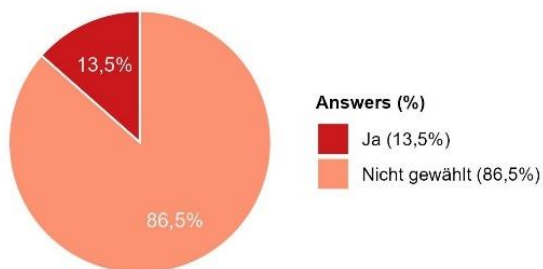
**[Q15 - C] Ich muss mit dem Widerstand von Schüler:innen und Schulpersonal umgehen**



**[Q15 - D] Ich habe vor besser zu lüften**



**[Q15 - E] Ich bin mir nicht sicher, ob ich die Belüftung aufrechterhalten kann**



**[Q15 - F] Sonstiges**

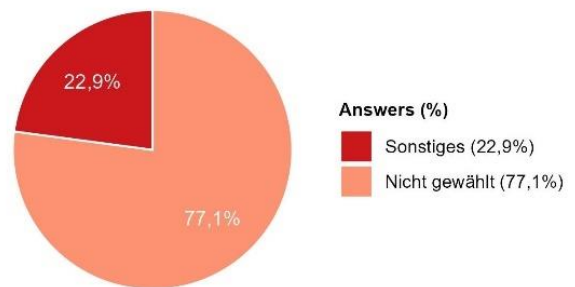
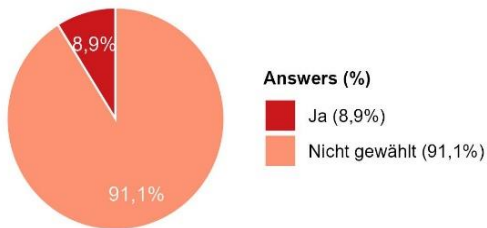
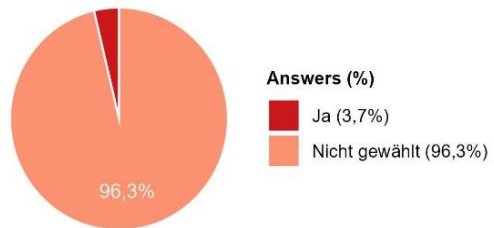


Abbildung A 65 Antworten der Lehrer:innen auf die Frage 15 in der Winterumfrage.

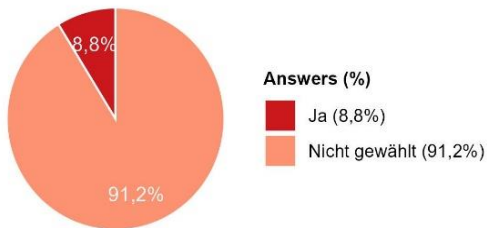
**[Q16 - A] Ich denke, dass der neue CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanleitung sinnlos sind**



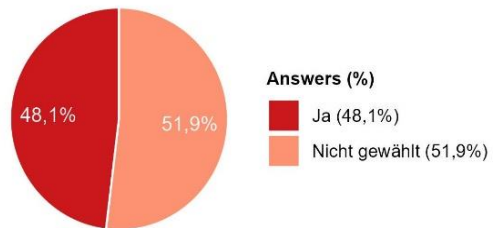
**[Q16 - B] Ich verstehe den Zweck der CO<sub>2</sub>-Messung und Belüftung nicht**



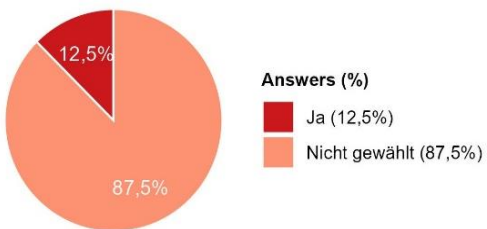
**[Q16 - C] Ich bin unschlüssig, ob die Messung von CO<sub>2</sub> und Belüftung eine gute Idee ist**



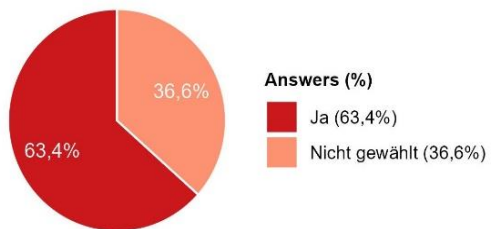
**[Q16 - D] Ich denke, dass der neue CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanleitung nützlich sind**



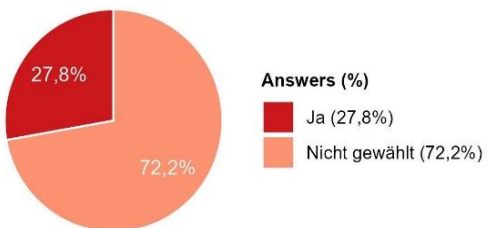
**[Q16 - E] Ich habe jetzt das Wissen und die Mittel, um richtig zu lüften**



**[Q16 - F] Ich denke, dass häufiges Lüften eine gute Idee ist**



**[Q16 - G] Ich bemühe mich jetzt, mit Hilfe des CO<sub>2</sub>-Sensors und der erlernten Lüftungstechniken eine gute Luftqualität in meinem Klassenzimmer aufrechtzuerhalten**



**[Q16 - H] Sonstiges**

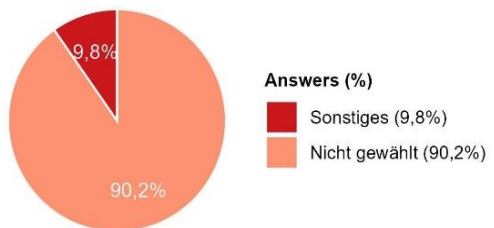
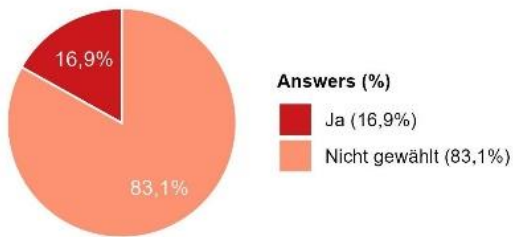
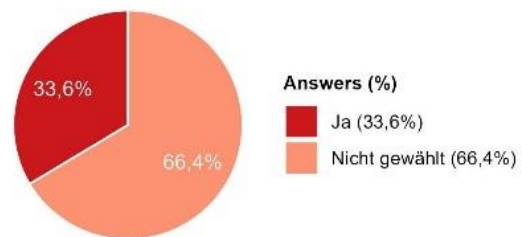


Abbildung A-66 Antworten zur Frage 16 aus der ersten Umfrage unter Lehrer:innen (Winterperiode).

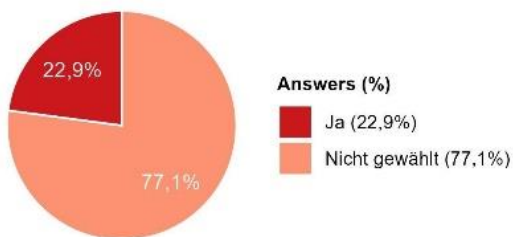
[Q17 - A] Ich schaue nie auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



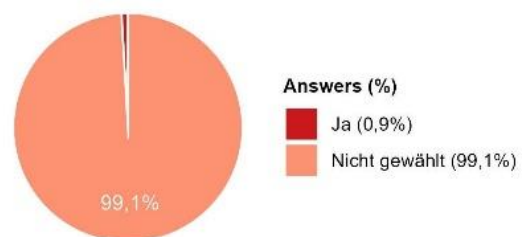
[Q17 - B] Ich schaue nur selten auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



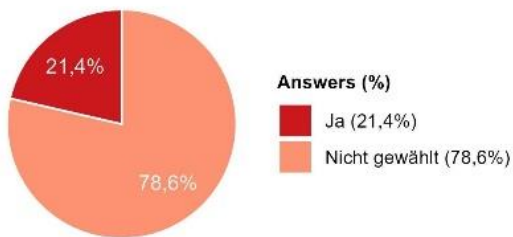
[Q17 - C] Ich schaue sehr häufig auf den CO<sub>2</sub>-Sensor (mehrmals am Tag)



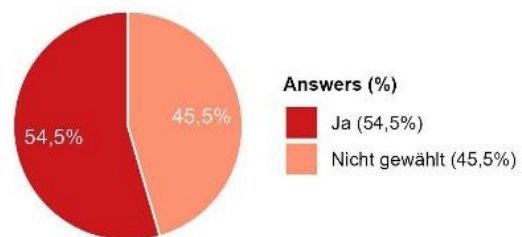
[Q17 - D] Ich schaue ständig auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



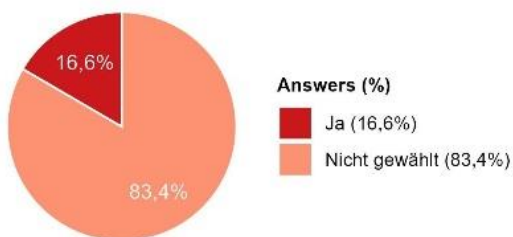
[Q17 - E] Ich tendiere dazu, den neuen CO<sub>2</sub>-Sensor als Richtwert für meine Lüftungsgewohnheiten zu verwenden, anstatt die Fenster immer geschlossen zu halten



[Q17 - F] Ich öffne die Fenster häufig (mehrmals am Tag)



[Q17 - G] Ich beobachte den Sensor aufmerksam und lüfte dann (mehrmals täglich), um die bestmögliche Luftqualität zu erreichen



[Q17 - H] Sonstiges

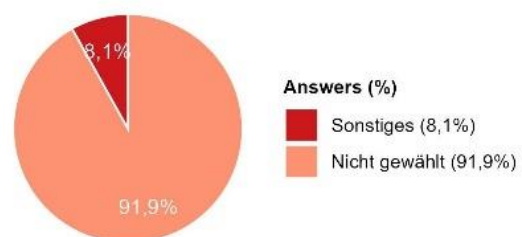
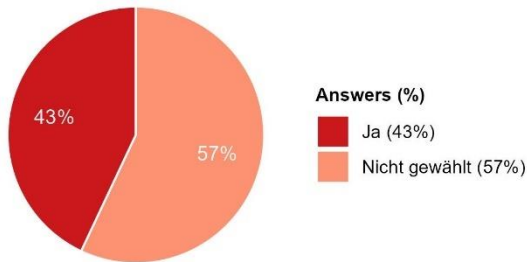
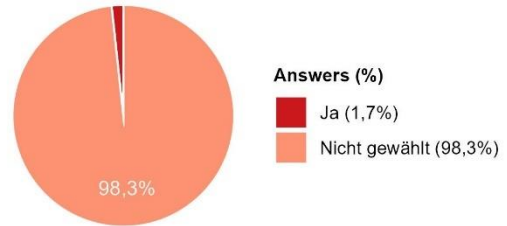


Abbildung A-67 Rückmeldungen zur Frage 17 aus der Umfrage unter Lehrer:innen (Winterperiode).

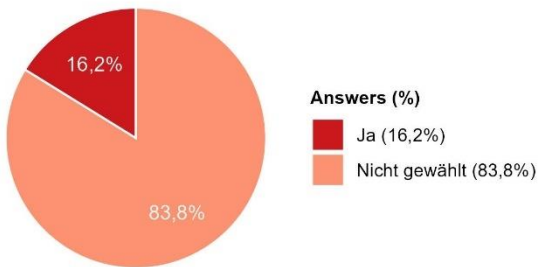
**[Q18 - A] Ich schaue gerne auf den CO<sub>2</sub>-Sensor**



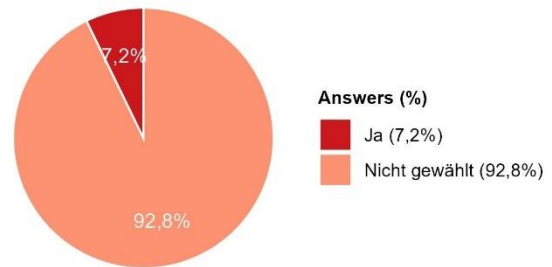
**[Q18 - B] Meine Schule betreibt ein automatisches mechanisches Lüftungssystem, so dass ich mir darüber keine Gedanken machen muss**



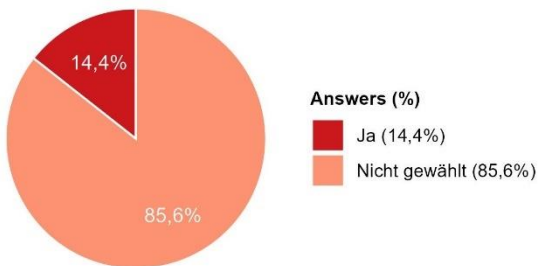
**[Q18 - C] Der CO<sub>2</sub>-Sensor ist für mich nicht von Interesse**



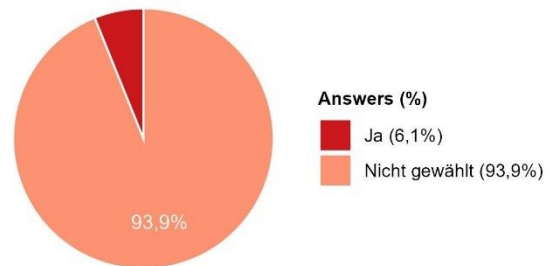
**[Q18 - D] Der CO<sub>2</sub>-Sensor deprimiert/verunsichert mich**



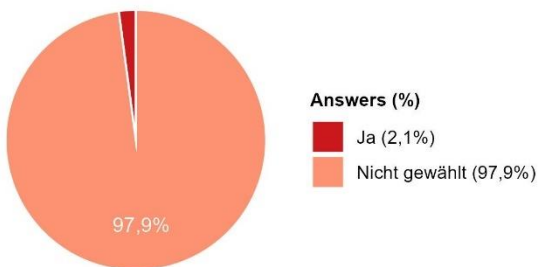
**[Q18 - E] Ich habe keine Zeit, einen CO<sub>2</sub>-Sensor zu benutzen**



**[Q18 - F] Ich öffne und schließe die Fenster so oft, dass es mich ablenkt**



**[Q18 - G] Ich bin nicht an der Luftqualität interessiert**



**[Q18 - H] Sonstiges**

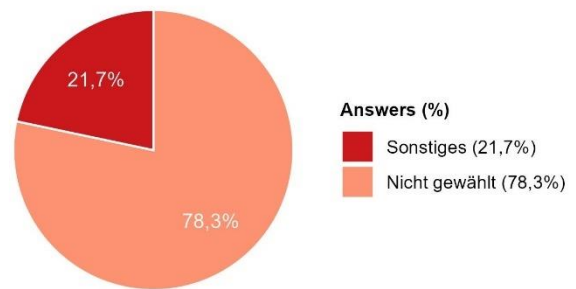


Abbildung A-68 Daten aus der Frage 18 der ersten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Winterperiode.



### C.2.2.2. Ergebnisse der zweiten Umfrage

**[Q01] Welche der folgenden Situationen beschreibt Ihr Klassenzimmer?**

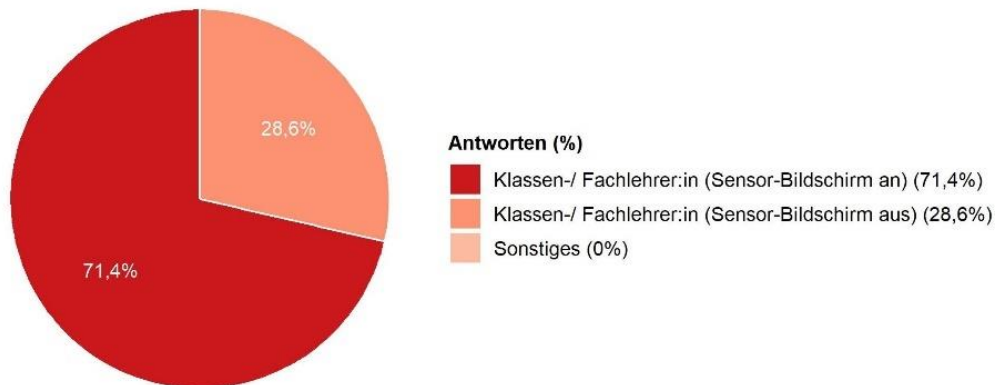
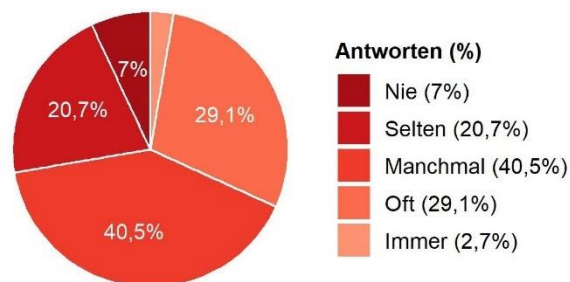
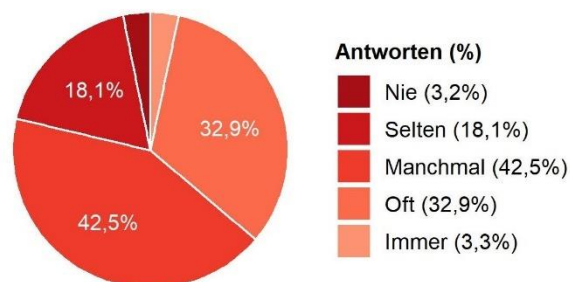


Abbildung A-69 Befragte der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen in der Sommerperiode.

**[Q02 - A] Wie oft haben Sie die durchschnittliche Raumtemperatur beim Lüften im letzten Schuljahr als zu warm/zu kalt empfunden?**



**[Q02 - B] Wie oft hätten Sie es lieber, wenn die Temperatur kühler/wärmer wäre?**



**[Q03] Wie empfinden Sie die Luftbewegung (Zugluft) beim Lüften im Sommer?**

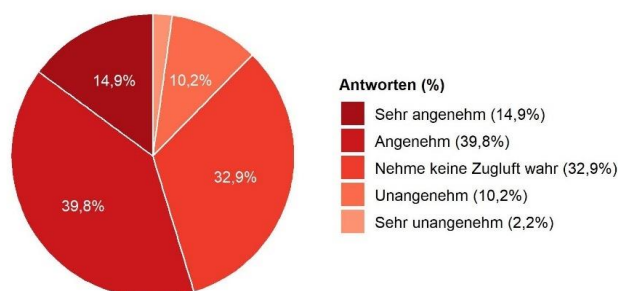
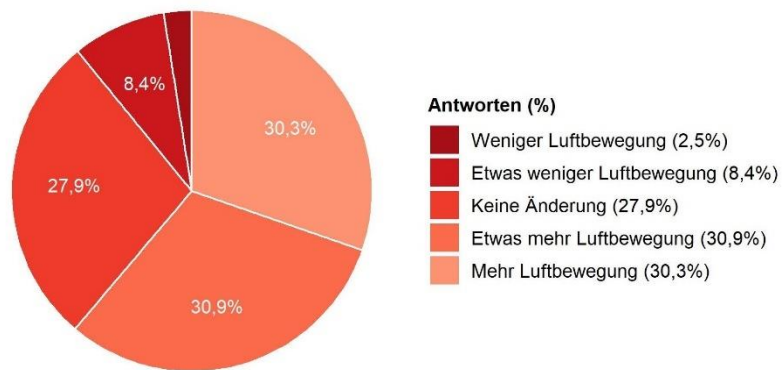


Abbildung A-70 Ergebnisse der Frage 1 in der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

[Q04] Wie würden Sie die Luftbewegung im Sommer bevorzugen?



[Q05] Wie empfinden Sie den (Außen-)Lärm beim Lüften im Sommer?

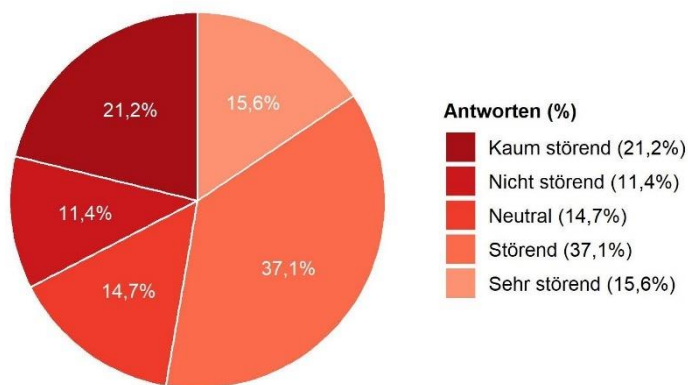


Abbildung A-71 Zweite Umfrage unter Lehrer:innen, Antworten auf die Fragen 4 und 5.

[Q06] Haben Sie das Gefühl, dass sich die Schüler:innen während des Lüftens besser oder schlechter konzentrieren können?

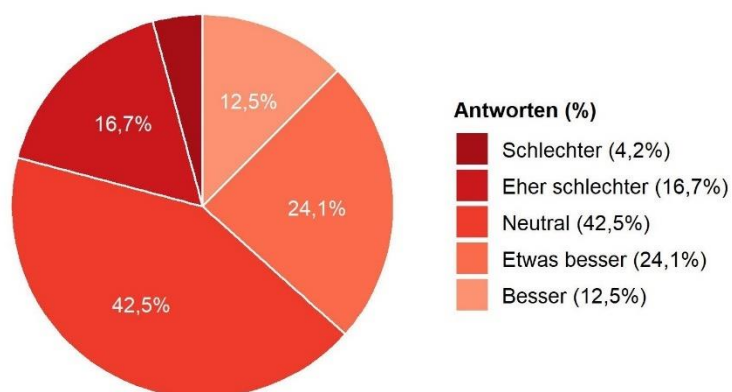
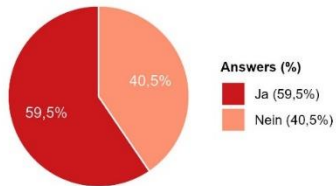
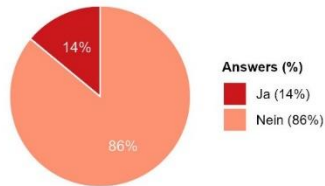


Abbildung A-72 Antworten auf Frage 6 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen in der Sommerperiode.

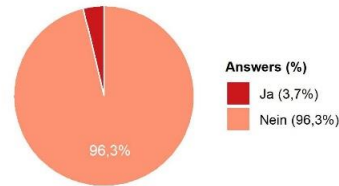
[Q07 - A] In den letzten 3 Monaten war der Lärm von außen beim Lüften ein Problem



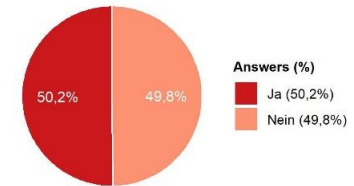
[Q07 - B] In den letzten 3 Monaten wurden die Schüler:innen durch den Lärm der Lüftungsgeräte abgelenkt



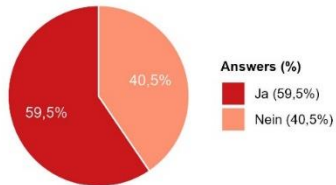
[Q07 - I] Wir hatten Probleme, die durch ein mechanisches Lüftungssystem verursacht wurden



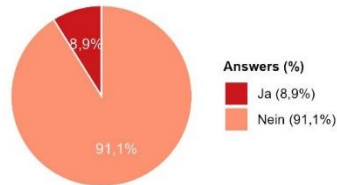
[Q07 - J] Die Schulrichtlinien informierten uns darüber, dass wir keine Energie verschwenden sollten



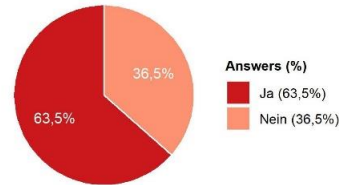
[Q07 - C] Während der letzten 3 Monate waren die Raumtemperaturen zu warm



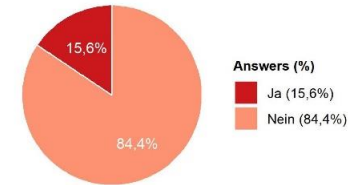
[Q07 - D] Während der letzten 3 Monate waren die Raumtemperaturen zu kalt



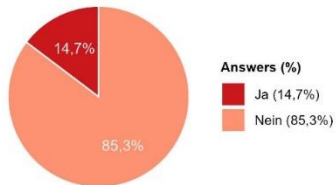
[Q07 - K] Es war meine persönliche Entscheidung, keine Energie zu verschwenden



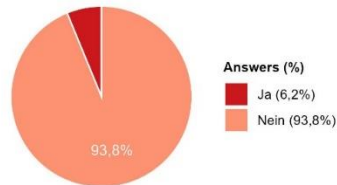
[Q07 - L] Meine Klasse ist unruhig, wenn ich lüfte



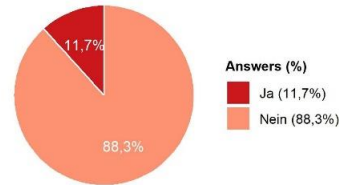
[Q07 - E] Während der letzten 3 Monate gab es unangenehme Zugluft



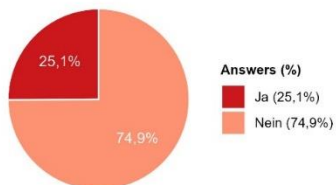
[Q07 - F] Während der letzten 3 Monate war die Luftverschmutzung (schlechte Außenluftqualität) unerträglich



[Q07 - M] Belüftung lenkt ab und ist unangenehm



[Q07 - G] Manchmal war ich mir nicht sicher, ob ich lüften soll oder nicht



[Q07 - H] Wir hatten Probleme, die Fenster zu öffnen (Hindernisse, verschlossene Fenster usw.)

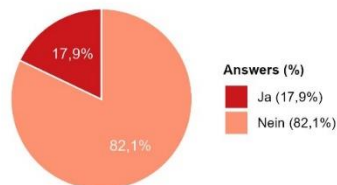
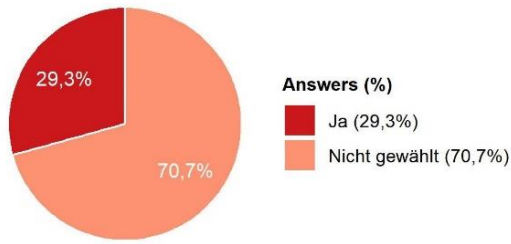
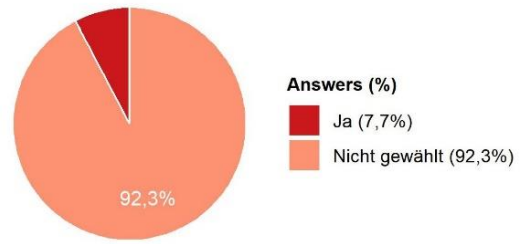


Abbildung A-73 Überblick über die Antworten auf Frage 7 in der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

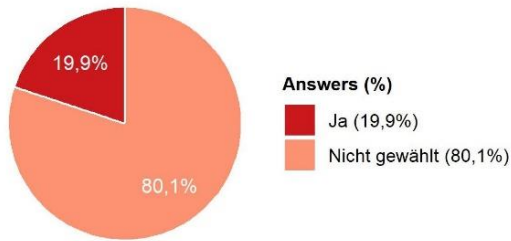
[Q09 - A] CO<sub>2</sub>-Sensor, mit numerischer Anzeige



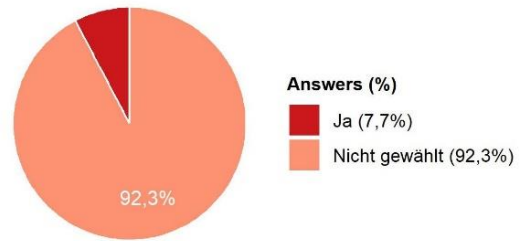
[Q09 - B] CO<sub>2</sub>-Sensor, mit Ampel



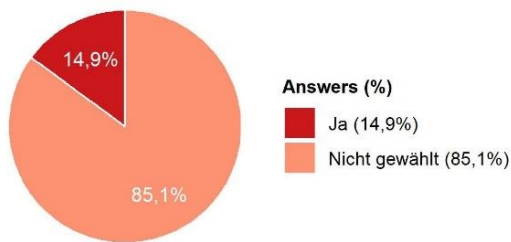
[Q09 - C] CO<sub>2</sub>-Sensor, mit numerischer Anzeige & Ampel



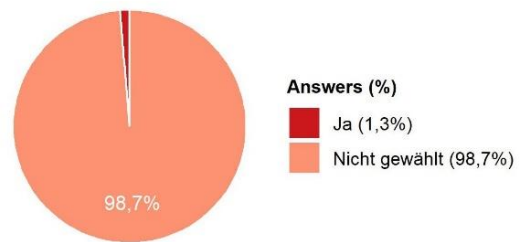
[Q09 - D] Lüftungsanleitung



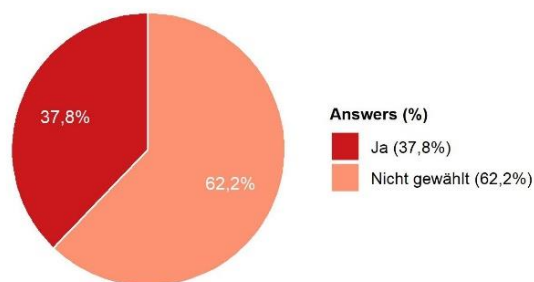
[Q09 - E] CO<sub>2</sub>-Grenzwert-Anleitung



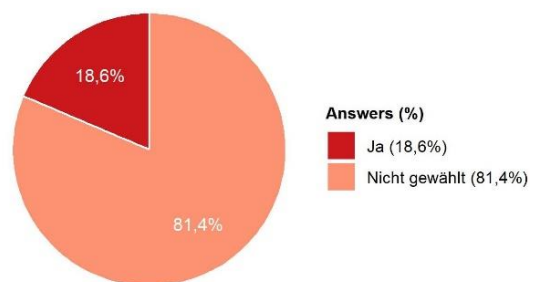
[Q09 - F] Projekt-Webseite mit klaren Informationen zum richtigen Lüften



[Q09 - G] Keine der oben genannten Möglichkeiten



[Q09 - H] Ich würde eine vollautomatische mechanische Lüftung bevorzugen



[Q09 - I] Sonstiges

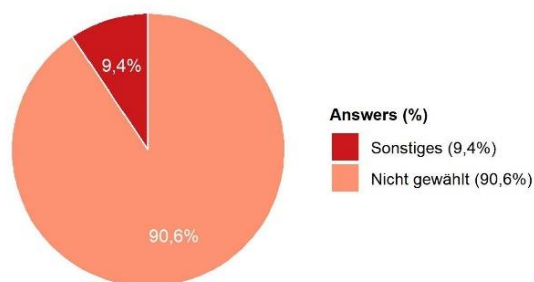
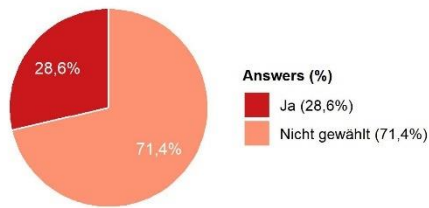
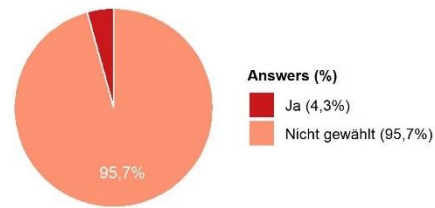


Abbildung A-74 Rückmeldungen zur Frage 9 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, in der Sommerperiode.

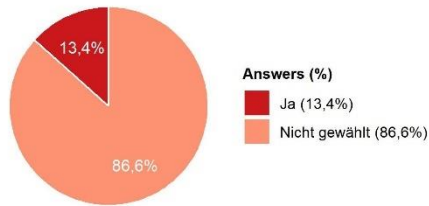
[Q10 - A] Stoppuhr oder Timer (um die Dauer der Fensteröffnung zu messen)



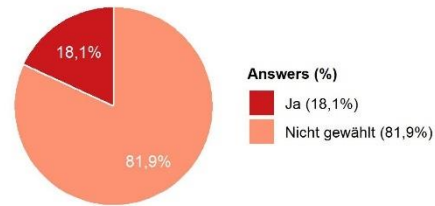
[Q10 - B] Ein Videoseminar, bei dem ich Expert:innen Fragen zum Thema Lüftung stellen kann



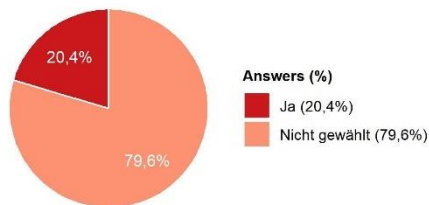
[Q10 - C] Spezifische Ratschläge zur Vermeidung von Zugluft bei der Verwendung von Fenstern zum Lüften



[Q10 - D] Spezifische Ratschläge zu den Energie- und CO<sub>2</sub>-Kosten für die Belüftung meines Klassenzimmers



[Q10 - E] Persönlicher Besuch durch Lüftungsexpert:innen



[Q10 - F] Sonstiges

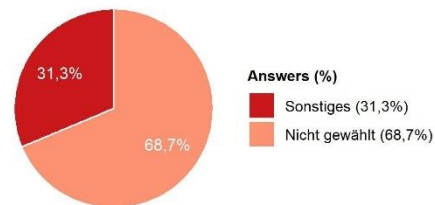
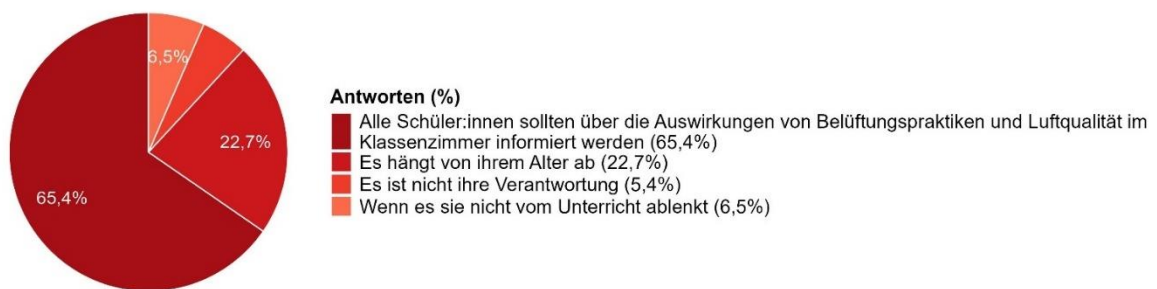


Abbildung A-75 Antworten auf Frage 10 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

[Q12] Glauben Sie, dass Schüler:innen über die Auswirkungen von Belüftungspraktiken und Luftqualität im Klassenzimmer informiert werden sollten?



[Q12 - A] Bitte geben sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. 'Es hängt von ihrem Alter ab')

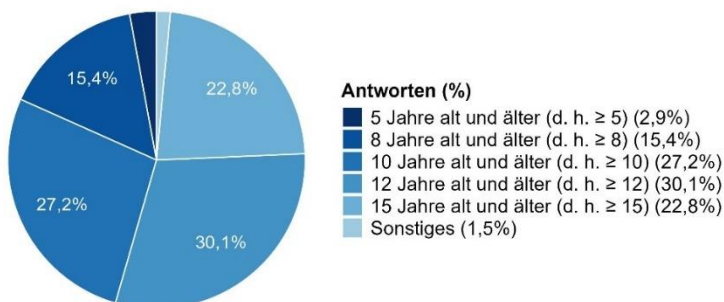
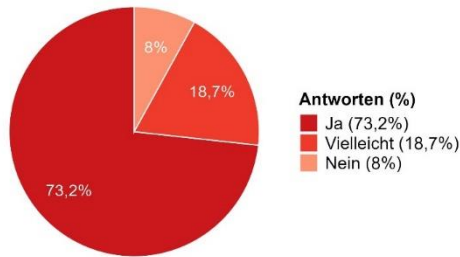
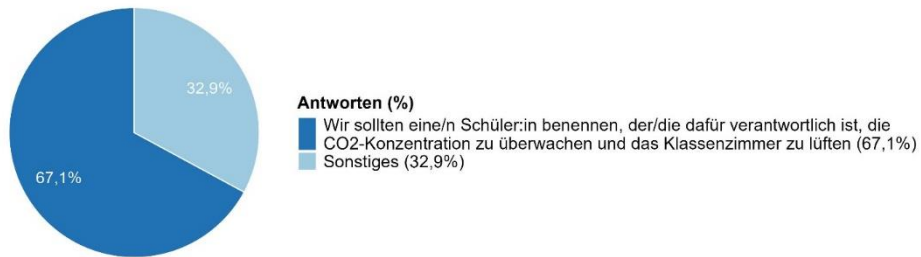


Abbildung A-76 Ergebnisse der Fragen 12 und 12A aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, in der Sommerperiode.

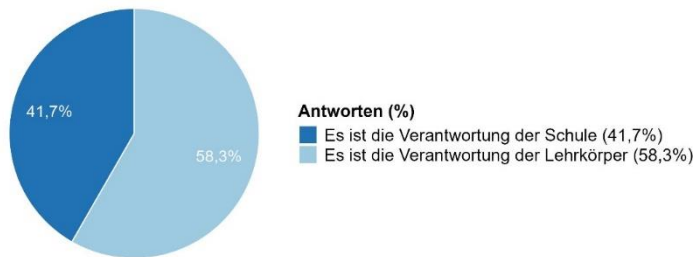
**[Q13] Glauben Sie, dass Schüler:innen eine aktive Rolle bei der Aufrechterhaltung der Belüftungsqualität im Klassenzimmer spielen sollten?**



**[Q13 - A] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ‚Ja‘)**



**[Q13 - C] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ‚Nein‘)**



**[Q13 - B] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ‚Vielleicht‘)**



**[Q13 - B - 1] Bitte geben Sie mehr Informationen zu Ihrer Antwort an (z.B. ‚Vielleicht, es hängt von ihrem Alter ab‘):**

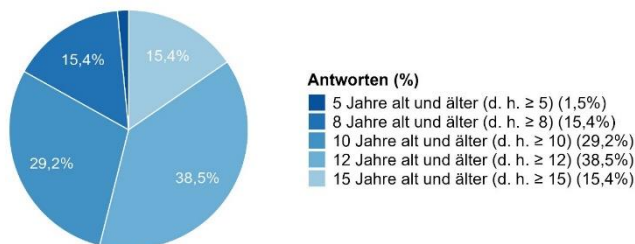


Abbildung A-77 Rückmeldungen zu den Fragen 13, 13A, 13B und 13C aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

**[Q14] Haben Sie derzeit einen CO<sub>2</sub>-Champion (z. B. eine/n Schüler:in, der/die dafür verantwortlich ist, die CO<sub>2</sub>-Konzentration zu überwachen und das Klassenzimmer zu lüften?)**

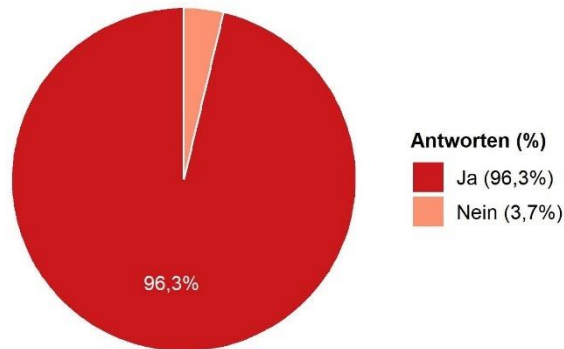


Abbildung A-78 Ergebnisse der Frage 14 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

**[Q15] Wie oft gelingt es Ihnen, den empfohlenen CO<sub>2</sub>-Bereich im Sommer einzuhalten?**



**[Q16] Wie schwierig ist es, mit Hilfe eines CO<sub>2</sub>-Sensors im Sommer richtig zu lüften?**

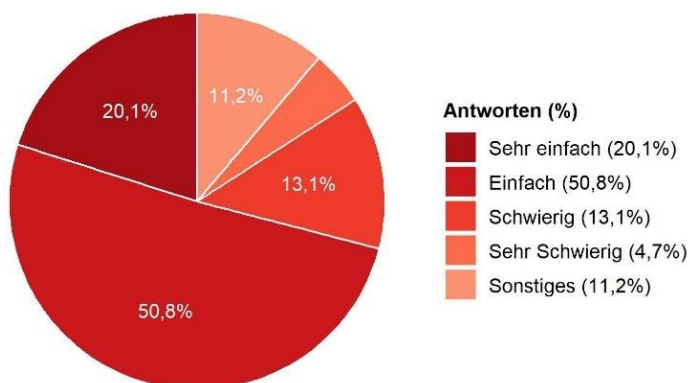
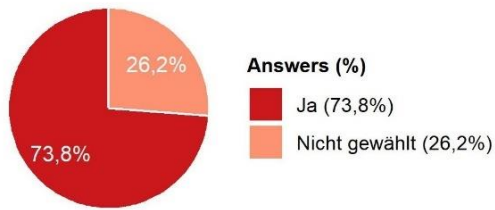
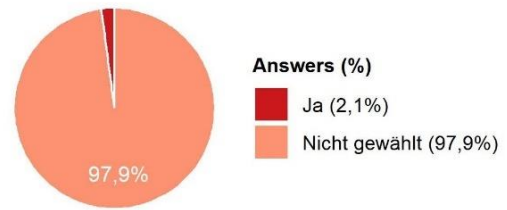


Abbildung A-79 Ergebnisse der Fragen 15 und 16 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, in der Sommerperiode.

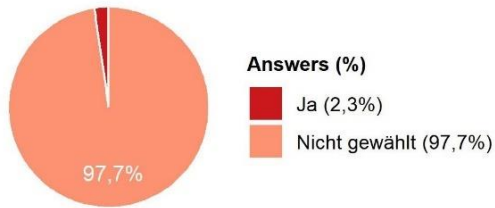
[Q17 - A] Ich habe keine Schwierigkeiten



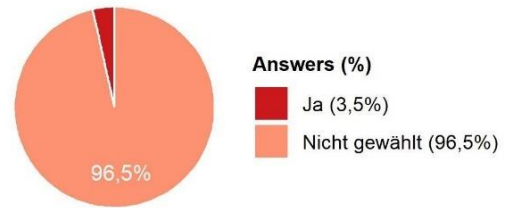
[Q17 - B] Ich finde die Sensoranleitung nicht verständlich



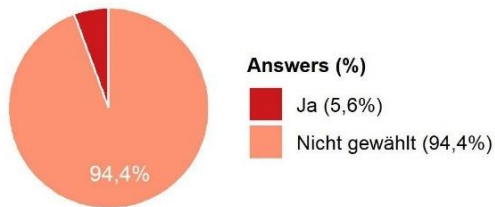
[Q17 - C] Ich finde die Lüftungsanleitung nicht verständlich



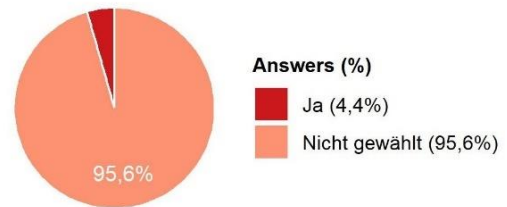
[Q17 - D] Ich finde die Sensoranzeige verwirrend



[Q17 - E] Ich muss mir immer die Anleitung ansehen, wenn ich den Sensor benutze



[Q17 - F] Der Sensor verhält sich oft auf unerwartete Weise



[Q17 - G] Sonstiges

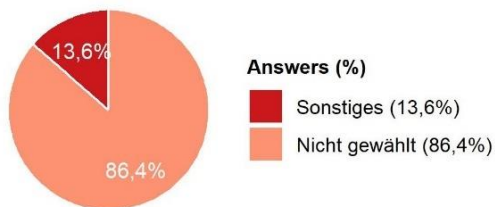
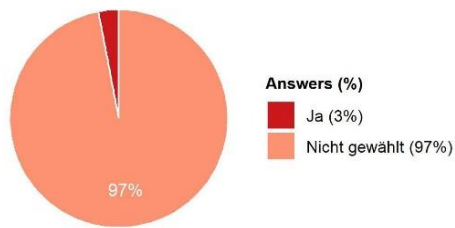


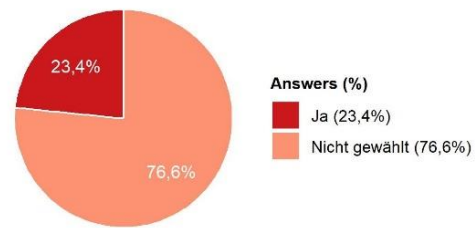
Abbildung A-80 Antworten auf Frage 17 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.



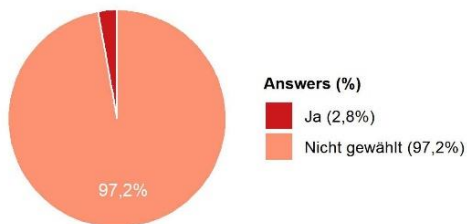
[Q18 - A] Der CO<sub>2</sub>-Sensor stört mich



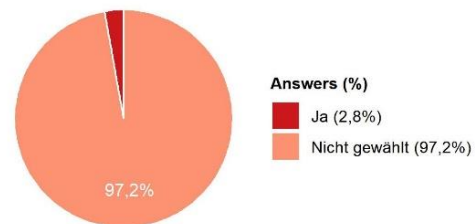
[Q18 - B] Ich ignoriere den CO<sub>2</sub>-Sensor meistens



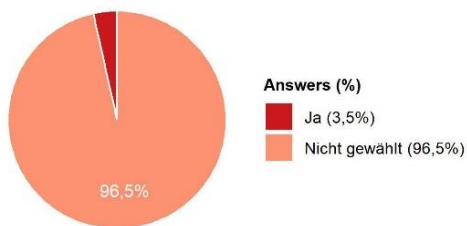
[Q18 - C] Ich bin oft verwirrt, wenn ich mir die Sensor-/Lüftungsanleitung ansehe



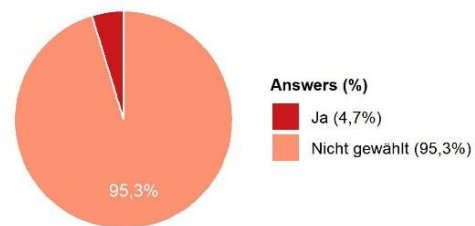
[Q18 - D] Die Umsetzung der Belüftungsanleitung ist frustrierend



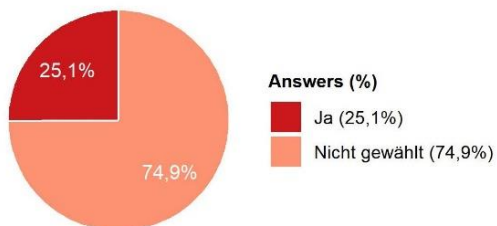
[Q18 - E] Ich muss mir immer die Anleitung ansehen, wenn ich den Sensor benutze



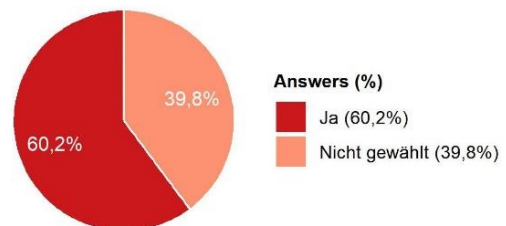
[Q18 - F] Ich bin immer noch dabei zu lernen, wie der CO<sub>2</sub>-Sensor funktioniert.



[Q18 - G] Mit der neuen Einrichtung (CO<sub>2</sub>-Sensor und Anleitung zur Belüftung) ist es einfacher, die CO<sub>2</sub>-Werte in einem guten Bereich zu halten



[Q18 - H] Ich habe kein Problem mit dem CO<sub>2</sub>-Sensor



[Q18 - I] Sonstiges

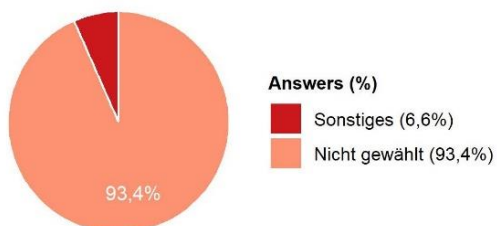
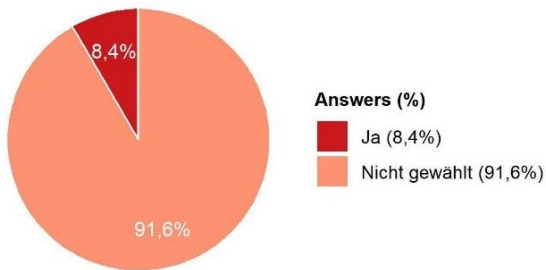
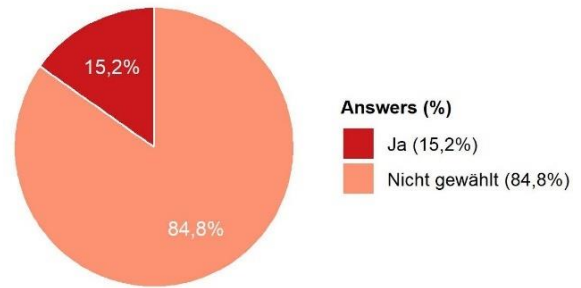


Abbildung A-81 Zusammenfassung der Antworten auf Frage 18 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

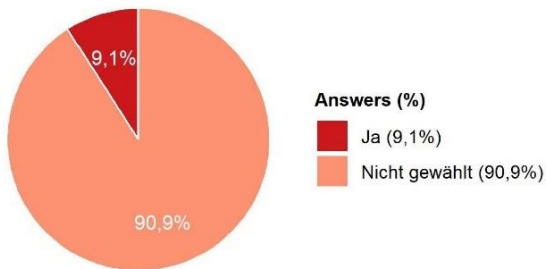
[Q19 - A] Ich übe noch den Sensor zu verstehen



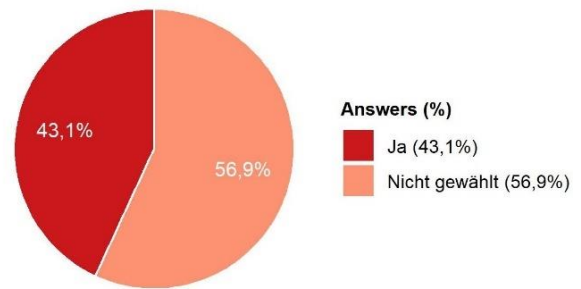
[Q19 - B] Ich übe noch richtig zu lüften



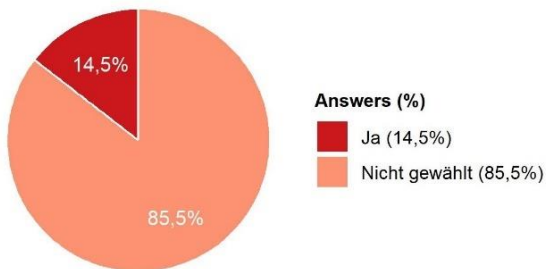
[Q19 - C] Ich muss mit dem Widerstand von Schüler:innen und Schulpersonal umgehen



[Q19 - D] Ich habe vor besser zu lüften



[Q19 - E] Ich bin mir nicht sicher, ob ich die Belüftung aufrechterhalten kann



[Q19 - F] Sonstiges

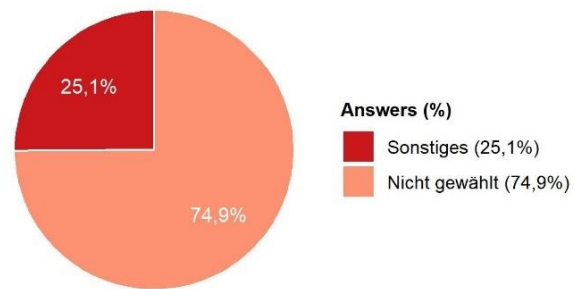
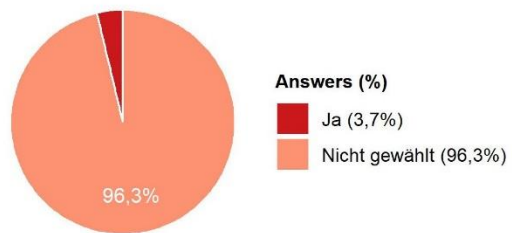


Abbildung A-82 Ergebnisse der Frage 19 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

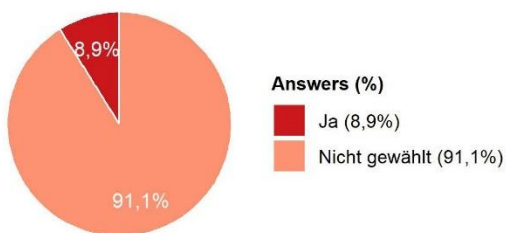
**[Q20 - A] Ich denke, dass der neue CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanleitung sinnlos sind**



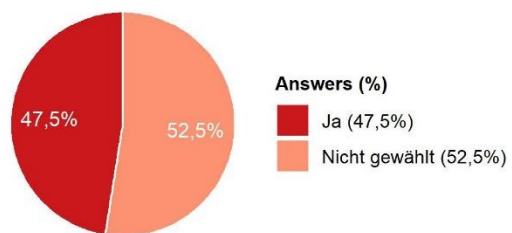
**[Q20 - B] Ich verstehe den Zweck der CO<sub>2</sub>-Messung und Belüftung nicht**



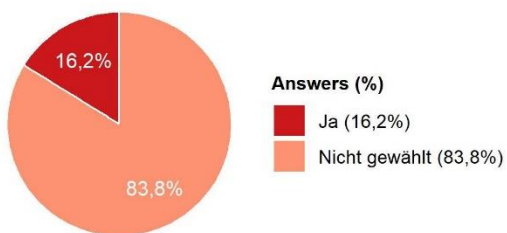
**[Q20 - C] Ich bin unschlüssig, ob die Messung von CO<sub>2</sub> und Belüftung eine gute Idee ist**



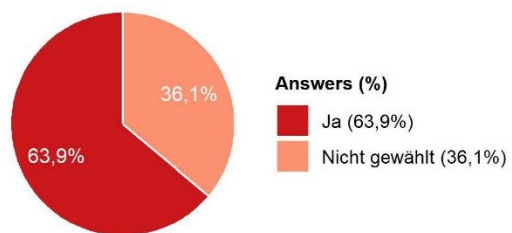
**[Q20 - D] Ich denke, dass der neue CO<sub>2</sub>-Sensor und die Lüftungsanleitung nützlich sind**



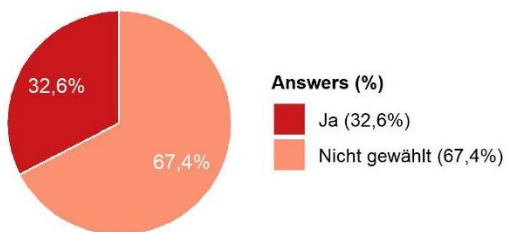
**[Q20 - E] Ich habe jetzt das Wissen und die Mittel, um richtig zu lüften**



**[Q20 - F] Ich denke, dass häufiges Lüften eine gute Idee ist**



**[Q20 - G] Ich bemühe mich jetzt, mit Hilfe des CO<sub>2</sub>-Sensors und der erlernten Lüftungstechniken eine gute Luftqualität in meinem Klassenzimmer aufrechtzuerhalten**



**[Q20 - H] Sonstiges**

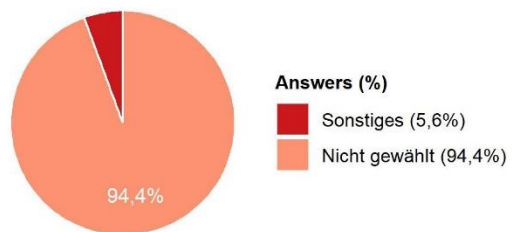
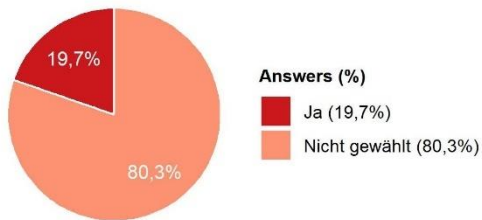
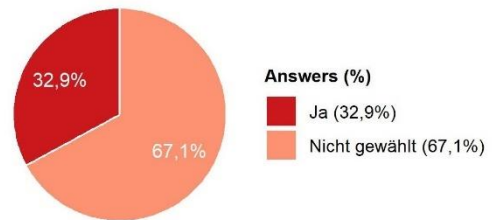


Abbildung A-83 Erkenntnisse aus Frage 20 der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

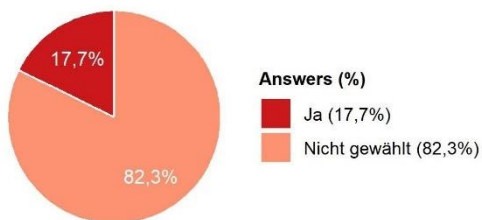
[Q21 - A] Ich schaue nie auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



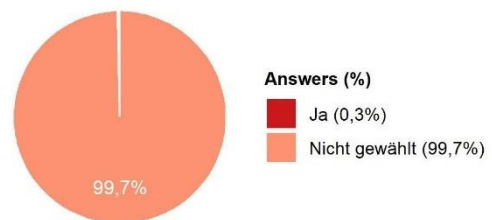
[Q21 - B] Ich schaue nur selten auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



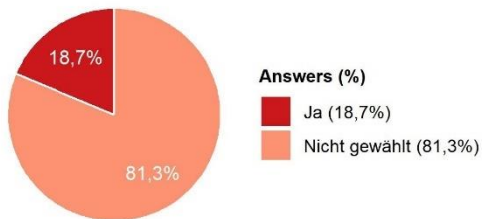
[Q21 - C] Ich schaue sehr häufig auf den CO<sub>2</sub>-Sensor (mehrmals am Tag)



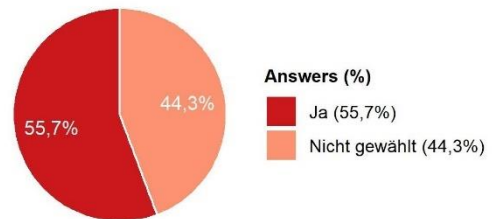
[Q21 - D] Ich schaue ständig auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



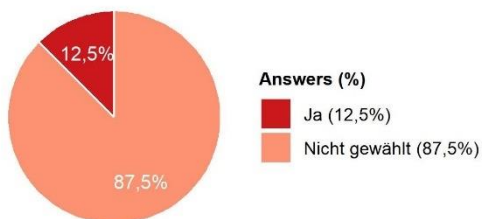
[Q21 - E] Ich tendiere dazu, den neuen CO<sub>2</sub>-Sensor als Richtwert für meine Lüftungsgewohnheiten zu verwenden, anstatt die Fenster immer geschlossen zu halten



[Q21 - F] Ich öffne die Fenster häufig (mehrmals am Tag)



[Q21 - G] Ich beobachte den Sensor aufmerksam und lüfte dann (mehrmals täglich), um die bestmögliche Luftqualität zu erreichen



[Q21 - H] Sonstiges

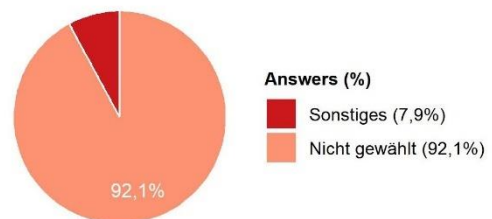
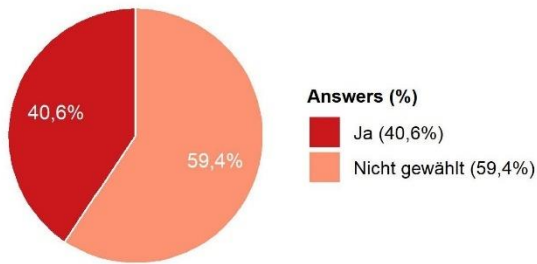
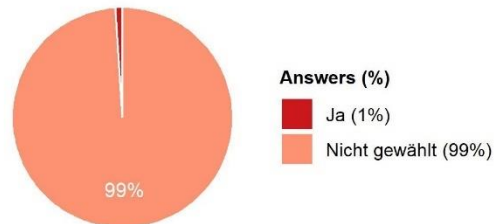


Abbildung A-84 Antworten auf Frage 21 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.

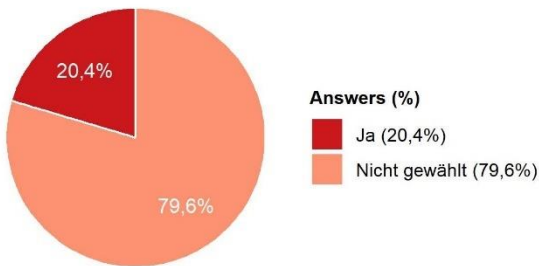
[Q22 - A] Ich schaue gerne auf den CO<sub>2</sub>-Sensor



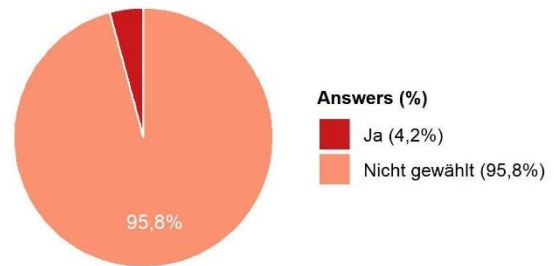
[Q22 - B] Meine Schule betreibt ein automatisches mechanisches Lüftungssystem, so dass ich mir darüber keine Gedanken machen muss



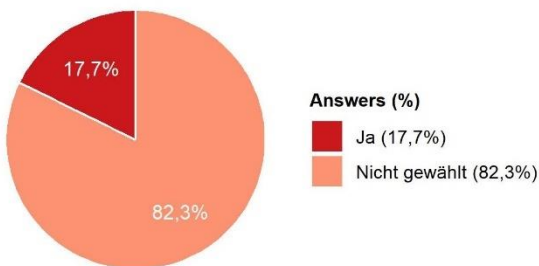
[Q22 - C] Der CO<sub>2</sub>-Sensor ist für mich nicht von Interesse



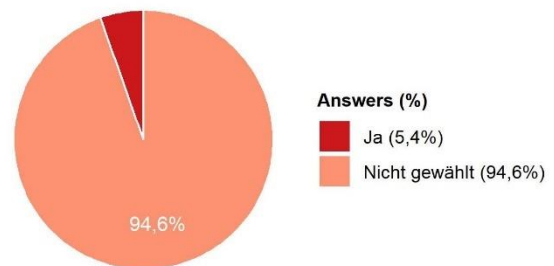
[Q22 - D] Der CO<sub>2</sub>-Sensor deprimiert/verunsichert mich



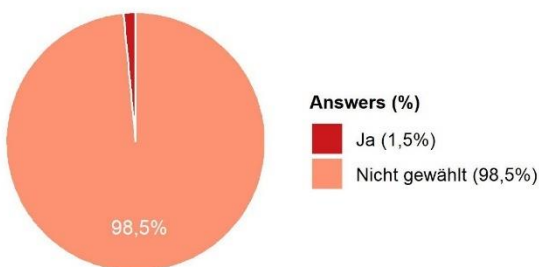
[Q22 - E] Ich habe keine Zeit, einen CO<sub>2</sub>-Sensor zu benutzen



[Q22 - F] Ich öffne und schließe die Fenster so oft, dass es mich ablenkt



[Q22 - G] Ich bin nicht an der Luftqualität interessiert



[Q22 - H] Sonstiges

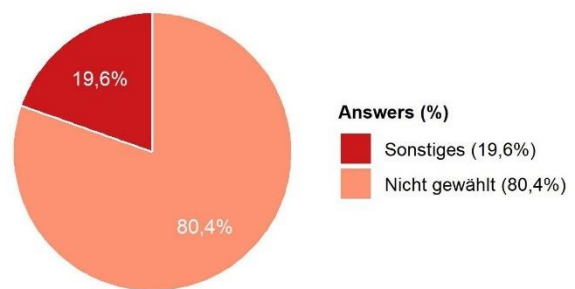


Abbildung A-85 Ergebnisse der Frage 22 aus der zweiten Umfrage unter Lehrer:innen, durchgeführt in der Sommerperiode.